

PROJETO PARAMÉTRICO ORIENTADO AO DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE FACHADA

PERFORMANCE-DRIVEN PARAMETRIC DESIGN OF FAÇADE ELEMENTS

 **Rodolfo Rodrigo do Nascimento Biller¹**

 **Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris²**

 **Daniel de Carvalho Moreira³**

¹ Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, r264172@dac.unicamp.br

² Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, damore@unicamp.br

Contribuição dos autores:

RRNB: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **ALNCH:** conceituação, análise formal, investigação, metodologia, administração de projetos, supervisão, escrita - rascunho original. **DCM:** investigação, metodologia, supervisão, escrita - revisão e edição.

Fomento: Não houve fomento.

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editor Responsável:

Vanessa Gomes da Silva 

Resumo

Entre as soluções para a proteção da envoltória de uma edificação, o uso de elementos de fachada é uma estratégia de projeto que pode contribuir para um melhor desempenho da construção, tanto em termos de eficiência energética, quanto de conforto ambiental. No projeto de elementos de fachada, tecnologias computacionais têm sido crescentemente exploradas com o desenvolvimento e aplicação de novos métodos para promover soluções com melhor desempenho. O uso integrado de aplicativos de modelagem paramétrica, simulação de desempenho e otimização computacional, possibilita o estudo de soluções de projeto alternativos e auxiliam o projetista na tomada de decisões. Neste trabalho, realizou-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para investigar como as tecnologias computacionais têm sido apropriadas no projeto de elementos de fachada otimizados. Foram levantados 37 elementos, categorizados em: elementos vazados, brises, fotovoltaicos, e outros elementos dinâmicos e estáticos. Também foram mapeados os aplicativos BPS (*Building Performance Simulation*), as simulações realizadas e os métodos de otimização. Os resultados indicaram que as simulações de desempenho e os métodos de otimização mais recorrentes são aqueles proporcionados por *plugins* que promovem a integração de dados entre os diferentes aplicativos computacionais.

Palavras-chave: fachada, modelagem paramétrica, otimização, simulação de desempenho, revisão sistemática da literatura.

Abstract

Among the solutions for protecting a building envelope, using facade elements is a design strategy that can contribute to better building performance in terms of energy efficiency and indoor comfort. In designing facade elements, computational technologies have been increasingly explored with the development and use of new methods based on performance-driven design. The combined use of parametric modeling application, performance simulation and computational optimization allows the study of alternative design solutions and assists the designer in decision-making. In this paper, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted to investigate how computational technologies have been used to design optimized facade elements. Thirty-seven elements were categorized into perforated, brises, photovoltaic, and other dynamic and static elements. BPS (Building Performance Simulation) applications, optimization methods, and simulations were also mapped. Results highlight that the prevailing performance simulations and optimization methods are those provided by plugins that enable data integration between different computer applications

Keywords: parametric modeling, optimization, performance simulation, systematic literature review.

How to cite this article:

BILLER, R. R. do N.; HARRIS, A. L. N. de C.; MOREIRA, D. de C. Projeto paramétrico orientado ao desempenho de elementos de fachada. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e02325, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8665828>

Introdução

No contexto da indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), promover a eficiência energética pressupõe reduzir o consumo energético de uma edificação, mantendo-se as mesmas funções e condições ambientais, sem redução de sua qualidade (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Para tanto, o projeto de edifícios eficientes tem sido incentivado por orientações de certificações de sustentabilidade e políticas

Submitted 30.05.2021 – Approved 09.10.2023 – Published 27.11.2023

e023025-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023025, 2023, ISSN 1980-6809



governamentais, bem como pela adoção de princípios projetivos, como o conceito NZEB (Nearly Zero Energy Building), no qual estratégias projetuais de eficiência energética são associadas ao aproveitamento de fontes renováveis de energia. Em essência, o conceito NZEB consiste na ideia de que uma edificação pode obter, a partir de recursos renováveis locais e de baixo custo, a energia necessária para atender toda, ou quase toda, a sua demanda energética (Hu e Qiu, 2019).

A contemplação de medidas de eficiência energética e dos critérios das certificações, durante o projeto, pode reduzir significativamente a demanda energética da construção. Segundo o Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO, 2021), a demanda energética das edificações no Brasil corresponde a cerca de 50% do consumo faturado nacional. Em contrapartida, estima-se uma redução de até 50% no consumo para novas edificações e de 30% para reformas que seguirem os padrões do Selo Procel Edifica.

Na missão de melhorar o desempenho das edificações, as envoltórias exercem um papel fundamental quando atuam no controle das transferências de calor entre os ambientes interno e externo, bem como no aproveitamento de luz e ventilação natural. Na concepção de envoltórias eficientes, o uso de elementos de fachada para fins de sombreamento é uma importante estratégia projetual. Estes dispositivos podem atuar tanto na proteção contra a incidência direta da radiação solar, quanto na distribuição de luz natural no ambiente interno. Deste modo, quando projetados adequadamente, os elementos de fachada podem contribuir para a redução da demanda energética por parte de equipamentos de climatização e iluminação.

Para auxiliar o desenvolvimento de projetos com características mais sustentáveis, aplicativos de modelagem e simulação de desempenho, técnicas de parametrização e métodos de otimização computacional têm sido utilizados em esquematizações de procedimentos inter-relacionados para orientar a tomada de decisões. No âmbito do projeto de elementos de fachadas, as informações que podem ser trabalhadas nestes aplicativos envolvem desde características físicas do dispositivo – como dimensionamento, materialidade, posicionamento e movimentação – até especificidades do local simulado, a partir da vinculação do modelo digital da construção a dados de arquivos climáticos.

Algumas revisões publicadas entre 2010 e 2020 abordaram temáticas que abrangeram tanto o projeto paramétrico orientado ao desempenho, com ênfase em suas diferentes etapas, quanto o desenvolvimento de elementos e sistemas de fachada. Eltaweel e Su (2017) elaboraram uma revisão sobre o uso da modelagem paramétrica para desenvolver soluções de tratamento de radiação solar e aproveitamento de luz natural em projetos arquitetônicos. Østergård, Jensen e Maagaard (2016) revisaram o uso de aplicativos BPS no suporte à tomada de decisões e reuniram, entre outros dados, informações sobre os aplicativos existentes, os profissionais que os utilizaram, as fases de projeto em que as análises foram realizadas, os objetivos, a interoperabilidade com outros aplicativos e a complexidade das simulações.

No âmbito da otimização computacional, Evins (2013) revisou métodos meta-heurísticos variados, utilizados no projeto de edifícios sustentáveis, incluindo envoltórias, sistemas controladores de instalações, sistemas de geração de energia e aplicações em projetos residenciais e *retrofits*. Kheiri (2018) revisou a aplicação de métodos computacionais para otimização da eficiência energética dos edifícios, a partir da manipulação de parâmetros de forma e materialidade das envoltórias. Embora as revisões de Kheiri (2018) e Evins (2013) tenham seções dedicadas à envoltória, as publicações reunidas por estes autores atêm-se a estudos de forma, tamanho de aberturas e materialidade da

fachada, não havendo atenção particular ou extensa revisão sobre o projeto de elementos de fachada especificamente. A revisão sistemática de Ekici, Cubukcuoglu, Turrin e Sariyildiz (2019), dedicou-se a pesquisar a esquematização do PCA, com interesse exclusivo na otimização meta-heurística de algoritmos evolutivos e *swarm intelligence* (SI). Touloupaki e Theodosiou (2017) revisaram trabalhos que combinaram o uso de modelagem paramétrica, simulação de desempenho e algoritmos de otimização em diversas finalidades da AEC. Embora não tenham detalhado os parâmetros controladores de projeto das publicações encontradas, Touloupaki e Theodosiou (2017) apresentaram como são estabelecidas as relações entre os diferentes procedimentos do CPDDO, bem como os requisitos tecnológicos e as habilidades profissionais necessárias à sua implementação.

Quanto às pesquisas sobre elementos e sistemas de fachada, Fiorito, Sauchelli, Aroyo, Pesenti *et al.* (2016) elaboraram uma revisão sobre dispositivos de sombreamento dinâmicos, com especial atenção à natureza de seus movimentos. Com base nos artigos selecionados, foram indicadas algumas considerações importantes que devem ser contempladas no projeto destes dispositivos, incluindo o comportamento do usuário, a possibilidade de integração com sistemas de energia renovável, a aplicação de conceitos de biomimética e o emprego de materiais responsivos. Kirimtat, Koyumbaba, Chatzikonstantinou, Sariyildiz (2016a) realizaram uma revisão sobre diferentes tipos de elementos de fachada, fixos e móveis, e os aplicativos de simulação de desempenho utilizados para avaliá-los. Al-Masrani, Al-Obaid, Zalin e Aida Isma (2018) apresentaram uma revisão sobre dispositivos de sombreamento de edifícios de escritório em clima tropical (Malásia e Singapura) e os categorizaram em sistemas passivos (sem uso de energia elétrica), ativos (com dispositivos mecânicos) e híbridos biomiméticos. Hosseini, Mohammadi, Rosemann e Schröder *et al.* (2019) revisaram estudos sobre fachadas cinéticas, orientando-se pelos objetivos de verificar as diferentes abordagens interdisciplinares envolvidas na concepção de elementos dinâmicos, e os fatores mais impactantes na melhoria das condições de conforto visual e térmico dos ocupantes. Os temas inter-relacionados incluíram biomimetismo, estudo da forma, eficiência energética, conforto ambiental e modelagem paramétrica. Por fim, Al-Masrani e Al-Obaidi (2019) também realizaram uma revisão sobre parâmetros de projeto, aplicativos de simulação e estratégias de avaliação utilizados no desenvolvimento de sistemas de sombreamento dinâmicos, sem abranger, todavia, a otimização algorítmica.

Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre elementos de fachada com suporte tecnológico computacional, em específico, os que foram desenvolvidos por meio dos procedimentos do projeto paramétrico orientado ao desempenho. A partir dos trabalhos selecionados, publicados entre 2010 e agosto de 2020, investigou-se como as tecnologias computacionais podem ser apropriadas pelo projetista, de modo a auxiliá-lo na elaboração de soluções de proteção de fachada mais eficientes em termos de desempenho energético e conforto ambiental. As informações foram coletadas, sistematicamente, avaliadas e integradas numa síntese de resultados. Deste modo, buscou-se configurar o estado da arte pautando-se nas evidências encontradas, com indicação de tendências, lacunas no conhecimento e possibilidades de pesquisa futura.

Fundamentação

Arquitetura performativa é toda aquela que tem por princípio condutor de projeto o desempenho do edifício. Sua produção consiste em explorar, a partir da determinação de critérios de desempenho, soluções otimizadas para algum aspecto da edificação. Neste processo, tecnologias computacionais são utilizadas para a obtenção de dados

quantitativos e qualitativos, gerados por simulações e análises de desempenho (Kolarevic; Malkawi, 2005).

Embora existam diversos aplicativos computacionais BPS (Building Performance Simulation), o potencial destas tecnologias é impactado pelo modo como são utilizadas. Quando empregados apenas de modo avaliativo – p. ex. avaliações comparativas de projetos em estágio avançado, validação de códigos, controle de qualidade – geralmente seus recursos ficam restritos ao fornecimento de informações em etapas nas quais alterações significativas são mais difíceis de realizar. Todavia, quando aproveitados proativamente, realizando simulações de desempenho ainda nas etapas iniciais de projeto, podem orientar os projetistas no processo de concepção e tomada de decisão (Østergård; Jensen; Maagaard, 2016).

Quando as informações dos aplicativos BPS são associadas às técnicas de parametrização, os modelos digitais podem ser alterados com monitoramento dos benefícios e prejuízos de cada solução gerada. À medida que se aumenta a quantidade de parâmetros e o conjunto de soluções possíveis, a avaliação das variáveis pelo projetista torna-se pouco viável. Além disso, o projeto arquitetônico envolve múltiplos critérios de desempenho, sendo alguns destes conflitantes entre si. (Touloupaki; Theodosiou, 2017). Diferentes métodos de otimização computacional têm sido explorados para lidar com múltiplas variáveis e objetivos. Entre estes, destaca-se a otimização estocástica, que abrange algoritmos e técnicas que envolvem um certo grau de aleatoriedade na busca por soluções ótimas (ou quase ótimas) para problemas complexos (Luke, 2016).

As meta-heurísticas correspondem aos principais métodos da otimização estocástica. E no contexto da AEC, os métodos meta-heurísticos mais usados têm sido os algoritmos evolutivos (Evins, 2013; Ekici; Cubukcuoglu; Turrin; Sariyildiz, 2019). Baseados na teoria da evolução de Darwin, estes algoritmos aplicam o princípio de sobrevivência do mais apto, através do qual são selecionados os indivíduos com a melhor adaptação ao seu ambiente (Eiben; Smith, 2015). Nos algoritmos evolutivos, os parâmetros de controle são codificados como cromossomos, responsáveis por gerar uma população inicial, correspondente a um primeiro conjunto de indivíduos (soluções). A cada nova geração, pares de indivíduos da população são escolhidos e seus “genes” – i.e. os valores dos seus parâmetros de controle – combinados. Para evitar o *local optimum*¹, mudanças aleatórias (mutação) e trocas de dados de diferentes indivíduos (*crossover*) são realizadas. Deste modo, os dados dos indivíduos são combinados repetitivamente, gerando populações de soluções com resultados otimizados para os critérios estabelecidos (Eiben; Smith, 2015; Ekici; Cubukcuoglu; Turrin; Sariyildiz, 2019; Evins, 2013).

Os algoritmos evolutivos mais comumente implementados são os algoritmos genéticos (GA), sendo o NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) o mais utilizado na resolução de problemas de otimização multiobjetiva (Evins, 2013; Ekici; Cubukcuoglu; Turrin; Sariyildiz, 2019). Tais algoritmos baseiam-se em estruturas fixas e lineares de dados. Por este motivo, um bom desempenho dos algoritmos genéticos está atrelado a uma adequada definição dos parâmetros de controle de um problema específico, uma vez que os valores destas variáveis são determinantes na geração das soluções (Vargas, 2018).

(1) *Local optimum* são soluções ótimas, máxima ou mínima, dentro de um conjunto de soluções possíveis. Entretanto, estas soluções podem não representar os ótimos da função. *Global optimum* são as soluções otimizadas de toda a função, em relação a todos os conjuntos de soluções possíveis. Luke (2016, p. 14).

Diferentes abordagens de projeto paramétrico orientado ao desempenho, tais como a “Performative computational architecture” (PCA) (Sariyildiz apud Ekici; Cubukcuoglu; Turrin; Sariyildiz, 2019), e a “Computational performance-driven design optimization” (CPDDO) (Touloupaki; Theodosiou, 2017), baseiam-se em esquematizações de procedimentos computacionais combinados em três etapas. A primeira se refere à modelagem paramétrica do objeto, com definição dos seus parâmetros de controle. A segunda é relativa à análise de desempenho, na qual são definidas as simulações e as métricas de avaliação. A terceira etapa é a de otimização, em que são determinados os métodos e os objetivos de maximização e minimização. O intuito destas abordagens é prover ao projetista, durante as etapas conceptivas, informações acerca das soluções com melhor atendimento aos critérios de desempenho desejados.

Nesta RSL, propôs-se verificar, para cada publicação selecionada, os tipos de elementos de fachada desenvolvidos, os parâmetros de controle utilizados em sua modelagem, as simulações de desempenho realizadas e os métodos de otimização implementados. Note-se que o objetivo desta revisão é identificar as situações em que foram utilizados os procedimentos do projeto paramétrico orientado ao desempenho no desenvolvimento dos elementos de fachada, ou seja, somente foram selecionados aqueles que empregaram de forma associada às três etapas de modelagem, simulação e otimização. Desta forma, foram excluídas as pesquisas que não empregaram algoritmos de otimização computacional, mesmo que tenham envolvido tecnologias de modelagem paramétrica e simulações de desempenho; assim como os trabalhos de otimização de fachada sem proposição de elementos de proteção.

Método

O método de revisão sistemática utilizado neste trabalho estrutura-se em três etapas: planejamento, condução e documentação (Brereton; Kitchenham; Budgen; Turner et al., 2007; Tranfield; Denyer; Smart, 2003). As subseções seguintes registram informações referentes às etapas “Planejamento” e “Condução”. A síntese de dados e a etapa “Documentação” são abordadas na seção “Resultados e Discussão”.

Planejamento da revisão

Na primeira fase, definiu-se o escopo da pesquisa a partir da seguinte questão: “*Como a modelagem paramétrica e os métodos evolutivos de otimização computacional podem ser utilizados no projeto de elementos de fachada, para contemplar múltiplos objetivos de conforto ambiental e desempenho energético?*”? Deste modo, almejou-se abranger as três etapas do projeto computacional orientado ao desempenho, identificando-se:

- Os tipos de elementos de fachada e os seus parâmetros de controle;
- Os aplicativos de modelagem e simulação;
- As simulações de desempenho e os objetivos de otimização;
- Os métodos de otimização.

Em seguida foi elaborado um protocolo de revisão, estabelecendo-se as bases de dados e os critérios para coleta e inclusão dos estudos. Para tanto, inicialmente foram realizadas buscas não sistematizadas, para mapeamento de palavras-chave, identificação de potenciais bases de dados de interesse, e familiarização com o comportamento das ferramentas de busca. As buscas iniciais foram feitas nos sites *Google Scholar*, *ScienceDirect* e *CumInCAD*. As principais palavras-chave utilizadas neste momento foram “*genetic algorithm*”, “*evolutionary algorithm*”, “*optimization*”, “*parametric design*”, “*parametric modeling*”. Somaram-se a estas, alternadamente, as

palavras “building”, “building envelope” e “facade”. Por fim, diferentes combinações foram testadas com termos relacionados a conforto ambiental e desempenho energético, tais como “energy”, “energy efficiency”, “performance”, “indoor comfort”, “thermal comfort”, “illumination”, “daylighting”, “ventilation” e “acoustics”.

Para cada combinação foram observados: a quantidade dos resultados, a coerência entre os títulos dos artigos e os objetivos desta revisão, os congressos e periódicos em que foram publicados, e as palavras-chave utilizadas pelos autores para categorizar seus trabalhos. Após estas primeiras verificações, estruturou-se sistematicamente os termos em quatro grupos, apresentados nos Quadros 1 a 3, de modo que as combinações pudessem ser replicadas nas diferentes bases de dados.

O Quadro 1 apresenta as palavras-chave agrupadas e os operadores lógicos que as relacionam para compor a expressão de busca.

Quadro 1 – Estrutura de combinação entre os quatro grupos de palavras-chave

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4
Acoustic OR	AND	Facade OR	AND	Parametric Design	AND	Genetic Algorithm
Ventilation OR						
Daylight OR						
Thermal OR						
Energy		Building Envelope				

Fonte: os autores.

A partir desta estrutura, definiu-se a seguinte expressão de busca:

“acoustic” OR “ventilation” OR “daylight” OR “thermal” OR “energy”) AND (“facade” OR “building envelope”) AND (“parametric design”) AND (“genetic algorithm”).

Estabeleceu-se como critério de inclusão adicionar apenas publicações em inglês², em periódicos e conferências da área. As pesquisas deveriam estar relacionadas à modelagem paramétrica performativa de elementos de fachada, desconsiderando-se estudos focados na implantação, forma do edifício ou fachada, e porcentagem de abertura na fachada, assim como quaisquer outros trabalhos não referentes à AEC. O recorte temporal delimitado compreende publicações de 2010 a agosto de 2020. O Quadro 2 apresenta os critérios de inclusão e exclusão aplicados.

Quadro 2 – Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
(i1) Pesquisas e revisões sobre modelagem paramétrica performativa de elementos de fachada	(e1) Artigos duplicados que foram encontrados em mais de uma base de dados
(i2) Artigos publicados entre 2010 e 2020	(e2) Pesquisas não relacionadas ao escopo da revisão
(i3) Artigos de periódicos ou conferências	(e3) Artigos publicados fora do recorte temporal
-	(e4) Artigos não publicados em inglês

Fonte: os autores.

Condução

As buscas sistemáticas foram nas seguintes bases de dados: *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *IEEE Xplore*, *CAPES Periódicos*, *ACM Digital Library*, *Taylor & Francis Online*, *SAGE Journals*, *Emerald Insight*, *CumInCAD*, *MDPI* e *SciELO*.

(2) As buscas preliminares com os termos em português, nas bases *Google Scholar*, *CumInCAD* e *ScienceDirect*, entre julho e agosto de 2020, retornaram apenas uma pesquisa compreendida no escopo desta RSL, que foi publicada em congresso (Mairink; Vilela; Garcia; Veloso et al., 2019) e periódico (Garcia; Vilela; Mairink; Veloso et al., 2020). Fora das bases de dados indexadas, foi encontrado somente um trabalho de interesse desta revisão publicado em português (Cartana; Pereira, 2016). As buscas com os termos em inglês, por outro lado, retornaram uma maior quantidade de resultados, dentre os quais, pesquisas nacionais de autores brasileiros. Por esses motivos, optou-se pelo idioma inglês, a fim de se estabelecer um protocolo sistematizado único e replicável em diferentes bases de dados indexadas.

Entretanto, a base *CumInCAD* não apresentou o comportamento esperado para os operadores lógicos. Neste caso, decidiu-se realizar duas buscas com filtros distintos – um para os títulos dos artigos, e outro para as palavras-chave dos autores. Além disso, filtros adicionais disponíveis em algumas bases foram utilizados para remover documentos que não correspondiam a artigos de periódicos ou conferências. Na base *SpringerLink* também foram inseridos filtros de disciplina. O Quadro 3 reúne as expressões de busca, os filtros aplicados e os resultados de cada base.

Para gerenciar as publicações encontradas, utilizou-se o aplicativo *Zotero*. Uma vez importados na biblioteca virtual do programa, os resultados foram separados em pastas de acordo com as bases em que foram encontrados e filtrados com auxílio dos recursos de tratamento de dados do programa.

Quadro 3 – Expressões de busca, filtros adicionais e resultado bruto das bases de dados

Base	Expressão de Busca	Filtros	Resultados
ScienceDirect	("acoustic" OR "ventilation" OR "daylight" OR "thermal" OR "energy") AND ("facade" OR "building envelope") AND ("parametric design") AND ("genetic algorithm")	"Review Articles"; "Research Articles"	70
SpringerLink	Idem	"Article"; "Discipline: Engineering"; "Subdiscipline: Building Construction and Design"	25
IEEE Xplore	Idem		1
CAPES Periódicos	Idem		28
ACM Digital Library	Idem	-	3
Taylor & Francis Online	Idem	-	10
SAGE Journals	Idem	-	3
Emerald Insight	Idem	-	24
SciELO	Idem	-	0
MDPI	Idem	-	0
CumInCAD	genetic algorithm {keywords} =~ m/parametric design/i or {keywords} =~ m/facade/i or {keywords} =~ m/building envelope/i or {keywords} =~ m/ventilation/i or {keywords} =~ m/acoustic/i or {keywords} =~ m/energy/i or {keywords} =~ m/thermal/i or {keywords} =~ m/daylight/i	"keywords"	67
	genetic algorithm {title} =~ m/parametric design/i or {title} =~ m/facade/i or {title} =~ m/building envelope/i or {title} =~ m/ventilation/i or {title} =~ m/acoustic/i or {title} =~ m/energy/i or {title} =~ m/thermal/i or {title} =~ m/daylight/i	"title"	

Fonte: os autores.

A seleção ocorreu em duas etapas. A primeira consistiu numa pré-triagem a partir da leitura dos títulos, resumos e palavras-chave. Neste momento foram aplicados os critérios de exclusão definidos no planejamento. A segunda etapa baseou-se na leitura dos artigos remanescentes, verificando-se a pertinência de seus conteúdos aos interesses desta revisão. Ao todo, 35 publicações foram selecionadas e as respectivas referências foram examinadas a fim de identificar outros artigos relevantes. Após esta verificação, adicionaram-se 11 artigos, finalizando uma amostra de 46 trabalhos. Destes, 10 artigos são de revisão e já foram mencionados na Introdução. Artigos de congresso foram removidos quando se constatou publicações referentes à mesma pesquisa em periódicos.

Resultados e discussão

No Quadro 4 estão reunidos os dados extraídos dos artigos selecionados, por ordem cronológica de publicação.

A análise das publicações foi estruturada de acordo com o tipo de elemento de fachada desenvolvido nas subseções "Elementos vazados", "Brises", "Elementos Fotovoltaicos", "Outros elementos dinâmicos" e "Outros elementos estáticos". Em

“Síntese dos resultados” é apresentada uma síntese dos periódicos e congressos das publicações encontradas nas bases dados, a localização adotada no desenvolvimento de cada trabalho, as características dos elementos de fachada, as simulações de desempenho e os aplicativos BPS utilizados, e os métodos de otimização empregados.

Quadro 4 – Extração de dados dos artigos selecionados

Autor	Tipo de elemento	Simulação de desempenho	Otimização
El-Sheikh e Gerber (2011)	Brises aletados	Iluminação	GA (Galapagos)
Castorina (2012)	Outros estáticos	Termoenergética	GA (Outros)
Etman, Tolba e Ezzeldin (2013)	Elementos vazados	Iluminação	GA (Galapagos)
Gadelhak (2013)	Brises aletados	Iluminação	GA (Galapagos)
Karamata, Giovannini, Verso e Andersen (2014)	Elementos vazados	Iluminação	Outros
Sawyer, Torghabehi e Buelow (2014)	Elementos vazados	Iluminação	GA (Outros)
Choi, Lee, Ahn e Piao (2014)	Brises aletados	Termoenergética	GA (Galapagos)
Elghazi, Wagdy, Mohamed e Hassan (2014)	Outros dinâmicos	Iluminação	GA (Outros)
Karagkouni, Fatah Gen Schieck, Tsigkari e Chronis (2014)	Outros estáticos	Fluidodinâmica	GA (Outros)
Wortmann; Costa; Nannicini; Schroepfer (2015)	Elementos vazados	Iluminação	SMO e RBF (Opossum)
Wagdy e Fathy (2015)	Brises aletados	Iluminação	PA, Exhaustive Search
Ercan e Elias-Orkan (2015)	Brises aletados	Iluminação	GA (Galapagos)
González e Fiorito (2015)	Brises aletados	Iluminação; Termoenergética	GA (Galapagos)
Kirimtat, Koyumbaba, Chatzikonstantinou, Saryildiz (2016a)	Brises aletados	Iluminação; Termoenergética	NSGA-II, jDEMO
Narangerel, Lee e Stouffs (2016)	Fotovoltaico	Iluminação; Radiação solar	SPEA-2/HypE (Octopus)
Lavin e Fiorito (2017)	Elementos vazados	Iluminação; Termoenergética	GA (Galapagos)
Chi; Moreno; Navarro (2017)	Elementos vazados	Iluminação; Termoenergética	Orthogonal Array
Wortmann (2017)	Elementos vazados e Brises	Iluminação	SMO e RBF (Opossum); HypE (Octopus); PSO (Silvereye); Gradient-free Optimization (Goat)
Jayathissa, Luzzatto, Schimidli, Hofer <i>et al.</i> (2017)	Fotovoltaico	Radiação solar	Exhaustive Search
Zani, Andaloro, Deblasio, Ruttico <i>et al.</i> (2017)	Outros estáticos	Iluminação; Termoenergética	SPEA-2/HypE (Octopus)
Shan e Junghans (2018)	Brises aletados	Iluminação; Termoenergética	GA (Outros)
Tablada, Kosorić, Huang e Chaplin <i>et al.</i> (2018)	Fotovoltaico	Iluminação; Radiação solar	GA (Outros)
Tabadkani; Banihashemi; Hosseini (2018)	Outros dinâmicos	Iluminação	GA (Galapagos)
Newton (2018)	Outros estáticos	Iluminação; Fluidodinâmica	NSGA-II
Giantini, Souza, Turczyn e Celani (2019)	Elementos vazados	Iluminação	SPEA-2/HypE (Octopus)
Kirimtat, Krejcar, Ekici e Tasgetiren (2019)	Brises aletados	Iluminação; Termoenergética	NSGA-II, JcGA-DE
Bomfim e Tavares (2019)	Fotovoltaico	Radiação solar	GA (Galapagos)
Taveres-Cachat, Lobaccaro; GOIA, Chaudhary, (2019)	Fotovoltaico	Iluminação; Termoenergética; Radiação solar	SPEA-2/HypE (Octopus)
Hosseini, Mohammadi e Guerra-Santin (2019)	Outros dinâmicos	Iluminação	Outros
Yi, Kim, Kim, Kim <i>et al.</i> (2019)	Outros dinâmicos	Iluminação	T-APSSA
Tabadkani, Valinejad Shoubi, Soflaei, Banihashemi (2019)	Outros dinâmicos	Iluminação	GA (Galapagos)
Yi (2019)	Outros estáticos	Iluminação	NSGA-II
Vazquez, Duarte, Poerschke (2020)	Elementos vazados	Iluminação; Termoenergética	SPEA-2 (Octopus)
Samadi, Noorzai, Beltrán, Abbasi (2020)	Brises aletados	Iluminação	GA (Galapagos)
Taveres-Cachat e Goia (2020)	Brises aletados	Iluminação; Termoenergética; Radiação solar	SPEA-2/HypE (Octopus)
Abdel-Rahman (2021)	Outros estáticos	Termoenergética	GA (Galapagos)

Fonte: os autores.

Elementos vazados

Etman, Tolba e Ezzeldin (2013) modelaram no *Rhinoceros/Grasshopper* telas perfuradas, baseadas em muxarabis egípcios. O modelo é composto por retângulos com largura, altura e inclinação variáveis. O software *Radiance*, através do *plugin Diva*, foi utilizado

para simular a iluminação, e o algoritmo genético do *Galapagos*, resolvidor evolutivo nativo do *Grasshopper*, foi aplicado para maximizar o aproveitamento de iluminação natural no interior de um escritório hipotético situado em Cairo, no Egito (Latitude 30° 2' N, longitude 31° 14' L). Karamata, Giovannini, Verso e Andersen (2014) também modelaram um muxarabi de forma variável para a fachada de edifícios em clima árido, adotando-se como localização a cidade de Abu-Dhabi, nos Emirados Árabes Unidos (24° 28' N, 54° 22' L). Com os objetivos de bloquear a radiação solar direta e maximizar a iluminação natural e a vista para o exterior, os autores desenvolveram um sistema com três camadas de superfícies perfuradas, sendo duas móveis e uma fixa. O muxarabi foi modelado no *Rhinoceros/Grasshopper*, com variáveis de distanciamento entre as camadas e refletância das superfícies, e submetido a simulações com o *Diva (Daysim/Radiance)*.

Sawyer, Torghabehi e Buelow (2014) propuseram um sistema de proteção de fachada autoportante e aplicável a edifícios preexistentes. Modelado no *Rhinoceros/Grasshopper*, o sistema é composto por unidades retangulares com aberturas elípticas, com variáveis de tamanho e profundidade dos módulos. As simulações foram realizadas com o *Diva (Daysim/Radiance)*, e a estrutura foi dimensionada com o *Bentley STAAD.Pro*. O *ParaGen* foi utilizado para minimizar a radiação solar direta e maximizar a autonomia de luz natural. A localização simulada foi Nova Iorque, nos EUA (40° 43' N, 73° 56' O).

Wortmann, Costa, Nannicini e Schroepfer (2015) desenvolveram um método de otimização baseado na biblioteca *Python RBFOpt* e compararam o seu desempenho com os algoritmos do *Galapagos*. As comparações basearam-se na otimização de placas perfuradas, com variação no tamanho das perfurações. Os objetivos foram maximizar a iluminância por luz natural e reduzir o risco de ofuscamento. O *Diva (Radiance)* foi utilizado na simulação de iluminação, e a localização simulada foi em Jurong, em Singapura (1° 18' N, 103° 43' L). Este método resultou na criação de um componente de otimização para o *Grasshopper*, denominado *Opossum*. Wortmann (2017) reproduziu o estudo anterior, adotando como local simulado a cidade de Singapura, em Singapura (1° 17' N, 103° 51' L), e incluiu em seu estudo comparativo outros métodos de otimização de *plugins* disponíveis para o *Grasshopper*, como o *Silvereye*, o *Goat* e o *Octopus*.

Lavin e Fiorito (2017) modelaram com *Rhinoceros/Grasshopper* painéis perfurados com variáveis de disposição e tamanho de perfurações. A localização adotada nas simulações foi Sydney, na Austrália (33° 51' S, 151° 12' L). Os aplicativos *Radiance*, *Daysim* e *Energyplus* foram integrados ao modelo paramétrico – através dos *plugins Ladybug* e *Honeybee* para o *Grasshopper* – para realizar as simulações de iluminação e desempenho termoenergético. O *Galapagos* foi utilizado para otimizar as perfurações de modo a maximizar a iluminância por luz natural e reduzir o consumo energético dos sistemas de iluminação e climatização. Semelhantemente, Chi; Moreno; Navarro (2017) modelaram painéis perfurados otimizados em termos de aproveitamento de luz natural e redução de consumo energético. As variáveis foram o tamanho, a geometria e a quantidade de perfurações. As simulações de iluminação foram feitas com o *Daysim/Radiance*, e as termoenergéticas com *EnergyPlus*. O local simulado foi em Sevilha, na Espanha (37° 23' N, 5° 59' L). A otimização foi realizada a partir da seleção de uma fração representativa das combinações possíveis entre as variáveis, com uso do método estatístico de arranjo ortogonal (*orthogonal arrays*).

Giantini, Souza, Turczyn e Celani (2019) modelaram elementos de fachada cerâmicos no *Rhinoceros/Grasshopper*. Os módulos possuem profundidade afunilada e aberturas com tamanhos variáveis. *Ladybug* e *Honeybee* foram utilizados para simular o desempenho termoenergético e luminoso. A cidade de Campinas (Brasil, 23° 0' S, 47° 7' O), no Brasil,

foi adotada como local simulado. O *Octopus*, resolvedor evolutivo multiobjetivo para *Grasshopper*, foi empregado para maximizar a iluminância por luz natural e minimizar a radiação solar direta.

Vazquez, Duarte e Poerschke (2020) desenvolveram um sistema generativo de paredes perfuradas de tijolos cerâmicos. Os autores analisaram a gramática da forma de paredes de tijolos cerâmicos no Paraguai e identificaram 18 regras de composição. Estas regras definiram o sistema generativo, baseado em variáveis topológicas de angulação e dimensão dos tijolos. O *Octopus* foi utilizado para maximizar a autonomia de luz natural, considerando os critérios do *Leed v4*, e reduzir o consumo energético de climatização. As simulações foram realizadas com o *Diva (Radiance)* e o *Ladybug (EnergyPlus)*, adotando-se a localização da cidade de Assunção, no Paraguai (25° 16' S, 57° 38" O).

Brises

El-Sheikh e Gerber (2011) modelaram no *Rhinoceros/Grasshopper* um conjunto de brises horizontais móveis, otimizados em termos de aproveitamento de luz natural. Com variação individual na inclinação das aletas, diferentes configurações foram simuladas. A cidade de Los Angeles, nos EUA (34° 3' N, 118° 14' O), foi escolhida como local para a simulação de iluminação, realizada com o *Diva (Radiance)*. O *Galapagos* foi empregado para otimizar a distribuição da luz no interior do ambiente e maximizar a iluminância.

Gadelhak (2013) modelou dois dispositivos de sombreamento no *Rhinoceros/Grasshopper*. O primeiro é uma combinação de uma prateleira solar com uma trama de quebra-sóis verticais e horizontais. Foram variadas a curvatura e a inclinação da prateleira solar, e a quantidade de quebra-sóis que compõem o tramado. O segundo dispositivo é composto por superfícies escamadas bioinspiradas, com formas irregulares variáveis. As simulações foram feitas com o *Diva (Radiance)*, e a localização simulada foi Cairo, no Egito (30° 2' N, 31° 14' L). O *Galapagos* foi utilizado para maximizar o aproveitamento de luz natural.

Choi, Lee, Ahn e Piao (2014) dedicaram-se a otimizar e analisar o desempenho de brises com diferentes inclinações no controle da radiação solar direta. As variáveis foram: o ângulo de rotação, o percentual de sombreamento, o espaçamento entre aletas e a distância em relação à fachada. As simulações foram realizadas com o *Autodesk Ecotect Analysis*, adotando-se como localização a cidade de Seul, na Coreia do Sul (37° 31' N, 127° 1' L). O *Galapagos* foi utilizado para maximizar a entrada de radiação solar durante o inverno e minimizá-la durante o verão.

Wagdy e Fathy (2015) modelaram no *Rhinoceros/Grasshopper* brises aletados horizontais, com variáveis de quantidade, inclinação, profundidade e refletância das aletas. A simulação de iluminação foi realizada com o *Diva (Radiance/Daysim)*, e a localização adotada foi Cairo, no Egito (30° 2' N, 31° 14' L). Algoritmos paralelos (PA) foram utilizados num método de busca exaustiva, com intuito de simular todas as configurações possíveis e avaliar a influência de cada parâmetro no desempenho luminoso. Os objetivos foram maximizar a área iluminada por luz natural e reduzir o risco de ofuscamento.

Ercan e Elias-Orkan (2015) modelaram um conjunto de brises verticais, com ângulo, profundidade, quantidade e distância entre aletas variáveis. Os objetivos da otimização, realizada com o *Galapagos*, foram minimizar a incidência de radiação solar direta e maximizar o aproveitamento de luz natural. As simulações foram realizadas com o *Diva (Radiance)*, com localização em Lánarca, no Chipre (34° 55' N, 33° 38' L).

González e Fiorito (2015) modelaram brises horizontais fixos, com parâmetros variáveis de profundidade, inclinação e quantidade de unidades. O *Diva (Radiance/Daysim)* foi

utilizado na simulação de iluminação e o *EnergyPlus* na termoenergética. A localização adotada foi Sydney, na Austrália (33° 51' S, 151° 12' L). O *Galapagos* foi utilizado para maximizar o aproveitamento da luz natural e reduzir o consumo energético dos sistemas de iluminação e climatização.

Kirimtat, Koyunbaba, Chatzikonstantinou, Sariyildiz *et al.* (2016b) também modelaram no *Rhinoceros/Grasshopper* brises horizontais fixos, otimizados em termos de consumo energético. As variáveis do sistema foram inclinação, largura e quantidade de aletas. O *Diva (Radiance)* foi utilizado para simular a iluminação, enquanto o consumo energético foi simulado com o *Ladybug* e o *Honeybee (EnergyPlus)*. O local de simulação foi Esmirna, na Turquia (38° 25' N, 27° 8' L). Para maximizar o aproveitamento de luz natural e reduzir o consumo energético, dois métodos evolutivos foram aplicados e comparados: o NSGA-II e um algoritmo de evolução diferencial (jDEMO – *multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm*).

Shan e Junghans (2018) desenvolveram um algoritmo genético e o aplicaram na otimização de uma proteção de fachada para validação de sua eficiência. O modelo consistiu em um quebra-sol fixo horizontal superior, combinado com uma série de aletas verticais inferiores, com rotação variável. A modelagem foi realizada no *Rhinoceros/Grasshopper* e as simulações com o *Radiance* e o *EnergyPlus*. Três localizações nos EUA foram simuladas: São Francisco (37° 46' N, 122° 25' O), Miami (25° 46' N, 80° 12' O) e Chicago (41° 52' N, 87° 37' O). O objetivo foi reduzir o consumo energético dos sistemas de iluminação e climatização.

Kirimtat, Krejcar, Ekici e Tasgetiren (2019) modelaram brises horizontais fixos com forma variada. O conjunto é composto por seis superfícies geradas individualmente, com distância variável de suas extremidades em relação à fachada, o que determina a largura e a inclinação do elemento e configura a geometria irregular das unidades. O *EnergyPlus* e o *Radiance* foram utilizados nas simulações termoenergética e de iluminação. A localização adotada foi Esmirna, na Turquia (38° 25' N, 27° 8' L). Com objetivos de maximizar o aproveitamento da luz natural e reduzir o consumo energético, dois métodos evolutivos foram utilizados e comparados: NSGA-II e evolução diferencial (JcGA-DE – “*self-adaptive continuous genetic algorithm with differential evolution*”).

Samadi, Noorzai, Beltrán e Abbasi (2020) modelaram com o *Grasshopper* brises horizontais móveis, com parâmetros variáveis de rotação, quantidade e distância entre aletas. O *Ladybug* e o *Honeybee* foram utilizados na simulação de iluminação. A cidade de Teerã, no Irã (35° 42' N, 51° 24' L), foi escolhida como local de simulação. O *Galapagos* foi utilizado na busca por configurações formais otimizadas em termos de distribuição de luz natural.

Taveres-Cachat e Goia (2020) elaboraram brises fixos, com variáveis de quantidade, inclinação, posicionamento, materialidade e dimensionamento de aletas. Foi estabelecido um ambiente de teste, com modelo real e digital para comparação de resultados locais e simulados. A cidade de Trondheim (63° 26' N, 10° 25' L), na Noruega foi adotada para as simulações termoenergéticas, realizadas com *Ladybug (EnergyPlus)*, e de iluminação, com o *Honeybee (Radiance)*. Os multiobjetivos envolveram a redução do consumo energético e a maximização da autonomia de luz natural. A otimização foi realizada com o *Octopus*.

Elementos fotovoltaicos

Narangerel, Lee e Stouffs (2016) modelaram no *Rhinoceros/Grasshopper* proteções compostas por módulos tridimensionais, gerados por triangulação de Delaunay. A

unidade modular contém dez superfícies triangulares de materiais variados, incluindo painéis fotovoltaicos. Além da materialidade, também se variou a extrusão volumétrica, responsável por criar projeções e profundidades na fachada. O *Radiance* (*Ladybug* e *Honeybee*) foi utilizado para simular a iluminação, e a localização adotada foi Incheon, na Coreia do Sul (37° 27' N, 126° 42' L). O *Octopus* foi empregado para otimizar o potencial de geração de energia e a distribuição interna de luz natural.

Jayathissa, Luzzatto, Schimidli, Hofer *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de sombreamento de fachada dinâmico composto por painéis fotovoltaicos. O sistema foi modelado com *Rhinoceros/Grasshopper* e submetido à simulação de incidência solar com o *Ladybug* (*Radiance*). A localização adotada foi Zurique, na Suíça (47° 22' N, 8° 31' L). Os resultados foram utilizados para estimar a geração de energia dos painéis e o consumo energético dos sistemas de climatização e iluminação. Um algoritmo de busca exaustiva foi empregado na busca por soluções com melhor balanço energético.

Tablada, Kosorić, Huang e Chaplin *et al.* (2018) desenvolveram um protótipo de fachada produtiva, integrando quebra-sóis fotovoltaicos fixos e plantadoras agrícolas. Dois tipos de fachada, com e sem sacada, foram modelados no *Rhinoceros/Grasshopper*. O *Ladybug* e o *Honeybee* foram utilizados para simular a radiação solar e a iluminação. A localização adotada foi a cidade de Singapura, em Singapura (1° 17' N, 103° 51' L). As variáveis foram o tamanho, a inclinação dos quebra-sóis e o posicionamento das plantadoras. Os objetivos foram reduzir a entrada de radiação solar direta e maximizar o potencial de geração de energia e de produção de alimentos, os ângulos visuais e a iluminação natural. A otimização foi realizada por um método de soma ponderada, atribuindo-se pesos para cada objetivo.

Bomfim e Tavares (2019) modelaram com o *Rhinoceros/Grasshopper* uma fachada fixa, composta por painéis fotovoltaicos otimizados em termos de ganho solar. A disposição dos painéis foi definida a partir de uma modularização de superfície curvas, geradas por ondas senoidais e curvas *nurbs*, com pontos de controle variáveis. A radiação solar foi simulada com o *Ladybug* (*Radiance*), adotando-se como localização a cidade de Salvador, no Brasil (12° 58' S, 38° 30' O). A otimização foi realizada com o *Galapagos*.

Taveres-Cachat, Lobaccaro, Goia e Chaudhary (2019) elaboraram brises fixos fotovoltaicos, modelados no *Rhinoceros/Grasshopper*, com variáveis de quantidade, inclinação e posicionamento de aletas. As simulações termoenergéticas foram feitas com *Ladybug* (*EnergyPlus*) e a de iluminação com o *Honeybee* (*Radiance*). A cidade de Oslo, na Noruega (59° 54' N, 10° 45' L), foi a localização simulada. Os multiobjetivos envolveram a redução do consumo energético e a maximização da autonomia de luz natural e da geração de energia. A otimização foi realizada com o *Octopus*.

Outros elementos dinâmicos

Elghazi, Wagdy, Mohamed e Hassan (2014) modelaram um sistema de sombreamento dinâmico constituído por caleidociclos modulares. A simulação de iluminação foi realizada com o *Diva* (*Radiance/Daysim*), e a avaliação baseou-se na métrica do Leed V4. O local simulado foi em Cairo, no Egito (Latitude 30° 2' N, longitude 31° 14' L). Um algoritmo genético foi utilizado na otimização, com variáveis de tamanho e rotação do caleidociclo.

Tabadkani, Banihashemi e Hosseini (2018) desenvolveram um sistema composto por rosáceas dinâmicas modulares. As variáveis foram a rotação das subunidades hexagonais que constituem a rosácea, distanciamento do sistema em relação à fachada e materialidade. Simulações de iluminação foram realizadas com o *Diva* (*Radiance/Daysim*). *Ladybug* foi utilizado para configurar diferentes horários e simular a

incidência de radiação solar. A cidade de Teerã, no Irã ($35^{\circ} 42' N, 51^{\circ} 24' L$), foi escolhida como o local de simulação. A otimização foi realizada com *Galapagos*, tendo por objetivos a maximização da autonomia da luz natural e a minimização do risco de ofuscamento.

Hosseini, Mohammadi e Guerra-Santin (2019) apresentaram um modelo digital de um sistema de sombreamento dinâmico para um ambiente de escritório, localizado em Iazde, no Irã ($31^{\circ} 53' N, 54^{\circ} 21' L$). Considerando-se a disposição dos ocupantes, o movimento dos elementos de fachada foi simulado para diferentes períodos a fim de se encontrar configurações adequadas para o conforto visual dos usuários.

Yi, Kim, Kim, Kim et al. (2019) desenvolveram um algoritmo híbrido, baseado em pesquisa tabu e recozimento simulado (*Tabu-based Adaptive Pattern Search Simulated Annealing T-APSSA*), para otimizar as configurações de elementos dinâmicos em termos de iluminação e consumo energético. A proteção composta por módulos hexagonais com abertura ajustável foi modelada no *Rhinoceros/Grasshopper*. A simulação de iluminação foi realizada com o *Diva (Radiance/Daysim)*, integrando-se dados coletados por fotossensores, colocados num ambiente real e conectados ao modelo digital pelo *Arduino*. A localização adotada foi Miami, nos EUA ($25^{\circ} 46' N, 80^{\circ} 12' O$).

Tabadkani, Valinejad Shoubi, Soflaei, Banihashemi et al. (2019) modelaram no *Rhinoceros/Grasshopper* uma fachada adaptativa composta por caleidociclos hexagonais modulares. Variaram-se os ângulos visuais do interior para o exterior, a rotação das subunidades do módulo e a materialidade dos elementos. O *Galapagos* foi utilizado para otimizar as configurações do sistema em termos de iluminação natural. As simulações foram realizadas com o *Ladybug* e o *Honeybee (Radiance/Daysim)*. A cidade adotada foi Teerã, no Irã ($35^{\circ} 42' N, 51^{\circ} 24' L$).

Outros elementos estáticos

Abdel-Rahman (2021) aplicou conceitos de biomimética na concepção de elementos de sombreamento estáticos modelados no *Rhinoceros/Grasshopper*. Baseado em superfícies dobradas de uma espécie de cacto, o módulo constitui-se de duas superfícies triangulares espelhadas, com variáveis de abertura e inclinação. O *EnergyPlus* foi utilizado nas simulações termoenergéticas e o *Galapagos* na otimização da configuração formal, com os objetivos de reduzir a radiação solar direta no ambiente e o consumo energético da climatização. A localização simulada a cidade 6 de Outubro, no Egito ($29^{\circ} 57' N, 30^{\circ} 55' L$).

Castorina (2012) aplicou um algoritmo genético para otimizar a configuração variada de quebra-sóis em termos de desempenho energético. Foram testados diferentes conjuntos a partir de tesselações de triângulos, retângulos, losangos e hexágonos. Também foram variadas a profundidade e a inclinação das unidades. As simulações foram realizadas no *EnergyPlus*, com localização em Londres, na Inglaterra ($51^{\circ} 30' N, 0^{\circ} 7' O$).

Karagkouni, Fatah Gen Schieck, Tsigkari e Chronis (2014) modelaram elementos verticais curvos para fachadas a barlavento e a sotavento de um edifício hipotético, com localização em Roma, na Itália ($41^{\circ} 53' N, 12^{\circ} 29' L$). As superfícies curvas são manipuladas pelos pontos de controle das curvas *nurbs* que as geram. A posição destes pontos determina a dimensão das aberturas e o grau de curvatura dos elementos, impactando a direção e velocidade do fluxo de ar. A simulação de fluidos FFD (*Fast Fluid Dynamics*) e a otimização, por meio de algoritmo genético, foram implementados no *Processing*. Os objetivos foram maximizar o fluxo e a taxa de troca de ar interno.

Newton (2018) desenvolveu um algoritmo genético aplicável a problemas multiobjetivos dinâmicos, baseado em NSGA-II, buscando incluir no processo de otimização a possibilidade de alteração nas variáveis e nos objetivos, de modo a permitir uma maior participação do usuário e uma busca evolutiva contínua e aberta. O proposto “*Dynamic Progressive for Architecture NSGA-II*” (DPA-NSGA-II) foi aplicado na modelagem de um sistema de sombreamento fixo, composto por tubulações verticais dobradas, projetadas para circular água para fins de resfriamento e coleta de condensação entre a fachada e os tubos. Variaram-se a forma e a quantidade de tubos verticais. O *Diva (Radiance/Daysim)* foi utilizado para simular a iluminação e *Autodesk CFD* para os fluxos de ar e térmicos. A localização adotada foi a cidade de Kuwait, no Kuwait (29° 22’ N, 47° 59’ L). Os objetivos foram maximizar a coleta de condensação anual e a luz natural útil no ambiente, bem como reduzir a temperatura externa entre a fachada e o sombreamento, e a necessidade de dobras nos tubos para reduzir seu custo de produção.

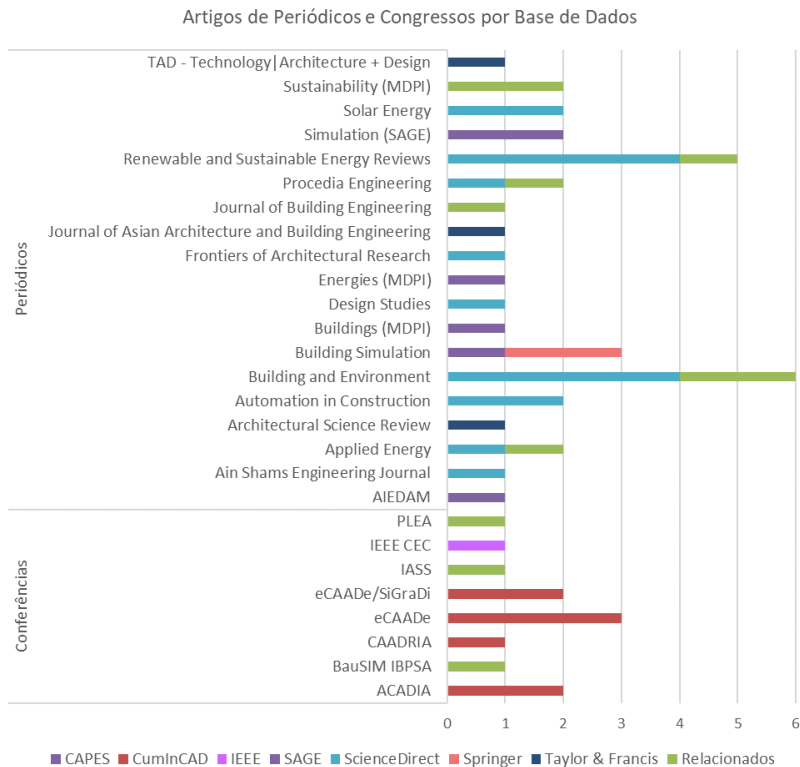
Yi, Kim, Kim, Kim et al. (2019) elaborou um sistema para a modelagem de fachadas otimizadas em termos de aproveitamento de luz natural com inclusão de preferências estéticas do projetista. O modelo, parametrizado no *Grasshopper*, consiste numa combinação entre um padrão de aberturas – baseado na fachada do edifício *Suites Avenue Building*, projetada por Toyo Ito – e uma superfície ondulada, gerada por curvas senoidais, com variação no período e na amplitude das ondas. As preferências do usuário quanto ao tamanho das aberturas e à complexidade das superfícies foram obtidas através de um questionário interativo, elaborado com o *plugin Human UI* para *Grasshopper*. As respostas do projetista foram codificadas em pesos para guiar o processo de otimização. A simulação de iluminação foi realizada com *Diva (Radiance)*, adotando-se por localização a cidade de Champaign, nos EUA (40° 6’ N, 88° 14’ O). A otimização foi realizada com o NSGA-II do *MATLAB*, com objetivos de maximizar a autonomia de luz natural e reduzir o risco de ofuscamento.

Zani, Andaloro, Deblasio, Ruttico et al. (2017) modelaram no *Rhinoceros/Grasshopper* painéis de concreto com aberturas horizontais inclinadas variáveis. Os padrões de direção e distribuição das aberturas foram determinados por gradientes de cinza gerados de imagens em *bitmap*. O *Radiance* e o *EnergyPlus*, através dos *plugins Ladybug* e *Honeybee*, foram utilizados nas simulações de iluminação e termoenergética. A localização adota foi Milão, na Itália (45° 25’ N, 9° 10’ L). A otimização foi realizada com o *Octopus*, com objetivos de minimizar a entrada de radiação direta e o consumo energético dos sistemas de climatização e iluminação, bem como maximizar as vistas para exterior e o aproveitamento de luz natural.

Síntese dos resultados

A Figura 1 reúne os 46 artigos selecionados, de acordo com as bases de dados em que foram encontradas. Nota-se que a maioria dos periódicos, nos quais as publicações ocorreram, é dedicada ao desenvolvimento tecnológico e científico em projeto, arquitetura e engenharia civil. Periódicos dedicados às questões de sustentabilidade e eficiência energética – tais como *Sustainability*, *Solar Energy*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Energies*, *Building and Environment*, *Applied Energy* – também apresentaram trabalhos relevantes e em número considerável em relação ao conteúdo desta revisão. Por fim, constatou-se que a maioria das conferências são sobre pesquisas relacionadas ao projeto assistido por computador (CAD) e a simulações de desempenho.

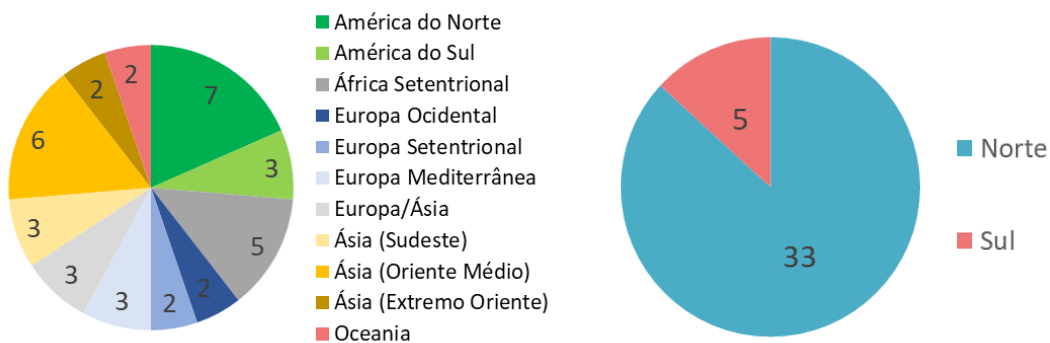
Figura 1 – Artigos de periódicos e congressos encontrados por base de dados



Fonte: os autores.

No Quadro 5 foram reunidas as localizações adotadas nas simulações das publicações selecionadas, incluindo a latitude e longitude de cada cidade. A maior quantidade de simulações envolveu regiões asiáticas (Figura 2), sendo 6 trabalhos localizados no Oriente Médio, 3 no Sudeste Asiático (Singapura), e 2 no Extremo Oriente (Coreia do Sul). O segundo continente com maior número cidades simuladas foi o americano, com 7 nos EUA, 2 no Brasil e 1 no Paraguai. A Europa totaliza 7 cidades simuladas, além de 3 situadas em regiões entre Ásia e Europa (Turquia e Chipre). A África Setentrional é a única região do continente africano e todas as 5 cidades simuladas situam-se no Egito. Por fim, o continente com menor número de localizações utilizadas nas simulações é a Oceania, representada unicamente pela Austrália. Apesar da variedade de regiões contempladas nos trabalhos contendo simulações, observa-se que estes concentram-se claramente no hemisfério norte (38), com apenas 5 cidades simuladas no hemisfério sul.

Figura 2 – Quantidade de publicações por localização adota nas simulações (esquerda) e por hemisfério (direita)



Fonte: os autores.

Quadro 5 – Localizações adotadas nas simulações computacionais

Autor	Localização	País	Região/Continentes	Latitude	Longitude
El-Sheikh e Gerber (2011)	Los Angeles	EUA	América do Norte	34° 3' N	118° 14' O
Castorina (2012)	Londres	Inglaterra	Europa Ocidental	51° 30' N	0° 7' O
Etman, Tolba e Ezzeldin (2013)	Cairo	Egito	África Setentrional	30° 2' N	31° 14' L
Gadelhak (2013)	Cairo	Egito	África Setentrional	30° 2' N	31° 14' L
Karamata, Giovannini, Verso e Andersen (2014)	Abu Dhabi	Emirados Árabes Unidos	Ásia (Oriente Médio)	24° 28' N	54° 22' L
Sawyer, Torghabehi e Buelow (2014)	Nova Iorque	EUA	América do Norte	40° 43' N	73° 56' O
Choi, Choi, Lee, Ahn e Piao (2014)	Seul	Coreia do Sul	Ásia (Extremo Oriente)	37° 31' N	127° 1' L
Elghazi, Wagdy, Mohamed e Hassan (2014)	Cairo	Egito	África Setentrional	30° 2' N	31° 14' L
Karagkouni, Fatah Gen Schieck, Tsigkari e Chronis (2014)	Roma	Itália	Europa Mediterrânea	41° 53' N	12° 29' L
Wortmann, Costa, Nannicini, Schroepfer (2015)	Jurong	Singapura	Ásia (Sudeste)	1° 18' N	103° 43' L
Wagdy e Fathy (2015)	Cairo	Egito	África Setentrional	30° 2' N	31° 14' L
Ercan e Elias-Orkan (2015)	Lárnaca	Chipre	Europa/Ásia	34° 55' N	33° 38' L
González e Fiorito (2015)	Sydney	Austrália	Oceania	33° 51' S	151° 12' L
Kirimtat, Koyunbaba, Chatzikonstantinou, Sariyildiz (2016b)	Esmirna	Turquia	Europa/Ásia	38° 25' N	27° 8' L
Narangerel, Lee e Stouffs (2016)	Incheon	Coreia do Sul	Ásia (Extremo Oriente)	37° 27' N	126° 42' L
Lavin e Fiorito (2017)	Sydney	Austrália	Oceania	33° 51' S	151° 12' L
Chi; Moreno; Navarro (2017)	Sevilha	Espanha	Europa Mediterrânea	37° 23' N	5° 59' L
Wortmann (2017)	Singapura	Singapura	Ásia (Sudeste)	1° 17' N	103° 51' L
Jayathissa, Luzzatto, Schimidli, Hofer <i>et al.</i> (2017)	Zurique	Suíça	Europa Ocidental	47° 22' N	8° 31' L
Zani, Andaloro, Deblasio, Ruttico <i>et al.</i> (2017)	Milão	Itália	Europa Mediterrânea	45° 25' N	9° 10' L
Shan e Junghans (2018)	São Francisco	EUA	América do Norte	37° 46' N	122° 25' O
	Miami	EUA	América do Norte	25° 46' N	80° 12' O
	Chicago	EUA	América do Norte	41° 52' N	87° 37' O
Tablada, Kosorić, Huang e Chaplin <i>et al.</i> (2018)	Singapura	Singapura	Ásia (Sudeste)	1° 17' N	103° 51' L
Tabadkani, Banihashemi, Hosseini (2018)	Teerã	Irã	Ásia (Oriente Médio)	35° 42' N	51° 24' L
Newton (2018)	Kuwait	Kuwait	Ásia (Oriente Médio)	29° 22' N	47° 59' L
Giantini, Souza, Turczyn e Celani (2019)	Campinas	Brasil	América do Sul	23° 0' S	47° 7' O
Kirimtat, Krejcar, Ekici e Tasgetiren (2019)	Esmirna	Turquia	Europa/Ásia	38° 25' N	27° 8' L
Bomfim e Tavares (2019)	Salvador	Brasil	América do Sul	12° 58' S	38° 30' O
Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2019)	Oslo	Noruega	Europa Setentrional	59° 54' N	10° 45' L
Hosseini, Mohammadi e Guerra-Santin (2019)	Iazde	Irã	Ásia (Oriente Médio)	31° 53' N	54° 21' L
Yi, Kim, Kim, Kim <i>et al.</i> (2019)	Miami	EUA	América do Norte	25° 46' N	80° 12' O
Tabadkani, Valinejad Shoubi, Soflaei, Banihashemi (2019)	Teerã	Irã	Ásia (Oriente Médio)	35° 42' N	51° 24' L
Yi (2019)	Champaign	EUA	América do Norte	40° 6' N	88° 14' O
Vazquez, Duarte, Poerschke (2020)	Assunção	Paraguai	América do Sul	25° 16' S	57° 38' O
Samadi, Noorzai, Beltrán, Abbasi (2020)	Teerã	Irã	Ásia (Oriente Médio)	35° 42' N	51° 24' L
Taveres-Cachat e Goia (2020)	Trondheim	Noruega	Europa Setentrional	63° 26' N	10° 25' L
Abdel-Rahman (2021)	6 de Outubro	Egito	África Setentrional	29° 57' N	30° 55' L

Fonte: os autores.

A partir das localizações, mapeou-se o clima predominante das cidades adotadas nas simulações. O Quadro 6 reúne as classificações climáticas e os climas predominantes, conforme a ordem de publicação dos trabalhos.

Quadro 6 – Clima das localizações adotadas, conforme classificação climática de Köppen-Geiger

Autor	Tipo de elemento	Cidade	Clima predominante	Classificação climática (Köppen-Geiger)
El-Sheikh e Gerber (2011)	Brises aletados	Los Angeles	Temperado	Mediterrânico de verão fresco (Csb)
Castorina (2012)	Outros estáticos	Londres	Temperado	Temperado oceânico (Cfb)
Etman, Tolba e Ezzeldin (2013)	Elementos vazados	Cairo	Seco	Árido quente (BWh)
Gadelhak (2013)	Brises aletados	Cairo	Seco	Árido quente (BWh)
Karamata, Giovannini, Verso e Andersen (2014)	Elementos vazados	Abu Dhabi	Seco	Árido quente (BWh)
Sawyer, Torghabehi e Buelow (2014)	Elementos vazados	Nova Iorque	Temperado	Subtropical úmido (Cfa)
Choi, Choi, Lee, Ahn e Piao (2014)	Brises aletados	Seul	Continental	Continental úmido de verão quente influenciado pelas monções (Dwa)
Elghazi, Wagdy, Mohamed e Hassan (2014)	Outros dinâmicos	Cairo	Seco	Árido quente (BWh)
Karagkouni, Fatah Gen Schieck, Tsigkari e Chronis (2014)	Outros estáticos	Roma	Temperado	Mediterrânico de verão fresco (Csb)
Wortmann; Costa; Nannicini; Schropfer (2015)	Elementos vazados	Jurong	Tropical	Equatorial (Af)
Wagdy e Fathy (2015)	Brises aletados	Cairo	Seco	Árido quente (BWh)
Ercan e Elias-Orkan (2015)	Brises aletados	Lárnaca	Temperado	Mediterrânico de verão quente (Csa)
González e Fiorito (2015)	Brises aletados	Sydney	Temperado	Subtropical úmido (Cfa)
Kirimtat et al. (2016b)	Brises aletados	Esmirna	Temperado	Mediterrânico de verão quente (Csa)
Narangerel, Lee e Stouffs (2016)	Fotovoltaicos	Incheon	Continental	Continental úmido de verão quente influenciado pelas monções (Dwa)
Lavin e Fiorito (2017)	Elementos vazados	Sydney	Temperado	Subtropical úmido (Cfa)
Chi; Moreno; Navarro (2017)	Elementos vazados	Sevilha	Temperado	Mediterrânico de verão quente (Csa)
Wortmann (2017)	Elementos vazados e Brises aletados	Singapura	Tropical	Equatorial (Af)
Jayathissa, Luzzatto, Schmidli, Hofer et al. (2017)	Fotovoltaicos	Zurique	Temperado	Temperado oceânico (Cfb)
Zani, Andaloro, Deblasio, Ruttico et al. (2017)	Outros estáticos	Milão	Temperado	Subtropical úmido (Cfa)
Shan e Junghans (2018)	Brises aletados	São Francisco	Temperado	Mediterrânico de verão fresco (Csb)
		Miami	Tropical	Clima de monção (Am)
		Chicago	Continental	Continental úmido de verão quente (Dfa)
Tablada, Kosorić, Huang e Chaplin et al. (2018)	Fotovoltaicos	Singapura	Tropical	Equatorial (Af)
Tabadkani; Banihashemi; Hosseini (2018)	Outros dinâmicos	Teerã	Seco	Semiárido frio (BSk)
Newton (2018)	Outros estáticos	Kuwait	Seco	Árido quente (BWh)
Giantini, Souza, Turczyn e Celani (2019)	Elementos vazados	Campinas	Temperado	Subtropical de altitude (Cwb)
Kirimtat, Krejcar, Ekici e Tasgetiren (2019)	Brises aletados	Esmirna	Temperado	Mediterrânico de verão quente (Csa)
Bomfim e Tavares (2019)	Fotovoltaicos	Salvador	Tropical	Equatorial (Af)
Taveres-Cachat, Lobaccaro, Goia, Chaudhary, (2019)	Fotovoltaicos	Oslo	Continental	Continental úmido de verão fresco (Dfb)
Hosseini, Mohammadi e Guerra-Santin (2019)	Outros dinâmicos	Izde	Seco	Árido frio (BWk)
Yi, Kim, Kim, Kim et al. (2019)	Outros dinâmicos	Miami	Tropical	Clima de monção (Am)
Tabadkani, Valinejad Shoubi, Soflaei, Banihashemi (2019)	Outros dinâmicos	Teerã	Seco	Semiárido frio (BSk)
Yi (2019)	Outros estáticos	Champaign	Continental	Continental úmido de verão quente (Dfa)
Vazquez; Duarte; Poerschke (2020)	Elementos vazados	Assunção	Temperado	Subtropical úmido (Cfa)
Samadi, Noorzai, Beltrán, Abbasi (2020)	Brises aletados	Teerã	Seco	Semiárido frio (BSk)
Taveres-Cachat e Goia (2020)	Brises aletados	Trondheim	Continental	Continental úmido de verão fresco (Dfb)
Abdel-Rahman (2021)	Outros estáticos	6 de Outubro	Seco	Árido quente (BWh)

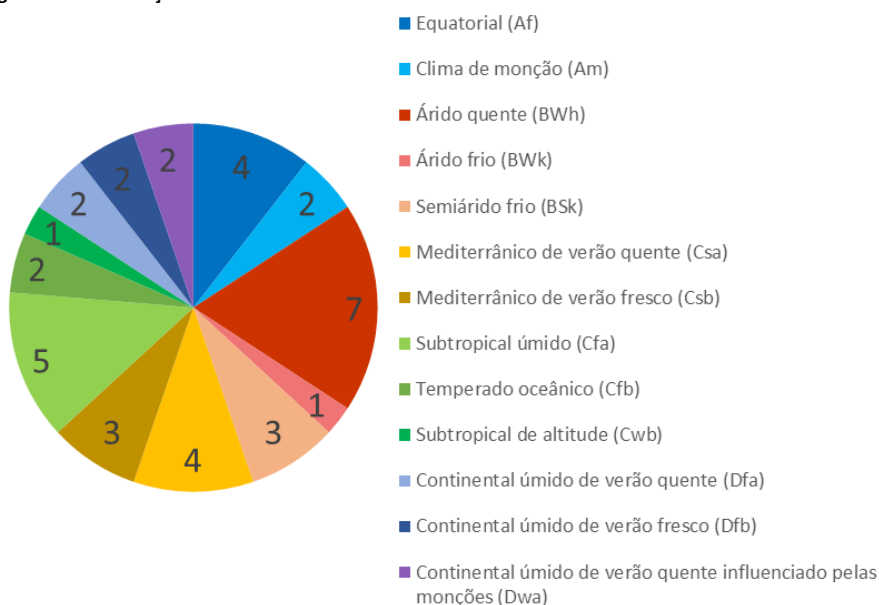
Fonte: os autores.

A Figura 3 apresenta os tipos climáticos observados segundo a classificação de Köppen-Geiger. De modo geral, os climas temperados foram os mais recorrentes, totalizando 15 ocorrências. Os climas secos – árido e semiárido – aparecem em segundo lugar nos

climas mais frequentes, totalizando 11 ocasiões. Os climas tropical e continental apresentaram 6 correspondências cada.

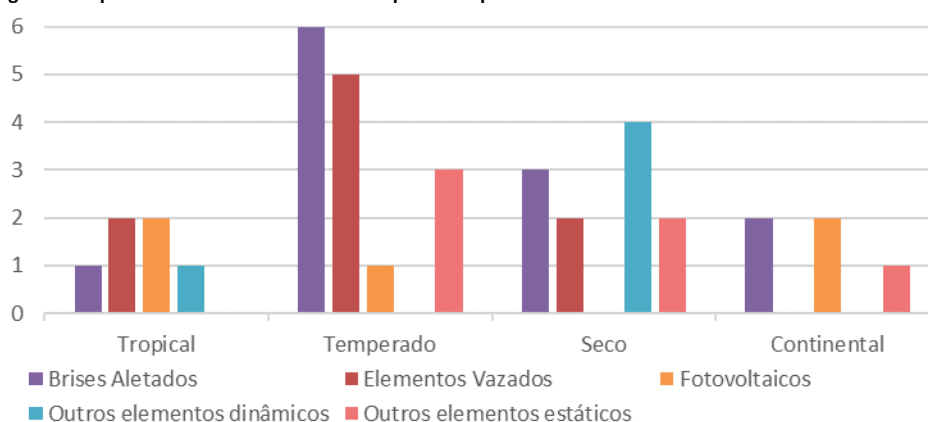
Na Figura 4, foram associados os tipos de elementos aos climas para os quais foram desenvolvidos. De todos os tipos de elementos, os brises aletados foram os únicos onipresentes para todos os climas. Nos climas tropicais, nota-se que as pesquisas, embora reduzidas, mostraram-se bem diversificadas quanto à proposição do elemento a ser desenvolvido, não sendo encontrados apenas elementos estáticos customizados. Os locais com climas temperados apresentaram a maior parte do desenvolvimento de brises aletados, elementos vazados e outros elementos estáticos. Ainda assim, nota-se uma ausência de elementos dinâmicos customizados nestes climas para o período levantado nesta revisão. Por outro lado, nos climas secos, os elementos dinâmicos customizados foram os mais explorados nas pesquisas encontradas, embora nenhum elemento fotovoltaico tenha sido proposto. Nos locais de clima continental não foram encontrados elementos vazados nem elementos dinâmicos.

Figura 3 – Classificação climática das cidades simuladas



Fonte: os autores.

Figura 4 – Tipos de elementos desenvolvidos por clima predominante

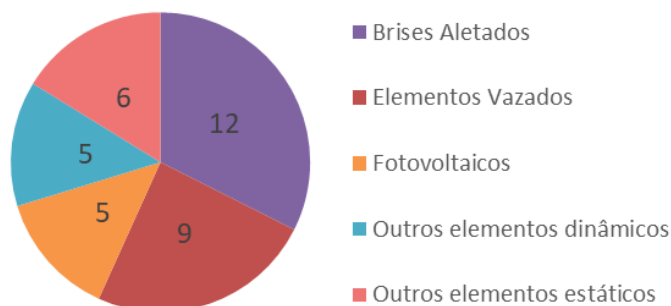


Fonte: os autores.

Conforme a Figura 5, os brises aletados foram os elementos de fachada mais comumente desenvolvidos, seguidos por elementos vazados diversos. Contudo, quando considerados em conjunto, os demais elementos dinâmicos e estáticos, de

forma e funcionamento variados, foram encontrados em quantidade muito próxima a dos brises. Este interesse em desenvolver elementos modulares customizados pode estar relacionado à facilidade com que modelos digitais alternativos podem ser gerados durante a exploração formal da modelagem paramétrica.

Figura 5 – Quantidade de elementos de fachada de acordo com o tipo



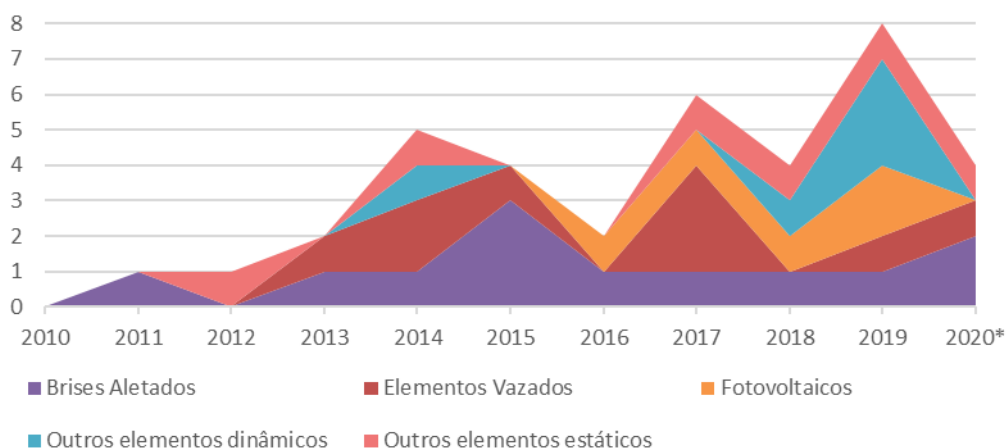
Fonte: os autores.

Quanto à mobilidade dos elementos, constatou-se que a maioria é estática e apenas 9 dos 37 levantados são móveis. Yi, Kim, Kim, Kim *et al.* (2019) atribuem os poucos estudos sobre elementos móveis à insuficiência técnica dos aplicativos no suporte ao projeto de modelos dinâmicos, tanto pela dificuldade em se desenvolver algoritmos de simulação aplicáveis na avaliação de desempenho, quanto pela escassez de procedimentos que considerem a automação e a otimização de geometrias adaptáveis. Além disso, segundo estes autores, as metodologias de otimização mais comumente empregadas – em geral através de *plugins* para aplicativos de modelagem – são focadas em buscar soluções determinísticas e, portanto, mais apropriadas para o desenvolvimento de elementos estáticos, uma vez que estes processos retornarão um mesmo produto final como resposta a um mesmo conjunto de dados de entrada.

Outros motivos possivelmente associados ao baixo número de pesquisas sobre elementos dinâmicos são o potencial custo de manutenção e o consumo energético destes dispositivos (Fiorito, Sauchelli, Arroyo, Pesenti *et al.*, 2016). Entretanto, problemas de manutenção também podem ser tratados ainda durante as etapas iniciais de projeto, com considerações sobre como estes elementos podem ser acessados, limpos e trocados (Loonen, 2010). Quanto à demanda energética, uma possibilidade de pesquisa que pode estimular o desenvolvimento de elementos móveis é a integração de materiais fotovoltaicos para geração de energia. Conforme a Figura 6, a partir de 2016, observa-se o surgimento e a contínua publicação de pesquisas interessadas em explorar o potencial de geração de energia através de dispositivos de fachada. Além disso, nota-se um pico de publicações em 2019, com diferentes tipos de elementos desenvolvidos. Por fim, é importante salientar que, apesar da redução observada, o ano de 2020 não se encontra representado em sua totalidade, uma vez que o levantamento abrange até agosto de 2020 apenas, mês em que foram concluídas as buscas sistemáticas desta RSL.

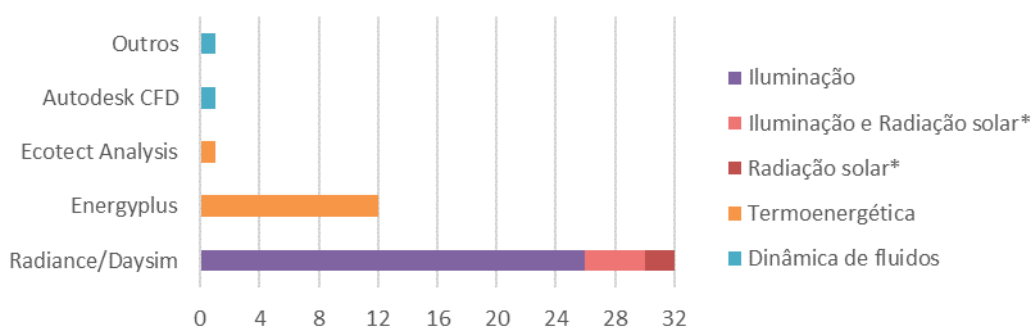
Os aplicativos BPS mais utilizados foram *Radiance* e *Daysim*, para simular a incidência de radiação solar sobre superfícies, necessária para avaliar o desempenho luminoso e estimar a geração de energia dos elementos fotovoltaicos (Figura 7). As simulações de desempenho termoenergético realizadas com *EnergyPlus*, principalmente, e com uso ocasional do *Autodesk CFD* (limitado à análise térmica, junto à fluidodinâmica) e do *Ecotect Analysis*, descontinuado em 2015, somam metade do uso dos BPS (Autodesk, 2016). Apenas duas simulações de dinâmica de fluidos, por FFD e CFD, foram encontradas.

Figura 6 – Elementos de fachada desenvolvidos ao longo dos anos



Nota: *período de levantamento até agosto de 2020. Fonte: os autores.

Figura 7 – Aplicativos BPS e simulações de desempenho realizadas

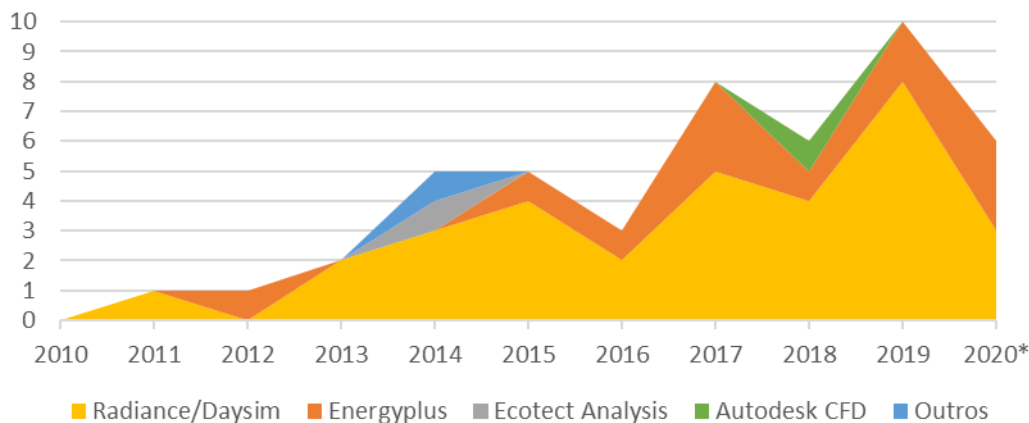


Nota: *Simulação de incidência de radiação solar sobre superfícies para estimativa de geração de energia. Fonte: os autores.

Analisando a Figura 8, nota-se que o uso do *Radiance* e *Daysim* não apenas é o maior, como também foi o que mais cresceu desde as primeiras publicações. O *EnergyPlus* teve uma pesquisa pontual em 2012, porém desde 2015 observa-se ao menos uma publicação anual que menciona seu uso. Este cenário pode ser atribuído à existência de determinados *plugins* que intermedeiam a integração entre aplicativos de modelagem e BPS, de modo que os dados gerados nas simulações podem ser graficamente visualizados no modelo digital. Por exemplo, informações do *Radiance* e *Daysim* podem ser inseridas nos modelos gerados no *Rhinoceros/Grasshopper* através dos *plugins* *Diva*, *Ladybug* e *Honeybee*. Estes dois últimos também oferecem suporte ao *EnergyPlus* e *OpenStudio*, associando simulações termoenergéticas. Esta situação pode ser alterada ou amplificada, à medida que novos *plugins* ou outras formas de integração entre aplicativos sejam desenvolvidas.

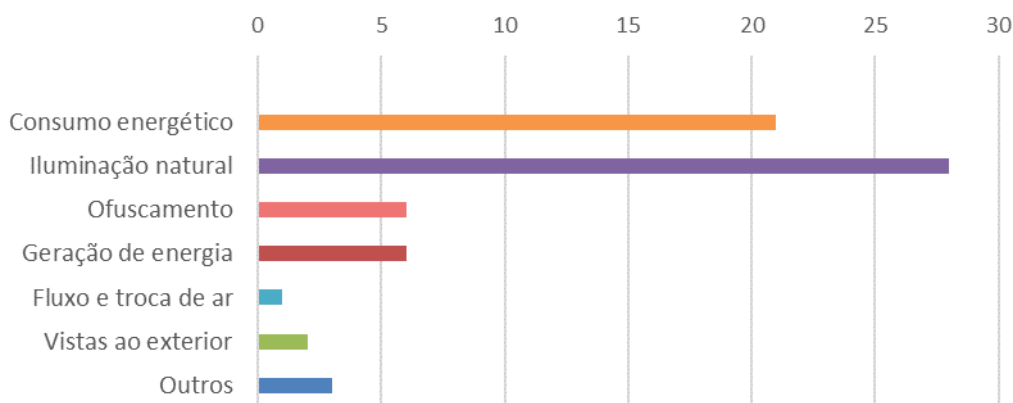
Os *plugins* também influenciam a quantidade, os objetivos e os métodos de otimização. A otimização do desempenho luminoso e do energético foram as mais realizadas, justamente as que podem ser pautadas em aplicativos BPS mais integrados aos de modelagem (Figura 9).

Figura 8 – Aplicativos BPS utilizados ao longo do tempo



Nota: *até agosto de 2020. Fonte: os autores.

Figura 9 – Objetivos de otimização mapeados

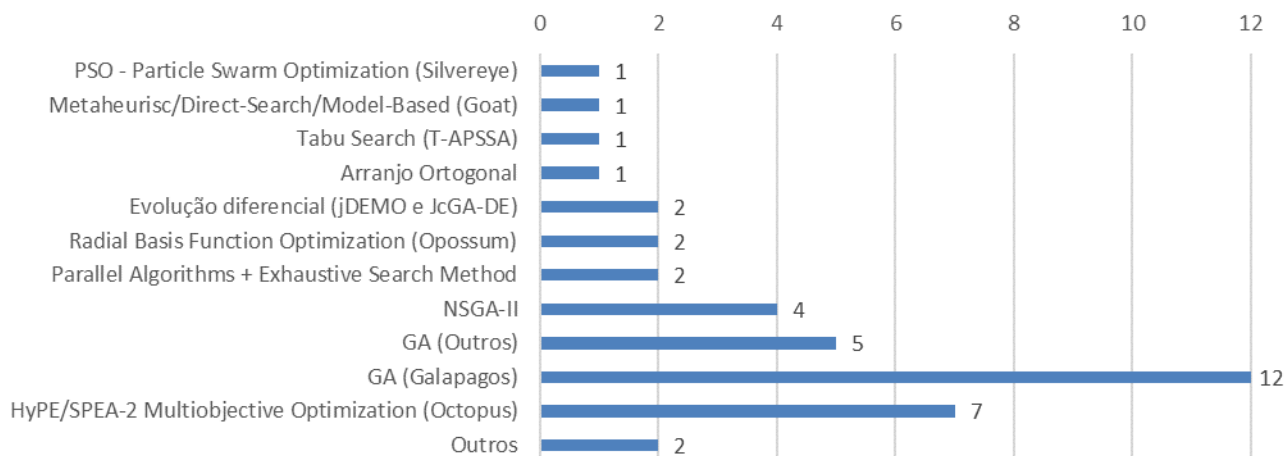


Nota: Outros objetivos foram custo de fabricação e coleta de condensação (Newton, 2018) e produção de alimentos (Tablada, Kosorić, Huang e Chaplin *et al.*, 2018). Fonte: os autores.

Apesar dos benefícios advindos da existência dos *plugins*, é necessário expandir a vinculação entre aplicativos com outros tipos de simulação, de modo que novos objetivos de otimização possam ser explorados. Embora dependentes dos recursos computacionais que dispõem os pesquisadores, podendo exigir muito tempo de processamento e inviabilizar os estudos que se presumem ser de etapas iniciais de projeto (Evins, 2013; Karagkouni; Fatah Gen Schieck; Tsigkari; Chronis, 2014), as simulações de CFD podem ampliar os usos destas tecnologias ao trazer para a pesquisa análises de velocidade, direção, pressão e mudanças de temperatura causadas por massas de ar, e que certamente impactam não apenas no desempenho da construção, como também o desenvolvimento de formas e funcionamento dos elementos de fachada.

Entre os métodos de otimização mapeados (Figura 10), os mais recorrentes também são aqueles disponíveis por meio de *plugins* integrados em aplicativos de modelagem, como *Galapagos* e *Octopus*, ambos para *Grasshopper*. O *Galapagos* contém dois métodos de otimização determinísticos – um algoritmo genético e um algoritmo de recozimento simulado (*Simulated Annealing*) – baseados num único objetivo (Rutten, 2013). Múltiplos objetivos também podem ser explorados no *Galapagos* por soma ponderada (Kocabay; Alaçam, 2017). O *Octopus* é um resolvidor evolutivo com dois métodos de otimização multiobjetiva – o *HypE* (*Hypervolume-based Many-Objective Optimization*) e o *SPEA-II* (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm II*) (Vierlinger, 2021).

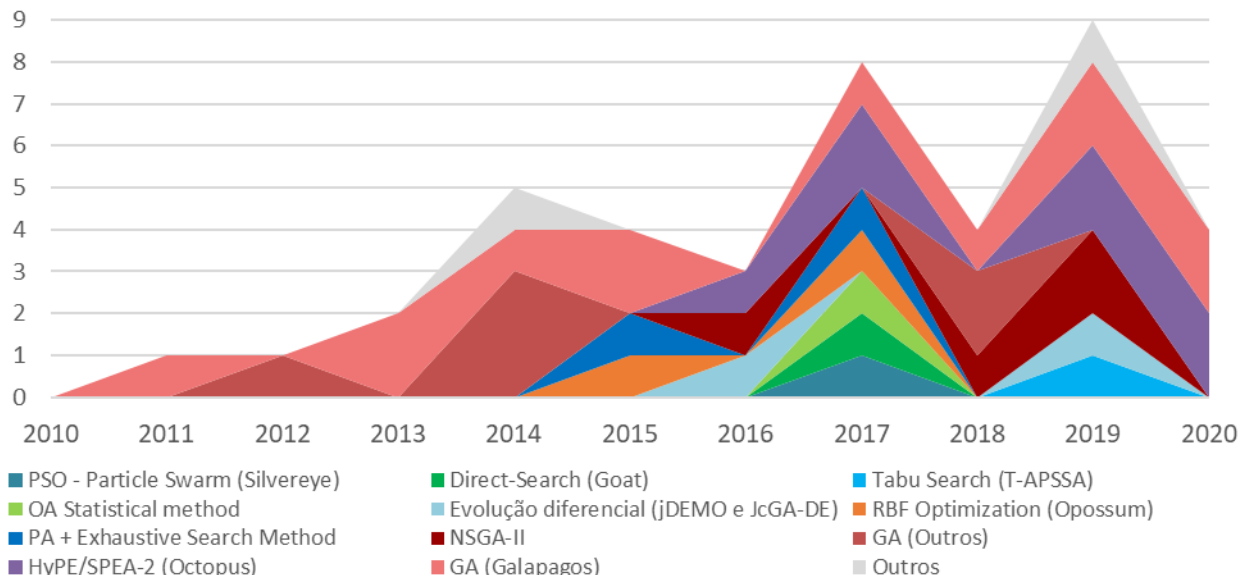
Figura 10 – Métodos de otimização mapeados



Fonte: os autores.

A Figura 11 apresenta os métodos mapeados ao longo do tempo. Observa-se, a partir de 2015, a aplicação de outros tipos de otimização além dos algoritmos genéticos, com picos de diversidade em 2017 e 2019, revelando um crescente interesse no desenvolvimento de métodos alternativos que contemplem múltiplos objetivos e que apresentem um menor tempo de processamento computacional na busca pelas soluções otimizadas. Ainda assim, percebe-se que o uso dos algoritmos genéticos (GA, NSGA-II e *Galapagos*) para otimização de soluções manteve-se contínuo desde as primeiras publicações até o fim do período do levantamento desta RSL.

Figura 11 – Métodos de otimização mapeados



Nota: período de levantamento até agosto de 2020. Fonte: os autores.

Conclusão

Foi realizada uma RSL para proporcionar um panorama atual a respeito do desenvolvimento de elementos de fachada eficientes, a partir de métodos de projeto paramétrico orientado a desempenho. As publicações selecionadas apresentaram diferentes tipos de elementos, projetados com auxílio de procedimentos computacionais inter-relacionados de modelagem paramétrica, simulação de desempenho e otimização computacional algorítmica. Constatou-se que, do período de

2010 a 2020, houve um crescimento de publicações sobre o tema, revelando um gradativo interesse na apropriação dos recursos computacionais para auxiliar a tomada de decisões e a geração de soluções com melhor desempenho. Este interesse é estimulado – e limitado – pela integração entre os diferentes aplicativos de modelagem e simulação. Aplicativos BPS, que contêm *plugins* de intermediação com o modelo digital, foram os mais utilizados. Conseqüentemente, as simulações e análises de desempenho que estes aplicativos proporcionam também foram encontradas em maior número. O mesmo foi observado para os métodos de otimização computacional: os algoritmos mais usados foram aqueles disponibilizados em *plugins* para aplicativos de modelagem. Este cenário pode mudar à medida que novos *plugins* ou outras formas de integração entre aplicativos forem desenvolvidas.

Em relação às localizações adotadas nas simulações, observou-se uma difusão de pesquisas em diversas regiões do globo. Entretanto, constatou-se uma disparidade elevada quando as latitudes foram comparadas. Das 38 localizações simuladas nas publicações encontradas, apenas 5 cidades de Austrália, Brasil e Paraguai foram simuladas no hemisfério sul, com notável concentração de estudos no em cidades do hemisfério norte.

Quanto aos elementos de fachada em si, foram levantados 37 dispositivos, distribuídos em 5 categorias: elementos vazados, brises, fotovoltaicos, e outros elementos dinâmicos e estáticos. Os brises aletados foram encontrados em maior número e em todas as regiões, revelando-se ser a solução de proteção de fachada mais comum em todos os climas predominantes mapeados (tropical, temperado, seco e continental). Depois dos brises, os elementos vazados variados foram os mais propostos, embora não tenham sido propostos em locais com clima continental. Os elementos de forma e funcionalidade variada, dinâmicos ou estáticos, quando considerados conjuntamente, totalizam quase a mesma quantidade de brises e estão também presentes em todos os climas predominantes, revelando um interesse na exploração de soluções customizadas para proteções, alternativas aos tradicionais brises e elementos vazados. Observou-se, ainda, a partir de 2016, o surgimento do desenvolvimento de elementos fotovoltaicos. A proposição de elementos fotovoltaicos pode não apenas impulsionar novas pesquisas para exploração da geração de energia através das fachadas, como também pode ampliar o uso das tecnologias de simulação e otimização, uma vez que novas variáveis e objetivos podem ser considerados como, por exemplo, o consumo proveniente da movimentação de elementos dinâmicos e o respectivo balanço entre a energia gerada e a consumida neste movimento.

Constatou-se que, para o período levantado, embora haja um crescente interesse na otimização de elementos de fachada, a integração limitada entre aplicativos ainda é um desafio a ser superado para que novas possibilidades de simulação sejam exploradas na geração de soluções construtivas. Além disso, para o projeto de elementos dinâmicos, também é necessário que sejam desenvolvidos métodos de otimização mais adequados, e que os múltiplos objetivos incluam critérios de custo-benefício e manutenção.

É importante salientar que os resultados encontrados através desta RSL estão limitados pelo período e critérios para formação da amostra em que se conduziram as buscas sistemáticas. É necessário, portanto, que novos levantamentos sejam produzidos, contemplando o final de 2020, bem como os anos de 2021 e 2022, para avaliar como o número e a diversidade de pesquisas relacionadas ao objeto desta RSL evoluíram. Neste sentido, o método e a estruturação das expressões de busca apresentados podem contribuir para orientar a condução de futuros levantamentos. Por fim, ressalta-se que a revisão incluiu apenas publicações em inglês. Apesar de atender aos fins propostos

para este trabalho, tal limitação exclui, portanto, trabalhos de otimização de fachada que abordem as questões referentes às baixas latitudes publicados em outros idiomas, notadamente a produção nacional e latino-americana, o que pode criar certo viés em termos de sugestões de pesquisas orientadas aos padrões e demandas internacionais. Assim, recomenda-se que novos estudos retirem esta restrição e/ou enfoquem aplicações locais.

Agradecimentos

Em memória da Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris, cuja incessante dedicação e fundamental supervisão concretizaram a realização deste trabalho. Sua determinação e paixão pela pesquisa sempre nos inspirarão.

Referências

ABDEL-RAHMAN, Wael Salah Mansour. Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration. **Ains Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 1133-1142, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.007>.

AL-MASRANI, S. M.; AL-OBAIDI, K. M.; ZALIN, N. A.; AIDA ISMA, M. I. Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. **Solar Energy**, v. 170, p. 848-872, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047>.

AL-MASRANI, S. M.; AL-OBAIDI. Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. **Automation in Construction**, v. 102, p. 195-216, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>.

AUTODESK. **Ecotect Analysis Discontinuation FAQ**. Oct. 2016. Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/Ecotect-Analysis-Discontinuation-FAQ.html>. Acesso em: 20 maio 2021.

BOMFIM, K.; TAVARES, F. Building facade optimization for maximizing the incident solar radiation. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE, 37.; IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS, JOINT CONFERENCE, 23., 2019, Porto. **Proceedings [...]**. São Paulo: Blucher, 2019. p. 171-182. Disponível em: https://pdf.blucher.com.br/designproceedings/ecaadesigradi2019/ecaadesigradi2019_555.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

BRERETON, P.; KITCHENHAM, B. A.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; KHALIL, M. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. **Journal of Systems and Software**, v. 80, n. 4, p. 571-583, Apr. 2007. DOI 10.1016/j.jss.2006.07.009.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R. Elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 7, n. 3, p. 133-144, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v7i3.8647516>.

CASTORINA, Giulio. Performative topologies: an evolutionary shape optimization framework for daylighting performance coupling a particle-spring-system with an energy simulation tool. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE, 12., 2012, San Francisco. **Proceedings [...]**. New York: ACADIA, 2012. p. 479-490. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2012.479>.

CHI, D. A.; MORENO, D.; NAVARRO, J. Design optimisation of perforated solar façades in order to balance daylighting with thermal performance. **Building and Environment**, v. 125, p. 383-400, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.007>.

CHOI, J.; LEE, T.; AHN, E.; PIAO, G. Parametric louver design system based on direct solar radiation control performance. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 3, n. 1, p. 57-62, Jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.3130/jaabe.13.57>.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to evolutionary computing**, 2nd ed. Berlin: Springer, 2015. 287 p. (Natural computing series).

EKICI, B.; CUBUKCUOGLU, C.; TURRIN, M.; SARIYILDIZ, I. S. Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. **Building and Environment**, v. 147, p. 356-371, Jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.023>.

ELGHAZI, Y.; WAGDY, A.; MOHAMED, S.; HASSAN, A. Daylighting driven design: optimizing kaleidocycle facade for hot aride climate. In: BAUSIM IBPSA CONFERENCE, 15., 2014, Aachen. **Proceedings** [...]. Aachen: RWTH Aachen University. p. 314-321. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/proceedings/bausim/2014/papers/bausim2014_1155.pdf. Acesso em: 20 fev. 2021.

EL-SHEIKH, M.; GERBER, D. J. Building skin intelligence: a parametric and algorithmic tool for daylighting performance design integration. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE: INTEGRATION THROUGH COMPUTATION, 31., 2011, Calgary/Banff. **Proceedings** [...]. New York: ACADIA, 2011. p. 170-177.

ELTAWHEEL, A.; SU, Y. Parametric design and daylighting: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1086-1103, June. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011>.

ERCAN, B.; ELIAS-OZKAN, S. T. Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components. **Design Studies**, v. 38, p. 33-53, May. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.01.001>.

ETMAN, O.; TOLBA, O.; EZZELDIN, S. Double-skin façades in egypt between parametric and climatic approaches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE, 31., 2013, Delft. **Proceedings** [...]. Delft: Delft University of Technology, 2013. p. 459-466. Disponível em: https://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2013_027.content.pdf.

EVINS, Ralph. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230-245, June 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>.

FIORITO, F.; SAUCHELLI, M.; ARROYO, D.; PESENTI, M.; IMPERADORI, M.; MASERA, G.; RANZI, G. Shape morphing solar shadings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 863-884, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086>.

GADELHAK, M. Integrating computational and building performance simulation techniques for optimized facade designs. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 31., 2013, Delft. **Proceedings** [...]. Delft: Delft University of Technology, 2013. p. 261-270. Disponível em: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ecaade2013_298.content.pdf. Acesso em: 20 mar. 2021.

GARCIA, M. S.; VILELA, J. A.; MAIRINK, A. J. M.; VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G. Simulação paramétrica de brise-soleil para redução de consumo energético em edificação comercial. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 16, n. 40, p. 1-27, abr./jun. 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/9783>. Acesso em: 20 jan. 2023.

GIANTINI, G.; SOUZA, L. N.; TURCZYN, D.; CELANI, G. Environmental Ceramics Merging the digital and the physical in the design of a performance -based facade system. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 31.; IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS, JOINT CONFERENCE, 23., 2019, Porto. **Proceedings** [...]. São Paulo: Blucher, 2019. p. 749-758.

GONZÁLEZ, J.; FIORITO, F. Daylight Design of Office Buildings: Optimisation of External Solar Shadings by Using Combined Simulation Methods. **Buildings**, v. 5, n. 2, p. 560-580, May 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings5020560>.

HOSSEINI, S. M.; MOHAMMADI, M.; GUERRA-SANTIN, O. Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. **Building and Environment**, v. 165, p. 106396, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396>.

HOSSEINI, S. M.; MOHAMMADI, M.; ROSEMAN, A.; SCHRÖDER, A.; LICHTENBERG, J. A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review. **Building and Environment**, v. 153, p. 186-204, abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040>.

HU, M.; QIU, Y. A comparison of building energy codes and policies in the USA, Germany, and China: progress toward the net-zero building goal in three countries. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, p. 291-305, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1636-x>.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem Edifica**. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sobre>. Acesso em: 31 jan. 2021.

JAYATHISSA, P.; LUZZATTO, M.; SCHMIDLI, J.; HOFER, J.; NAGY, Z.; SCHLUETER, A. Optimising building net energy demand with dynamic BIPV shading. **Applied Energy**, v. 202, p. 726-735, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.083>.

KARAGKOUNI, C.; FATAH GEN SCHIECK, A.; TSIGKARI, M.; CHRONIS, A. Performance-driven facades: Analysis of natural cross-ventilation in an indoor environment with Fast Fluid Dynamics and apertures optimization based on a genetic algorithm. **Simulation**, v. 90, n. 8, p. 978-990, June. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549714537133>.

KARAMATA, B.; GIOVANNINI, L.; VERSO, V. L.; ANDERSEN, M. Concept, Design and Performance of a Shape Variable Mashrabiya as a Shading and Daylighting System for Arid Climates. In: PLEA CONFERENCE SUSTAINABLE HABITAT FOR DEVELOPING SOCIETIES, 30., 2014, Ahmedabad. **Proceedings** [...]. Ahmedabad: CEPT University Ahmedabad, 2014. p. 344-351. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/148011370>. Acesso em 20 fev. 2021.

KHEIRI, F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 897-920, Sept. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>.

KIRIMTAT, A.; KOYUNBABA, B. K.; CHATZIKONSTANTINO, I.; SARIYILDIZ, S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23-49, Jan. 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>.

KIRIMTAT, A.; KOYUNBABA, B. K.; CHATZIKONSTANTINO, I.; SARIYILDIZ, S.; SUGANTHAN, P. N. Multi-objective optimization for shading devices in buildings by using evolutionary algorithms. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC), 2016b, Vancouver. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2016. p. 3917-3924. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEC.2016.7744286>.

KIRIMTAT, A.; KREJCAR, O.; EKICI, B.; TASGETIREN, M. F. Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. **Solar Energy**, v. 185, p. 100-111, June. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.048>.

KOCABAY, Serkan; ALAÇAM, Sema. Algorithm driven design comparison of single-objective and multi-objective genetic algorithms in the context of housing design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN FUTURES, 17., 2017, Istanbul. **Proceedings** [...]. Istanbul: Springer, 2017. p. 492-508. Disponível em: https://papers.cumincad.org/data/works/att/cf2017_492.pdf. Acesso em: 20 fev. 2023.

KOLAREVIC, B; MALKAWI, A. (ed.). **Performative architecture: beyond instrumentality**. Abingdon: Routledge, 2005. 272 p.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: PROCEL/ELETOBRÁS, 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 20 jan. 2023.

LAVIN, C.; FIORITO, F. Optimization of an external perforated screen for improved daylighting and thermal performance of an office space. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 571-581, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.216>.

LOONEN, R.C.G.M. **Climate adaptive building shells: what can we simulate?** 2010. 115 f. Thesis (Master in Building Services) – Architecture, Building & Planning, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2010. Disponível em: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46995605/693430-1.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2021.

LUKE, Sean. **Essentials of metaheuristics: A Set of Undergraduate Lecture Notes**. 2nd ed. Durham: Lulu, 2016. 263 p. Disponível em: <https://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2021.

MAIRINK, A. J. M.; VILELA, J. A.; GARCIA, M. S.; VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G. Simulação paramétrica de brise-soleil em fachada oeste para redução de consumo energético em edificação comercial. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019. p.2494-2503.

NARANGEREL, A.; LEE, J.-H.; STOUFFS, R. Daylighting based parametric design exploration of 3D facade patterns. In: COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 34., 2016, Oulu. **Proceedings [...]**. Oulu: University of Oulu, 2016. p. 379-388. Disponível em: https://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2016_042.pdf. Acesso em: 20 jan. 2023.

NEWTON, David. Accommodating change and open-ended search in design optimization. In: THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA CONFERENCE, 23., Beijing, 2018. **Proceedings [...]**. Hong Kong: CAADRIA, 2018. p. 175-184. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2018.2.175>.

ØSTERGÅRD, T.; JENSEN, R. L.; MAAGAARD, S. E. Building simulations supporting decision making in early design – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 187-201, Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.045>.

RUTTEN, David. Galapagos: on the logic and limitations of generic solvers. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p. 132-135, Mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1568>.

SAMADI, S.; NOORZAI, E.; BELTRÁN, L. O.; ABBASI, S. A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 335-349, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.10.004>.

SAWYER, O. A.; TORGHABEHI, O. O.; BUELOW, P. V. Performance-based design of a self-standing building skin; A methodology to integrate structural and daylight performance in a form exploration process. In: IASS-SLTE SYMPOSIUM “SHELLS, MEMBRANES AND SPATIAL STRUCTURES: FOOTPRINTS”, 2014, Brasília. **Proceedings [...]**. Brasília: IASS-SLTE, 2014.

SHAN, R.; JUNGHANS, L. “Adaptive radiation” optimization for climate adaptive building facade design strategy. **Building Simulation**, v. 11, p. 269-279, Sept. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0406-8>.

TABADKANI, A.; BANIHASHEMI, S.; HOSSEINI, M. R. Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis. **Building Simulation**, v. 11, n. 4, p. 663-676, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0433-0>.

TABADKANI, A.; VALINEJAD SHOUBI, M.; SOFLAEI, F.; BANIHASHEMI, S. Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort. **Automation in Construction**, v. 106, p. 102857, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102857>.

TABLADA, A.; KOSORIĆ, V.; HUANG, H.; CHAPLIN, I. K.; LAU, S. K.; YUAN, C.; LAU, S-Y. Design optimization of productive façades: integrating photovoltaic and farming systems at the tropical technologies laboratory. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 3762, Oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103762>.

TAVERES-CACHAT, E.; GOIA, F. Co-simulation and validation of the performance of a highly flexible parametric model of an external shading system. **Building and Environment**, v. 182, p. 107111, Sept. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107111>.

TAVERES-CACHAT, E.; LOBACCARO, G.; GOIA, F. CHAUDHARY, G. A methodology to improve the performance of PV integrated shading devices using multi-objective optimization. **Applied Energy**, v. 247, p. 731-744, Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.033>.

TOULOUPAKI, E.; THEODOSIOU, T. Performance simulation integrated in parametric 3D modeling as a method for early stage design optimization - A review. **Energies**, v. 10, n. 5, p. 637, May 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10050637>.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, Sept. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.

VARGAS, Dênis E. C. Um estudo dos parâmetros do algoritmo NSGA-II com o operador SBX em problemas de otimização estrutural multiobjetivo. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 2., 2018. DOI: <https://doi.org/10.5540/03.2018.006.02.0333>.

VAZQUEZ, E.; DUARTE, J.; POERSCHKE, U. Masonry screen walls: a digital framework for design generation and environmental performance optimization. **Architectural Science Review**, v. 63, n. 3, p. 262-274, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1749552>.

VIERLINGER, R. **Octopus**. 2021. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/app/octopus>. Acesso em: 20 maio 2021.

WAGDY, A.; FATHY, F. A parametric approach for achieving optimum daylighting performance through solar screens in desert climates. *Journal of Building Engineering*, v. 3, p. 155-170, Sept. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.07.007>.

WORTMANN, T.; COSTA, A.; NANNICINI, G.; SCHROEPFER, T. Advantages of surrogate models for architectural design optimization. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, v. 29, n. 4 (Special issue: Generative and evolutionary design exploration), p. 471-481, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890060415000451>.

WORTMANN, Thomas. Model-based optimization for architectural design: optimizing daylight and glare in Grasshopper. **Technology|Architecture + Design**, v. 1, n. 2: Simulations: Modeling, Measuring and Disrupting Design), p. 176-185, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/24751448.2017.1354615>.

YI, H.; KIM, M.-J.; KIM, Y.; KIM, S.-S.; LEE, K.-I. Rapid simulation of optimally responsive façade during schematic design phases: use of a new hybrid metaheuristic algorithm. **Sustainability**, v. 11, n. 9, p. 2681, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11092681>.

YI, Y. K. Building facade multi-objective optimization for daylight and aesthetical perception. **Building and Environment**, v. 156, p. 178-190, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.002>.

ZANI, A.; ANDALORO, M. DEBLASIO, L.; RUTTICO, P.; MAININI, A. G. Computational design and parametric optimization approach with genetic algorithms of an innovative concrete shading device system. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1473-1483, May 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.310>.

1 Rodolfo Rodrigo do Nascimento Biller

Arquiteto e Urbanista pelo Universidade Presbiteriana Mackenzie. Mestrando no Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade na Universidade Estadual de Campinas. Endereço postal: R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-889

2 Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris

Falecida em 11.06.2021. Foi Arquiteta e Urbanista pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Mestre em Tecnologia do Ambiente pela Universidade de São Paulo e doutora em Engenharia Civil também pela Universidade de São Paulo. Era Professora Assistente na Universidade Estadual de Campinas.

3 Daniel de Carvalho Moreira

Arquiteto e Urbanista pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Mestrado em Multimeios e Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas. Endereço postal: R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-889