

Design Algorítmico Aplicado ao Processo de Projeto de Proteções Solares

Algorithmic Design Applied to the Solar Shading Design Process

Nicolle Salgado Silva, graduanda, UFMG

collesalgado@gmail.com

Rejane Magiag Loura, doutora, UFMG

rejane79@ufmg.br

Número da sessão temática da submissão – [06]

Resumo

O processo tradicional de projeto e dimensionamento de proteções solares ainda demanda esforço manual significativo dos arquitetos, o que dificulta sua aplicação. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um algoritmo capaz de adaptar e automatizar a metodologia de projeto para proteções solares recomendada pelo Anexo I do RTQ-R. O algoritmo foi construído no Grasshopper e executa todos os cálculos necessários automaticamente, representando os resultados finais por meio da carta solar e da tabela de temperaturas médias, além de gerar alternativas de proteções para o contexto analisado. Os testes demonstraram sua eficiência na tradução dos procedimentos originais para o ambiente computacional, embora ainda haja necessidade de aperfeiçoamento das alternativas geradas. Conclui-se que a ferramenta otimiza o tempo e esforço, ampliando as possibilidades de exploração e análise no processo de projeto, sem substituir a atuação crítica do projetista.

Palavras-chave: Proteção solar; Algoritmo; Design generativo;

Abstract

The traditional process of designing and dimensioning solar shading devices still demands significant manual effort from architects, which hinders its practical application. This study proposes the development of an algorithm capable of adapting and automating the design methodology for solar shading devices recommended by Annex I of the RTQ-R. The algorithm was built in Grasshopper and automatically performs all required calculations, representing the final results through a solar chart and an average temperature table, in addition to generating alternative shading solutions for the analyzed context. The tests demonstrated its efficiency in translating the original procedures into a computational environment, although there is still a need to improve the generated alternatives. It is concluded that the tool optimizes time and effort, expanding exploration and analysis possibilities within the design process without replacing the architect's critical role.

Keywords: Solar shading; Algorithm; Generative design;

1. Introdução

Nos últimos 20 anos, o design computacional trouxe grandes inovações para o campo da arquitetura. A integração do processo de projeto a métodos como o design paramétrico, algorítmico e generativo surge como resposta à complexidade dos desafios da arquitetura no século XXI. Essas novas estratégias possibilitam projetar com maior assertividade e de forma otimizada, revolucionando os processos tradicionais de projeto, antes baseados principalmente em tarefas manuais (Caetano et al., 2019).

Caetano et al. (2019) definem o termo “Design Computacional” como um processo que se beneficia das capacidades computacionais para desenvolver projetos, por meio da: automatização de procedimentos de projeto, paralelização das tarefas, gestão de grandes quantidades de informação, incorporação rápida de mudanças ou apoio aos projetistas nos processos de design da forma.

A aplicação do design computacional na arquitetura não necessariamente significa uma grande mudança no processo de projeto tradicional. Trata-se, em suma, de um método. Diferente de abordagens baseadas em inteligência artificial que buscam automatizar decisões projetuais e, por vezes, obscurecem os critérios adotados em cada escolha, o design computacional segue com a participação e análise crítica do projetista responsável. Nesse sentido, observa-se um amplo potencial de aplicação do design computacional no campo de atuação da arquitetura.

Autores como Luciano et. al (2023) e Mairink et. al (2019) demonstraram em suas pesquisas que o uso de algoritmos, simulações integradas e estruturas paramétricas é um processo válido para embasar tomadas de decisão do projetista, ampliando sua capacidade de experimentação e análise. A ferramenta Wyvern Bioclimático, desenvolvida por Luciano et. al (2023), integra o modelo tridimensional no Rhinoceros ao design algorítmico no Grasshopper para fornecer informações sobre a carta solar, obstruções do entorno e análise de ventos. Testada com alunos de arquitetura da Universidade Federal de Juiz de Fora, a ferramenta revelou-se uma aliada no aprendizado, facilitando a compreensão dos conceitos e otimizando a relação entre tempo e praticidade no processo projetual.

Na mesma direção, Mairink et al. (2019) aplicaram o design algorítmico e generativo para avaliar proteções solares em fachadas oeste, com foco na redução do consumo energético em edificações comerciais. O estudo comparou alternativas de brises dimensionados de forma tradicional com aqueles gerados pelo algoritmo e concluiu que as soluções otimizadas computacionalmente apresentaram melhor desempenho nas simulações termoenergéticas. As autoras destacam que o uso adequado de dispositivos de sombreamento pode trazer impactos positivos para o desempenho de edificações, especialmente aquelas com grandes áreas envidraçadas, e que a simulação paramétrica constitui um recurso valioso para apoiar profissionais nos processos de tomada de decisão.

Sob esse contexto, o estudo apresentado neste artigo tem como objetivo contribuir com a otimização do processo de projeto de dispositivos de proteção solar por meio da aplicação do design computacional algorítmico. Em um país tropical como o Brasil, a utilização desses dispositivos é benéfica para o desempenho térmico e melhoria da eficiência energética das

edificações (Pereira, Souza, 2008). No entanto, o processo de projeto tradicional das proteções solares ainda exige muito esforço manual dos arquitetos, o que dificulta sua aplicação em contextos práticos, por demandar tempo e esforços consideráveis.

O presente trabalho baseia-se na metodologia apresentada no Anexo 1 do antigo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edificações Residenciais (RTQ-R), e no trabalho de Pereira e Souza (2008), que o originou. Esse anexo tem como objetivo auxiliar no dimensionamento de proteções solares e sua metodologia permanece válida, embora não tenha sido atualizada para integrar os manuais da Instrução Normativa Inmetro (INI-R). Segundo o próprio RTQ-R, “este método possui várias etapas, às vezes morosas e complexas” (INMETRO, 2012, p.8), motivo pelo qual o documento fornece cartas solares prontas para “as cidades cujas Normais Climatológicas de 1961–1990 estavam disponíveis” (INMETRO, 2012, p.8). Tal limitação evidencia a necessidade de ferramentas que automatizem o processo e ampliem sua aplicabilidade.

Nesse sentido, como produto final, foi desenvolvido um algoritmo na ferramenta Grasshopper, no software Rhinoceros, que automatiza o método proposto no RTQ-R e o adapta para aplicação em qualquer localidade do Brasil, desde que haja disponível um arquivo climático no formato .epw. Essa solução permite maior flexibilidade de uso, rapidez na geração de alternativas e integração com modelos tridimensionais, reforçando o potencial do design algorítmico como instrumento pedagógico e de apoio à decisão projetual.

2. Procedimentos Metodológicos

A metodologia deste estudo aplica os princípios do Metadesign para formalização do processo de projeto de proteções solares e organização do conhecimento em sistemas. Tal abordagem promove a abstração do processo de criação e independência daquele que o cria, tornando-o aplicável em outros contextos (Vassão, 2010). O objetivo não é projetar um único elemento arquitetônico muito eficiente, mas reconhecer as competências e variáveis envolvidas e consolidá-las em um processo capaz de gerar múltiplas soluções adaptáveis a diferentes contextos.

Assim, a primeira etapa envolveu uma revisão bibliográfica e estudo dos métodos mais relevantes para o projeto e dimensionamento de proteções solares. A fundamentação teórica incluiu literatura especializada como Olgyay (1957), Frola (2004), e Lamberts e Dutra (2014). A metodologia proposta por Pereira e Souza (2008), que posteriormente culminou no Anexo 1 – Dispositivos de Proteção Solar em Edificações Residenciais, do antigo RTQ-R, é um aprimoramento do método de Frola (2004) e foi escolhida para orientar o desenvolvimento do algoritmo neste trabalho.

Em seguida, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre design algorítmico e performativo, simulação térmica e modelagem paramétrica. Com base nessa revisão, verificou-se que o conjunto de plugins Ladybug Tools, integrado ao Grasshopper no software Rhinoceros, tem sido amplamente utilizado no campo da arquitetura e do design para análises térmicas, climáticas e de desempenho ambiental. Sua integração direta com modelos tridimensionais, a variedade de análises disponíveis, tempo reduzido de processamento e a compatibilidade

com outros plugins justificaram a escolha do Grasshopper como plataforma para o desenvolvimento do algoritmo proposto.

Após a definição da metodologia a ser adaptada e da plataforma de desenvolvimento, iniciou-se o processo de construção computacional do algoritmo, estruturado nas seguintes etapas:

1. Subdivisão da metodologia de projeto em fases/grupos, a fim de facilitar sua tradução para o ambiente computacional;
2. Definição dos requisitos para os dados de entrada. Considerando geometria, dados climáticos, dados da tipologia e orientação geográfica;
3. Definição das simulações necessárias para obtenção das informações relevantes ao processo;
4. Elaboração do fluxograma inicial do algoritmo, descrevendo a sequência de interações;
5. Caracterização da geometria paramétrica das proteções solares, com definição dos parâmetros mutáveis e das possíveis formas/combinções;
6. Pesquisa e seleção de plugins para geração multiobjetiva de alternativas;
7. Construção de uma interface amigável interativa, voltada à usabilidade do usuário e clareza na apresentação dos resultados;
8. Realização de testes e análises dos resultados obtidos, visando avaliar o desempenho do algoritmo quanto à coerência e eficiência em comparação com o processo tradicional;
9. Elaboração de um vídeo tutorial para orientação do usuário.

3. Resultados

A aplicação do processo descrito na metodologia resultou em um algoritmo que traduz o raciocínio projetual em uma sequência lógica de avaliações automatizadas. A Figura 1 apresenta os grupos decorrentes da subdivisão em etapas da metodologia de projeto e uma visão geral do algoritmo construído no Grasshopper, com suas partes integrantes organizadas por cores conforme os grupos correspondentes.

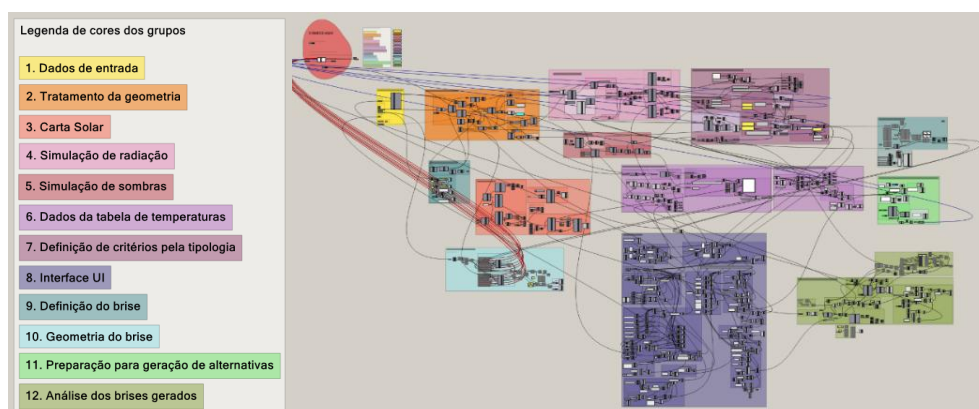


Figura 1: Grupos da Subdivisão da Metodologia de Projeto e algoritmo construído no Grasshopper. Fonte: As autoras (2025)

O fluxograma simplificado do processo de análise do algoritmo é sintetizado pela Figura 2.

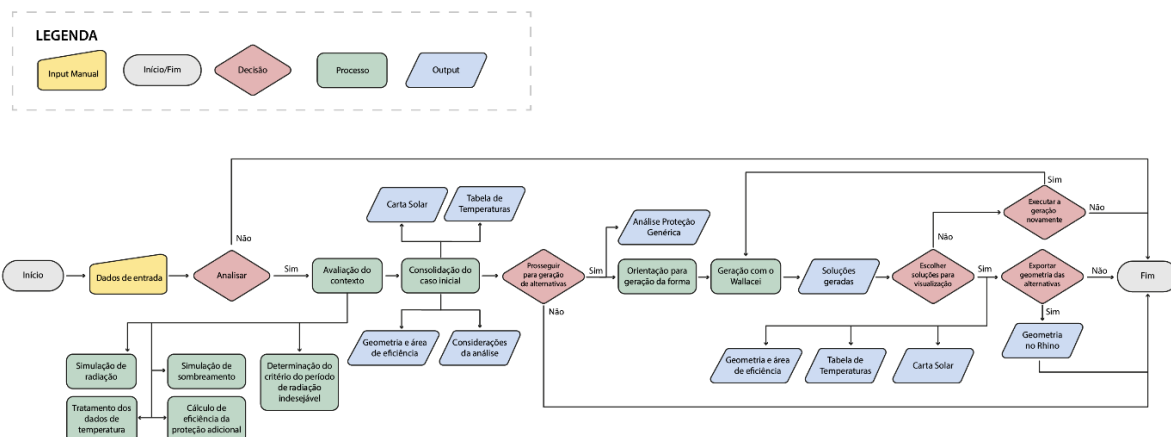


Figura 2: Fluxograma simplificado do algoritmo desenvolvido. Fonte: As autoras (2025).

Os dados de entrada necessários para utilização do algoritmo envolvem: Arquivo Bioclimático em .epw da localização do projeto; modelo tridimensional do Rhinoceros com os ambientes separados em blocos, aberturas como superfícies e geometria do entorno; Ângulo de orientação do norte e Tipologia do ambiente analisado, dentre comercial ou residencial. O campo “sombreamentos adicionais” permite que o usuário adicione uma proteção solar já projetada, com o objetivo de analisar seu desempenho. Esses dados são adicionados por meio de uma interface mais amigável que o ambiente do Grasshopper, apresentada na Figura 3. Todas as interações do usuário com o algoritmo acontecem por meio da interface Ui.

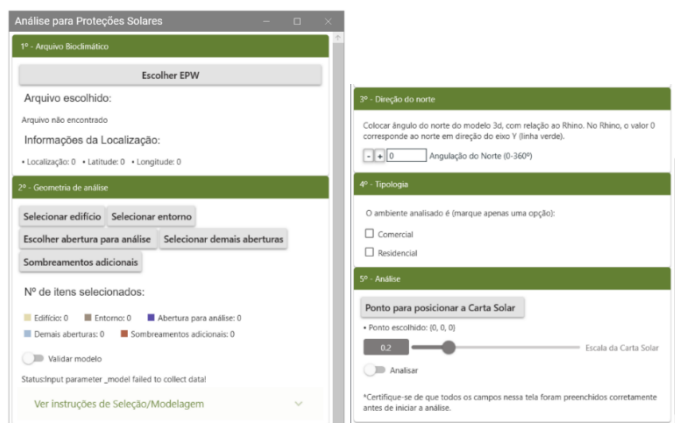


Figura 3: Interface para configuração dos dados de entrada do algoritmo. Fonte: As autoras (2025)

A avaliação é realizada para uma abertura por vez e, por isso, um dos dados geométricos solicitados é a “abertura para análise”. Todos os resultados apresentados posteriormente correspondem à orientação e às condições específicas dessa abertura. Embora não seja possível realizar a análise de múltiplas aberturas simultaneamente, o processo pode ser executado novamente para qualquer outra abertura.

O processo de projeto e dimensionamento das proteções solares de Pereira e Souza (2008) envolve a sobreposição manual de uma máscara de radiação na Carta Solar para identificar os períodos em que a radiação incidente na fachada é superior a 500W ou 600W. Essa “máscara de sobreposição” vem da metodologia de Koenigsberger *et al.* (1977), desenvolvida a partir de cálculos que determinam a radiação solar global incidente sobre planos verticais em

condições de céu claro. Para possibilitar a interpretação dos dados de radiação pelo algoritmo, o método de sobreposição manual não poderia ser utilizado. Portanto, utilizou-se o componente “HB Annual Irradiance” do Ladybug Tools para executar a simulação de radiação incidente na fachada, visto que seu funcionamento é condizente com o método original. A partir dessa simulação, foi possível extrair uma mancha de radiação muito semelhante à da “máscara de sobreposição” utilizada no processo de projeto tradicional.

Além da análise de radiação, é igualmente importante identificar as áreas sombreadas para realizar o dimensionamento adequado das proteções solares. No algoritmo desenvolvido, essa análise é conduzida em duas etapas: a primeira corresponde à representação visual na carta solar, obtida por meio do componente Sky Mask; e a segunda consiste na conversão do sombreamento em dados quantitativos, realizada com o componente LB Direct Sun Hours. Ambos os componentes utilizados integram o conjunto Ladybug Tools. Esse processo possibilitou a representação do sombreamento decorrente da orientação da fachada e de elementos arquitetônicos ou do entorno, tanto na carta solar quanto na tabela de temperaturas.

A Tabela de Temperaturas organiza os dados das temperaturas médias mensais horárias, classificadas em função da temperatura neutra. Conforme a metodologia de Pereira e Souza (2008), a determinação desses valores requer o tratamento dos dados climáticos pelo ajuste dos dados locais à curva-padrão da Organização Mundial de Meteorologia (WMO). Em seguida, calcula-se a temperatura neutra mensal e classificam-se os resultados conforme a variação obtida. Assim como ocorre com os dados de radiação, as informações de temperatura são extraídas do arquivo climático (.epw) definido nos dados de entrada, e o algoritmo realiza automaticamente todos os cálculos necessários para a geração da tabela, dispensando qualquer intervenção do usuário.

A obtenção dos dados quantitativos de sombreamento permitiu sua integração à tabela de temperaturas, um aperfeiçoamento em relação à metodologia original. Dessa forma, a tabela passa a representar, por meio de uma escala de cores, tanto a classificação com relação à temperatura neutra quanto o sombreamento da abertura analisada. Com isso, torna-se possível visualizar simultaneamente os dados de radiação, temperatura e sombreamento, tanto na tabela quanto na carta solar, oferecendo uma leitura integrada das condições analisadas. A Figura 4 demonstra como esses dados são representados.

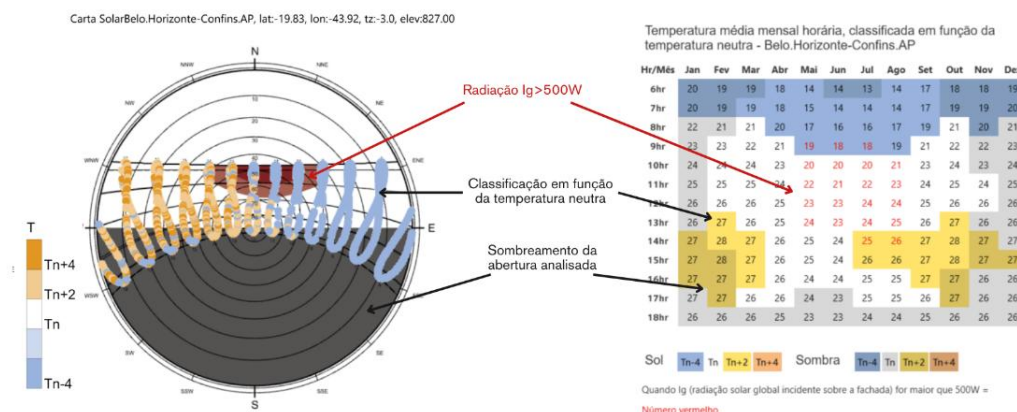


Figura 4: Dados indicados na Carta Solar e na Tabela de Temperaturas. Fonte: As autoras (2025)

A interface também possibilita que a visualização dos dados apresentados na carta solar seja personalizável pelo usuário, como demonstrado pela Figura 5.

Aba de controle da carta solar na interface



Algumas possibilidades de visualização da carta solar

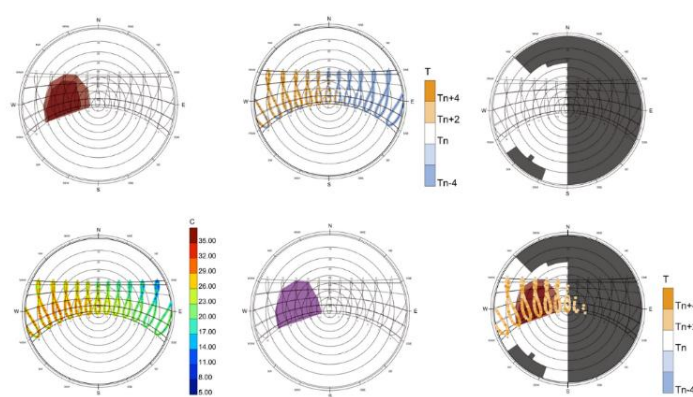
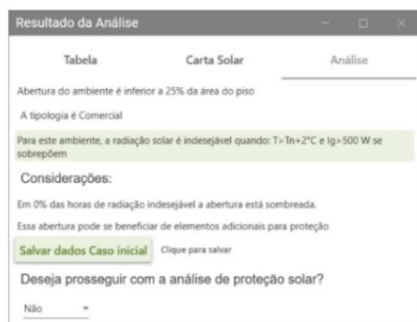


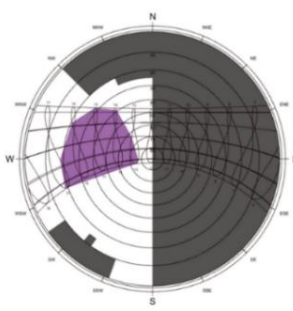
Figura 5: Aba de “Carta Solar” da interface e possibilidades de visualização da carta solar. Fonte: As autoras (2025)

A partir dos dados de entrada e das simulações descritas, o algoritmo realiza a análise e identifica as horas de radiação solar indesejável na fachada. Esse período de radiação indesejável pode ser visualizado tanto na tabela de temperaturas quanto na carta solar e é o que orienta a geração de alternativas na etapa posterior. As considerações resultantes são apresentadas na aba de “Análise”, ilustrada na Figura 6.

Aba de análise da interface



Período de radiação indesejável na carta solar



Período de radiação indesejável na Tabela de Temperaturas (contorno preto)



Hr/Mês	Jan	Feb	Mar	Abr	Ma	Jun	Jul	Ag	Set	Out	Nov	Dez
6hr	20	19	19	18	15	14	13	14	17	18	18	19
7hr	20	19	19	18	15	14	13	14	17	18	18	19
8hr	22	21	21	20	17	16	16	17	19	21	20	21
9hr	23	23	22	21	19	18	18	19	21	22	22	23
10hr	24	24	24	23	20	20	20	21	23	24	23	24
11hr	25	25	25	24	22	21	22	23	24	25	24	25
12hr	26	26	26	25	23	23	24	24	25	26	26	26
13hr	26	27	26	25	24	23	24	25	26	27	26	26
14hr	27	28	27	26	25	24	25	26	27	28	27	27
15hr	27	28	27	26	25	24	25	26	27	28	27	27
16hr	27	27	27	26	24	24	25	25	27	27	26	26
17hr	27	27	26	26	24	23	25	25	26	27	26	26
18hr	26	26	26	25	23	23	24	24	25	26	26	26

Figura 6: Aba de “Análise” da interface e mancha de radiação indesejável indicada na carta solar (roxo) e na tabela de temperaturas (contorno preto). Fonte: As autoras (2025)

Ao final da primeira etapa de avaliação, o usuário possui a opção de prosseguir ou não para a geração de alternativas. Essa etapa consiste em uma geração multiobjetiva de opções de proteções solares para a situação avaliada, conduzida pelo motor evolutivo do plugin Wallacei. A ferramenta realiza variações dos parâmetros inseridos, avaliando múltiplas combinações possíveis, selecionando e aprimorando as soluções com melhor desempenho em relação aos objetivos estabelecidos (Makki et al., 2019). Ela também permite analisar e escolher as alternativas mais equilibradas e eficientes para a situação de projeto. No caso das proteções

solares do algoritmo desenvolvido, os parâmetros incluem: forma da proteção (horizontal, vertical ou mista); posição (lado direito, esquerdo ou ambos); comprimento; profundidade; angulação e número de aletas.

Os objetivos envolvidos na geração de alternativas são: minimizar incidência solar no período de radiação indesejável, minimizar sombreamento nos períodos em que a radiação solar não é indesejável e maximizar a eficiência da área total da proteção solar. Após a obtenção das soluções, o usuário seleciona aquelas que gostaria de analisar com mais detalhes. É possível visualizar a geometria, a tabela de temperaturas e a máscara de sombras para cada uma das soluções exportadas, comparando-as com a situação inicial sem proteção solar. O algoritmo também apresenta uma escala de cores na geometria da proteção solar, representando a porcentagem de horas indesejáveis que cada área é capaz de proteger, conforme ilustrado pela Figura 7.

Aba de controle da visualização das soluções finais



Geometria da solução, com indicação da % de horas indesejáveis protegidas por cada área

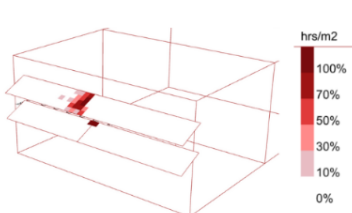


Tabela de temperaturas indicando o sombreamento da solução

Resultado brise

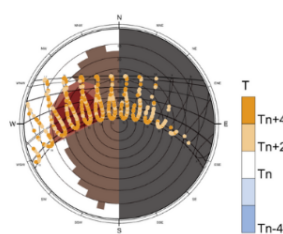
Tabela de temperaturas

Estatísticas

Temperatura média mensal horária, classificada em função da temperatura neutra - Porto Alegre

Hr/Mês	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
6hr	21	20	20	17	12	12	14	11	12	16	17	20
7hr	22	21	20	17	13	13	14	11	12	17	17	21
8hr	23	23	22	19	14	14	16	13	14	18	18	23
9hr	25	24	23	20	15	16	17	15	16	20	21	25
10hr	27	26	25	22	17	17	18	17	18	22	22	26
11hr	28	27	26	23	18	18	20	18	19	23	23	28
12hr	29	28	27	24	19	19	21	19	20	24	24	29
13hr	30	28	28	24	19	20	21	20	21	25	25	29
14hr	30	29	28	25	20	20	22	21	21	26	25	30
15hr	31	29	29	25	20	20	22	21	22	26	26	31
16hr	30	29	29	25	19	20	22	20	21	25	25	30
17hr	30	29	28	25	19	20	21	20	21	25	25	30
18hr	29	28	27	24	19	19	21	19	20	24	24	29
Sol	Tn-4	Tn	Tn+2	Tn+4	Sombra	Tn-4	Tn	Tn+2	Tn+4			

Carta solar com a máscara de sombras da solução (em marrom)



Aba de Estatísticas

Resultado brise	
Tabela de temperaturas	Estatísticas
Solução (8.6)	
96% das horas indesejáveis estão cobertas - O brise cobriu 77% de horas além do necessário (horas onde a radiação solar não era indesejável)	
GEOMETRIA DA PROTEÇÃO SOLAR:	
HORIZONTAL	
Ângulo de inclinação (°): 65	
Profundidade (m): 0.8	
Comprimento total (m): 5.75	
Número de aletas: 2	

Figura 7: Visualização das soluções geradas. Fonte: As autoras (2025)

Por fim, as geometrias escolhidas podem ser exportadas para o ambiente do Rhinoceros, permitindo ao usuário realizar ajustes e modificações conforme as demandas específicas do projeto. Após essas alterações, é possível executar novamente o processo de análise, reavaliando o desempenho das novas configurações propostas.

4. Análises dos Resultados e Discussões

A aplicação do algoritmo retorna 3 tipos de produtos, através dos quais é possível verificar o desempenho e a coerência das suas principais funcionalidades. O primeiro é a visualização da tabela de temperaturas, o segundo a carta solar e o terceiro as alternativas geradas pelo mecanismo evolutivo.

A Figura 8 apresenta uma comparação entre a tabela gerada pelo algoritmo e aquela apresentada por Pereira e Souza (2008), utilizada como referência metodológica neste trabalho. Observa-se uma pequena divergência nos valores de temperatura média entre ambas, decorrente da diferença nas bases de dados climáticos adotadas. Enquanto Pereira e Souza utilizam as Normais Climatológicas do INMET (1961–1990), a tabela gerada pelo algoritmo emprega o arquivo climático (.epw) do INMET, referente ao mesmo período, que representa um ano meteorológico típico construído a partir dessas normais. Apesar dessas diferenças, a classificação conforme a temperatura neutra, representada pelas cores azul, amarelo e laranja, está coerente. Ademais, a tabela do algoritmo acrescenta novas informações relevantes: o sombreamento da abertura, indicado por tons acinzentados; o período em que a radiação solar global incidente na fachada está acima de 500W, destacada pela cor vermelha nos números; e a possibilidade de visualização do período de radiação indesejável na fachada, ativada pelo botão abaixo da tabela.



Figura 8: Comparação entre 3 Tabelas de Temperatura para a cidade de Porto Alegre. Fonte: Pereira e Souza (2008) e as autoras (2025).

A figura 9 ilustra duas situações diferentes, com suas respectivas cartas solares e tabelas.

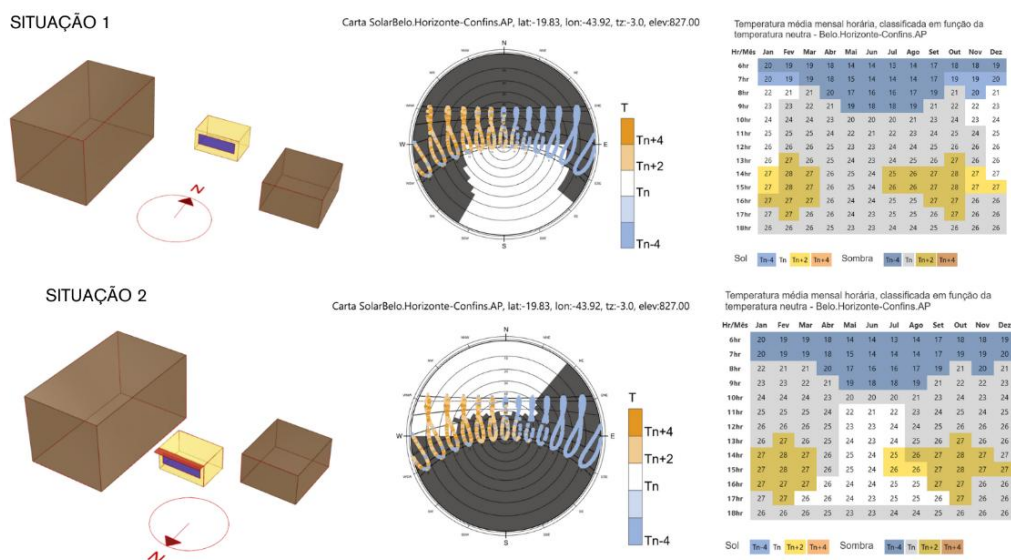


Figura 9: Comparação do sombreamento representado na carta solar e na tabela de temperaturas para 2 situações diferentes. Fonte: As autoras (2025)

As mesmas informações visualizadas na tabela de temperaturas podem ser simultaneamente analisadas na carta solar. Foram realizados diversos testes com modelos tridimensionais em diferentes contextos, e concluiu-se que os resultados de sombreamento apresentados pelo algoritmo são coerentes com a geometria e a orientação das aberturas analisadas, conforme demonstrado pela Figura 9.

Quanto à avaliação da radiação, observou-se que como os valores de radiação direta e difusa são obtidos através do arquivo climático (.epw) definido nos dados de entrada, os resultados variam a depender da localidade. Essa característica representa uma ampliação em relação ao método original, que adota uma máscara de sobreposição única e genérica com o propósito de simplificar as etapas de cálculo e viabilizar sua aplicação prática no processo de projeto. No algoritmo desenvolvido, a automatização dos cálculos complexos elimina a necessidade de intervenção do usuário, permitindo a geração de resultados específicos conforme a orientação, contexto e a localidade analisadas. Além disso, constatou-se que existe uma grande diferença nas manchas de radiação geradas através do Céu mais frequente (dados obtidos diretamente do .epw, que simula um ano típico) e aquelas geradas através do céu claro. A Figura 10 apresenta uma comparação entre as cartas solares produzidas para a cidade de Porto Alegre na metodologia de Pereira e Souza (2008), pelo algoritmo utilizando dados de céu mais frequente, e pelo algoritmo utilizando dados de céu claro. Optou-se por prosseguir com a utilização dos dados de céu claro no fluxo do algoritmo, por gerar a mancha mais parecida com o método original e estar em conformidade com as recomendações de Frota (2004) para os cálculos de radiação e dimensionamento do projeto para o pior cenário.

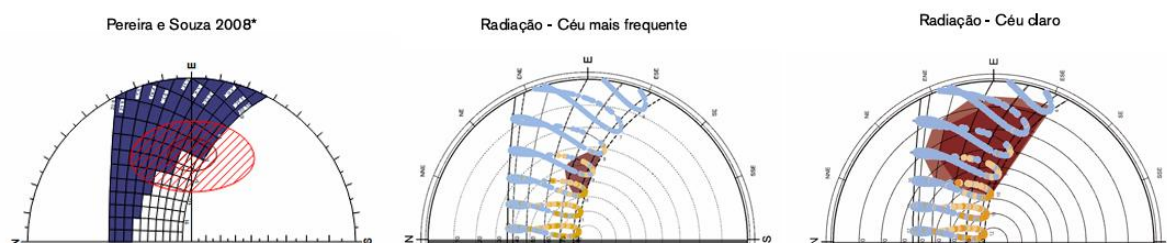


Figura 10: Comparação entre 3 cartas solares para a orientação Leste da cidade de Porto Alegre, com metodologias diferentes para geração da mancha de radiação. Fonte: Pereira e Souza (2008) e As autoras (2025).

A geração de alternativas através do Wallacei é capaz de produzir 80 opções em um intervalo de 2-4 minutos, em um computador com processador Intel Core i5-8300H e memória RAM de 8GB. Observou-se que, dada a natureza evolutiva do mecanismo, quanto maior o número de opções geradas, melhores tendem a ser os resultados obtidos. No entanto, há uma limitação na variabilidade morfológica das soluções, uma vez que as geometrias das proteções solares adotadas pelo algoritmo seguem configurações tradicionais, compostas por brises horizontais, verticais ou mistos, com lâminas planas e dimensões uniformes entre as aletas. A Figura 11 apresenta algumas alternativas geradas para uma fachada oeste sem obstruções, na cidade de Belo Horizonte.

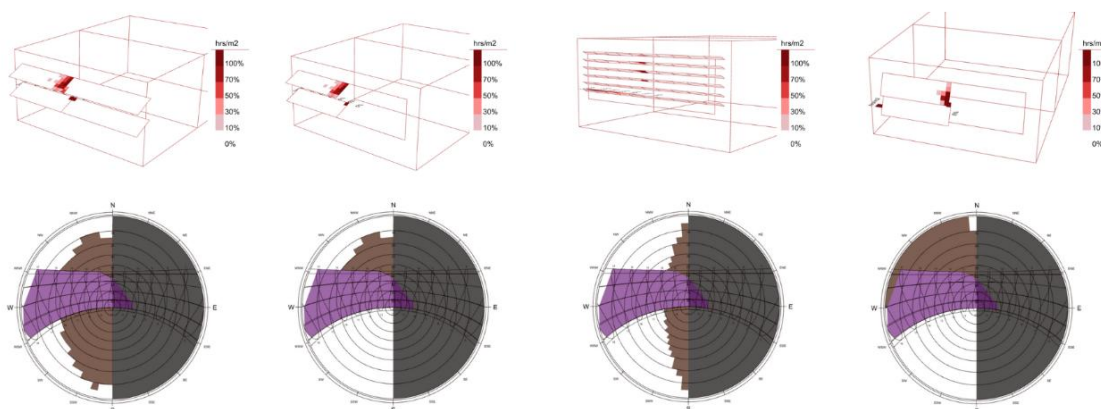


Figura 11: Comparação entre 4 soluções de proteção solar, com indicação em escala de cores da % de horas indesejáveis protegidas por cada área e representação da máscara de sombras correspondente (em marrom). Fonte: As autoras (2025).

A visualização final das soluções contribui para facilitar a interpretação do usuário, pois possibilita a análise simultânea da mancha de horas indesejáveis na carta solar (destacada em roxo), do sombreamento da proteção (marrom) e da própria fachada (cinza). Observa-se que ainda há fragilidades nas alternativas propostas pelo algoritmo, pois nem todas são eficientes para o contexto. Apesar disso, a simplicidade da geometria adotada contribui para a compreensão do desempenho de cada alternativa e, considerando o aspecto didático, é interessante por oferecer uma base de referência que estimula a reflexão e a análise crítica do usuário. Na escolha da solução final, é importante que o arquiteto analise, faça alterações pertinentes e teste suas próprias criações com auxílio do algoritmo.

5. Considerações Finais

O algoritmo desenvolvido demonstrou desempenho satisfatório e coerente com a metodologia de referência, adaptando de forma eficiente o processo de projeto e dimensionamento de proteções solares ao ambiente computacional. No entanto, há necessidade de aperfeiçoamento da geometria e da eficiência das soluções geradas. Contudo, a possibilidade de geração de múltiplas alternativas e avaliação de uma proteção personalizada inserida pelo usuário reforça o caráter iterativo e exploratório do algoritmo desenvolvido, que não busca substituir o processo de projeto arquitetônico, mas sim ampliar suas possibilidades. Ele automatiza as etapas de cálculo mais complexas para que o projetista possa se concentrar na análise dos resultados e explorar diversas alternativas em menor tempo e com menor esforço em comparação ao processo manual. Dessa forma, o algoritmo atua como um instrumento de apoio à decisão projetual, mantendo o projetista no centro do processo, responsável pela interpretação crítica dos resultados e pela definição das soluções mais adequadas a cada contexto.

Para aperfeiçoamentos futuros, sugere-se a inclusão de análises complementares, como conforto térmico, iluminação natural e ofuscamento. Tais aprimoramentos podem contribuir para avaliações mais precisas e para uma compreensão mais abrangente do desempenho das

soluções, oferecendo dados relevantes sobre o potencial das proteções solares e adequação de sua geometria. Ademais, a realização de um teste de usabilidade com profissionais da área de arquitetura permitiria avaliar a clareza da interface, a facilidade de operação do algoritmo e sua aplicabilidade em contextos reais de projeto, fornecendo informações para ajustes e melhorias da ferramenta.

Referências

- CAETANO, Inês; SANTOS, Luís; LEITÃO, António. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 287–300, jun. 2019.
- FROTA, A.B. **Geometria da insolação**. São Paulo: Geros, 2004.
- INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R**. Portaria Inmetro nº 18, de 16 de janeiro de 2012. Rio de Janeiro, 2012.
- KOENIGSBERGER, O. et al. **Viviendas y Edificios en Zonas Calidas y Tropicales**. Madrid: Paraninfo, 1977.
- LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª edição. São Paulo, 2014.
- LUCIANO, Lucas de Castro; REIZINGER, Isabela Wanchutz Brito; RABITE, Caio Augusto; ZAMBRANO, Letícia Maria de Araújo; MARQUES, Aline Calazanz. (BIO)CLIMATIC WYVERN: Tool for Environmental Analysis in the Initial Project Stages. In: International Conference of the Ibero-American Society of Digital Graphics (SIGraDi), 17., 2023, Punta del Este. **Anais [...]**. Punta del Este: Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo (UdelaR), 2023. p.1121-1132.
- MAIRINK, Ana Júlia Maia; VILELA, Jacqueline Alves; GARCIA, Marina da Silva; VELOSO, Ana Carolina de Oliveira; SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. Simulação paramétrica de Brise-Solei em Fachada Oeste para Redução de Consumo Energético em Edificação Comercial. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15., 2019. **Anais [...]**. [S. l.], 2019. p. 2494–2503.
- MAKKI, M.; SHOWKATBAKHS, M.; SONGS, Y. *Wallacei Primer 2.0*. **Wallacei**. 2019. Disponível em: <https://www.wallacei.com/>. Acesso em: 8 de nov. 2025
- OLGYAY, Victor; OLGYAY, Aladar. **Solar Control and Shading Devices**. Princeton: Princeton University Press, 1957.
- PEREIRA, I. M.; SOUZA, R. V. G. Proteção Solar em Edificações Residenciais e Comerciais: Desenvolvimento de Metodologia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 12, Fortaleza, 2008. **Anais[...]** Fortaleza, CE: Antac, 2008.
- VASSÃO, Caio Adorno. **Metadesign: ferramentas, estratégias e ética para a complexidade**. São Paulo: Blucher, 2010.