



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Natália de Queiroz Nome

**O PROJETO DA ENVOLTÓRIA GUIADO POR DESEMPENHO: MÉTODO PARAMÉTRICO  
INTEROPERÁVEL COM ENFOQUE NO DESEMPENHO TÉRMICO, VISUAL E LUMINOSO**

Florianópolis

2023

Natália de Queiroz Nome

**O PROJETO DA ENVOLTÓRIA GUIADO POR DESEMPENHO: MÉTODO PARAMÉTRICO  
INTEROPERÁVEL COM ENFOQUE NO DESEMPENHO TÉRMICO, VISUAL E LUMINOSO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa  
Catarina como requisito para a obtenção do título de Doutora  
em Arquitetura e Urbanismo

Orientador(a): Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira Ph.D.

Florianópolis

2023

Queiroz, Natália

O PROJETO DA ENVOLTÓRIA GUIADO POR DESEMPENHO : MÉTODO  
PARAMÉTRICO INTEROPERÁVEL COM ENFOQUE NO DESEMPENHO TÉRMICO,  
VISUAL E LUMINOSO / Natália Queiroz ; orientador, Fernando Oscar  
Ruttkay Pereira, 2023.

287 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina,  
Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e  
Urbanismo, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Fachadas, controle solar,  
otimização, modelagem paramétrica. I. Oscar Ruttkay Pereira,  
Fernando. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa  
de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Natália de Queiroz Nome

## **O PROJETO DA ENVOLTÓRIA GUIADO POR DESEMPENHO: MÉTODO PARAMÉTRICO INTEROPERÁVEL COM ENFOQUE NO DESEMPENHO TÉRMICO, VISUAL E LUMINOSO**

A presente tese em nível de DOUTORADO foi avaliada e aprovada por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Luís Fernandes, Ph.D.  
Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.

Maria Gabriela Caffarena Celani, Ph.D.  
Universidade Estadual de Campinas. SP.

Fernando Simon Westphal, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina. SC.

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira  
Ph.D.

Orientador(a)

Florianópolis, 2023.

Ao Carlos e Helena.  
Em memória de Geovany Silva, Natália Queiroz (avó) e Faruk Nome.

# AGRADECIMENTOS

Aos estimados membros da banca examinadora, orientadores e colegas,

Com gratidão, dedico meus mais sinceros agradecimentos. Este trabalho não representa um fim, mas o início de uma jornada. Quero expressar minha gratidão a todos aqueles que contribuíram para a realização desta trajetória, que culmina na minha tese de doutorado.

Primeiramente, ao Professor Ph.D. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, meu orientador, cujo conhecimento, sabedoria foram essenciais para este trabalho. Suas críticas construtivas e inspiração são um importante aprendizado no meu percurso acadêmico.

Ao meu marido, Ph.D. Carlos Nome, cujo amor, apoio e encorajamento sempre estiveram presentes, não há palavras suficientes para expressar minha gratidão. Não seria possível a execução desta tese sem seu apoio incondicional. Meus pais, Vilma e Queiroz, vocês são minha fonte de força e inspiração ao longo de todos esses anos. Agradeço do fundo do coração por estarem ao meu lado em todas as etapas dessa caminhada.

Aos professores que me acompanharam nessa jornada acadêmica, em especial ao Professor Doutor Fernando Westphal, sou grata por suas valiosas contribuições, conselhos e orientações em momentos cruciais da minha pesquisa. Seu conhecimento, experiência e dedicação acadêmica foram fundamentais para a minha formação. Ao cientista Ph.D. Luís Fernandes, do *Lawrence Berkeley Laboratory*, pelas orientações, conselhos sábios e acolhimento acadêmico durante o período da pandemia de Covid e gravidez. Agradeço às suas horas de dedicação, e aprendizado inestimável. Agradeço aos Professores Doutores Regiane Pupo e Carlos Vaz pelo acolhimento e suporte durante os estágios iniciais na UFSC. Vocês foram fundamentais para a minha adaptação.

Aos amigos e colegas de doutorado, o caminho teria sido mais difícil sem a amizade e o apoio que compartilhamos. As discussões enriquecedoras no Laboratório de Conforto da UFSC proporcionaram um ambiente enriquecedor. Meus cunhados Marcelo e Juane Nome, por me receberem em sua casa por pouco mais de um ano durante o doutorado. E a Sophia Lomo que foi minhas mãos nos primeiros meses de vida de Helena.

Não posso deixar de prestar uma homenagem especial a três pessoas muito queridas, que infelizmente partiram durante o período que desenvolvi esta tese. Meu coração se alegra ao recordar meu sogro, Ph.D. Faruk Nome, um cientista brilhante e sagaz cuja paixão pelo

conhecimento e dedicação à pesquisa eram verdadeiramente inspiradoras. Sua mente ágil e sua busca por respostas me inspirou. Seu legado de excelência acadêmica, representatividade para América Latina e contribuições para o campo da ciência será eternamente valorizado.

Além disso, menciono minha amada avó, a qual carrego o mesmo nome, Natália Queiroz, cuja partida deixou um vazio. Sua alegria e experiência são fonte de inspiração. Sua partida repentina durante a elaboração desta tese deixou uma lacuna profunda, mas carrego comigo a certeza de que sua essência permeia toda minha trajetória.

Também é importante dedicar um parágrafo especial a um amigo querido que partiu prematuramente durante a dolorosa pandemia de covid. O Professor Doutor Geovany Silva, cuja ausência é profundamente sentida. Sua amizade, seu espírito contagiante e sua dedicação à área de Urbanismo deixaram uma marca em minha vida. Sua perda é uma lembrança dolorosa de como a vida pode ser frágil. Seu entusiasmo, perspicácia intelectual e sua presença alegre deixaram uma lacuna que jamais poderá ser preenchida. Agradeço por ter compartilhado momentos preciosos contigo, Samira, Sara e Sophia e por sua influência, que continuará a ecoar em nossos corações. Que seu legado seja lembrado e sua memória viva.

Meus sinceros agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio fundamental concedido na forma de bolsa e financiamento. Esta tese não seria possível sem o apoio da FAPESC à ciência no estado de Santa Catarina.

Por fim, quero expressar minha gratidão a todos pesquisadores que, mesmo sem conhecer pessoalmente, contribuíram para o avanço do conhecimento em minha área de estudo. Suas obras, artigos e pesquisas foram fontes inesgotáveis de inspiração e referência, moldando meu pensamento crítico e ampliando meus horizontes.

A todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para a conclusão deste trabalho, minha eterna gratidão. Cada palavra de incentivo, conselho e gestos de apoio foram essenciais para tornar esta jornada uma realidade. Que este agradecimento formal, porém cheio de emoção, alcance vocês como uma expressão da minha gratidão e apreço. Que esta tese também seja um tributo ao legado de todos aqueles que me apoiaram nesta trajetória.

Com profunda gratidão,  
Natália Queiroz.

# RESUMO

Esta tese propõe um processo integrado de modelagem paramétrica e indicadores de desempenho térmico, visual e luminoso para o projeto de elementos de controle solar em processos guiados por desempenho. Os objetivos desta pesquisa são a caracterização de parâmetros relevantes, o estabelecimento de um sistema de modelagem paramétrica, a criação de um modelo analítico unificado interoperável, a definição de algoritmos de otimização e a identificação de indicadores de desempenho. A tese é dividida em cinco capítulos: Introdução, Referencial teórico, Método, Resultados e Conclusões.

A introdução descreve as perguntas de pesquisa e objetivos do estudo. A justificativa e relevância da pesquisa estão relacionadas à necessidade de integrar a simulação computacional no processo de tomada de decisões, explorar o desempenho térmico, visual e luminoso, além de preencher a lacuna de pesquisa na concepção da janela sob o ponto de vista da morfogênese e fornece diretrizes para melhores soluções de controle solar em fachadas. A pesquisa tem como público-alvo pesquisadores, consultores e projetistas interessados em controle solar, simulação computacional e processos de projeto guiados por desempenho.

O referencial teórico aborda o controle solar em fachadas, explorando dispositivos, sombreamento e tipos de vidros, além de apresentar indicadores de desempenho e procedimentos de modelagem e otimização. O procedimento metodológico envolveu a sistematização de literatura recente e a análise de casos pré-existentes. Foram estabelecidos componentes de modelagem paramétrica e estratégias de modelagem flexíveis, compatíveis com o processo de projeto baseado em desempenho. O modelo integrado baseou-se no método de duas fases do *Radiance*, incorporando o método matemático RTS para avaliar o desempenho térmico. A análise foi realizada utilizando a fronteira de Pareto e considerando diferentes parâmetros de projeto. Foram utilizadas ferramentas de modelagem paramétrica, como *Rhinoceros 3D*, *Grasshopper* e *GhPython*, juntamente com plugins como *Ladybug/honeybee+* e *Octopus*, além dos softwares de simulação *Radiance* e *EnergyPlus*.

A pesquisa analisou a otimização de fachadas em três cidades brasileiras, levando em conta cinco indicadores de desempenho. As soluções ideais, identificadas nas fronteiras de Pareto, ressaltam a importância de equilibrar a escolha de vidros e elementos de sombreamento para uma otimização adequada. O modelo de otimização revelou combinações de geometria que se desviaram do padrão linear de dispersão em diversos indicadores, evidenciando a influência significativa da variação geométrica no desempenho final.

Em conclusão, esta tese contribui com um processo integrado e interoperável para o projeto de controle solar em fachadas, fornecendo diretrizes e ferramentas para a otimização do desempenho térmico e luminoso. Sugere-se a continuidade das pesquisas para explorar ainda mais os parâmetros e aprimorar as técnicas de modelagem e otimização.

**Palavras-chave: Fachadas, desempenho térmico, desempenho luminoso, controle solar, otimização, modelagem paramétrica.**

# ABSTRACT

This dissertation proposes an integrated process of parametric modeling and flexible modeling strategies, compatible with performance-based design processes. The research objectives include characterizing relevant parameters, establishing a parametric modeling system, creating a unified and interoperable analytical model, defining optimization algorithms, and identifying performance indicators. The dissertation is divided into five chapters: Introduction, Theoretical Framework, Method, Results, and Conclusions.

The introduction describes the research questions and objectives. The justification and relevance of the research lie in the need to integrate computational simulation into the decision-making process, explore thermal, visual, and daylighting performance, address the research gap in window design from the perspective of morphogenesis, and provide guidelines for improved solar control solutions in facades. The research targets researchers, consultants, and designers interested in solar control, computational simulation, and performance-based design processes.

The theoretical framework discusses solar control in facades, exploring shading devices, types of glass, and presenting performance indicators, modeling, and optimization procedures. The methodological approach involved literature review systematization and analysis of existing cases. Parametric modeling components and flexible modeling strategies were established, compatible with performance-based design processes. The integrated model was based on the two-phase method of Radiance, incorporating the RTS mathematical method to assess thermal performance. The analysis utilized the Pareto frontier and considered different design parameters. Parametric modeling tools such as Rhinoceros 3D, Grasshopper, and GhPython, along with plugins like Ladybug/honeybee+ and Octopus, as well as simulation software like Radiance and EnergyPlus, were employed.

The research examined facade optimization in three Brazilian cities, considering five performance indicators. The optimal solutions identified on the Pareto frontier highlight the importance of balancing the choice of glass and shading devices for adequate optimization. The optimization model revealed geometry combinations that deviated from the linear dispersion pattern in various indicators, indicating the significant influence of geometric variation on the final performance.

In conclusion, this thesis contributes to an integrated and interoperable process for solar control design in facades, providing guidelines and tools for optimizing thermal and luminous performance. Further research is suggested to further explore parameters and improve modeling and optimization techniques.

**Keywords: Facades, thermal performance, daylight performance, solar control, optimization, parametric modeling.**

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA CONCEITUAL DA TESE	7
FIGURA 2. INTERSECÇÕES DAS ABORDAGENS DA PESQUISA.	8
FIGURA 3. DIAGRAMA REVISÃO TEORIA PARTE 1 – SOLAR CONTROL.	12
FIGURA 4. DIAGRAMA REVISÃO TEORIA PARTE 1 – SHADING DEVICES.	13
FIGURA 5. DIAGRAMA REVISÃO TEÓRICA PARTE 2 – PROJETO GUIADO POR DESEMPENHO.	13
FIGURA 6. FACHADA OPACA. FONTE:TECTÓNICA MONOGRAFÍAS DE ARQUITECTURA, TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN (1995A).	15
FIGURA 7. FACHADA ENVIDRAÇADA. FONTE: TECTÓNICA MONOGRAFÍAS DE ARQUITECTURA, TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN (1995).	15
FIGURA 8. ESQUERDA - A SOLUÇÃO ENCONTRADA PARA O MÍNIMO DE ILUMINAÇÃO NATURAL NOS ESPAÇOS INTERNOS. FONTE: REINHART; LOVERSO (2010). À DIREITA - ANÁLISE DE RADIAÇÃO E VARIAÇÕES DO IMPACTO NAS FACHADAS.	16
FIGURA 9. ZONEAMENTO DA JANELA REALIZADO POR PEREIRA (1992), ANEXANDO DISPOSITIVOS SUPERIORES PARA DISTRIBUIÇÃO DA LUZ E DISPOSITIVOS NA ALTURA DOS OLHOS DE MODO A NÃO PREJUDICAR AS VISTAS. A PORÇÃO ABAIXO DA CINTURA, É PAREDE OPACA.	17
FIGURA 10. PREFERÊNCIA DE ABERTURAS DENTRO DO AMBIENTE SEGUNDO DOGRUSOY; TUREYEN (2007).	19
FIGURA 11. DIAGRAMA DE GHR EM PLANOS VERTICAIS EM OCORRÊNCIAS DE TEMPERATURA SOL-AR MENOS A TEMPERATURA DE TERMOSTATO A 24C° (ENTRE 8:00 E 18:00). FONTE: AUTOR.	21
FIGURA 12. DEMANDA DE CONSUMO PARA DIFERENTES PERCENTUAIS DE ABERTURAS EM FACHADAS PARA O CENTRO DA EUROPA. FONTE: ULRICH KNAACK ET AL. (2007).	22
FIGURA 13. ZONEAMENTO DA JANELA COM BASE EM DISCUSSÕES PRESENTE NA LITERATURA. FONTE: AUTOR.	23
FIGURA 14. DIAGRAMA-RESUMO: O PROJETO DA JANELA. FONTE: AUTOR.	25
FIGURA 15. SOLUÇÕES DE CONTROLE SOLAR. DA ESQUERDA PARA DIREITA DE CIMA PARA BAIXO: VIDRO IMPRESSO, VIDRO IMPRESSO, BRISES HORIZONTAIS COM PADRÃO VARIÁVEL, BRISES COMPLEXOS, BRISES COMPLEXOS E JANELAS COM VARIAÇÃO DA ORIENTAÇÃO E ÁREA.	27
FIGURA 16. SISTEMAS CONVENCIONAIS ATUAM PRIMARIAMENTE NA RADIAÇÃO DIRETA. FONTE: PEREIRA (1992).	28

FIGURA 17. SISTEMAS DE SOMBREAMENTO QUE ATUAM TAMBÉM NA RADIAÇÃO DIFUSA, GERALMENTE INCORPORAM SISTEMA MAIS SOFISTICADOS. FONTE: KISCHKOWEIT-LOPIN (2002).	28
FIGURA 18. VIDROS DINÂMICOS ASSOCIADOS AO USO DE SOMBREAMENTO FIXO EXTERNO. FONTE: INOUE (2003).	29
FIGURA 19. ESTUDOS PARA FACHADA ENVIDRAÇADA EM UM HOSPITAL. FONTE: AKSAMIJA (2013).	30
FIGURA 20. INTERDISCIPLINARY SCIENCE & TECHNOLOGY (IST) EM TEMPE, ARIZONA. FONTE: AKSAMIJA (2013).	31
FIGURA 21. REDUÇÃO DE CARGA TÉRMICA PARA VIDRO LOW-E, SOMBREAMENTO HORIZONTAL E PERSIANA INTERNA EM HONG KONG, HOUSTON, MIAMI E SINGAPURA. FONTE: HUANG; NIU; CHUNG (2014).	32
FIGURA 22. INTERAÇÕES DOS ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR E INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO E LUMINOSO. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DE AKSAMIJA (2013); KISCHKOWEIT-LOPIN (2002); PEREIRA (1992); RUCK ET AL. (2000).	33
FIGURA 23. CAIXA D'ÁGUA DE OLINDA – PE, 1936.	34
FIGURA 24. EDIFÍCIO DO MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, RJ 1939/45.	34
FIGURA 25. EDIFÍCIO COM AUTO SOMBREAMENTO.	35
FIGURA 26. EDIFÍCIO COM AUTO SOMBREAMENTO.	35
FIGURA 27. EDIFÍCIO COM ELEMENTO DE SOMBREAMENTO EXTERNO RETRÁTIL.	35
FIGURA 28. EDIFÍCIO COM ELEMENTOS EXTERNOS FIXO DE SOMBREAMENTO.	35
FIGURA 29. ELEMENTOS VAZADOS COMPLEXOS MOSTRADO POR OLGAY (1963).	36
FIGURA 30. ESCALA DE SOMBREAMENTO DE ACORDO COM OLGAY (1963).	36
FIGURA 31. ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO EXTERNO ANEXADOS A FACHADA. FONTE: VALLADARES-RENDÓN; SCHMID; LO (2017).	38
FIGURA 32. SOMBREAMENTO EXTERNO DO TIPO TELA.	38
FIGURA 33. SOMBREAMENTO COMPLEXO COM VARIAÇÃO DE OPACIDADE E REFLETÂNCIA. PROTÓTIPO PARA O KUWAIT UNIVERSITY COLLEGE OF EDUCATION PARTE PARA O MASTER PLAN DO SABAH AL-SALEM UNIVERSITY CITY NO KUWAIT. FONTE: AKSAMIJA (2013).	38
FIGURA 34. CORTE DO MUSEU BROAD EM LOS ANGELES, EUA MOSTRANDO ELEMENTO DE SOMBREAMENTO COMPLEXO.	38
FIGURA 35. EDIFÍCIO GARAGEM EM BERKELEY, CALIFÓRNIA – EUA; MOSTRANDO CUSTOMIZAÇÃO INDIVIDUAL DOS ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO.	39
FIGURA 36. MATERIALIDADE DE ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO. FONTE: A, BAKER (2008); B E C, HOFER ET AL. (2016).	40

FIGURA 37. DIAGRAMA-RESUMO: FUNÇÃO DOS ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO. FONTE: AUTOR.	41
FIGURA 38. COMPRIMENTOS DE ONDA DA RADIAÇÃO SOLAR E DE CORPO NEGRO.	43
FIGURA 39. BALANÇO DA RADIAÇÃO NO VIDRO DUPLO COM TATAMENTO LOW-E. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.	45
FIGURA 40. BALANÇO DO VIDRO MONOLÍTICO COMUM E LOW-E DE ALTA EFICIÊNCIA PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA DA RADIAÇÃO SOLAR. FONTE: JELLE (2013).	46
FIGURA 41. ESPECTRO PARA VIDRO MONOLÍTICO CLARO, VERDE E BRONZE. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DO OPTICS6.	46
FIGURA 42. VIDRO LAMINADO.	48
FIGURA 43. VIDRO INSULADO.	48
FIGURA 44. TIPOS DE VIDRO. FONTE: AUTOR A PARTIR DA REVISÃO TEÓRICA.	50
FIGURA 45. CORRELAÇÃO ENTRE DGP E ILUMINÂNCIA. FONTE: MCNEIL; BURRELL, (2016).	57
FIGURA 46. FAIXA DE DISTÚRBO DE OFUSCAMENTO COM BASE EM ANÁLISE DA ILUMINÂNCIA VERTICAL NA ALTURA DOS OLHOS. FONTE: KARLSEN ET AL. (2015).	58
FIGURA 47. PROCESSO DE AVALIAÇÃO DA ABERTURA COMBINANDO VÁRIOS CRITÉRIOS DE DESEMPENHO. FONTE: KARLSEN ET AL. (2016B)	60
FIGURA 48. CORRELAÇÕES ENTRE INDICADORES DE DESEMPENHO TÉRMICO E DE ILUMINAÇÃO NATURAL. FONTE: CHI, (2018).	60
FIGURA 49. O PENSAMENTO DO PROJETO PARAMÉTRICO. FONTE: ADAPTADO DE OXMAN (2017).	64
FIGURA 50. PROCESSO TRADICIONAL DE PROJETO.FONTE: MODIFICADO DE ZHAO; DE ANGELIS (2019).	67
FIGURA 51. PROCESSO DE PROJETO GUIADO POR DESEMPENHO. FONTE: ADAPTADO DE ZHAO; DE ANGELIS (2019).	68
FIGURA 52. CURVA DE MACLEAMY, (2004).	68
FIGURA 53. FLUXO DE DADOS DO MODELO GUIADO PELO DESEMPENHO. FONTE: ADAPTADO DE ZHAO; DE ANGELIS (2019).	70
FIGURA 54. MODELO DOS PRINCÍPIOS FÍSICOS DA SAGRADA FAMÍLIA DE GAUDÍ BASEADO EM CATENÁRIAS GERADAS PELA FORÇA DA GRAVIDADE.	70
FIGURA 55. ESTÁDIOS DE LUIGGI MORETTI.	72
FIGURA 56. CITY HALL DO FOSTER AND PARTNERS.	74
FIGURA 57. SIMULAÇÃO DE RADIAÇÃO INCIDENTE DO CITY HALL DO FOSTER AND PARTNERS. FONTE: KOLAREVIC (2003B).	74
FIGURA 58. DIAGRAMA DE ESTRATÉGIAS DE CITY HALL DO FOSTER AND PARTNERS. FONTE: KOLAREVIC (2003B).	75

FIGURA 59. REPRESENTAÇÃO DE PROCESSO DE LPV. FONTE: TEDESCHI (2014).	76
FIGURA 60. PROJETO GUIADO POR DESEMPENHO. FONTE: AUTOR.	80
FIGURA 61. MODELO PARA SIMULAÇÃO NO ENERGYPLUS COM REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DE EDIFÍCIOS EXTERNOS FONTE: MARTELLOTTA ET AL. (2017).	84
FIGURA 62. EXEMPLO DE FATORES DE CONDUÇÃO PARA DIFERENTES PAREDES. FONTE: AUTOR A PARTIR DE ASHRAE (2021).	86
FIGURA 63. EXEMPLO DE FATORES RADIANTE DE ACORDO ASSOCIADO A INÉRCIA TÉRMICA. FONTE: AUTOR A PARTIR DE ASHRAE (2021).	87
FIGURA 64. FLUXO DE CÁLCULO PARA O MÉTODO RTS. FONTE: AUTOR A PARTIR DE ASHRAE (2021).	87
FIGURA 65. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS RTS (ASHRAE) E ADMITANCIA (EUROPEU) COM O MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR. FONTE: REES; SPITLER; HAVES (1998).	88
FIGURA 66. “TIME-SEGREGATION” DE ACORDO COM ANDERSEN ET AL. (2008) E MÉTODO USADO POR NEGENDAHL; NIELSEN (2015) RESPECTIVAMENTE.	90
FIGURA 67. FLUXO DO ALGORITMO EVOLUTIVO. FONTE: ADAPTADO DE RENNER (2004).	98
FIGURA 68. COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DETERMINÍSTICOS E NÃO DETERMINÍSTICOS DISPONÍVEIS NO GRASSHOPPER. A FRONTEIRA DE PARETO FOI DEFINIDA ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE TODOS OS ALGORITMOS, E FOI UTILIZADA PARA ESTABELECEER A CURVA DE PARETO COM OS MELHORES RESULTADOS (BEST). FONTE: WORTMANN (2017).	100
FIGURA 69. TIPOS DE VISUALIZAÇÕES ENCONTRADAS UTILIZADAS PARA REPRESENTAR RESULTADOS EM OTIMIZAÇÕES MULTICRITÉRIOS: A) GRÁFICO DE DISPERSÃO SIMPLES. B) GRÁFICO DE DISPERSÃO 3D. C) GRÁFICO DE DISPERSÃO EM MATRIZ. D) PROPOSTA DE HUANG; ZAN; ZHAI (2021), UM GRÁFICO DE DISPERSÃO EM MATRIZ INTEGRADO PARA OTIMIZAÇÕES COM QUATRO CRITÉRIOS DE DESEMPENHO. E) DIAGRAMA DE COORDENADAS PARALELAS. F) GRÁFICO POLAR.	102
FIGURA 70. FRONTEIRA DE PARETO NOS PONTOS ESCUROS INTERLIGADOS.	102
FIGURA 71. FRONTEIRA DE PARETO TRIDIMENSIONAL.	102
FIGURA 72. AUMENTO DE PUBLICAÇÕES DO USO DE OTIMIZAÇÃO PARA DESEMPENHO DE FACHADAS. FONTE: KHEIRI (2018).	103
FIGURA 73. GENE_ARCH PROPOSTO POR CALDAS, (2008).	106
FIGURA 74. PARAGEN PROPOSTO POR TURRIN, (2013).	107
FIGURA 75. RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO INTEGRADA A MODELAGEM DISCUTIDO POR LAURIDSEN; PETERSEN (2014).	108
FIGURA 76. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADO A MODELAGEM DISCUTIDO POR NEGENDAHL; NIELSEN (2015).	109

FIGURA 77. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO VISANDO APLICAÇÃO EM PROJETO DISCUTIDO POR TOUTOU; FIKRY; MOHAMED (2018) MOSTRANDO SOLUÇÃO OTIMIZADA.	110
FIGURA 78. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE MODELAGEM COMPLEXA APRESENTADO POR SANTOS ET AL. (2020).	110
FIGURA 79. SOLUÇÃO OTIMIZADA EXPLORADA POR WANG ET AL. (2022).	111
FIGURA 80. ESTUDO DE ELEMENTOS COMPLEXOS DE FACHADA COM QUATRO VARIÁVEIS. FONTE: QIAN (1999).	114
FIGURA 81. PONTO ATRATOR E VARIAÇÃO DA GEOMETRIA APRESENTADO POR QIAN, (1999) EM “A” E GIANTINI ET AL., 2019) EM “B” E QUEIROZ ET AL. (2018).	115
FIGURA 82. USO DE LINHAS ATRATORAS. FONTE: <a href="https://www.iaacblog.com/programs/parametric-facade-triangular/">HTTPS://WWW.IAACBLOG.COM/PROGRAMS/PARAMETRIC-FACADE-TRIANGULAR/</a> .	116
FIGURA 83. A - MOSTRA UMA SOLUÇÃO DE PADRÃO FIXO COM ALTA RESTRIÇÃO. B - MOSTRA UMA SOLUÇÃO DE SISTEMA LIVRE COM PADRÕES A SEREM DEFINIDOS POR UM PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO. C E D - MOSTRA SOLUÇÕES DE PADRÕES MISTOS QUE PERMITEM UMA DIVERSIDADE DE SOLUÇÕES DE PADRÕES COM SISTEMAS DE RESTRIÇÃO LIMITADOS.	118
FIGURA 84. USO DE IMAGEM NA GERAÇÃO DE PADRÕES FIXOS. FONTE: <a href="https://www.grasshopper3d.com/m/photo/large?id=2985220%3Aphoto%3A1293568">HTTPS://WWW.GRASSHOPPER3D.COM/M/PHOTO/LARGE?ID=2985220%3APhoto%3A1293568</a> .	119
FIGURA 85. RESULTADO DE OTIMIZAÇÃO COM CARACTERIZAÇÃO RANDÔMICA PROPOSTA POR ERCAN; ELIAS-OZKAN (2015).	120
FIGURA 86. USO DE SISTEMA MULTIAGENTES DESCRITOS POR PANTAZIS; GERBER (2018).	120
FIGURA 87. MODELAGEM DE FACHADA COM PADRÃO FLEXÍVEL E RESTRIÇÃO ESTABELECIDAMENTE. FONTE: TSAY; WU; LIN (2022).	121
FIGURA 88. MODELAGEM DE FACHADA COM PADRÃO FLEXÍVEL E RESTRIÇÃO ESTABELECIDAMENTE UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES. FONTE: FATHY ET AL. (2015).	121
FIGURA 89. OTIMIZAÇÃO DE FACHADAS PARAMÉTRICAS: DIAGRAMA DO PROCESSO GERAL. FONTE: AUTOR.	122
FIGURA 90. DIAGRAMA DA TESE COM ETAPAS DO MÉTODO.	126
FIGURA 91. DESENVOLVIMENTO DA PERGUNTA DE PESQUISA. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR A PARTIR DE GROAT; WANG (2013).	128
FIGURA 92. DIAGRAMA DO PROJETO DA JANELA GRIFANDO ÁREAS CONTEMPLADAS PELO MODELO UNIFICADO.	132
FIGURA 93. COMPONENTES REALIZADOS EM GHPYTHON PARA CÁLCULO DO MÉTODO RTS. FONTE: AUTOR	137

FIGURA 94. FATORES DE CONDUÇÃO E DO EFEITO RADIANTE.	137
FIGURA 95. ROTINAS DE USO DE EQUIPAMENTOS E OCUPAÇÃO HUMANA.	138
FIGURA 96. ROTINA DE ATIVIDADE METABÓLICA.	138
FIGURA 97. MODELO DE DESEMPENHO TÉRMICO MOSTRANDO INTEGRAÇÃO DO GRASSHOPPER COM O RADIANCE ATRAVÉS DO HONEYBEE+.	139
FIGURA 98. INTEGRAÇÃO DO GRASSHOPPER COM O RADIANCE ATRAVÉS DO HONEYBEE+ PARA UDI.	140
FIGURA 99. INTEGRAÇÃO DO GRASSHOPPER COM O RADIANCE ATRAVÉS DO HONEYBEE+ PARA OFUSCAMENTO.	141
FIGURA 100. INTERFACE DO OPOSSUM.	143
FIGURA 101. INTERFACE DO OCTOPUS MOSTRANDO UNIVERSO DE SOLUÇÕES GERADOS NO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.	143
FIGURA 102. FLUXOGRAMA DO MODELO INTEGRADO.	143
FIGURA 103. RESUMO DO CLIMA DE SALVADOR-BA.	144
FIGURA 104. RESUMO DO CLIMA DE SÃO PAULO-SP.	145
FIGURA 105. RESUMO DO CLIMA DE PORTO ALEGRE-RS.	145
FIGURA 106. CASO-BASE	147
FIGURA 107. PERCENTUAL DE VISÃO DO CÉU NA ALTURA DO CENTRO DAS ABERTURAS A UMA DISTANCIA DE 0,5M DAS JANELAS PELO LADO INTERNO .	147
FIGURA 108. NÚMERO DE HORAS ENSOLARADAS (ESQUERDA) E RADIAÇÃO INCIDENTE (DIREITA) PARA AS TRÊS CIDADES CONSIDERADAS.	148
FIGURA 109. GRADE DE ANÁLISE UTILIZADA. DA ESQUERDA PARA DIREITA: CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO, UDI, E AUTONOMIA DE OFUSCAMENTO.	149
FIGURA 110. CASO-BASE COM CONTEXTO URBANO.	153
FIGURA 111. CASO-BASE COM MODELO DE UM PAVIMENTO E QUATRO ZONAS TÉRMICAS.	153
FIGURA 112. CASO-BASE	153
FIGURA 113. VISTA DE TOPO COM CONTEXTO URBANO.	153
FIGURA 114. GRADE DE SENSORES NA FACHADA.	156
FIGURA 115. GRADE DE SENSORES NO PLANO DE TRABALHO.	157
FIGURA 116. SOLUÇÕES DE DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO EXTERNOS CONSIDERADAS. A SOLUÇÃO WSD NÃO POSSUI DISPOSITIVO DE SOMBREAMENTO. SD1, SD3, SD4 E SD5 TEM 4 ALETAS POR ANDAR. SD2 TEM 6 ALETAS, USANDO MAIS MATERIAL. AS SOLUÇÕES SD3, SD4 E SD5 POSSUEM EFEITO TORCIDO AO LONGO DA FACHADA.	159

FIGURA 117. COMPONENTES ELABORADOS EM GHPYTHON. A ESQUERDA ESTABELECE PADRÕES HARMONICOS E A DIREITA, ESTABELECE PARÕES NÃO HARMONICOS INSPIRADO NA ESTRATÉGIA DE PONTOS ATRADORES.	162
FIGURA 118. SOMA DE DOIS PADRÕES, ESTABELECENDO UMA NOVA SOLUÇÃO.	167
FIGURA 119. APLICAÇÃO SIMILAR EM UM BRISE HORIZONTAL CURVO.	167
FIGURA 120. COMPONENTE ESTABELECIDO PARA MODELAGEM DE JANELAS.	169
FIGURA 121. EXEMPLOS DE SOLUÇÕES ESTABELECIDAS COM COMPONENTE DE MODELAGEM DE JANELAS.	170
FIGURA 122. EXEMPLO DE SOLUÇÕES PASSÍVEIS DE SEREM MODELADAS COM OS TRÊS COMPONENTES ESTABELECIDOS.	171
FIGURA 123. COMPONENTES ESTABELECIDOS EM GRASSHOPPER PARA MODELAGEM DE ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO. COMPONENTE 1 (ESQUERDA), COMPONENTE 2 E COMPONENTE 3(DIREITA).	172
FIGURA 124. DIAGRAMA MOSTRANDO LÓGICA PARA APLICAÇÃO DOS PADRÕES A MODELAGEM DE ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO.	173
FIGURA 125. SCRIPT EXEMPLIFICANDO A LÓGICA DE APLICAÇÃO DA SOMA DE DOIS PADRÕES HARMÔNICOS COMBINADOS À MODELAGEM DE ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO APRESENTADO NA FIGURA 119.	173
FIGURA 126. EXEMPLOS DE RESULTADOS PARA O COMPONENTE QUE GERA SOLUÇÕES COM LARGURA VARIÁVEL.	174
FIGURA 127. EXEMPLOS DE RESULTADOS PARA O COMPONENTE QUE GERA SOLUÇÕES COM ALETAS TORCIDAS PARAMETRICAMENTE.	175
FIGURA 128. EXEMPLOS DE RESULTADOS PARA O COMPONENTE QUE GERA SOLUÇÕES MODULARES INTERTRAVADAS COM ABERTURA NA HORIZONTAL OU VERTICAL.	176
FIGURA 129. MATRIZ DE DISPERSÃO DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.	179
FIGURA 130. MATRIZ DE DISPERSÃO DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA A CIDADE DE SÃO PAULO.	180
FIGURA 131. MATRIZ DE DISPERSÃO DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA A CIDADE DE SALVADOR.	180
FIGURA 132. FUNÇÃO DE PREFERÊNCIA ENTRE OS INDICADORES DE VISÃO DE CÉU COMPARADO A $CTR_{PICO}$ , UDI E DGP VERSUS A ECONOMIA EM RELAÇÃO AO CASO-BASE PARA PORTO ALEGRE.	184
FIGURA 133. FUNÇÃO DE PREFERÊNCIA ENTRE OS INDICADORES DE VISÃO DE CÉU COMPARADO A $CTR_{PICO}$ , UDI E DGP VERSUS A ECONOMIA EM RELAÇÃO AO CASO-BASE PARA SÃO PAULO.	184

FIGURA 134. FUNÇÃO DE PREFERÊNCIA ENTRE OS INDICADORES DE VISÃO DE CÉU COMPARADO A $CTR_{PICO}$ , UDI E DGP VERSUS A ECONOMIA EM RELAÇÃO AO CASO-BASE PARA SALVADOR.	185
FIGURA 135. GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO MOSTRANDO TRÊS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.	186
FIGURA 136. GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO MOSTRANDO TRÊS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE SÃO PAULO.	186
FIGURA 137. GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO MOSTRANDO TRÊS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE SALVADOR.	187
FIGURA 138. FACHADAS DAS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.	190
FIGURA 139. FACHADAS DAS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE SÃO PAULO.	191
FIGURA 140. FACHADAS DAS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE SALVADOR.	192
FIGURA 141. FACHADAS DAS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.	194
FIGURA 142. FACHADAS DAS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE SÃO PAULO.	194
FIGURA 143. FACHADAS DAS SOLUÇÕES SELECIONADAS PARA A CIDADE DE SALVADOR.	195
FIGURA 144. ERROS QUADRÁTICOS AO REDUZIR O ARQUIVO CLIMÁTICO.	198
FIGURA 145. CORRELAÇÕES PARA UDI DAS SIMULAÇÕES USANDO ARQUIVO CLIMÁTICO REDUZIDO E ARQUIVO CLIMÁTICO COMPLETO.	199
FIGURA 146. ERROS PARA O INDICADOR DE UDI AO REDUZIR O ARQUIVO CLIMÁTICO.	199
FIGURA 147. CORRELAÇÃO PARA SDGPA DAS SIMULAÇÕES USANDO ARQUIVO CLIMÁTICO REDUZIDO E ARQUIVO CLIMÁTICO COMPLETO.	200
FIGURA 148. ERROS PARA O INDICADOR DE SDGPA AO REDUZIR O ARQUIVO CLIMÁTICO.	200
FIGURA 149. FIGURA 150. CORRELAÇÃO PARA $CTR_{PICO}$ DAS SIMULAÇÕES USANDO ARQUIVO CLIMÁTICO REDUZIDO E ARQUIVO CLIMÁTICO COMPLETO.	201
FIGURA 151. ERROS PARA O INDICADOR DE $CTR_{PICO}$ AO REDUZIR O ARQUIVO CLIMÁTICO.	201
FIGURA 152. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO MATEMÁTICO (INFERIOR)E ENERGYPLUS (SUPERIOR) PARA FACHADA NORTE.	204
FIGURA 153. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO MATEMÁTICO (INFERIOR)E ENERGYPLUS (SUPERIOR) PARA FACHADA SUL.	204
FIGURA 154. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO MATEMÁTICO (INFERIOR)E ENERGYPLUS (SUPERIOR) PARA FACHADA LESTE.	205
FIGURA 155. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO MATEMÁTICO (INFERIOR)E ENERGYPLUS (SUPERIOR) PARA FACHADA OESTE.	205
FIGURA 156. CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS TESTADOS E OS RESULTADOS DO DAYSIM .	207

FIGURA 157. BOXPLOTS PARA OS RESULTADOS DO DESVIO SDA PARA CADA NÍVEL DE ILUMINÂNCIA TESTADO.	207
FIGURA 158. ERRO PARA RESULTADOS DE DA EM CADA SENSOR NA SALA.	208
FIGURA 159. ERRO PARA RESULTADOS DE DA PARA CADA SENSOR NA SALA.	209
FIGURA 160. ERROS PARA $CTR_{pico}$ POR NÚMERO DE BOUNCES.	210
FIGURA 161. ERROS PARA UDI POR NÚMERO DE BOUNCES.	211

# LISTA DE TABELAS

TABELA 1. MATRIZ DE PROGRAMAÇÃO ARQUITETÔNICA PARA O PROJETO DA JANELA.	24
TABELA 2. DIFERENTES VIDROS ORGANIZADOS PELA TRANSMISSÃO VISÍVEL. FONTE: PROPRIEDADES E APARÊNCIA DOS VIDROS (2022).	47
TABELA 3. RESUMO DA DISCUSSÃO SOBRE INDICADORES DE DESEMPENHO.	61
TABELA 4. TERMOS ASSOCIADOS AOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS.	97
TABELA 5. PROGRAMAS E ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADOS A FERRAMENTAS DE ARQUITETURA.	100
TABELA 6. RESUMO DO MÉTODO COM BASE NOS OBJETIVOS.	127
TABELA 7. COMPARATIVO PARA FERRAMENTA DE DESEMPENHO TÉRMICO.	136
TABELA 8. PARÂMETROS DO RADIANCE PARA O MÉTODO DE DUAS FASES NO MODELO TÉRMICO	136
TABELA 9. DADOS DE ENTRADA PARA CARGAS INTERNAS.	138
TABELA 10. PARÂMETROS DO RADIANCE PARA O MODELO PARA UDI.	140
TABELA 11. PARÂMETROS DO RADIANCE PARA O MODELO PARA OFUSCAMENTO SEM IMAGEM.	141
TABELA 12. FATOR DE REDUÇÃO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.	142
TABELA 13. VIDROS CONSIDERADOS NAS OTIMIZAÇÕES	147
TABELA 14. SISTEMA CONSTRUTIVO UTILIZADO.	152
TABELA 15. COMBINAÇÕES UTILIZADAS PARA ANÁLISES PARAMÉTRICAS COM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO REGULARES.	155
TABELA 16. VIDROS CONSIDERADOS PARA COMBINAÇÃO COM ELEMENTOS CURVOS.	158
TABELA 17. CASO-BASE ADOTADO POR ANÁLISE.	159
TABELA 18. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS PADRÕES HARMÔNICOS APLICADOS A UM ARRAY DE CÍRCULOS.	164
TABELA 19. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS PADRÕES NÃO HARMÔNICOS APLICADOS A UM ARRAY DE CÍRCULOS.	166
TABELA 20. RESULTADOS DOS CASO-BASE SEM ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO PARA CADA VIDRO CONSIDERADO.	178
TABELA 21. CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS INDICADORES DE DESEMPENHO PARA TODOS OS DADOS E PARA AGRUPAMENTOS DE CADA VIDRO SIMULADO.	182
TABELA 22. ECONOMIAS ENTRE CASOS SELECIONADOS E CASOS-BASE PARA AS TRÊS CIDADES.	189

TABELA 23. MÉDIA QUADRÁTICA PARA OS DADOS COMPLETOS DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS ANALISADOS.	196
TABELA 24. ERRO QUADRÁTICO PARA OS DADOS REDUZIDOS DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS ANALISADOS.	197
TABELA 25. TEMPO DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA CADA MÉTODO.	206

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AECO	<i>Arquitetura Engenharia e Construção</i>
ASE	<i>Annual Sunlight Exposure</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVS	<i>Ângulo Vertical de Sombreamento</i>
BSDF	<i>Bidirectional Scattering Distribution Function</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i>
CLTD/CLF	<i>Cooling load temperature differential method with solar cooling load factors</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>
CTF	<i>Conduction Time Factor</i>
CTR	<i>Carga Térmica de Resfriamento</i>
DA	<i>Daylight Autonomy</i>
DCS	<i>Dispositivos de Controle Solar</i>
DGP	<i>Daylight Glare Probability</i>
EQM	<i>Erro Quadrático Médio</i>
FS	<i>Fator Solar</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GLANCE	<i>GLare ANnual Classes Evaluation</i>
GHR	<i>Graus-hora de resfriamento</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado)</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LPT	<i>Linguagem de Programação Textual</i>
LPV	<i>Linguagem de Programação Visual</i>
PGD	<i>Projeto guiado por desempenho</i>

PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RAV	<i>Razão de abertura de Vidro</i>
RMS	<i>Root Mean Square (média quadrática ou raiz quadrada da média dos quadrados)</i>
RTF	<i>Radiant Time Factor</i>
RTS	<i>Radiant Time Serie</i>
UDI	<i>Useful Daylight illuminance</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
sDA	<i>Spacial Daylight Autonomy</i>
sDGPa	<i>Spacial Daylight Glare Probability Autonomy</i>
SPM	<i>Sistema Paramétrico de Modelagem</i>
TETD/TA	<i>Total equivalent temperature differential method with time averaging</i>
TFM	<i>Transfer Function Method (método da função de transferência)</i>
Tvis	<i>Transmissão visível</i>

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>XXI</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTO: O PROJETO DA FACHADA .....	1
1.1.1 <i>Recomendações para o projeto da fachada</i> .....	2
1.1.2 <i>Projeto da fachada guiado por desempenho</i> .....	3
1.1.3 <i>Limitações dos estudos anteriores</i> .....	5
1.2 PERGUNTAS DE PESQUISA .....	5
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.3.1 <i>Geral</i> .....	6
1.3.2 <i>Específicos</i> .....	6
1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	6
1.5 RESULTADOS .....	9
1.6 ESTRUTURA DA TESE .....	9
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>11</b>
<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
2.1 O CONTROLE SOLAR EM FACHADAS .....	14
2.1.1 <i>Dispositivos de controle solar - DCS</i> .....	26
2.1.2 <i>Elementos de sombreamento</i> .....	34
2.1.3 <i>Vidros</i> .....	42
2.1.4 <i>Indicadores de desempenho para DCS</i> .....	51
2.2 PROCESSO DE PROJETO GUIADO POR DESEMPENHO .....	63
2.2.1 <i>Modelo paramétrico/algóritmico, bases do PGD</i> .....	63
2.2.2 <i>Breve histórico</i> .....	70
2.2.3 <i>Simulação integrada ao processo de projeto</i> .....	76
2.2.4 <i>Técnicas de simulação para as primeiras fases de projeto</i> .....	80

2.2.5	<i>Validação de ferramentas de análise para arquitetos</i> .....	92
2.2.6	<i>Processos de otimização no PGD</i> .....	94
2.2.7	<i>Breve revisão de literatura sobre otimização de envoltórias em Arquitetura</i> .....	103
2.3	MODELAGEM DE FACHADAS NO PGD.....	113
2.3.1	<i>Modelagem de fachadas paramétricas</i> .....	113
2.3.2	<i>Modelagem de fachadas visando otimização</i> .....	116
<b>CAPÍTULO 3</b> .....		<b>123</b>
<b>MÉTODO</b> .....		<b>123</b>
3.1	CONSTRUÇÃO DA REVISÃO DE LITERATURA .....	124
3.1.1	<i>Definição das perguntas de pesquisa</i> .....	127
3.2	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	129
3.2.1	<i>Definição dos indicadores de desempenho</i> .....	129
3.2.2	<i>Definição das etapas lógicas para modelagem</i> .....	133
3.2.3	<i>Definição dos métodos e ferramentas de análise</i> .....	134
3.2.4	<i>Definição do algoritmo de otimização</i> .....	142
3.2.5	<i>Definição do problema de otimização</i> .....	144
3.3	VALIDAÇÃO DA PROPOSTA DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	151
3.3.1	<i>Caso-base</i> .....	151
3.3.2	<i>Redução do arquivo climático</i> .....	154
3.3.3	<i>Modelo de desempenho térmico</i> .....	155
3.3.4	<i>Modelo de desempenho da luz natural</i> .....	156
<b>CAPÍTULO 4</b> .....		<b>160</b>
<b>RESULTADOS</b> .....		<b>160</b>
4.1	MODELAGEM DE FACHADAS .....	161
4.1.1	<i>Modelagem de padrões</i> .....	161
4.1.2	<i>Modelagem de janelas</i> .....	168
4.1.3	<i>Modelagem dos elementos de sombreamento</i> .....	171
4.2	EXPERIMENTO DE OTIMIZAÇÃO .....	177
4.2.1	<i>Tempo da otimização</i> .....	177
4.2.2	<i>Análise dos dados e discussões</i> .....	178
4.3	VALIDAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO .....	196
4.3.1	<i>Arquivo climático</i> .....	196
4.3.2	<i>Seleção dos métodos de simulação</i> .....	202

<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>212</b>
<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>212</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS.....	215
5.2 BIBLIOTECA DE MODELOS PARAMÉTRICOS .....	216
5.3 MODELO ANALÍTICO INTEGRADO E INTEROPERÁVEL .....	217
5.4 ANÁLISE MULTIVARIÁVEIS E MODELO DE OTIMIZAÇÃO .....	220
5.5 INDICADORES DE DESEMPENHO E ANÁLISE DOS DADOS .....	222
5.6 OUTRAS LIMITAÇÕES E PESQUISAS FUTURAS.....	224
<b>ANEXO 1</b> .....	<b>227</b>
GLOSSÁRIO .....	227
<b>ANEXO 2</b> .....	<b>231</b>
FATORES DE CONDUÇÃO E DE EFEITO RADIANTE UTILIZADOS .....	231
<b>ANEXO 3</b> .....	<b>232</b>
EQUAÇÕES PARA O MÉTODO RTS.....	232
<b>ANEXO 4</b> .....	<b>237</b>
ACESSO A CÓDIGOS E SCRIPTS EM GHPYTHON USADOS NESTA TESE.....	237
<b>ANEXO 5</b> .....	<b>238</b>
EXEMPLO DE ABORDAGEM PARA CÁLCULO DE VISUAL: MODELO EXPERIMENTAL PARA ESTABELECE VISÃO DO PÔR DO SOL.....	238
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>240</b>

# Introdução

Esta tese de doutorado usa como pressuposto o potencial do “projeto guiado por desempenho” - PGD (*performance-based design*) como suporte a concepção do controle da insolação em fachadas de edifícios não residenciais. O termo “dispositivo de controle solar” no contexto desta pesquisa descreve fechamentos transparentes e sistemas de sombreamento associados à fachada. A pesquisa tem foco no processo de tomada de decisões do projeto de arquitetura auxiliado por computador. Discute morfogênese associado a sistemas de geração da geometria, modelagem algorítmica (ver anexo 1), métodos de avaliação integrados a modelagem e ciclos de otimização. Por focar no controle da insolação, aborda desempenho térmico, visual e da luz natural e é contextualizada para edificações não-residenciais.

Esta introdução apresenta uma visão geral sobre a investigação proposta pela tese. A princípio, é apresentado o contexto que caracteriza o momento da pesquisa. Na sequência, são apresentados os questionamentos, objetivos e a hipótese da investigação. Ao final a introdução expõe a estrutura deste documento.

## 1.1 Contexto: o projeto da fachada

A crescente valorização de uma arquitetura de baixo impacto ambiental e a necessidade de revisão dos valores e dos processos de produção humanos fizeram com que a concepção do projeto passasse a ser mais criteriosa e prever medidas conservacionistas voltadas ao desenvolvimento sustentável. As discussões no contexto do projeto iniciam-se na década de 70 e se intensificam no final da década de 80 em decorrência da primeira grande crise do petróleo e de acordos internacionais (PAPANEK, 1971; ROAF; FUENTES; THOMAS-REES, 2014; WCED, 1987). A compreensão das consequências relacionadas ao impacto das construções nas últimas décadas, também ressalta a importância de uma visão ainda mais complexa e integrada nas fases de programação arquitetônica e de tomada de decisão do projeto arquitetônico (WETTER, 2012). É compreendido que as primeiras soluções do projeto são as que mais impactam na eficiência da edificação. Por essa razão, deve concentrar o maior esforço da equipe de projeto e incluir etapas analíticas (MACLEAMY, 2004).

Um dos principais elementos relacionados à eficiência dos edifícios é o projeto da fachada. Ela é a “pele” que filtra e promove a interação entre o interior e o exterior da edificação. Durante o processo da sua concepção, deve-se compreender padrões, obstruções e características geográficas externas, observar o clima incidente, e propor soluções que aproveitam benefícios e evita malefícios do entorno (OLGYAY, 1963). A fachada é composta por dispositivos opacos e transparentes, fechados e abertos, e a janela é o elemento que promove a maior conexão entre o ambiente externo e o interno.

O Brasil possui climas predominantemente quentes (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998), por isso o projeto da fachada no Brasil é comumente associado a estratégias de controle solar. O sombreamento da abertura é umas das principais recomendações de projeto para o clima do país, e impacta no conforto interno e desempenho energético dos ambientes (SANTOS; SOUZA, 2012).

Os principais efeitos da radiação solar no interior dos ambientes é o de aquecimento e iluminação. Seus benefícios estão associados ao bem-estar, e à saúde dos ocupantes. A iluminação natural e o contato externo são compreendidos como os efeitos mais benéficos associados à janela (AL HERR et al., 2016; DOGRUSOY; TUREYEN, 2007). O aproveitamento dos benefícios do sol através das janelas possui uma característica conflitosa. É de difícil abordagem, pois se intenciona aproveitar a iluminação natural, os visuais e o contato com o exterior, e ao mesmo tempo, proteger a edificação do sobreaquecimento provocado pelo contato com a radiação solar e problemas como ofuscamento provocado pelo excesso de brilho (BOUBEKRI; BOYER, 1992; RUCK, N., ASCHEHOUG, Ø., AYDINLI, S., CHRISTOFFERSEN, J., COURRET, G., EDMONDS, I., ... & MICHEL, 2000).

### **1.1.1 Recomendações para o projeto da fachada**

A Agência Internacional de Energia (IEA) publica regularmente recomendações para o futuro das edificações e soluções sustentáveis, abordando a preocupação com o crescimento econômico para os próximos anos de países em desenvolvimento, como o Brasil. O crescimento econômico desses países está associado ao aumento da demanda de refrigeração em todo o planeta (IEA, 2013a; OECD/IEA, 2018). Parte das soluções e recomendações propostas apontam para pesquisas e desenvolvimento do mercado de elementos de controle solar em climas quentes. Especificamente, recomenda-se desenvolvimento do uso de fechamentos transparentes *low-e* (ver

anexo 1) associados a elementos externos fixos de sombreamento. Apesar do entendimento da agência de que elementos de sombreamento móveis automatizados oferecem mais opções de proteção, economicamente, elementos fixos têm custo-benefício e potencial de mercado compatível com países em desenvolvimento econômico (IEA, 2013b, 2013a).

Os elementos comumente utilizados para exercer o controle da insolação são os vidros e elementos externos de sombreamento. O bom projeto de dispositivos de controle solar (DCS) reduz o sobreaquecimento, demandas de refrigeração e melhora a qualidade da iluminação ((AL-MASRANI et al., 2018). Já o uso de elementos de sombreamento colabora com a melhoria da eficiência energética e possibilita o aumento da área de abertura sem comprometer o desempenho do edifício como demonstrado por Ulrich Knaack et al., (2007).

Um levantamento de 118 artigos apresentado por Kiritat et al. (2016) demonstra que estudos sobre elementos de sombreamento externos fixos, geralmente não consideram variações de vidro para avaliar o conjunto ótico completo. Feng et al. (2021) por sua vez, apontam para a importância de integrar os parâmetros relevantes de forma mais eficiente no projeto de controle solar. Estudos que consideram diferentes tipos de vidros geralmente estão associados ao sombreamento interno e à área de abertura. Suas conclusões indicam que o desenvolvimento de estratégias de sombreamento, os materiais utilizados e os parâmetros de desempenho interno dos edifícios ainda necessitam de estudos adicionais. Já Queiroz; Westphal; Pereira (2019) apontam que o estudo do desempenho térmico e luminoso dos elementos de sombreamento deve estar associado a escolha do vidro. A alteração de um dos dois pode alterar o comportamento do desempenho do conjunto, devendo as interações serem mais bem compreendidas.

## **1.1.2 Projeto da fachada guiado por desempenho**

Adicionado às limitações de estudos, o projeto do sombreamento fixo não é mais delimitado por elementos convencionais horizontais e verticais, como brises regulares e beirais, mas também por geometrias complexas, muitas vezes associadas a métodos mais sofisticados de modelagem digital e ferramentas de desenho paramétrico. Muitas vezes, soluções baseadas apenas em considerações estéticas e não pautadas em desempenho, dessa forma também devem ser mais bem compreendidas como solução de projeto (AL-MASRANI et al., 2018).

As discussões da complexidade do projeto e seu desempenho ocorrem em associação com a evolução dos processos de projeto assistidos por computador e de simulação computacional

(WETTER, 2012). Nos anos 2000, métodos paramétricos e recentemente, métodos algorítmicos vêm se popularizando trazendo abordagens que modificam parte do processo de projeto (LEACH, 2014; WOODBURY, 2010). O método algorítmico permite que a geração da forma seja definida pelo projetista utilizando linguagem de programação, admitindo a associação de ações aos parâmetros relevantes do projeto, inclusão de bases de dados e a realização de ciclos de análise integrados à simulação computacional (KHEIRI, 2018; LEACH, 2014; NEGENDAHL, 2015). O método que integra modelagem, simulação e otimização vem sendo conhecido como “projeto guiado por desempenho”. Wetter (2012) aponta métodos integrados através de programação como um dos futuros dos processos de modelagem e simulação associados ao projeto.

O desejo de integrar programação, análise e processos de tomada de decisão não é novo, com as primeiras experiências datando da década de 1960. No entanto, até os anos 2000, poucos projetistas exploravam esse tipo de artifício devido às limitações de processamento das máquinas e à necessidade de conhecimentos específicos em programação clássica (AISH, 2011). A popularização do uso de programação dentro do processo de projeto vem sendo associada ao lançamento de ferramentas como o *Generative Components* da Bentley (2003) e o *Grasshopper* da McNeel (2008), que apresentam uma linguagem de programação visual, mais didática à arquitetos e projetistas (LEACH, 2014; LUCA, 2019).

Atualmente, métodos algorítmicos aproximam projetistas de abordagens que antes eram associadas apenas as áreas de computação e engenharias, tais como, modelos de otimização, *machine learn*, e redes neurais (GERBER; LIN, 2014; KHEIRI, 2018). Nos últimos anos, ferramentas com essas técnicas vêm sendo estabelecidas para arquitetos e designers como público-alvo. As aplicações de projeto guiado por desempenho e processos de otimização tem meio facilitado para aplicação (KHEIRI, 2018; NEGENDAHL, 2015).

As principais buscas nas pesquisas recentes sobre o método de projeto guiado por desempenho incluem a caracterização de modelos analíticos multicritério rápidos, a possibilidade de iteração no meio digital, a elaboração de modelos 3D integrados e flexíveis para transformações, além da busca por algoritmos de simulação que abranjam um amplo universo de avaliações e permitam a realização de múltiplas análises funcionais (AISH, 2011; AL-MASRANI et al., 2018; NEGENDAHL; NIELSEN, 2015). Uma revisão crítica feita por Feng et al. (2021) demonstra que umas das maiores limitações de implementação de métodos com múltiplas funções de análise é a interoperabilidade (ver anexo 1) das ferramentas e velocidade dos ciclos analíticos.

### **1.1.3 Limitações dos estudos anteriores**

Quanto ao controle da insolação de fachadas, recomenda-se a inclusão de pesquisas mais aprofundadas sobre elementos de sombreamento e vidros de controle solar, considerando o desempenho ótico e térmico do conjunto. Outra tendência são pesquisas sobre o auxílio do projeto de elementos de sombreamento complexos (BAHRI et al., 2022; KIRIMTAT et al., 2016, 2019). Tendência esta, associada a evolução dos processos de fabricação na indústria AECO e a possibilidade da customização em massa associada à fabricação digital (CELANI; PUPO, 2008).

Pesquisas recentes apontam buscas por modelos analíticos no projeto de elementos de sombreamento otimizados baseados em desempenho. As últimas pesquisas contextualizam-se dentro do processo de projeto e modelagem, e modelos analíticos. Os trabalhos, porém, tem característica exploratória e muitas vezes não abordam elementos translúcidos como estratégia relevante. Alguns fenômenos importantes como ofuscamento também costumam ser negligenciados nas abordagens (AL-MASRANI; AL-OBAIDI, 2019; BAHRI et al., 2022; KIRIMTAT et al., 2019; NEGENDAHL; NIELSEN, 2015).

Em decorrência da popularização relativamente recente do uso de processos algorítmicos em projeto, existem lacunas de estudos que organize cenários, identifique processos e/ou discuta limitações existentes associadas ao uso de simulação computacional na tomada de forma de edifícios e seus sistemas. Quanto ao projeto da fachada, revisões apontam que a modelagem algorítmica é utilizada no projeto de elementos de sombreamento geralmente de maneira estética e os cruzamentos com processos de tomada de forma baseados em desempenho devem ser melhor investigados. Essa abordagem esbarra na complexidade do projeto do controle solar que envolve a localidade, materiais aplicados, desenho do elemento de sombreamento e o fechamento transparente utilizado na abertura, associados ao seu desempenho térmico e luminoso.

Considerando a contextualização apresentada previamente, as perguntas de pesquisa formuladas para esta tese serão apresentadas a seguir:

## **1.2 Perguntas de pesquisa**

É possível por meio de modelos mais rápidos e interoperáveis baseados em desempenho gerar combinações de soluções de controle solar para fachadas associando desempenho térmico e luminoso?

Como atributos geométricos complexos e parâmetros de materialidade podem ser associados à modelagem em projetos baseados em desempenho de elementos de controle solar e elementos de sombreamento complexos?

Como estabelecer soluções possíveis ao projeto e escolher dentro de um universo de possibilidades?

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Geral

Desenvolver processo analítico integrado de modelagem e indicadores multicritério de desempenho térmico, visual e luminoso de elementos de controle solar para processos de geração da forma guiados por desempenho.

### 1.3.2 Específicos

1. Caracterizar função e parâmetros relevantes para desempenho térmico e luminoso de elementos de controle solar para fachada do edifício.
2. Estabelecer uma biblioteca de elementos de controle solar associados à princípios geradores da forma apropriados ao processo de projeto guiado por desempenho.
3. Estabelecer modelo analítico adequado a análise de multivariáveis integrando desempenho térmico e luminoso.
4. Definir o método de otimização adequado a análise de multivariáveis compatível com problema arquitetônico.
5. Estabelecer indicadores de desempenho e sensibilidade dos diferentes elementos de controle solar para edifícios não residenciais altamente envidraçados.

## 1.4 Justificativa e relevância

O cenário ao qual a contextualização desta introdução se refere descreve um momento em que a implementação da integração de simulação no processo projetual é facilitada. A popularização do uso de métodos de programação associado a modelagem e ao processo de projeto, facilita a inclusão de simulação computacional durante a tomada de decisões. A busca é para compreensão de soluções de controle da insolação associados ao desenho da janela. Dentro dessa

abordagem, está incluído o zoneamento da janela, sua função, o tamanho e a escolha de vidros e elementos de sombreamento. A pesquisa explora o desempenho térmico, visual e luminoso, com vistas a entender interações de causa e efeito associados a geração da forma e abordar indicadores de desempenho. Existe uma lacuna de pesquisa que investigue a concepção da janela sob ponto de vista da morfogênese, associada a modelos multivariáveis de análise e processos de otimização. As abordagens que existem são exploratórias e relacionam poucas variáveis nos processos de análises, ou abordam a geração da geometria de maneira limitada.

A pesquisa é pensada para o contexto do processo de projeto, e tem como audiência, pesquisadores, consultores e projetistas interessados em controle solar, simulação computacional, processos de otimização associado ao projeto e processos de projeto guiados por desempenho. É esperado que a tese colabore com a construção de processos de projeto guiados por desempenho no que diz respeito a problemática do projeto da janela e fachadas. Nesse sentido, os resultados esperados deste trabalho estão na sistematização e mapeamento e na criação de diretrizes para estabelecer melhores soluções de controle solar para fachadas edificadas. A Figura 1 mostra o mapa conceitual da tese.



Figura 1. Mapa conceitual da tese

Três abordagens para execução da tese foram identificadas, são elas: primeiras fases do projeto, o sistema paramétrico de modelagem e o método analítico. A primeira abordagem diz respeito ao contexto de aplicação da tese. O objetivo deste trabalho é apresentar discussões compatíveis com o processo de tomada de decisão dos elementos de controle solar. Entende-se que é neste momento que as principais e mais impactantes soluções de projeto ocorrem. A segunda abordagem, o sistema paramétrico de modelagem, será utilizada como método para organizar os princípios de modelagem flexível, que devem ser compatíveis com o projeto dos elementos de controle solar. A terceira abordagem diz respeito ao método analítico, que aborda o modelo para avaliação do desempenho térmico, visual e luminoso do objeto do estudo (Figura 2). Apesar de existirem alguns procedimentos discriminados e ferramentas validadas para a avaliação de elementos de controle solar e desempenho térmico, visual e luminoso de ambientes, é preferível que o processo de projeto auxiliado por computador, apresente modelos avaliativos rápidos e interoperáveis, compatíveis com a demanda do processo projetual. Ou seja, determinados métodos de avaliação são passíveis de simplificação em relação aos procedimentos utilizados nas fases finais de avaliação do projeto.

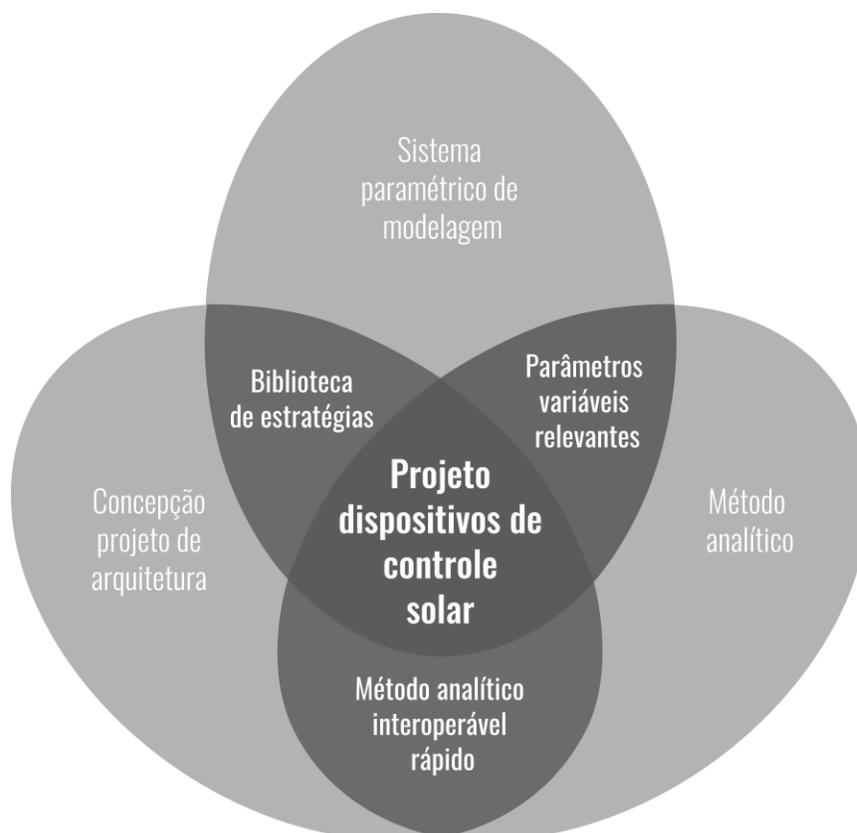


Figura 2. Intersecções das abordagens da pesquisa.

## 1.5 Resultados

Para responder às limitações encontradas em pesquisas anteriores, o estudo propõe um processo que integra a compreensão da complexidade do projeto da fachada e dos dispositivos de controle solar, associados a estratégias de modelagem paramétrica, análise integrada interoperável e otimização. Para testar a proposta, foram analisadas a otimização de fachadas em três cidades brasileiras, utilizando cinco indicadores de desempenho representativos na avaliação dos elementos de controle solar para diferentes cenários. Os resultados otimizados apresentam economias significativas, destacando-se Salvador, que apresentou melhores resultados para ofuscamento (sDGPa) e iluminação útil (UDI), bem como um menor valor de Carga térmica de resfriamento de pico ( $CTR_{pico}$ ). As soluções que alcançaram o melhor equilíbrio entre os principais indicadores de desempenho apresentaram um ganho conjunto de até 12% para UDI, 64% para sDGPa e 75% para  $CTR_{pico}$ , em comparação com a mesma solução sem sombreamento.

As soluções otimizadas, ou seja, que melhor equilibram os objetivos, foram apresentadas nas fronteiras de Pareto, e demonstram que a escolha do vidro e dos elementos de sombreamento deve considerar um conjunto de fenômenos conflitantes entre si para uma otimização adequada. O modelo de otimização também identificou que as variações de combinações de geometria possuem uma grande influência na variação dos indicadores no desempenho final. As correlações entre os resultados e a área do elemento de sombreamento, visão de céu e os tipos de vidro também foram identificadas no experimento.

## 1.6 Estrutura da tese

Esta tese é composta por cinco partes. A primeira introduz o tema abordado de forma geral, justifica a relevância do estudo e destaca os objetivos a serem alcançados pela pesquisa. A segunda apresenta a revisão de literatura sobre os temas relevantes à tese. Esta etapa foi dividida em duas partes. Primeiro, é exibido um panorama sobre o projeto da janela e dos elementos de controle solar. Neste momento, aspectos projetuais gerais e indicadores de desempenho são apresentados. Segundo, é discutido processos de projeto guiados por desempenho. Esta etapa aborda conceitos sobre processos de projeto auxiliado por computador, simulação computacional e processos de otimização no contexto de arquitetura e do projeto de elementos de controle solar. A terceira parte aborda o método levantado para a tese. Detalha a abordagem sistemática adotada e especifica processos, modelos e ferramentas adotadas para a execução da tese. A quarta parte apresenta os

resultados de modelagem e de otimização e também aborda os procedimentos de validação dos resultados. A quinta e última etapa apresenta conclusões dos resultados e aponta limitações e passos futuros.

# Capítulo 2

## Referencial teórico

O referencial teórico foca em dois temas centrais: dispositivos de controle solar no projeto da fachada, e processos de projeto guiados por desempenho. Este capítulo apresenta uma revisão de conceitos, história e pesquisas mais recentes nas áreas selecionadas. Ele começa com a seção 2.1, que aborda os dispositivos de controle solar, elementos de sombreamento, vidros e indicadores de desempenho relacionados a esses dispositivos. Em seguida, a seção 2.2 apresenta uma discussão sobre o modelo paramétrico/algorítmico, sua evolução histórica, a integração da simulação no processo de projeto e técnicas de simulação para as fases iniciais de projeto. Por fim, a seção 2.3 apresenta uma discussão sobre a modelagem de fachadas no projeto guiado por desempenho, incluindo a modelagem paramétrica e a modelagem visando a otimização. Esse capítulo fornece o embasamento teórico necessário para a compreensão do contexto e dos conceitos fundamentais abordados na pesquisa.





## 2.1 O controle solar em fachadas

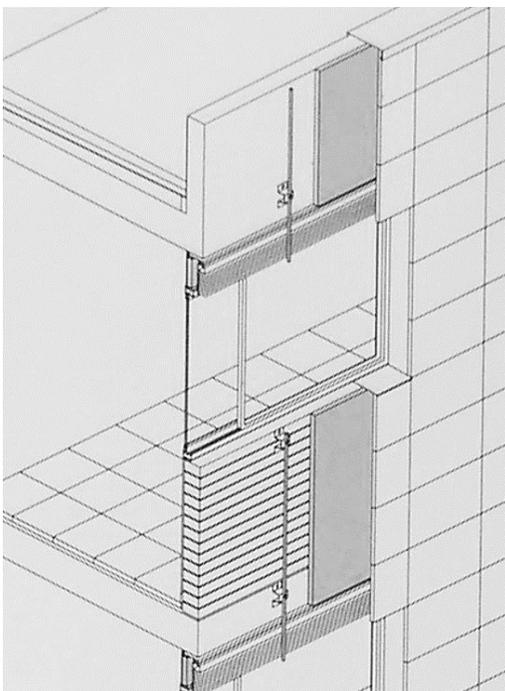
Para fins deste trabalho, o termo fachada designa os elementos da envoltória no plano vertical. Ela é a interface entre o interior e o exterior dos edifícios. Já o termo janela, é utilizado para designar “a esquadria, vertical ou inclinada geralmente envidraçada, destinada a preencher um vão, em fachadas ou não” (NBR-10821-1, 2017). O ar, a luz e o calor podem ser aproveitados ou dissipados através da janela (ULRICH KNAACK et al., 2007). As funções-chave da janela na fachada são promover uma vista para o exterior, gerenciar a entrada de luz, radiação solar e a ventilação. Por essa razão, tem interferência direta no consumo de energia do edifício. O projeto da janela também interfere no bem-estar, saúde e conforto dos ocupantes e conseqüentemente na produtividade das pessoas.

Em 1967, Thomas A. Markus escreve sobre a função das janelas em edifícios, destacando que elas podem servir como meio de comunicação e interação social, além de fornecer luz e ventilação. O autor argumenta que as janelas podem mediar a fronteira entre o interior e o exterior de um edifício, permitindo que as pessoas observem e interajam com o mundo exterior enquanto mantêm um senso de privacidade e segurança. O autor já sugere que arquitetos e designers devem considerar as múltiplas funções das janelas, incluindo aspectos de desempenho ambiental e social ao projetar edifícios para criar espaços eficientes e que facilitem a comunicação, interação e construção de comunidade (MARKUS, 1967).

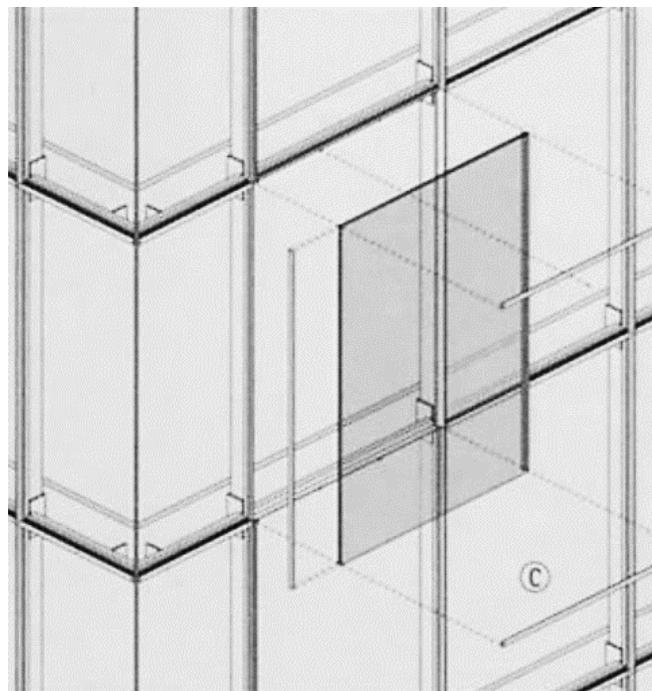
Segundo a IEA (2013a) e CIBSE (2014), os critérios de desempenho para fachadas são: segurança, integridade estrutural, proteção do fogo, proteção do clima, visão para o exterior, iluminação, ventilação natural, eficiência energética e os custos inerentes de construção e manutenção. Já a janela, é um dos elementos que mais interferem no desempenho dos parâmetros de conforto e eficiência energética de um edifício (RUCK et al., 2000; ULRICH KNAACK et al., 2007). Um projeto de janela inapropriado pode resultar em ambientes com problemas de ofuscamento, ruído, condensação, mofo, qualidade do ar, com excessivo ganho, ou perda de calor, conseqüentemente, desconforto térmico (geral e localizado) e aumento do consumo de energia (AKSAMIJA, 2013; RUCK et al., 2000; ULRICH KNAACK et al., 2007).

Segundo Aksamija (2013), no geral, existem dois tipos de fachadas: opacas e envidraçadas. O primeiro, é principalmente formado por uma proporção maior de camadas de materiais sólidos, como a alvenaria, pedra, cerâmicas e isolantes. A porção transparente é disposta espaçadamente em forma de aberturas vazadas e janelas (Figura 6). O segundo tipo, são formadas por fachadas modulares prioritariamente consistindo em materiais transparentes e translúcidos, geralmente vidro e montantes metálicos (Figura 7).

Os processos físicos nesses dois tipos de fachadas têm características distintas, já que as proporções de materiais e técnicas construtivas são diferentes. Fachadas opacas possuem geralmente mais massa, melhor isolamento, melhor retenção de calor em comparação com fachadas envidraçadas. Em contraposição, quando projetadas de forma adequada ao clima, as fachadas envidraçadas geralmente aproveitam melhor a vista externa, iluminação natural e demandam menos da estrutura da edificação (AKSAMIIJA, 2013).



*Figura 6. Fachada opaca. Fonte: Tectónica monografías de arquitectura, tecnología y construcción (1995a).*

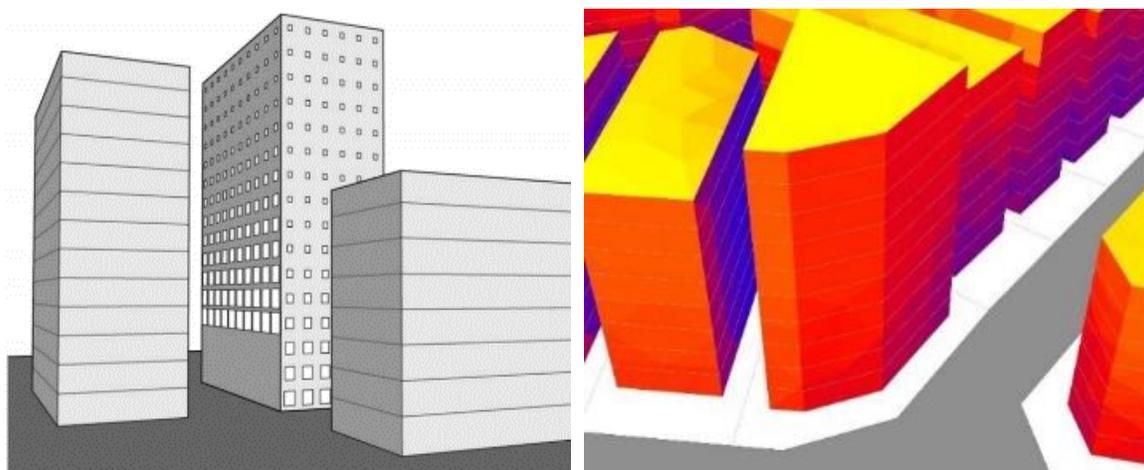


*Figura 7. Fachada envidraçada. Fonte: Tectónica monografías de arquitectura, tecnología y construcción (1995).*

O desempenho térmico, acústico e luminoso é afetado pela relação da fachada com indicadores geográficos e climáticos, tais como a temperatura do ar, orientação, radiação solar, umidade, velocidade do vento, ruído, reflexão do solo, características dimensionais do sítio e obstáculos externos. Esses parâmetros devem fazer parte da escolha da posição e das propriedades

térmicas e óticas dos materiais opacos e transparentes da fachada (AKSAMIJA, 2013; AL HERR et al., 2016; ZHANG; BARRETT, 2012) Além disso, os projetistas precisam considerar as dimensões do espaço interno, os padrões de uso e ocupação e as expectativas de conforto dos ocupantes (OLGYAY, 1963).

Cada abertura possui características individuais associadas ao ambiente interno e externo. Para exemplificar, Reinhart e Loverso (2010) discutem a influência da configuração urbana no desempenho da luz natural em espaços internos, e estabeleceram uma solução paramétrica para garantir que as aberturas atendam ao desempenho mínimo da luz natural nos ambientes internos. A solução mostra cada abertura com variações de tamanho distintas, sendo que a configuração urbana pode até impossibilitar o cumprimento de requisitos mínimos de iluminação natural nos primeiros andares. Outro exemplo: uma análise de radiação também pode exemplificar que aspectos da geometria solar e a configuração do entorno geram impactos variáveis ao longo das fachadas (Figura 8).



*Figura 8. Esquerda - a solução encontrada para o mínimo de iluminação natural nos espaços internos. Fonte: Reinhart; Loverso (2010). À direita - análise de radiação e variações do impacto nas fachadas.*

Em adição, aspectos psicológicos e subjetivos também fazem parte do projeto da janela. A qualidade da vista, segurança e estratégias como redução de vertigem dos ocupantes devem ser considerados (AKSAMIJA, 2013; RUCK et al., 2000). apresentam uma extensa revisão bibliográfica sobre pós-ocupação de edifícios altos e apontam preocupações associadas à janela e à altura, tais como: fragmentação social, vertigem ou intolerância à altura, e desconexão com áreas verdes. Ao mesmo tempo, apontam vantagens, como iluminação e a possibilidade de explorar uma vista vasta, que pode ajudar a reduzir sentimentos de estresse, agressividade e fadiga mental. Os autores relatam estudos que apontam indicadores negativos em edifícios altos onde há espaços sem

janelas. O projeto da janela, portanto, deve combinar aspectos funcionais subjetivos (qualitativos) e físicos (quantitativos).

A operação da janela deve satisfazer as diversas funções ergonômicas e o gerenciamento das condições contraditórias que o clima externo pode oferecer (RUCK et al., 2000). Dois aspectos de ergonomia relevantes para o projeto da janela são a altura dos olhos e a altura da pega das pessoas (RUCK et al., 2000). Fusaro; Kang, (2021) apresentam um processo participativo para identificar aspectos ergonômicos relevantes ao projeto da janela. Suas conclusões estabelecem três critérios: conexão com o contexto externo para se sentir orientado, configurações para mediar estímulos externos além de estabelecer condições internas ideais, e gerenciabilidade da janela.

Em relação ao conforto luminoso, a altura dos olhos é o aspecto humano mais preponderante. Qualquer parcela de janela muito acima da altura dos olhos, tem menor utilidade para produzir vista para o exterior, e por isso é uma região propícia para incluir elementos de proteção solar e de distribuição da luz. Da mesma forma, porções muito transparentes, muito abaixo da linha dos olhos em ambientes altos, podem produzir sensação de vertigem e desconforto em decorrência da falta de privacidade. (RUCK et al., 2000). Por exemplo, na pesquisa de Pereira (1992), o autor manipula os elementos de sombreamento baseado na linha da visão. A parte superior da janela recebeu elementos espelhados e com ângulo priorizando a distribuição da luz no espaço interno. Já a porção próxima aos olhos, priorizou a preservação da visibilidade (Figura 9) (PEREIRA, 1992).

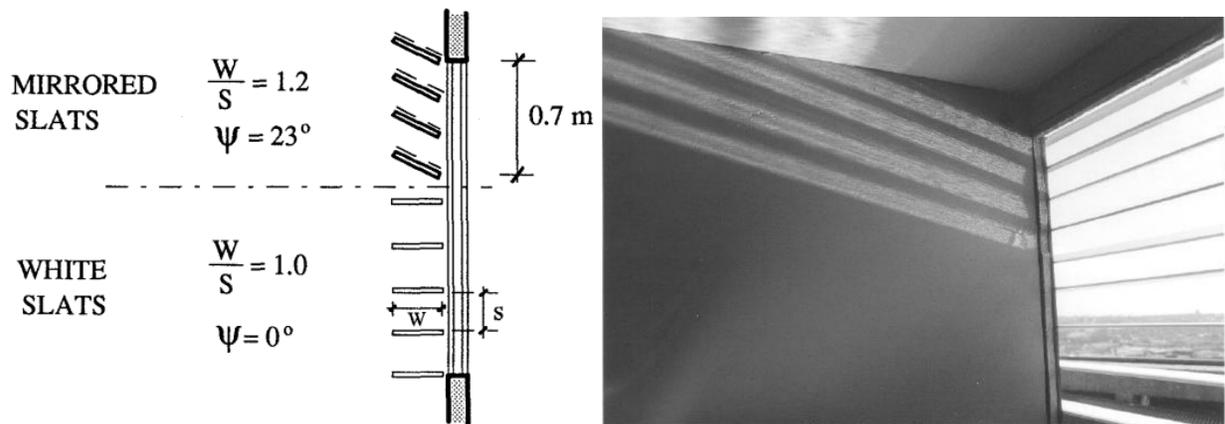


Figura 9. Zoneamento da janela realizado por Pereira (1992), anexando dispositivos superiores para distribuição da luz e dispositivos na altura dos olhos de modo a não prejudicar as vistas. A porção abaixo da cintura, é parede opaca.

A preferência dos usuários em espaços corporativos também deve ser considerada, Al Horr et al. (2016) realizaram uma revisão de literatura que aborda preferências e indicadores de

produtividade em ambientes de escritórios. O trabalho aponta como conclusão oito aspectos físicos relevantes ao projeto do espaço interno, todos relacionados direta e indiretamente ao projeto da janela, são eles:

1. Qualidade do ar interior e ventilação;
2. Luz e iluminação natural;
3. Conforto térmico;
4. Ruído e acústica;
5. Arranjo espacial do escritório;
6. Biofilia (ver anexo 1) e vistas;
7. Olhar e sentir;
8. Localização e amenidades.

A pesquisa de Dogrusoy; Tureyen (2007), que intencionou estabelecer a preferência de janelas por usuários em edifícios de escritórios, apresentou opções de proporção e posicionamento de janelas conforme Figura 10. Seus resultados apontam a preferência por grandes aberturas, entre 44 e 100% da parede interna. O estudo aponta que 48% dos participantes preferiram a janela de piso a teto, 35% preferiram a janela horizontal em fita, 10,9% preferiram a janela retangular. Já as pesquisas apresentadas por Ozdemir (2010) e Hong et al. (2019) também indicam a preferência por ambientes com grandes janelas, particularmente com vistas naturais. Estes estudos apontam também que a janela é um fator relevante para sensação de espacialização do ambiente e colabora para reduzir a monotonia e melhorar o estado emocional das pessoas. Apesar da preferência, grandes aberturas envidraçadas devem ser projetadas de maneira a evitar malefícios, como o ofuscamento e o sobreaquecimento provocado pela exposição do sol (ARIES; VEITCH; NEWSHAM, 2010; BOUBEKRI; BOYER, 1992).

O trabalho de Dogrusoy; Tureyen (2007) também elencou fatores humanos preponderantes para preferência de janelas. Seus resultados apontam que, em primeiro lugar, estão os **fatores básicos**, que consistem na iluminação e ventilação natural. Na sequência, vem os **fatores psicológicos**, que consistem na motivação, sensação de espacialidade, prestígio e estética. Em terceiro, vem o **controle ambiental**, que consiste no controle térmico e acústico prevenindo efeitos negativos do ambiente externo. Em quarto lugar, vem as **questões psicossociais**, que consistem no controle da privacidade, concentração e segurança. Em quinto e último, aparece o **visual**, refere-se

ao contato visual com exterior e a possibilidade de acessar a paisagem (DOGRUSOY; TUREYEN, 2007).

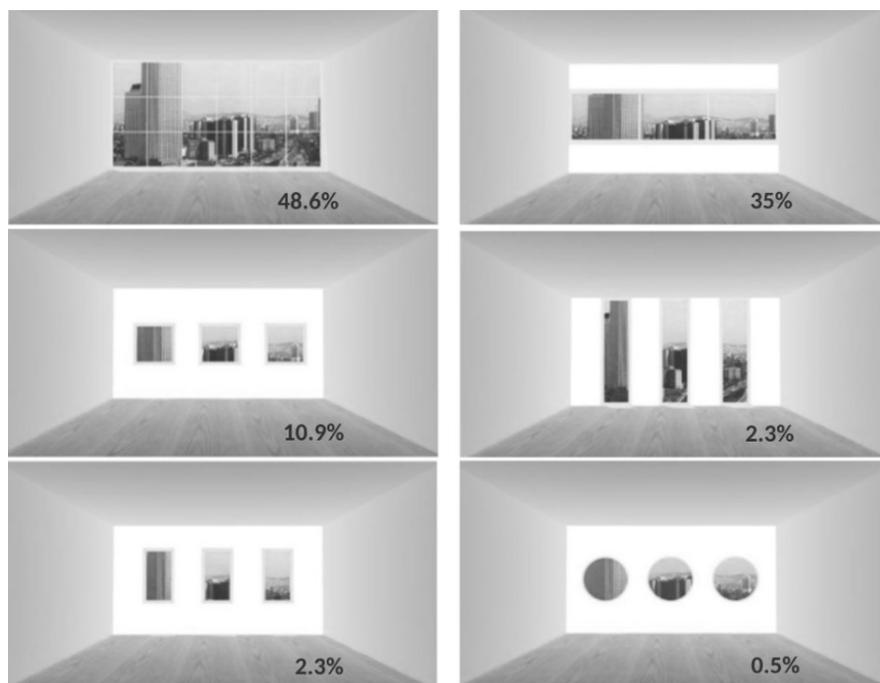
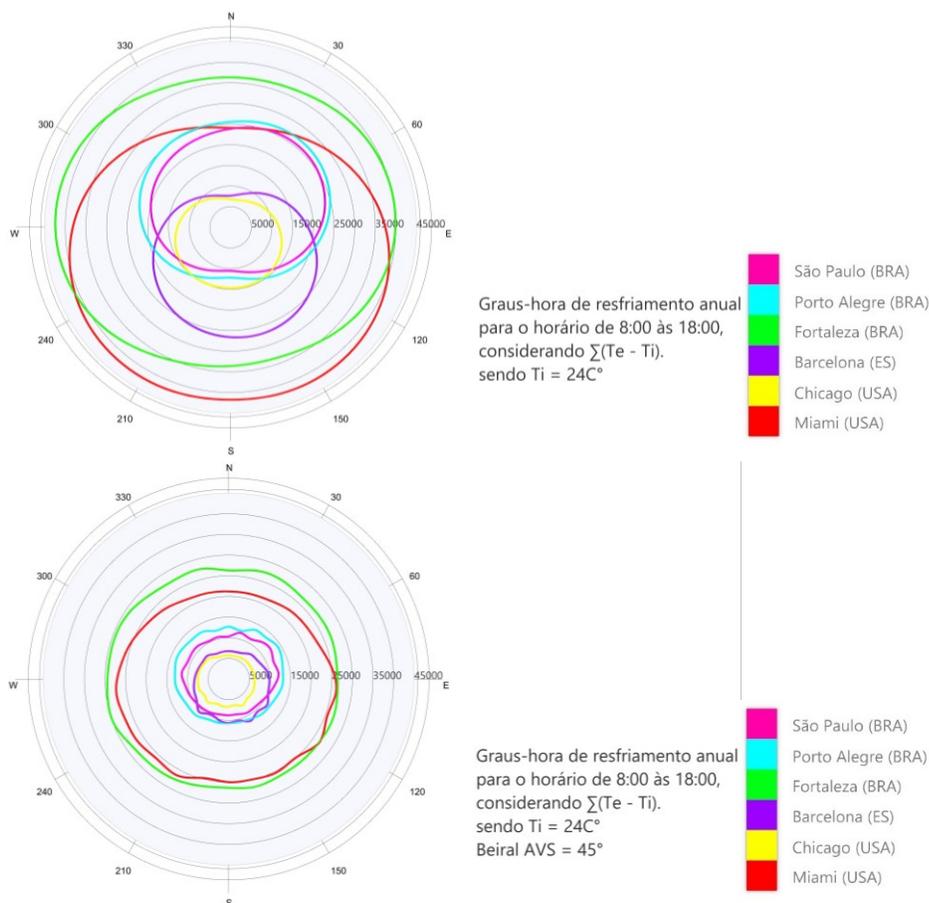


Figura 10. Preferência de aberturas dentro do ambiente segundo Dogrusoy; Tureyen (2007).

Em relação à interferência da janela na saúde, é importante a compreensão do Ciclo circadiano (ver anexo 1). A luz natural exerce um efeito fisiológico nas pessoas e seu ciclo diário influencia no sistema endócrino associado com o despertar e o sono do ser humano. O desempenho de tarefas é afetado pela perturbação do ciclo circadiano humano. A interrupção do ciclo cria problemas de saúde a longo prazo. A exposição a variações nas características da iluminação natural durante o dia e pouca ou nenhuma luz à noite estão associadas ao bom funcionamento do ciclo circadiano. A janela é a maior fonte de iluminação natural em ambientes internos, portanto, seu projeto é também um parâmetro importante na saúde humana. (BOYCE; HUNTER; HOWLETT, 2003; HONG et al., 2019).

O projeto inadequado e uso indevido de fachadas envidraçadas sem considerar características locais, geográficas e climáticas pode levar a intervenções não planejadas previamente no projeto de arquitetura associadas ao desconforto do usuário, como uso de *blackouts*, películas, ou uso excessivo de persianas, provocando aumento da demanda sobre o sistema de iluminação artificial e redução do contato dos usuários com o ambiente externo e a luz natural (ABOULNAGA, 2006; JAMES; BAHAJ, 2005).

Uma das estratégias mais utilizadas para melhorar o desempenho de janelas é a de sombreamento. Para exemplificar, a Figura 11 demonstra o somatório de Grau-Hora de Resfriamento (GHR) anual considerando a temperatura sol-ar ( $T_e$ ) (ver glossário) menos a temperatura interna a  $24\text{ C}^\circ$  (temperatura de termostato). Os dados foram medidos para o plano vertical para diferentes orientações em seis cidades. Três cidades no hemisfério sul e três no hemisfério norte. Foram considerados o horário comercial para situações sem sombreamento e com um beiral de ângulo Vertical de Sombreamento (AVS) de  $45^\circ$ . O terceiro diagrama demonstra a relevância do uso de sombreamento para reduzir carga térmica de resfriamento para diversas orientações. Cada cidade testada tem resultados distintos relacionados ao clima externo, geometria solar e distribuição da radiação solar na abobada celeste. O exercício considera apenas três critérios climáticos, mas já exemplifica a variabilidade de resultados associados a orientação de envoltórias em diferentes climas e posições geográficas.



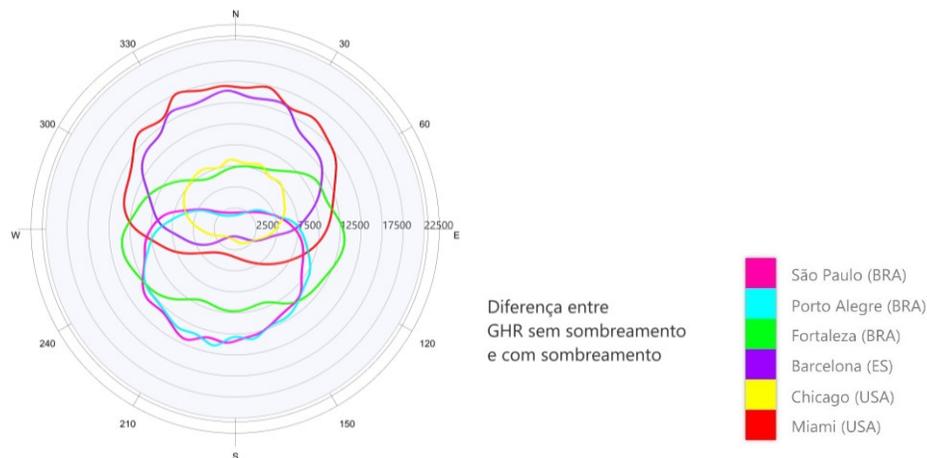


Figura 11. Diagrama de GHR em planos verticais em ocorrências de temperatura sol-ar menos a temperatura de termostato a 24°C (entre 8:00 e 18:00). Fonte: Autor.

Como demonstrado anteriormente, uma das maneiras de reduzir o sobreaquecimento provocado pela radiação solar no projeto da janela é associá-la a dispositivos de controle solar. No geral, o controle solar pode ocorrer através de autossombreamento, um tratamento na superfície transparente, e/ou através da inclusão de sistemas de proteção associados às aberturas, que podem ser externos ou internos. São utilizados para filtrar a radiação, modular a luz e a sombra, redirecionar a luz, proteger do ofuscamento e até para melhorar o isolamento térmico da janela (IEA, 2013a; OLGAYAY, 1963; RUCK et al., 2000).

Ulrich Knaack et al. (2007) demonstram o somatório da demanda de consumo para um edifício de escritórios na Europa para diversas combinações de percentual de abertura da janela em fachadas. O caso “A” apresenta a demanda de consumo para diferentes percentuais de área transparente na fachada utilizando vidros duplos. O caso “B” mostra o desempenho da fachada ao aumentar o isolamento da janela, através do uso de um vidro triplo. Por último, o caso “C” demonstra as demandas de consumo para o vidro triplo adicionados a elementos de proteção solar (Figura 12). A pesquisa demonstra que para o clima estudado, fachadas completamente envidraçadas podem ter desempenho superior quando associadas a elementos de proteção solar, mesmo se comparadas a fachadas com menos área de vidro sem sistema de proteção externo.

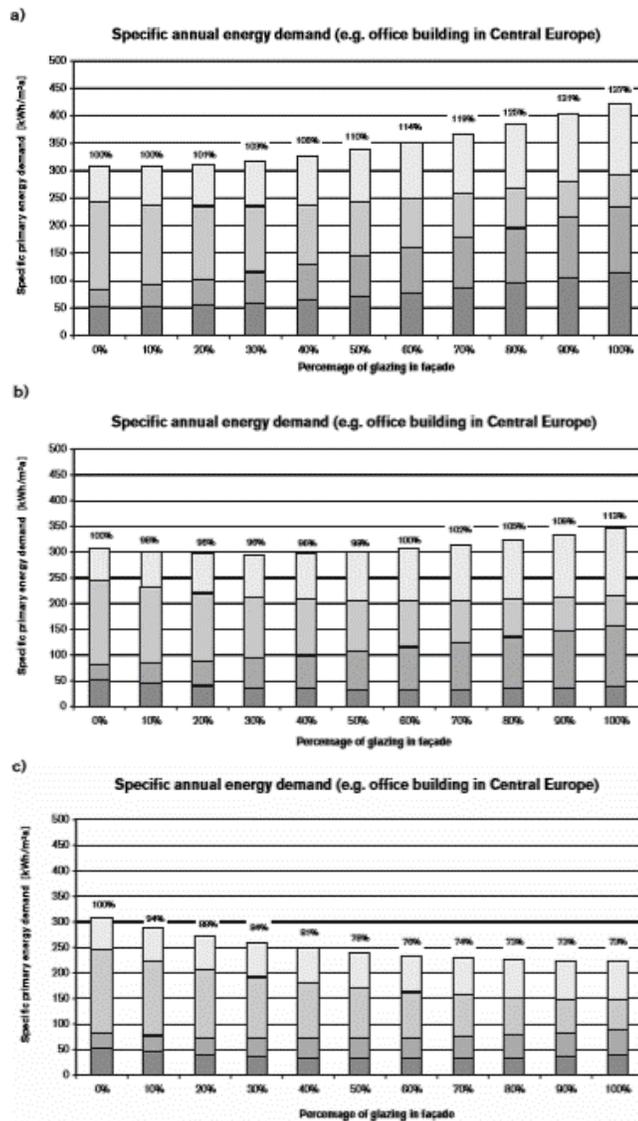


Figura 12. Demanda de consumo para diferentes percentuais de aberturas em fachadas para o centro da Europa. Fonte: Ulrich Knaack et al. (2007).

A heterogeneidade associada ao projeto da janela, permite realizar um zoneamento com base nas suas funções do ambiente interno (RUCK et al., 2000). Considerando a literatura pesquisada, a Figura 13 considera a possibilidade de subdivisão em três áreas distintas, uma superior à altura da cabeça, uma mediana na altura dos olhos e outra abaixo da altura da cintura. Cada uma apresenta características distintas quanto ao projeto da janela.

Com base na revisão da literatura, a Tabela 1 demonstra uma matriz dos aspectos de projeto associados à janela. A estrutura da matriz foi estabelecida com base na discussão de programação arquitetônica proposta por Peña; Parshall (2001). As cinco colunas: **objetivos, fatos, conceitos, necessidades e soluções** abordam de forma geral aspectos relacionados ao projeto da janela. Os

**objetivos** relacionam-se com o que o usuário almeja. Os **fatos** são aspectos imutáveis do projeto, com os quais devemos lidar. Os **conceitos** abordam métodos possíveis para alcançar os objetivos listados. **Necessidades** listam aspectos de qualidade que devem ser alcançados e considerados. As **soluções** abordam aspectos generalistas para solucionar toda a matriz. O projeto da janela pode combinar múltiplos aspectos da matriz, porém, não necessariamente todos. As soluções reais do projeto estão relacionadas às condições específicas de cada problemática, as quais devem ser aprofundadas caso a caso. A Figura 14 apresenta um diagrama-resumo da matriz apresentada e da temática discutida no item 1.1 deste capítulo.



Figura 13. Zoneamento da janela com base em discussões presente na literatura. Fonte: Autor.

Tabela 1. Matriz de programação arquitetônica para o projeto da janela.

	Objetivos	Fatos	Conceitos	Necessidades Estabelecer requisitos mínimos para...	Soluções
<b>Função</b> Pessoas Atividades Relações	<input type="checkbox"/> Vista <input type="checkbox"/> Estética <input type="checkbox"/> Status <input type="checkbox"/> Privacidade <input type="checkbox"/> Segurança	<input type="checkbox"/> Função do edifício <input type="checkbox"/> Dinâmica de atividades <input type="checkbox"/> Metabolismo <input type="checkbox"/> Vestimenta <input type="checkbox"/> Aspectos físicos (preferência dos usuários) <input type="checkbox"/> Comportamento social <input type="checkbox"/> Altura dos olhos <input type="checkbox"/> Altura da pega (mãos e braços)	<input type="checkbox"/> Multifuncionalidade (controle visual, da privacidade, da ventilação e da luz) <input type="checkbox"/> Ergonomia	<input type="checkbox"/> Ciclo circadiano <input type="checkbox"/> Qualidade visual (cor, vista) <input type="checkbox"/> Evitar vertigem <input type="checkbox"/> Evitar ofuscamento, brilho excessivo <input type="checkbox"/> Temperatura de cor da luz por padrão de uso <input type="checkbox"/> Segurança <input type="checkbox"/> Facilidade de operação	<input type="checkbox"/> Área da abertura <input type="checkbox"/> Fechamento <input type="checkbox"/> Posição da janela <input type="checkbox"/> Dispositivos de sombreamento externos <input type="checkbox"/> Dispositivos de sombreamento internos <input type="checkbox"/> Dispositivos de distribuição da luz <input type="checkbox"/> Dispositivos de segurança <input type="checkbox"/> Modulação e operação da abertura zoneados por aspecto de desempenho associado a função <input type="checkbox"/> Paisagismo
<b>Forma</b> Lugar Ambiente Qualidade	<input type="checkbox"/> Iluminação natural <input type="checkbox"/> Desempenho acústico <input type="checkbox"/> Ventilação natural <input type="checkbox"/> Ventilação mecânica <input type="checkbox"/> Condicionamento passivo <input type="checkbox"/> Condicionamento ativo <input type="checkbox"/> Desempenho térmico <input type="checkbox"/> Expectativa do cliente <input type="checkbox"/> Proteção do clima externo (evitar condensação) <input type="checkbox"/> Resistência ao fogo <input type="checkbox"/> Sustentabilidade	<input type="checkbox"/> Latitude <input type="checkbox"/> Altitude <input type="checkbox"/> Padrões ambientais do clima (radiação, geometria solar, temperatura, ventos, umidade, disponibilidade da luz) <input type="checkbox"/> Orientação <input type="checkbox"/> Altura do pavimento <input type="checkbox"/> Geometria e características óticas do espaço interno e do edifício <input type="checkbox"/> Características do sistema de condicionamento artificial <input type="checkbox"/> Propriedades térmicas das paredes <input type="checkbox"/> Obstruções externas <input type="checkbox"/> Refletância do exterior <input type="checkbox"/> Adensamento urbano	<input type="checkbox"/> Bioclimatologia <input type="checkbox"/> Biomimética e biofilia <input type="checkbox"/> Otimização da forma <input type="checkbox"/> Simulações computacionais (desempenho auxiliado por computador)	<input type="checkbox"/> Aproveitar potencialidades do clima externo e evitar aspectos negativos <input type="checkbox"/> Reduzir ganhos de calor nos períodos quentes, aproveitar nos períodos frios <input type="checkbox"/> Aproveitar potencialidades do espaço externo e evitar aspectos negativos <input type="checkbox"/> Conforto térmico interno satisfatório <input type="checkbox"/> Vedação e isolamento térmico e acústico da esquadria <input type="checkbox"/> Propriedade térmica e ótica da esquadria <input type="checkbox"/> Evitar assimetria radiante e desconforto localizado <input type="checkbox"/> Iluminação natural adequada a atividade e uniformidade da luz <input type="checkbox"/> Estanqueidade a água e vento	
<b>Economia</b> Recursos iniciais Recursos de operação Ciclo de vida	<input type="checkbox"/> Custo-benefício compatível <input type="checkbox"/> Redução do impacto ambiental <input type="checkbox"/> Redução de manutenção	<input type="checkbox"/> Aplicação de etiquetagem e selos de desempenho ambiental. <input type="checkbox"/> Atendimento à normas e legislação	<input type="checkbox"/> Flexibilidade <input type="checkbox"/> Eficiência energética <input type="checkbox"/> Reaproveitamento e reciclagem <input type="checkbox"/> Redução de emissão de gases de efeito estufa	<input type="checkbox"/> Custo para operação do sistema de abertura <input type="checkbox"/> Consumo energético requerido	
<b>Tempo</b> Passado Presente Futuro	<input type="checkbox"/> Preservação histórica <input type="checkbox"/> Ampliação do edifício e dos dispositivos anexos	<input type="checkbox"/> Aspectos históricos <input type="checkbox"/> Mudanças de uso do espaço previstas <input type="checkbox"/> Prospecções do uso e ocupação do solo no espaço urbano	<input type="checkbox"/> Adaptabilidade	<input type="checkbox"/> Planejamento de comissionamento, manutenção, e substituição de dispositivos	

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Aksamija (2013; Boyce; Hunter; Howlett (2003); Dogrusoy; Tureyen (2007); Hong et al. (2019); Ruck, N., Aschehoug, Ø., Aydinli, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., ... & Michel (2000).

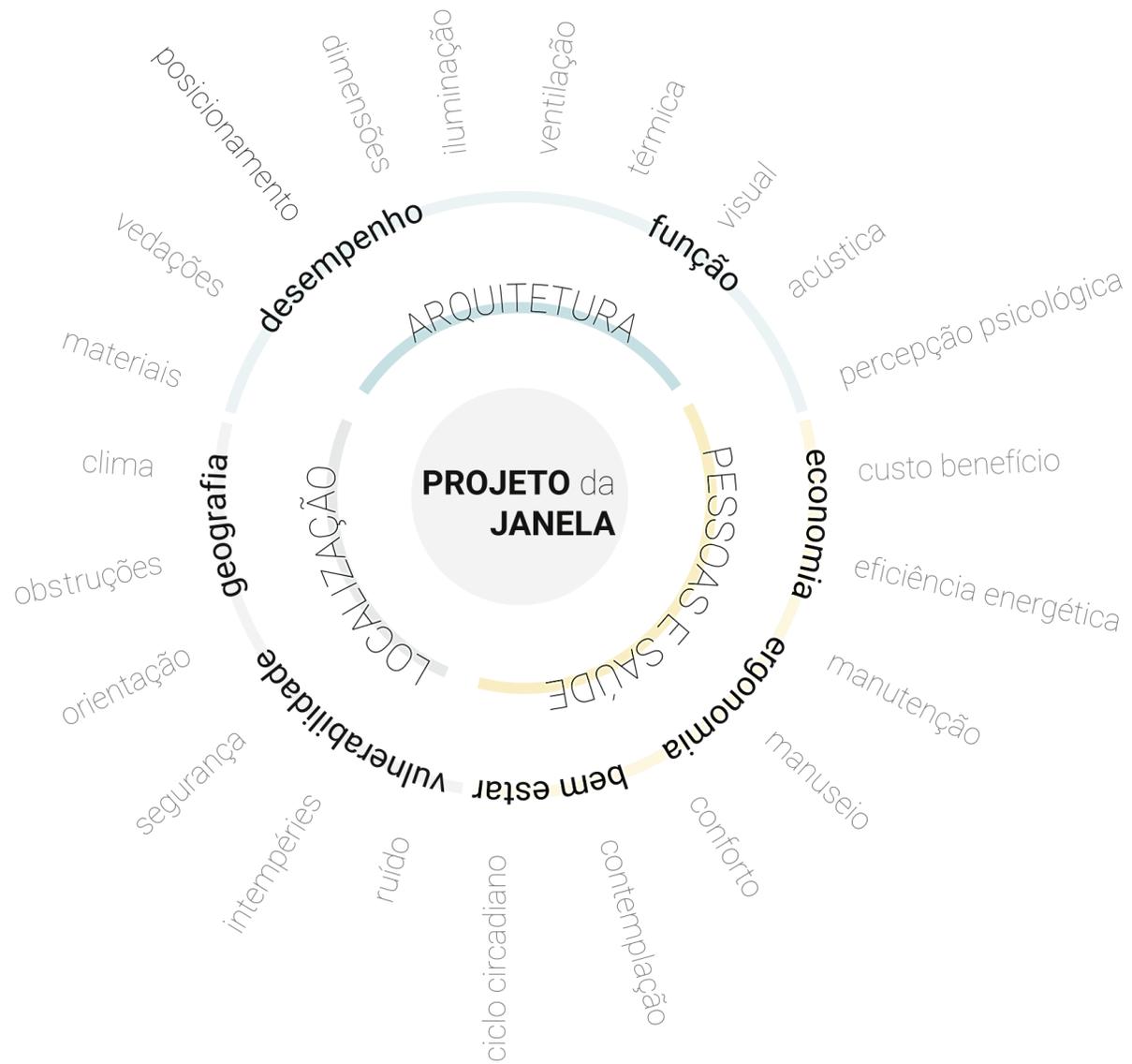


Figura 14. Diagrama-resumo: o projeto da janela. Fonte: Autor.

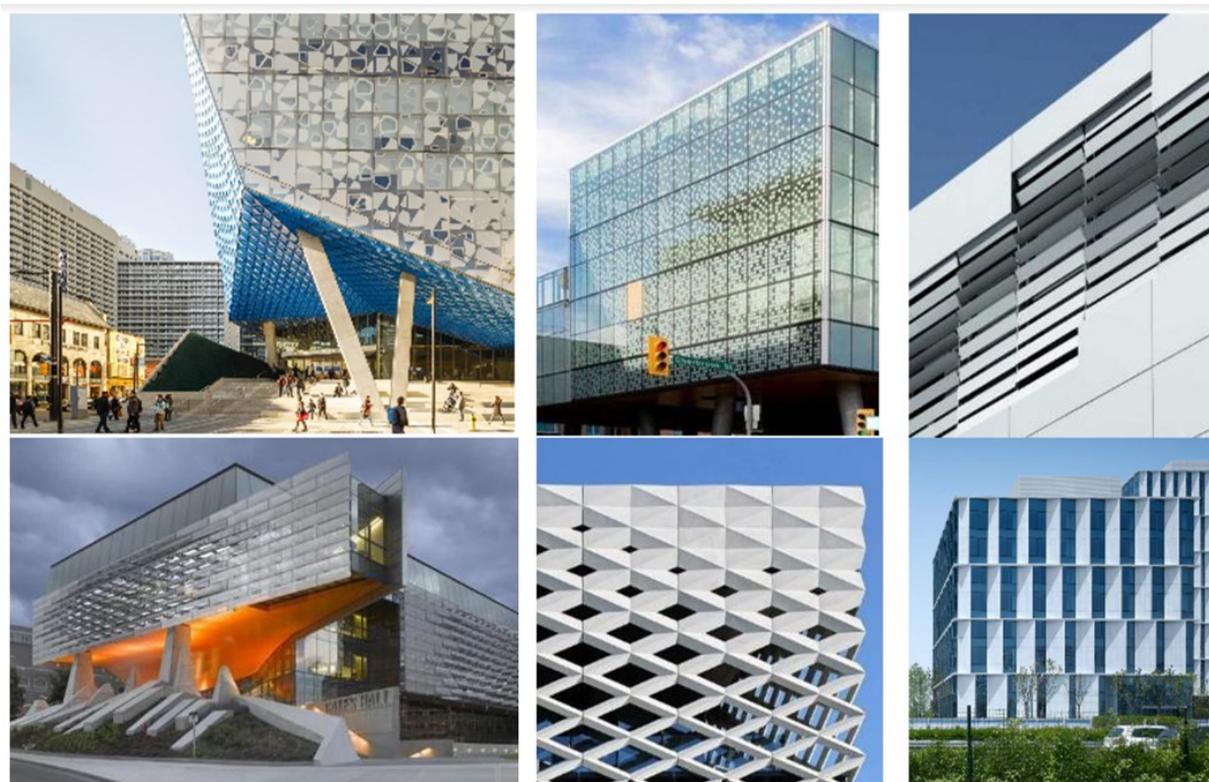
## 2.1.1 Dispositivos de controle solar - DCS

Para fins deste trabalho, entende-se como dispositivo de controle solar, materiais e sistemas anexados à janela e à fachada para exercer proteção ou redução da exposição da edificação a radiação solar. Este trabalho diferencia dois tipos de dispositivos de controle solar: os elementos de sombreamento, e os vidros de controle solar. O projeto dos dispositivos de controle solar na fachada é influenciado pelos ciclos climáticos e características geográficas, relacionadas a latitude, obstruções externas, albedo e orientação da fachada em relação ao sol (OLGYAY, 1963). As soluções são atreladas às características formais e às propriedades óticas e térmicas dos dispositivos projetados (RUCK et al., 2000).

O uso de dispositivos de controle solar é vital para o bom desempenho das fachadas. Principalmente as largamente envidraçadas, com vistas a conservação de energia dos edifícios (AL-MASRANI et al., 2018; IEA, 2013a; RUCK et al., 2000). Em relação ao desempenho energético das edificações, esses dispositivos, se bem projetados, podem colaborar prioritariamente com a redução da carga térmica de resfriamento. Um bom projeto também pode contribuir com a melhor distribuição da luz, e com o controle de outros aspectos de conforto térmico e luminoso, tais como, temperatura interna, desconforto térmico localizado e o controle de ofuscamento (RUCK et al., 2000; VALLADARES-RENDÓN; SCHMID; LO, 2017). Mais além, estes dispositivos podem oferecer proteção para privacidade, podem ser utilizados para o escurecimento dos ambientes, modular o contato visual com exterior, e possibilitar o uso de vidros mais transparentes. Dispositivos de controle solar também devem atender aspectos como: custo apropriado, apelo estético, concordância com as condições climáticas locais e permitir proteção a fogo, ruído, e do tempo (RUCK, N., ASCHEHOUG, Ø., AYDINLI, S., CHRISTOFFERSEN, J., COURRET, G., EDMONDS, I., ... & MICHEL, 2000).

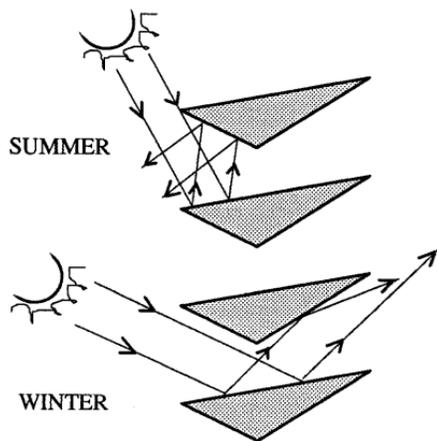
O projeto de dispositivos de controle solar é complexo e envolve uma grande quantidade de variáveis interconectadas, as quais muitas vezes, apresentam-se de maneira conflituosa no problema de projeto. Por exemplo, proteção da radiação solar versus a iluminação natural (RUCK et al., 2000). Um dispositivo de controle solar, deve evitar sobreaquecimento provocado pelo sol e ao mesmo tempo não prejudicar a viabilidade da luz. As variáveis envolvidas devem ser analisadas considerando múltiplos critérios, de forma a responder e colaborar com soluções para os conflitos apresentados (AL-MASRANI et al., 2018; KIRIMTAT et al., 2016; VALLADARES-RENDÓN;

SCHMID; LO, 2017). A Figura 15 ilustra diversas combinações de estratégias para o projeto do controle solar no projeto da fachada.

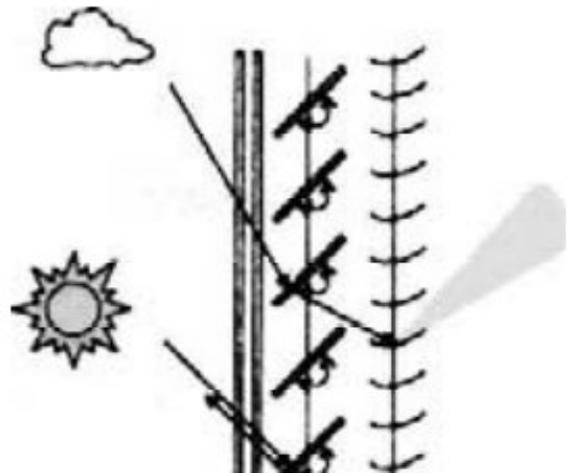


*Figura 15. Soluções de controle solar. Da esquerda para direita de cima para baixo: vidro impresso, vidro impresso, brises horizontais com padrão variável, brises complexos, brises complexos e janelas com variação da orientação e área.*

Como dito anteriormente, este trabalho diferencia dois tipos de dispositivos de controle solar: os elementos de sombreamento, e os vidros de controle solar. Segundo Kischkoweit-lopín (2002), elementos de sombreamento, podem ser internos ou externos, estáticos ou dinâmicos. Os elementos de sombreamento têm seu desempenho associado à sua forma, a maneira como é anexado à fachada e ao ambiente interno formando um conjunto ótico. Atuam primariamente na proteção e modulação da radiação direta, e admissão da radiação difusa (Figura 16). Porém, podem atuar também diretamente na radiação difusa, funcionando tanto como redirecionador da luz solar direta, como da difusa. O segundo tipo, menos comum, geralmente utiliza sistemas de espelhos e prismas, por isso são mais sofisticados e mais caros que o primeiro tipo (Figura 17). (KISCHKOWEIT-LOPIN, 2002; PEREIRA, 1992; RUCK, N., ASCHEHOUG, Ø., AYDINLI, S., CHRISTOFFERSEN, J., COURRET, G., EDMONDS, I., ... & MICHEL, 2000).



*Figura 16. Sistemas convencionais atuam primariamente na radiação direta. Fonte: Pereira (1992).*



*Figura 17. Sistemas de sombreamento que atuam também na radiação difusa, geralmente incorporam sistema mais sofisticados. Fonte: Kischkoweit-Lopin (2002).*

Os vidros de controle solar, atuam na radiação direta e na difusa agindo como “filtro” (GARG, 2007). De maneira geral, permitem que uma parcela da radiação direta atravesse o interior da edificação e atuam de maneira similar para diferentes momentos do dia. Há vidros dinâmicos disponíveis no mercado que mudam as propriedades de acordo com o ambiente externo (REZAEI; SHANNIGRAHI; RAMAKRISHNA, 2017), também há sistemas de vidro que interceptam a radiação direta e redirecionam a luz, atuando de forma semelhante a um elemento de sombreamento horizontal (THANACHAREONKIT; LEE; MCNEIL, 2013). Os dois últimos, ainda são sistemas considerados caros e nem sempre permitem planos de manutenção compatíveis com o projeto de arquitetura (RUCK et al., 2000).

A pesquisa apresentada por Inoue, (2003) exemplifica a associação de vidros dinâmicos e dispositivos de sombreamento. Na pesquisa, vidros termocrômicos são combinados a elementos de sombreamento fixo externos. Seus testes utilizam consumo de energia, temperatura superficial e temperatura interna como indicadores de desempenho. Os resultados indicam que a combinação ajuda no conforto localizado, redução do consumo de energia e melhor aproveitamento da luz natural nos espaços. Outra consideração apontada nas suas conclusões é a melhoria da visibilidade, uma vez que, o vidro dinâmico se mantém transparente quando sombreado. Sendo a combinação considerada positiva tanto para desempenho térmico, quando para desempenho da iluminação natural (Figura 18).

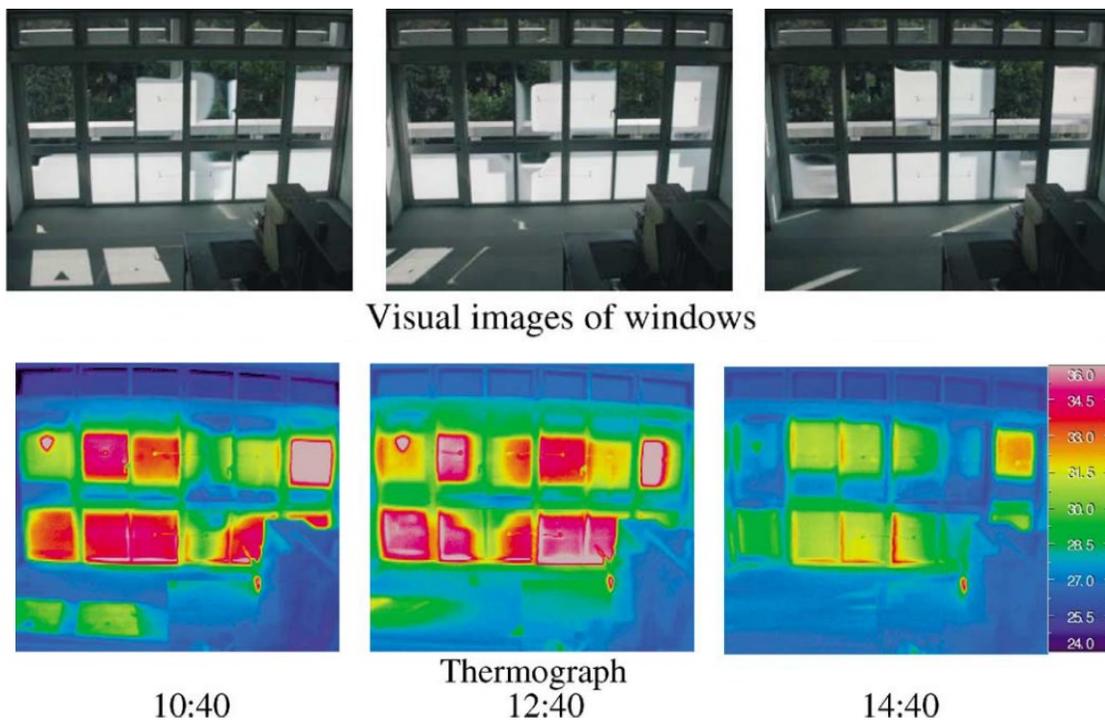


Figura 18. Vidros dinâmicos associados ao uso de sombreamento fixo externo. Fonte: Inoue (2003).

As Figura 19 e Figura 20 mostram duas referências de projetos de janelas associados a elementos de controle solar apresentadas por Aksamija, (2013). Ambos servem como exemplo sobre a complexidade do projeto da fachada. A primeira imagem mostra um estudo de caso para um hospital localizado em clima misto e úmido nos EUA. O edifício incorpora uma fachada envidraçada para uma orientação com muito contato com a radiação direta. O elemento de sombreamento único e horizontal protege a porção de vidro acima da altura dos olhos colaborando com a liberação da fachada transparente e redirecionamento da luz. Estudos quanto a mudança da forma do teto foram estabelecidos visando intensificar o efeito da distribuição. O conjunto atua melhorando a uniformidade da iluminação natural e protegendo uma parcela da abertura da radiação direta do sol. O projeto associou o elemento de sombreamento a três vidros diferentes: um vidro impresso (*fritted glass*) menos transparente na porção superior da abertura, um vidro *low-e* mais transparente no resto da abertura e um vidro opaco para esconder a estrutura.

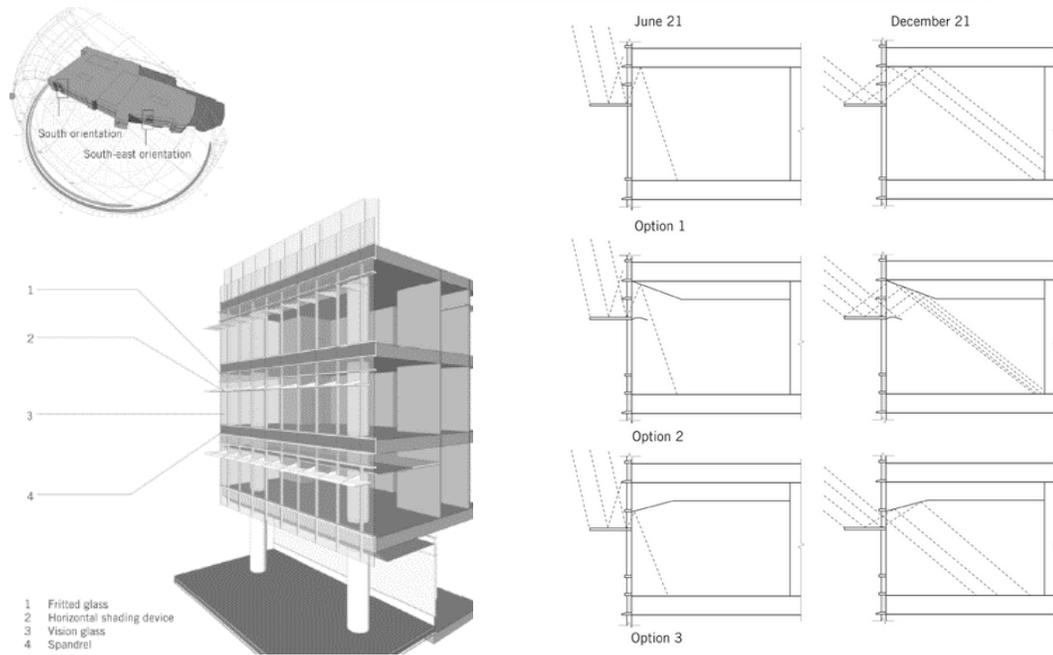
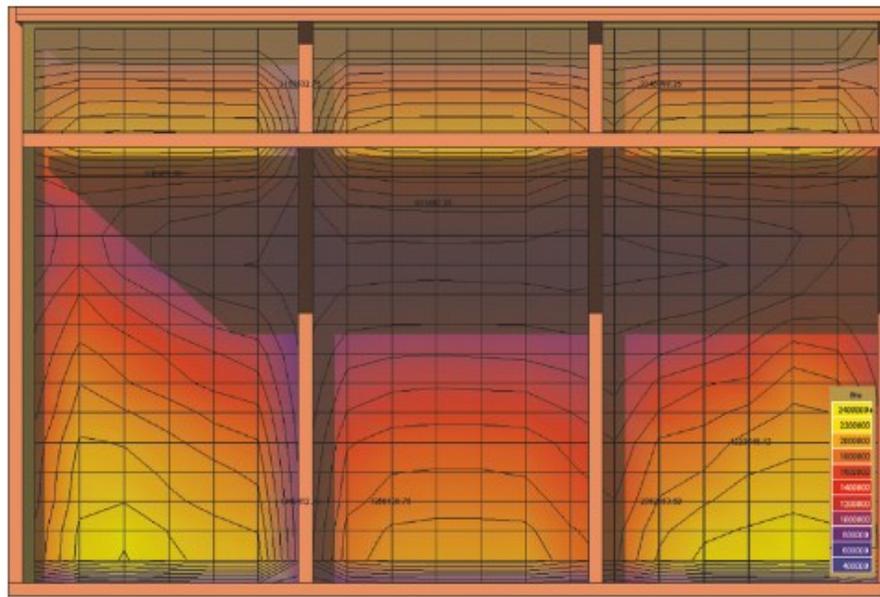


Figura 19. Estudos para fachada envidraçada em um hospital. Fonte: Aksamija (2013).

A segunda imagem mostra um estudo de caso para o edifício *Interdisciplinary Science & Technology* (IST) localizado no *Arizona State University* em *Tempe, Arizona*, cidade de clima quente e árido. Dessa vez, houve a escolha por elementos de sombreamento a frente da abertura, intercalados por aberturas com vidro de controle solar. As janelas são recuadas e moduladas de forma aumentar a proteção do sol por auto sombreamento e para reduzir efeito de vertigem causado por fachadas inteiramente envidraçadas nos pavimentos mais altos. O estudo dos ângulos de

inclinação dos elementos de sombreamento foi pensado tanto para proteção solar em períodos críticos, quanto para permissão dos visuais e permeabilidade da fachada.

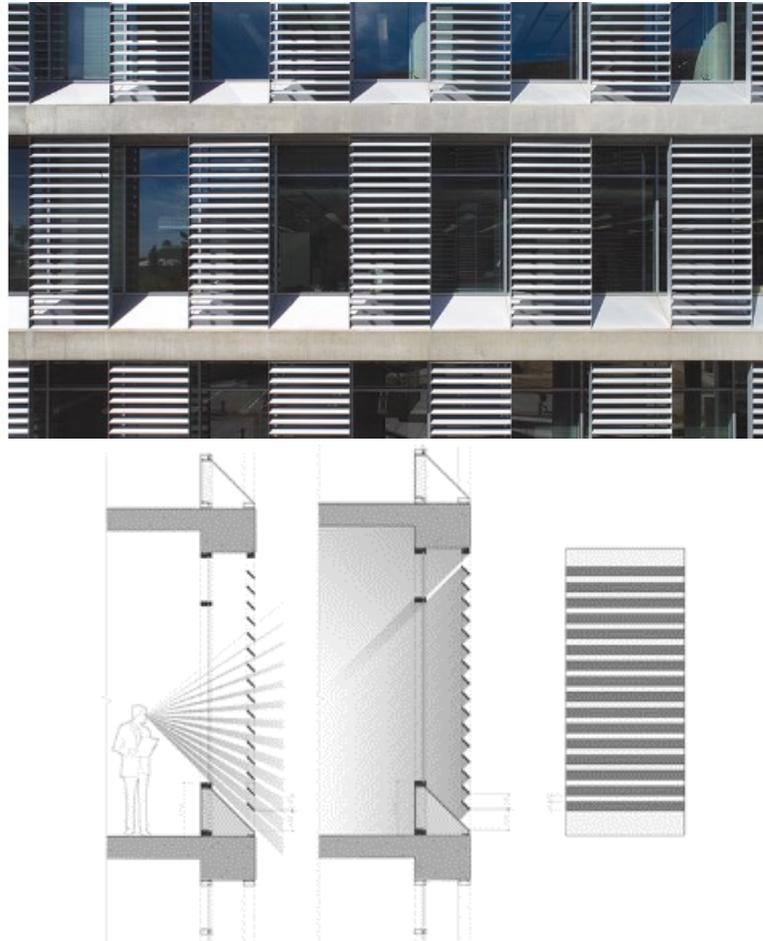


Figura 20. *Interdisciplinary Science & Technology (IST) em Tempe, Arizona. Fonte: Aksamija (2013).*

Huang; Niu; Chung (2014) realizaram uma pesquisa comparativa para estimar a redução do consumo dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar para diferentes dispositivos de controle solar, em fachadas para quatro orientações, e quatro cidades de clima quente: Singapura, Miami, Hong Kong e Houston. Os dispositivos de controle solar testados foram os vidros *low-e*, vidros insulados, um elemento horizontal de sombreamento (um beiral de 1 metro) e persianas internas. O vidro *low-e* e o elemento horizontal mostraram reduções significativas no consumo, sendo a redução de consumo provocada pela persiana interna menos preponderante (Figura 21).

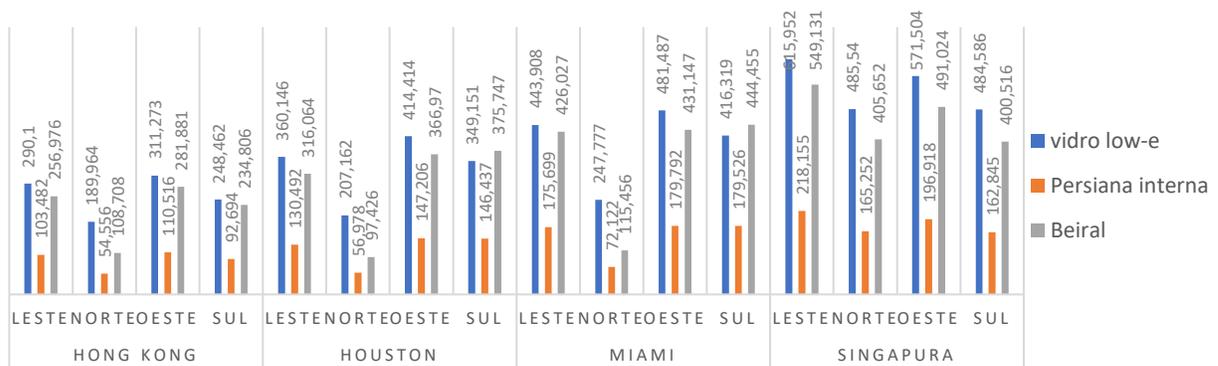


Figura 21. Redução de carga térmica para vidro low-e, sombreamento horizontal e persiana interna em Hong Kong, Houston, Miami e Singapura. Fonte: Huang; Niu; Chung (2014).

Com base na revisão de literatura foi possível elaborar um diagrama-resumo que exemplifica o funcionamento e relação de causa e efeito dos dispositivos de controle solar. Três considerações foram incorporadas: os dados de entrada, que dizem respeito a características relevantes externas para o projeto. A solução em si, que aborda o conjunto de elementos de sombreamento e vidros. E a interação com ambiente, que diz respeito ao funcionamento do conjunto ótico estabelecido (Figura 22).

Os itens 2.12 e 2.13, a seguir, deste referencial abordam com mais profundidade o funcionamento dos elementos de sombreamento e dos vidros, respectivamente. O foco do referencial são as soluções convencionais. Ou seja, não incluem sistemas sofisticados como sistema holográficos, prismas que dispersam a luz, toda diversidade de vidros dinâmicos e sistemas integrados de esquadrias (exemplo, esquadrias com persianas internas).

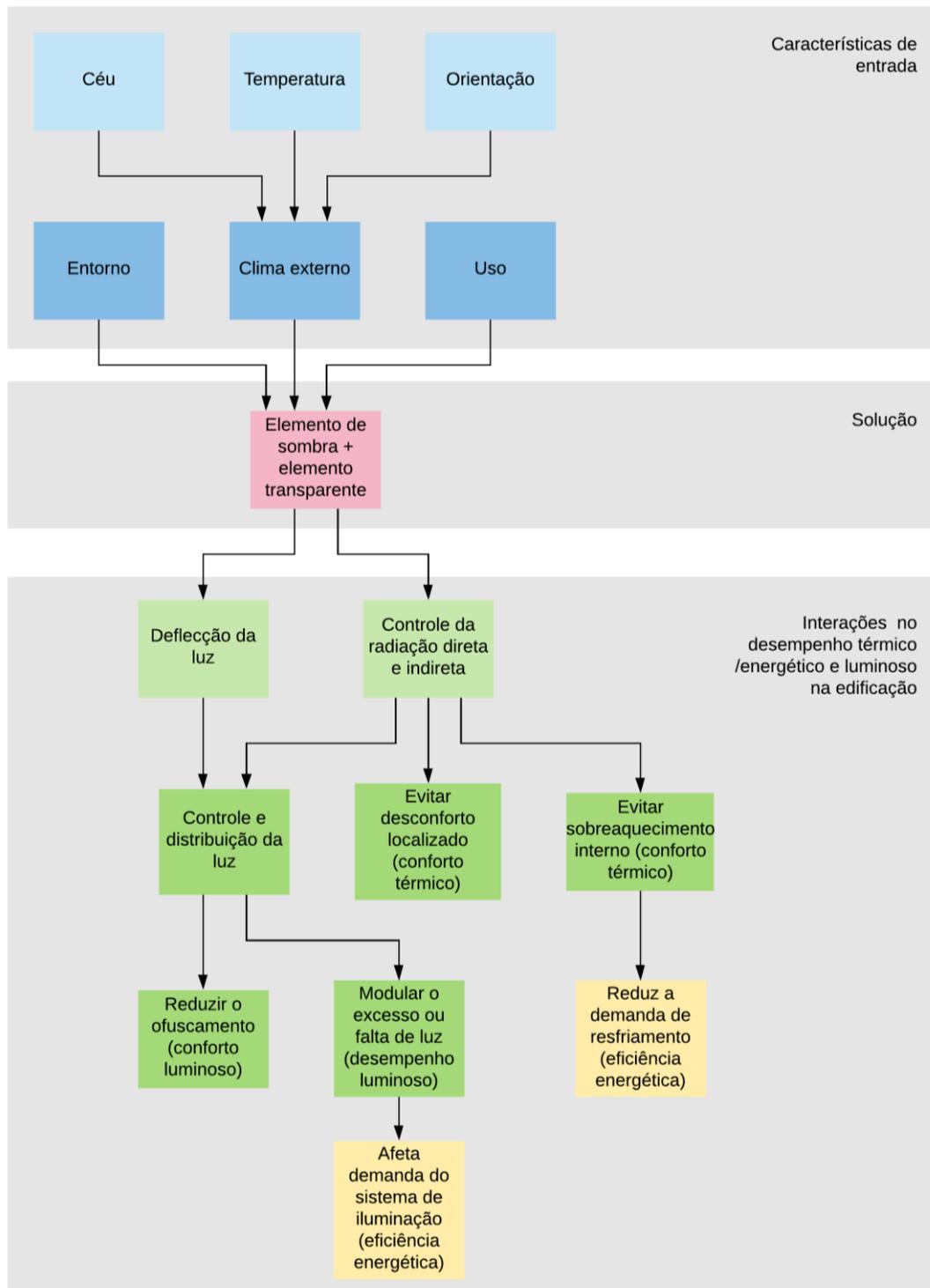


Figura 22. Interações dos elementos de controle solar e influência no desempenho térmico e luminoso. Fonte: elaborado pelo autor a partir de Aksamija (2013); Kischkoweit-Lopin (2002); Pereira (1992); Ruck et al. (2000).

## 2.1.2 Elementos de sombreamento

Os elementos de sombreamento, como os *brise soleil* e o cobogó (ver anexo 1) foram uma resposta adotada pelo Brasil ao estilo internacional moderno associado ao uso de grandes áreas envidraçadas e transparentes. Eles foram incorporados como estratégia climática para redução do sobreaquecimento. Aparecem em grande escala a partir da segunda metade dos anos 1930 (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). No ano de 1936 foi inaugurada a caixa d'água de Olinda, PE, edifício que ganhou destaque internacional na época por utilizar pela primeira vez um elemento vazado em larga escala feito de concreto patentado sob nome de Cobogó (ver anexo 1) (OLIVEIRA; BAUER, 2011). Em 1939 a inauguração do edifício do Ministério da Educação no Rio de Janeiro, com participação de arquitetos como Lúcio Costa e Le Corbusier, é considerado marco internacional da arquitetura pelo uso do *brise soleil* (SEGRE; BOAS; LEITÃO, [s.d.]).

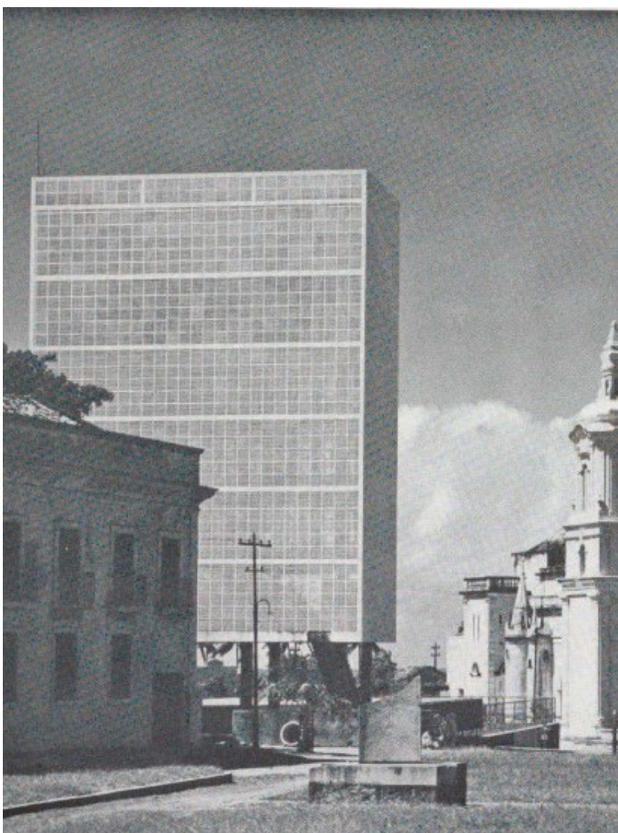


Figura 23. Caixa d'água de Olinda – PE, 1936.



Figura 24. Edifício do Ministério da Educação, RJ 1939/45.

A principal razão do uso de elementos de sombreamento é proteger a edificação da radiação direta do sol durante períodos de sobreaquecimento e dessa maneira, colaborar com a melhoria da performance do edifício e melhoria da qualidade do espaço interno (AL-MASRANI et al., 2018;

KISCHKOWEIT-LOPIN, 2002; RUCK et al., 2000). São três funções primordiais: interceptar a radiação direta, dispersá-la em forma de radiação difusa e regular a quantidade de iluminação difusa advinda do céu e do meio urbano adjacente (AL-MASRANI et al., 2018). Os estudos são categóricos a comprovar a importância do uso de elementos de sombreamento, mesmo quando associados a vidros de controle solar, ou mesmo, vidros dinâmicos, ou até, para climas frios (KARLSEN et al., 2016a; KIRIMTAT et al., 2016).

O projeto da fachada pode utilizar duas abordagens para gerar sombreamento. A primeira, o auto sombreamento da edificação, onde o próprio edifício promove a proteção solar da envoltória (Figura 25 e Figura 26). O segundo, o uso de elementos de sombreamento anexados, ou seja, elementos externos incorporados ao sistema de envoltória do edifício (Figura 27 e Figura 28) (VALLADARES-RENDÓN; SCHMID; LO, 2017).



*Figura 25. Edifício com auto sombreamento.*



*Figura 26. Edifício com auto sombreamento.*



*Figura 27. Edifício com elemento de sombreamento externo retrátil.*



*Figura 28. Edifício com elementos externos fixo de sombreamento.*

### 2.1.2.1 Tipos de elementos de sombreamento

Olgay (1963) é o primeiro autor identificado por este referencial que elenca uma série de combinações de elementos de sombreamento associados a abertura. Sua seleção mostra também exemplos de elementos vazados complexos utilizando técnica de modulação para composição (Figura 29). Sua classificação geral utilizou os elementos de sombreamento com lâminas horizontais e verticais considerando sombreamento externo e interno, organizados com base no fator de sombreamento em relação a uma abertura exposta (Figura 30).

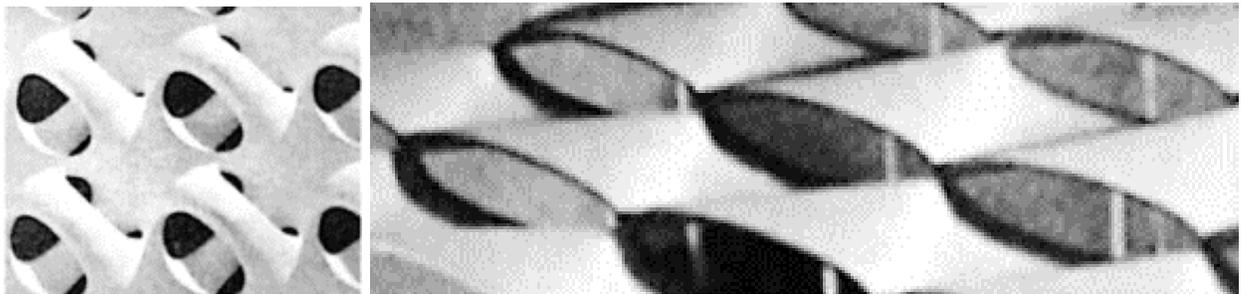


Figura 29. Elementos vazados complexos mostrado por Olgay (1963).

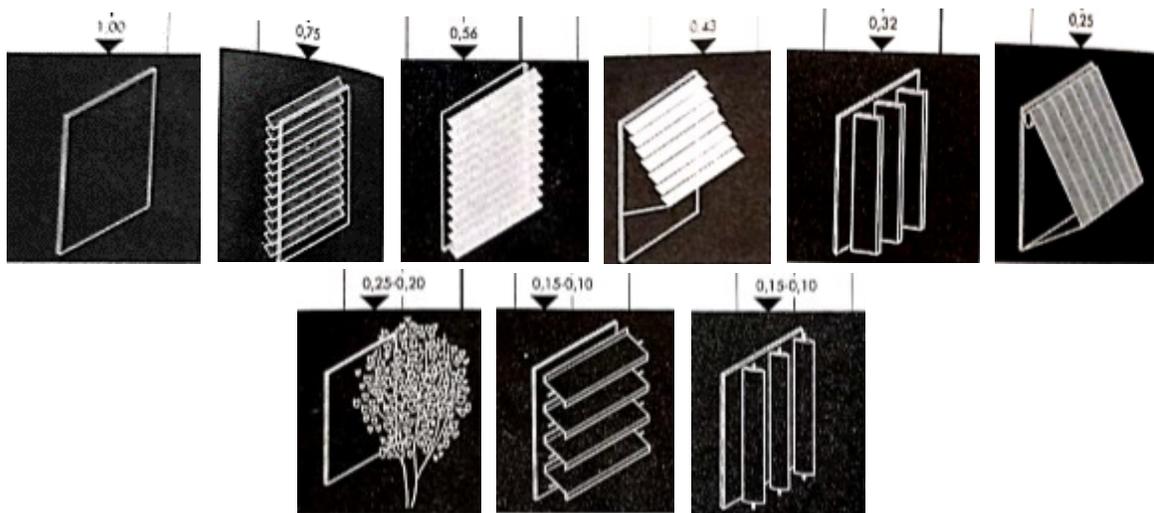


Figura 30. Escala de sombreamento de acordo com Olgay (1963).

Em relação ao funcionamento, os elementos de sombreamento anexados a envoltória podem ser **fixos** ou **móveis** (KIRIMTAT et al., 2016). Os fixos são os mais convencionais. Já os móveis podem ter acionamento manual ou por meio ativo. Os elementos móveis geralmente possuem o movimento de giro dentro do próprio eixo, de correr, ou também movimentos complexos. Estes últimos são associados a aspectos de materialidade e construção estrutural do elemento de sombreamento, como exemplo, o uso de técnicas de dobradura e membranas maleáveis. Dentre estes, destacam-se os que utilizam propriedades intrínsecas dos materiais para

exercer movimento; por exemplo, materiais que respondem a questões climáticas como umidade e temperatura. Esses materiais podem se dilatar e contrair a partir de mudanças do meio externo, e voltar à forma original associados a condição climática primária (AL-MASRANI et al., 2018).

Em relação ao posicionamento, os elementos podem ser **internos** ou **externos**. A principal diferença é a interceptação da radiação antes ou depois de atravessar o plano transparente da janela. Os elementos externos interceptam a radiação antes e protege as porções transparentes e opacas da fachada. Os elementos de sombreamento internos, permitem que a radiação direta atravesse. Na sequência, é parcialmente absorvida e parcialmente refletida para o exterior outra vez. É uma estratégia menos eficiente como proteção da radiação solar direta, mas podem ser utilizados para reduzir ofuscamento e para aumentar o isolamento da abertura (IEA, 2013a; VALLADARES-RENDÓN; SCHMID; LO, 2017).

Quanto à forma, os elementos de sombreamento podem ser **horizontais**, **verticais**, **mistos (grelha)**, do tipo **tela (cortina)**, ou possuir **desenhos complexos** (AL-MASRANI et al., 2018). De maneira geral, elementos de sombreamento são compostos por elementos horizontais e verticais combinadas entre si ou não (grelha). Eles podem ser anexados a frente das aberturas e envoltória; ou também na parte superior e/ou intermediária das aberturas (Figura 31). Podem projetar sombra através da combinação de ângulos e profundidades. Ao associar a estratégia de iluminação podem ter curvaturas que ajudam a direcionar a luz (KISCHKOWEIT-LOPIN, 2002). Os elementos do tipo tela ou cortina são superfícies dispostas no exterior da fachada ou no interior do ambiente. Podem ser translúcidas ou perfurados (Figura 27).

Elementos complexos, principalmente com o advento de processos de fabricação digital, vêm sendo utilizados como solução para fachadas. Geralmente, empregam-se estratégias como dobraduras, processos de tesselação de superfícies curvas, planos seriados e customização individual dos diferentes elementos que compõem os sistemas de sombreamento (Figura 34 e Figura 35) (IWAMOTO, 2010). Há explorações também quanto a materialidade, realizando combinações variando opacidade, reflexão e especularidade dos materiais (ver anexo 1) (Figura 33) (AKSAMIJA, 2013).

Algumas abordagens utilizam modelos matemáticos, associados a variáveis e parâmetros e que podem ser modificados simultaneamente passando por regras definidas previamente. O processo advém da popularização de métodos mais sofisticados de modelagem auxiliada por computador e modelagem paramétrica (ver anexo 1). Muitas vezes, possuem apelo puramente

estético, e as soluções pouco associadas às questões ambientais. Um desafio é associar modelos complexos de geometria a aspectos de desempenho. Incorporar processos de parametrização no processo de projeto pode ser uma forma importante de produzir envelopes customizados e otimizados em edifícios (AL-MASRANI et al., 2018).

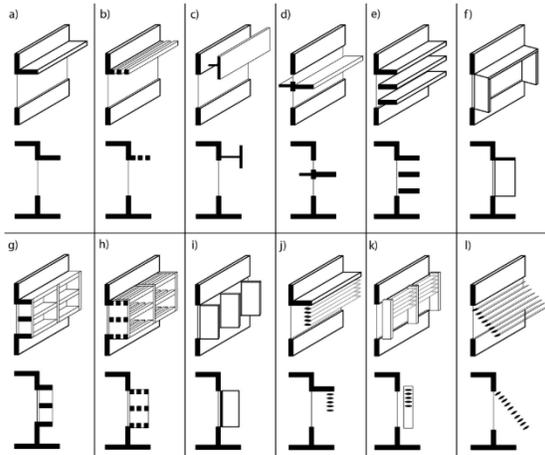


Figura 31. Elementos de sombreamento externo anexados a fachada. Fonte: Valladares-Rendón; Schmid; Lo (2017).



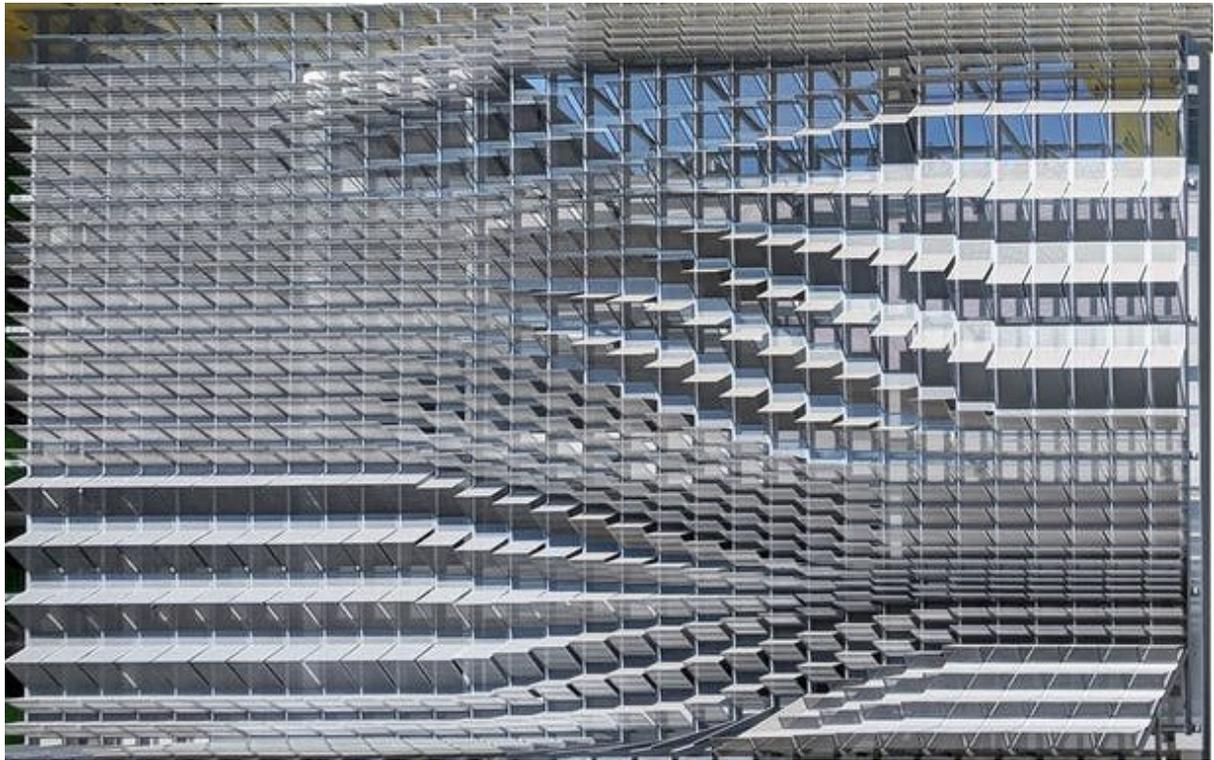
Figura 32. Sombreamento externo do tipo tela.



Figura 33. Sombreamento complexo com variação de opacidade e refletância. Protótipo para o Kuwait University College of Education parte para o master plan do Sabah Al-Salem University City no Kuwait. Fonte: Aksamija (2013).



Figura 34. Corte do museu Broad em Los Angeles, EUA mostrando elemento de sombreamento complexo.



*Figura 35. Edifício Garagem em Berkeley, Califórnia – EUA; mostrando customização individual dos elementos de sombreamento.*

A materialidade do elemento de sombreamento é relevante para sua função. Pereira (1992) utilizou elementos horizontais espelhados (alta refletância) na porção superior da janela para intensificar o efeito de distribuição de luz no espaço interno (Figura 9). Baker (2008) apresenta o uso persianas internas com organização *honeycomb* e barreira de baixa emissividade para melhorar a resistência da esquadria. Frighi (2022) aborda o uso de elementos de sombreamento externos com materiais translúcidos (que difundem a luz) para controle do ofuscamento e privacidade. Hofer et al. (2016) apresentam soluções de elementos de sombreamento externos dinâmicos associados a células fotovoltaicas para diversificar sua função primária através da produção de energia. Já Bianco et al. (2018) estudam o uso de materiais com mudança de fase (PCM) para combinar vantagens de um elemento de sombreamento translúcido com a dinamicidade do PCM para modular radiação e variar a inércia térmica do conjunto da fachada.



Figura 36. Materialidade de elementos de sombreamento. Fonte: a, Baker (2008); b e c, Hofer et al. (2016).

A Figura 37 apresenta um diagrama resumo que inclui a classificação dos elementos de sombreamento abordados neste tópico. O diagrama tem a intenção de apresentar uma classificação abrangente com base no funcionamento, localização, forma e funções dos elementos de sombreamento, proporcionando uma visão panorâmica das estratégias de projeto relacionadas a esses elementos. Essa categorização auxilia na compreensão e na seleção adequada dos dispositivos de controle solar, considerando suas características e benefícios específicos para a performance da envoltória arquitetônica.

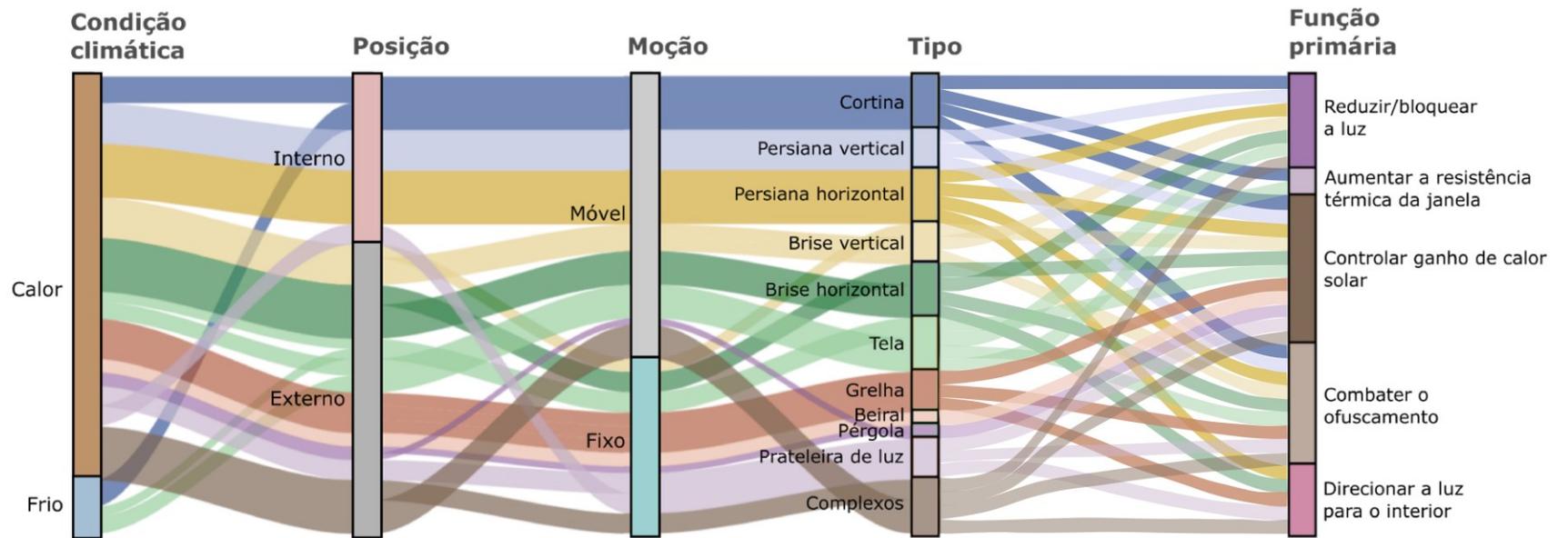


Figura 37. Diagrama-resumo: função dos elementos de sombreamento. Fonte: Autor.

### 2.1.3 Vidros

O elemento de sombreamento também deve estar associado à escolha e especificação de vidros adequados. Dessa forma, é possível combinar estratégias que visam modular e proteger a radiação direta do sol, ao mesmo tempo em que se reduz ou se aproveita a radiação indireta, na qual o elemento de sombreamento externo convencional exerce menor influência (KISCHKOWEIT-LOPIN, 2002).

Os planos transparentes permitem a passagem parcial da radiação solar direta e indireta para o interior. Proporcionam visibilidade e ao mesmo tempo, proteção do vento e da chuva. A influência do vidro no desempenho do edifício está associada ao nível de transparência, ao balanço térmico, à área de abertura envidraçada e à combinação com elementos de proteção solar. As propriedades térmicas e óticas do vidro devem ser consideradas na escolha, sendo que apresentam uma característica conflitua no projeto arquitetônico, uma vez que, o vidro deve proteger a edificação da radiação solar em períodos quentes e ao mesmo tempo, permitir a entrada de boa parte do espectro de luz visível para iluminação natural (AKSAMIIJA, 2013; SCHITTICH et al., 2013).

A radiação solar é composta por vários comprimentos de onda (Figura 38). O vidro permite a passagem parcial de alguns comprimentos, sendo que a radiação infravermelha de onda longa, não atravessa a porção transparente, assim como nos materiais opacos. A opacidade do vidro à radiação infravermelha de onda longa pode contribuir com o sobreaquecimento do ambiente quando não há renovação de ar suficiente (SCHITTICH et al., 2013). As superfícies internas, equipamentos e pessoas emitem radiação de onda longa, que contribui com o aumento da temperatura interna. Por essa razão, o uso do vidro pode impactar termicamente tanto no desempenho de resfriamento, quanto no desempenho de aquecimento dos ambientes internos. Assim sendo, podem ser utilizados como estratégia para aquecimento solar passivo em climas frios. Já para climas quentes, são adicionados tratamentos ao vidro para reduzir o montante de radiação que atravessa o plano transparente para o ambiente interno e assim, reduzir o efeito de sobreaquecimento (GARG, 2007; REZAEI; SHANNIGRAHI; RAMAKRISHNA, 2017; SCHITTICH et al., 2013).

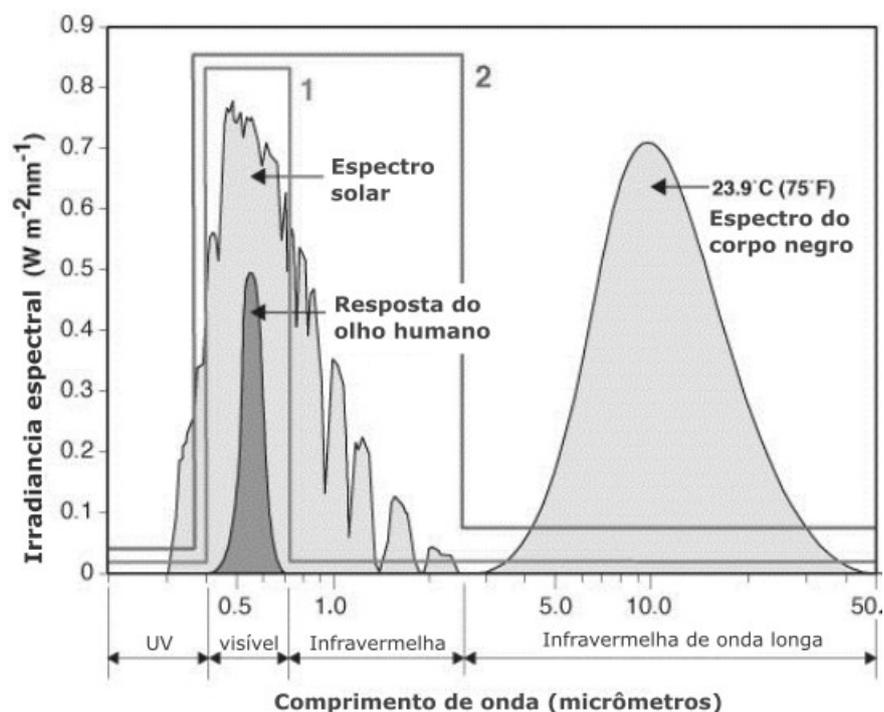


Figura 38. Comprimentos de onda da Radiação solar e de corpo negro.

Westphal, (2016) agrupa as propriedades do vidro relevantes ao projeto de arquitetura em dois grandes grupos com interconexões entre eles: calor e luz. O desempenho acústico, por sua vez está relacionado ao arranjo dos vidros e o projeto da esquadria. Dentro do grupo associado ao calor, é relevante a transmissão energética do vidro, representada pelo seu fator solar. Dentro do grupo associado à luz, a transmissão visível é o fator mais relevante. A reflexão em cada face do vidro deve ser observada e a sua propriedade de absorção (WESTPHAL, 2016). Garg (2007) e Rezaei et al. (2017) elencam mais indicadores. Agrupando considerações de Garg (2007), Westphal (2016) e Rezaei et al. (2017), as características térmicas e óticas do vidro relevantes ao projeto são:

1. Transmissão da luz visível (%): percentual da radiação transmitida no espectro visível, entre 380 e 780 nanômetros.
2. Reflexão da luz visível (%): o percentual da luz visível refletida.
3. Transmissão de Raios ultravioleta (%): percentual da radiação ultravioleta transmitida.
4. Transmissão da energia solar (%): percentual da energia solar incidente transmitida pelo vidro.
5. Reflexão da energia solar (%): percentual da energia solar incidente refletida pelo vidro.
6. Energia solar absorvida (%): Percentual da energia solar incidente absorvida
7. Fator solar: é o montante de energia entrando no edifício, expressa como o percentual da energia solar incidente.

8. Coeficiente de sombreamento: Divisão entre o fator solar do vidro em relação ao de um vidro simples de 3 mm com fator solar de 0,87.
9. Transmitância térmica (U) (W/m<sup>2</sup>K): montante de calor transferida através de 1m<sup>2</sup> de vidro para provocar uma diferença de 1 grau de temperatura entre o interior e o exterior. O isolamento térmico do vidro é expresso pelo valor da sua transmitância.
10. Índice de seletividade teórica: é a razão entre a transmissão visível do vidro e seu fator solar.
11. Emissividade: é o calor (radiação de onda longa) irradiado por um material em relação a um corpo negro ideal (a emissividade do corpo negro é igual a 1).

O balanço da radiação que incide sobre o vidro é o somatório da radiação que é refletida, transferida e a radiação absorvida, que por sua vez, é re-irradiada em forma de calor (Figura 40) (SCHITTICH et al., 2013; WESTPHAL, 2016). O vidro ideal para um clima quente que refletisse toda radiação infravermelha e UV do sol e permitisse que toda a luz visível entre no ambiente. Para climas frios, o ideal seria um vidro que permitisse a entrada de todo comprimento de onda de radiação do exterior, exceto UV e refletisse todas as radiações do interior (REZAEI; SHANNIGRAHI; RAMAKRISHNA, 2017). Dessa forma, a equação do balanço de radiação do vidro é dada por:

$$q_{conv} + q_{cond} + q_{refl} = q_{total} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

$q_{total}$  é a radiação incidente,  $q_{conv}$  é a radiação transferida,  $q_{cond}$  é a radiação absorvida e  $q_{refl}$  é a radiação refletida.

As propriedades de controle solar do vidro podem ser modificadas e melhoradas de várias maneiras. Os vidros de controle solar possuem adição de componentes metálicos para aumentar a reflexão e/ou absorção de determinados comprimentos de onda e reduzir emissividade (vidros *low-e*). O vidro *low-E* (*Low-Emissivity*) (ver anexo 1) possui uma camada de revestimento que tem a capacidade de refletir parte da radiação térmica e solar, permitindo que o vidro reduza a transferência de calor através dele. Dependendo do tratamento, tanto a estética, quando as propriedades óticas e térmicas do vidro sofrem alterações (Tabela 2). Esses tratamentos podem ocorrer na superfície do vidro, ou misturados a sua massa (SCHITTICH et al., 2013; WESTPHAL, 2016).

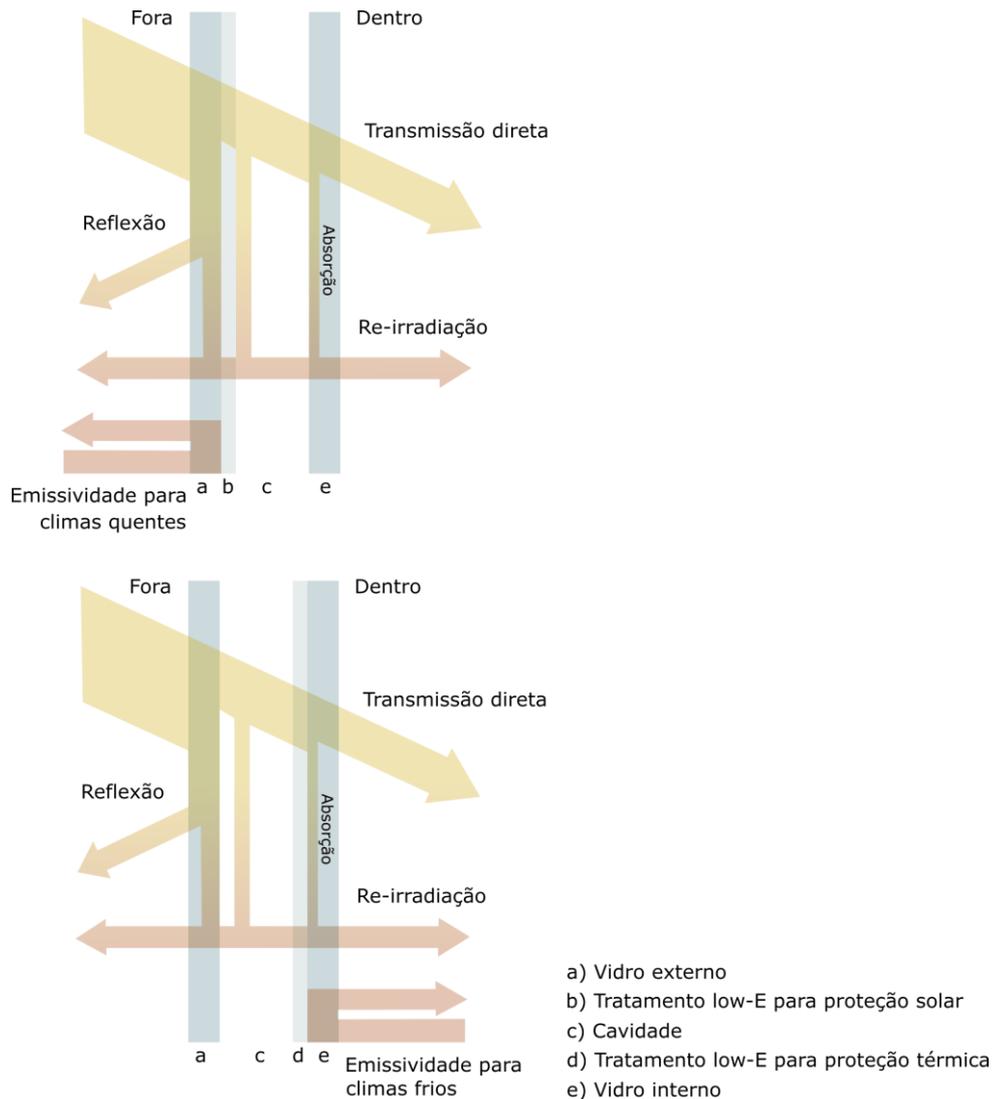


Figura 39. Balanço da radiação no vidro duplo com tratamento low-e. Fonte: elaborado pelo autor.

Uma das maneiras mais acessíveis de tratamento no vidro é o revestimento metálico e o uso de filmes aplicados a sua superfície modificando suas propriedades de refletância e absortância e até emissividade (CIBSE, 2004; SCHITTICH et al., 2013). A Figura 40 mostra um comparativo de um vidro simples com outro com revestimento metálico de baixa emissividade. Dependendo do metal, o vidro pode adquirir tom esverdeado, bronze, cinza ou uma combinação entre os três. O tratamento na superfície interna, ou externa com maior ou menor refletividade também modifica a aparência final (Tabela 2). Um elemento responsável pelo aumento da absorção é o óxido de ferro que dá um tom verde ao vidro e é responsável por um pico de redução da transmissão da radiação solar por volta do comprimento de 1000 nm (SCHITTICH et al., 2013; WESTPHAL, 2016). A Figura 41 mostra o comparativo do espectro de radiação nos vidros: o claro, verde e o bronze. O vidro verde e bronze possuem fator solar semelhante, porém transparências (transmissão da luz visível) significativamente diferentes.

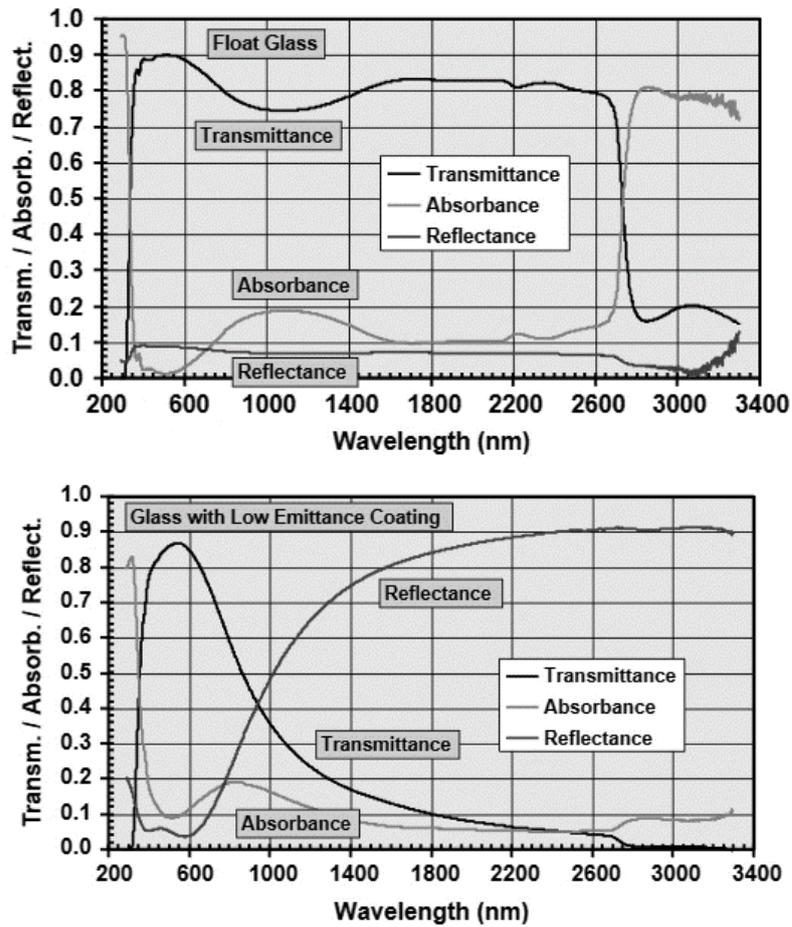


Figura 40. Balanço do vidro monolítico comum e low-e de alta eficiência para diferentes comprimentos de onda da radiação solar. Fonte: Jelle (2013).

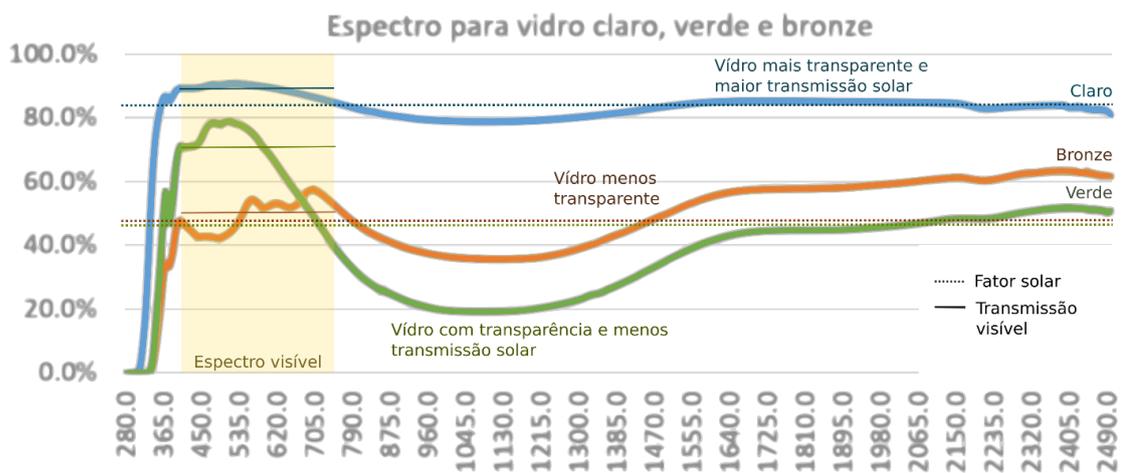
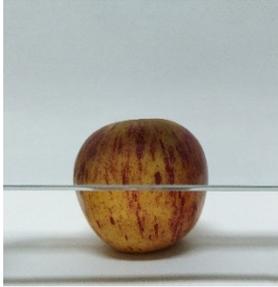
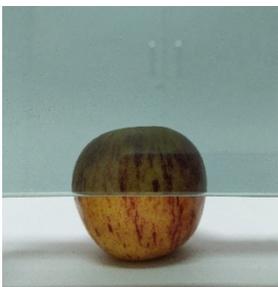
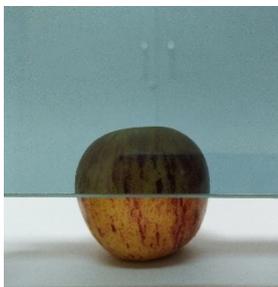
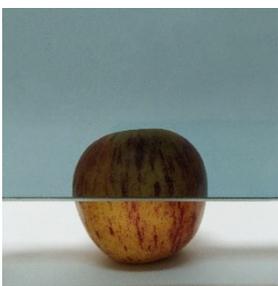
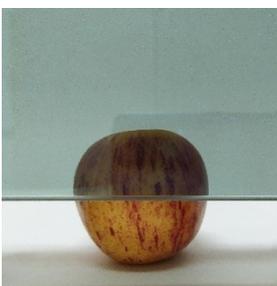
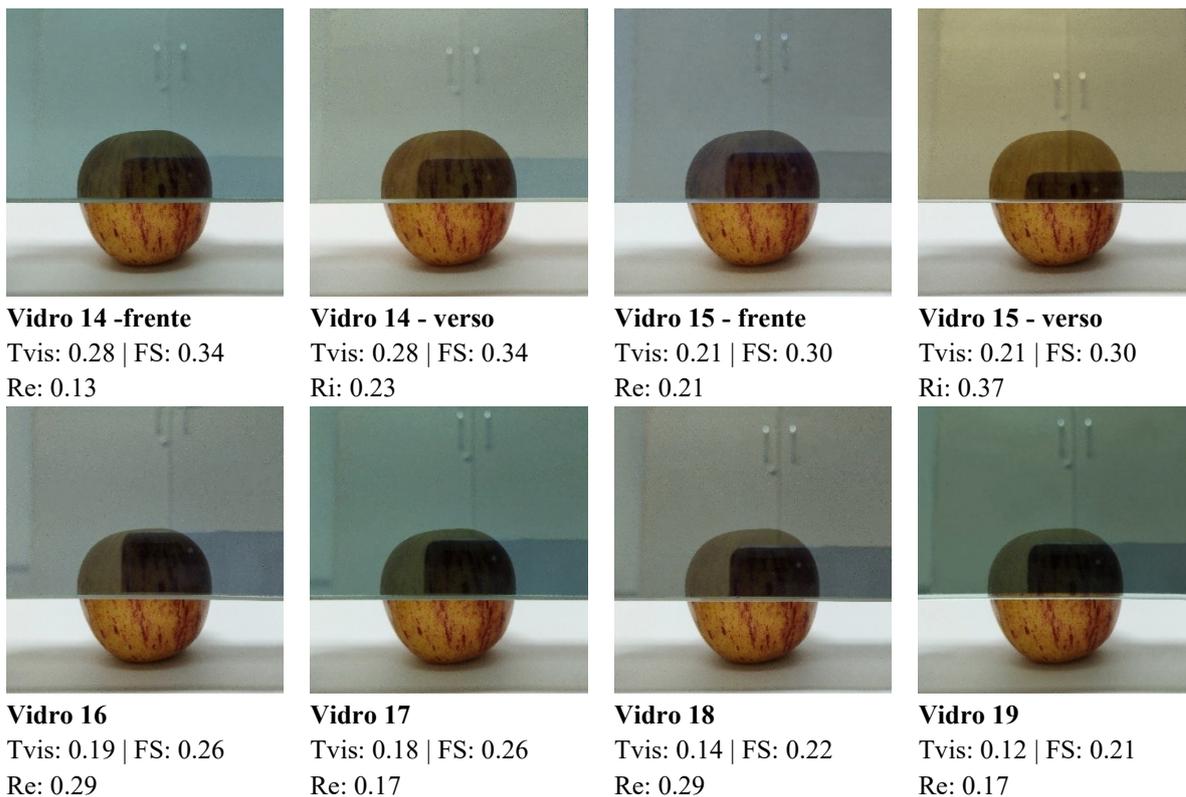


Figura 41. Espectro para vidro monolítico claro, verde e bronze. Fonte: elaborado pelo autor a partir do Optics6.

Tabela 2. Diferentes vidros organizados pela transmissão visível. Fonte: Propriedades e aparência dos vidros (2022).

			
<b>Vidro 01–Clear 4mm</b> Tvis: 0.90   FS: 0.87 Re: 0.08	<b>Vidro 02 - verso</b> Tvis: 0.82   FS: Ri: 0.19	<b>Vidro 02 - frente</b> Tvis: 0.82   FS: Re: 0.15	<b>Vidro 03-Verde 4mm</b> Tvis: 0.81   FS: 0.65 Re: 0.06
			
<b>Vidro 04 –Bronze 4mm</b> Tvis: 0.60   FS: 0.66 Re: 0.06	<b>Vidro 05 –Cinza 4mm</b> Tvis: 0.56   FS: 0.66 Re: 0.06	<b>Vidro 06</b> Tvis: 0.54   FS: 0.41 Re: 0.30	<b>Vidro 07</b> Tvis: 0.52   FS: 0.57 Re: 0.13
			
<b>Vidro 08</b> Tvis: 0.46   FS: 0.46 Re: 0.10	<b>Vidro 09</b> Tvis: 0.43   FS: 0.38 Re: 0.23	<b>Vidro 10</b> Tvis: 0.43   FS: 0.38 Re: 0.18	<b>Vidro 11</b> Tvis: 0.38   FS: 0. Ri: 0.25
			
<b>Vidro 11</b> Tvis: 0.38   FS: 0. Re: 0.10	<b>Vidro 12 - verso</b> Tvis: 0.32   FS: 0.35 Ri: 0.27	<b>Vidro 12 - frente</b> Tvis: 0.32   FS: 0.35 Re: 0.18	<b>Vidro 13</b> Tvis: 0.32   FS: 0.40 Re: 0.20



### 2.1.3.1 Tipos de vidros

Quanto a sua composição na esquadria o vidro pode ser monolítico, laminado ou insulado. O primeiro, é composto de uma única lâmina simples de vidro, ou seja, uma única camada plana de vidro. Sendo que pode ser colorido, *low-e* ou qualquer outro processo. O segundo combina duas ou mais camadas de vidros coladas em paralelo. A laminação intermediária atua como agente colante. Um vidro laminado também pode utilizar vidro colorido, *low-e*, ser serigrafado ou pigmentado (Figura 42). O terceiro, é uma estratégia para reduzir a transmitância térmica do vidro. Refere-se a duas ou mais lâminas de vidro colocadas em paralelo separadas por uma câmara de ar hermeticamente selada em seu perímetro. Pode ser composto por duas lâminas ou mais de vidro (Figura 43) (PATTERSON, 2011; SCHITTICH et al., 2013).

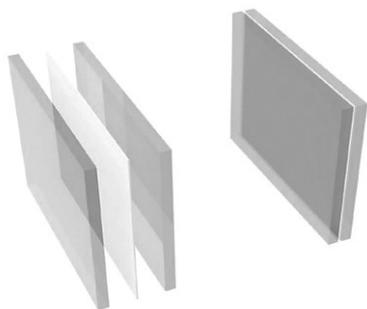


Figura 42. Vidro laminado.

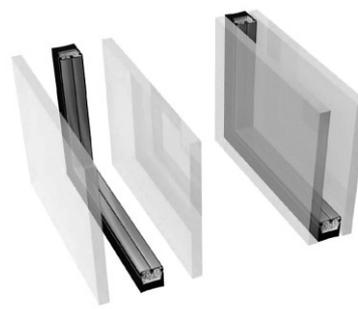


Figura 43. Vidro insulado.

Quanto a responsividade, os vidros podem ser estáticos, ou responsivos (mudam de acordo com o ambiente ou necessidade). Exemplos de vidros responsivos são os vidros termocrômicos que variam a transmissão visível de acordo com sua temperatura superficial de forma passiva. Quanto ao acionamento, podem ser ativos (acionamento elétrico) ou passivos. Um exemplo de vidro ativo e responsivo é o vidro eletrocrômico que é acionado pelo usuário, ou sensores.

Pesquisas para aprimoramento do desempenho térmico e ótico de vidros combinam diferentes materiais de apelo tecnológico. É possível citar incorporação de células fotovoltaicas para produção de energia (LI et al., 2009), materiais com mudança de fase (PCM) para adicionar inércia térmica e responsividade (SILVA; VICENTE; RODRIGUES, 2016) e avanços para aumentar o isolamento da janela, como a incorporação de aerogel (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2011). Com base em uma extensa revisão de literatura, Rezaei et al. (2017) apresentam uma classificação de tipos de vidros existentes com base em suas funções. A classificação apresentada pelos autores foi adaptada incluindo mais referências e agrupamentos levantados neste referencial e é apresentada na Figura 44.

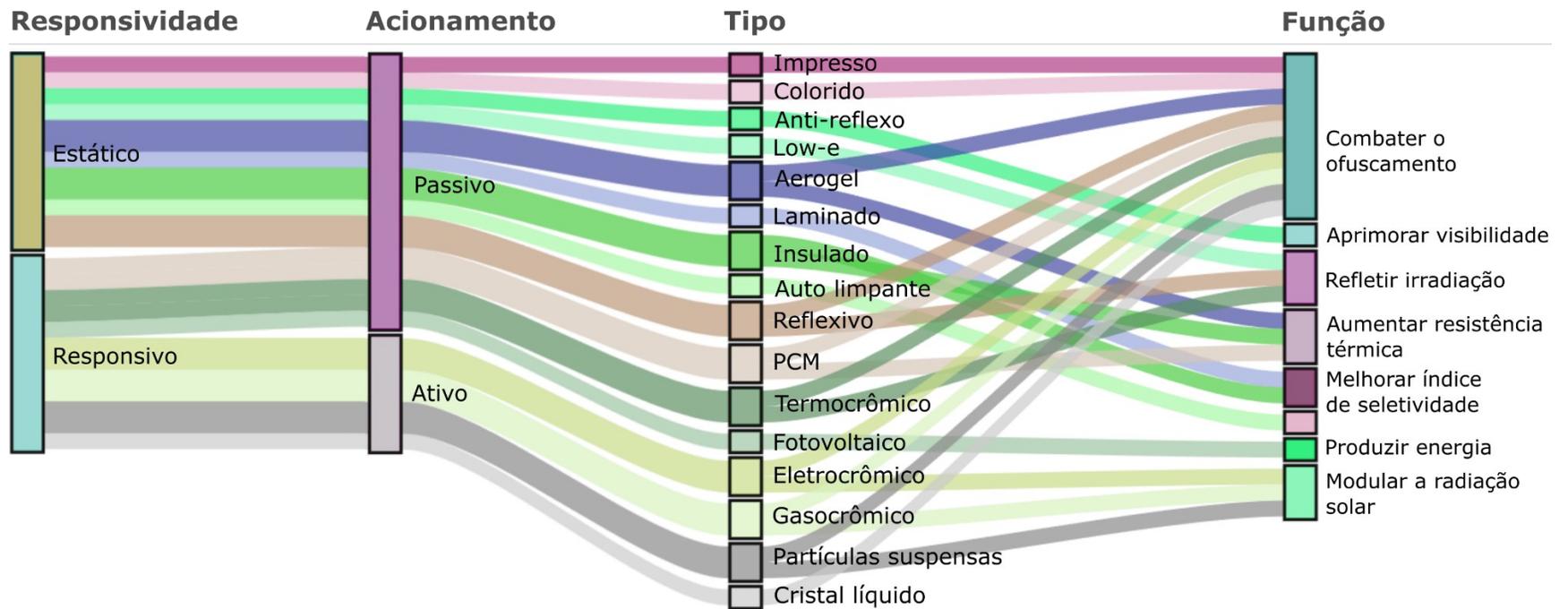


Figura 44. Tipos de vidro. Fonte: Autor a partir da revisão teórica.

## 2.1.4 Indicadores de desempenho para DCS

Esta etapa aborda indicadores de desempenho encontrado na literatura para análise de dispositivos de controle solar. Neste sentido, foca em pesquisa de desempenho de janelas, vidros e elementos de sombreamento no que tange seu desempenho térmico e de iluminação natural. Inicialmente traça um panorama a partir da seleção de artigos científicos realizados por trabalhos de revisão de literatura e na sequência foca em pesquisa individuais de jornais e revistas de impacto.

Kirimtat et. al (2016) levantou 109 artigos de relevância entre 1995 e 2015 sobre simulação do desempenho de elementos de sombreamento e esquadrias. Sua pesquisa aponta tendência de pesquisas, tais como, análises integradas com múltiplos aspectos de desempenho na investigação da eficiência dos dispositivos. Esses aspectos incluem estudos para orientação otimizada, iluminação natural, desempenho térmico e desempenho energético. Ainda segundo Kirimtat et. al (2016) os softwares mais utilizados para as pesquisas são o *EnergyPlus* e o *Radiance*, seguidos pelo DOE2. Destaca-se interfaces para o *EnergyPlus* e *Radiance* como o *Design Builder*, e o *Diva* para *Rhinoceros 3D*. Os tipos de elementos de sombreamento mais pesquisados são as venezianas, os elementos externos fixos, os elementos de correr internos, as prateleiras de luz e por último os sistemas de grelha, que apesar de menos pesquisados, são reconhecidos como o tipo de elemento externo mais eficiente por combinar sombreamento horizontal e vertical (AL-MASRANI et al., 2018; KIRIMTAT et al., 2016).

Já Al-Masrani et al. (2018) apresentam uma revisão de artigos sobre otimização de elementos de controle solar. O trabalho apresenta conclusões semelhantes às de Kirimtat et al. (2016). Quanto aos indicadores, ambos os trabalhos apresentam mudanças da adoção de indicadores de desempenho relacionados a iluminação natural. O motivo é o surgimento de novas métricas e indicadores dinâmicos, como o *spacial Daylight Autonomy* (sDA) e *Annual sunlight exposure* (ASE) (LM, 2013), o *Useful Daylight Illuminance* (UDI) (NABIL; MARDALJEVIC, 2006), o *Daylight Glare Probability* (DGP) (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2005), o DGP dinâmico (WIENOLD, 2009), e o *Glare autonomy* e *GLANCE* (sDGP)(GIOVANNINI et al., 2020; JONES, 2019). Em decorrência das métricas recentes, é apresentado o conceito dos indicadores térmicos e de iluminação natural nos próximos itens desta seção.

#### 2.1.4.1 Indicadores de desempenho térmico e energético

Os índices de desempenho térmico são utilizados para avaliar e comparar o desempenho térmico de ambientes internos e estão diretamente relacionados ao desempenho energético. Isso se deve ao fato de que uma parcela significativa da demanda energética de um edifício está relacionada ao condicionamento do ar. Este item apresenta indicadores térmicos e energéticos comumente encontrados na literatura, que são utilizados para avaliar o ambiente interno e o desempenho das janelas. Esses índices permitem uma comparação objetiva entre diferentes soluções arquitetônicas e tecnológicas no que diz respeito ao desempenho térmico e energético. São eles:

1. Voto Médio Predito (PMV): Este índice prevê o voto médio que um grupo de pessoas daria para o seu nível de conforto térmico com base na temperatura, umidade, velocidade do ar e temperatura radiante média do ambiente interno. Utiliza a escala de sensações de 7 pontos. Foi criado por Fanger (1972) em estudos em câmaras climatizadas artificialmente. O PMV é calculado usando a equação:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) * L \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

M é a atividade exercida pelo indivíduo e L, a carga térmica atuante sobre o corpo.

2. Porcentagem de pessoas Insatisfeitas (PPD): Este índice prevê a porcentagem de pessoas em um grupo que estariam insatisfeitas com seu nível de conforto térmico com base nos mesmos fatores que o PMV.
3. Temperatura Efetiva (ET): Este índice leva em conta os efeitos combinados de temperatura, umidade e velocidade do ar no conforto térmico.
4. Temperatura Operativa (OT): Este índice é semelhante ao ET, mas também leva em conta a temperatura radiante média do ambiente interno. É mais utilizado em avaliações de ambientes condicionados naturalmente.
5. Temperatura do bulbo seco (DBT): Esta é a temperatura do ar, medida com um termômetro protegido da radiação e umidade.
6. Carga térmica: Carga térmica em análise térmica de edificações é a quantidade de calor que precisa ser removida ou adicionada a um espaço para manter as condições de conforto térmico. Ela é geralmente expressa em unidades de calor (como watts ou joules) por tempo e área e é calculada com base nas características do edifício (como o tamanho, orientação, isolamento etc.), nas condições climáticas externas (como temperatura, vento, radiação solar etc.) e nas condições internas desejadas (como a temperatura, umidade e velocidade do ar). A carga térmica é um indicador importante

para se determinar a capacidade de refrigeração ou aquecimento necessária para um edifício.

7. Demanda de consumo de energia: A demanda de consumo de energia em análise térmica de edificações é a quantidade de energia necessária para manter as condições de conforto térmico dentro de uma edificação. O principal indicador para computar a demanda energética de condicionamento em edifícios condicionados artificialmente é a carga térmica.
8. Graus-hora de resfriamento: Muitos autores descrevem Graus-hora. A descrição aqui é a estabelecida por Oktay et al. (2011). É uma métrica que pode ser utilizada para avaliar de forma simplificada a carga térmica em análise térmica de edificações. Nesse caso é calculada somando a diferença entre a temperatura interna desejada e a temperatura externa para cada hora do ano, e multiplicando-a pelo somatório da transmitância térmica, área da envoltória e o volume do espaço vezes a capacidade térmica do ar.

#### 2.1.4.2 Indicadores de desempenho da luz natural

Os indicadores de desempenho de iluminação natural são métricas utilizadas para avaliar e analisar a quantidade e qualidade de luz natural no espaço interno. Esses índices ajudam arquitetos, engenheiros e projetistas a avaliar a eficácia do projeto arquitetônico em termos de fornecer iluminação natural e conforto visual adequados para aos ocupantes. Alguns índices de desempenho de iluminação natural comumente usados para análise de edifícios incluem:

1. Iluminância: é a medida da quantidade de luz que incide sobre uma superfície, medida em lux (lx). É usada na análise de iluminação natural para avaliar a qualidade e a quantidade de luz natural em um ambiente numa determinada hora e dia.
2. Luminância: é a medida da quantidade de luz emitida por uma fonte de luz ou refletida por uma superfície, medida em candelas por metro quadrado (cd/m<sup>2</sup>). Ela é usada na análise de iluminação natural para avaliar os brilhos e contrastes em uma cena. Em simulação computacional pode ser estabelecida em um modelo baseado na renderização de uma imagem.
3. Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor* - DF): A razão entre a iluminância dentro de um espaço e a iluminância horizontal externa sob condições de céu nublado. É uma métrica estática e adimensional, e utiliza o modelo padrão de céu nublado do CIE como referência, ou seja, não considera padrões climáticos.

4. Iluminância Útil da Luz do Dia (*Useful Daylight Illuminance* - UDI): é a medida da quantidade de luz do dia em um espaço adequado para tarefas visuais. Leva em conta situações de iluminância dentro de um domínio útil excluindo situações com falta e excesso de luz distribuídos no espaço. É uma métrica dinâmica que estabelece percentuais de ocorrência horárias anuais e utiliza um modelo de céu baseado no clima. Nem sempre é claro no UDI se um valor baixo está associado a falta de iluminação ou excesso, ou ambos. Por isso, pode ser necessário consultar outros dados para compreender os resultados.
5. Autonomia Contínua da Luz do Dia (*Continuous Daylight Autonomy* - CDA): A porcentagem de tempo que um espaço é iluminado pela luz natural acima de um nível especificado. A métrica considera situações abaixo do nível especificado usando um percentual.
6. Exposição Anual à Luz Solar (*Annual Sunlight Exposure* - ASE): é uma métrica usada para medir a quantidade de radiação solar que entra em um espaço ao longo de um ano. É tipicamente expresso em kWh/m<sup>2</sup>, ou quilowatts-hora por metro quadrado.
7. Autonomia da luz do dia (*Daylight Autonomy* - DA): é a porcentagem de tempo que um espaço é iluminado por acima de um nível especificado ao longo de um ano. A métrica desconsidera ocorrência de níveis abaixo do especificado.
8. Iluminância vertical na altura dos olhos (*Vertical Eyes Illuminance* – VEI): é a medida da quantidade de luz do dia que atinge o nível dos olhos de uma pessoa dentro de um edifício ou espaço, geralmente medida em lux (lx). É usado na análise de iluminação para avaliar a qualidade e a quantidade de luz natural em um espaço, em relação ao conforto visual. VEI é calculado medindo a iluminância ao nível dos olhos de uma pessoa dentro de um espaço, normalmente a uma altura de 1,5 metros acima do chão. A medição é feita em diferentes pontos dentro do espaço, geralmente em intervalos regulares, para criar um mapa dos níveis de VEI.
9. Índice de ofuscamento da luz do dia (*Daylight Glare Index* – DGI): é uma medida do desconforto causado por ofuscamento em um espaço, que está relacionado à intensidade da luz do dia que entra em um espaço e ao ângulo de incidência dessa luz. Foi descrito pela primeira vez por Hopkinson (1972) e é estabelecido pela equação:

$$DGI = 10 \log_{10} 0.4777 \sum \frac{L_{s,i}^{1.6} \left(\frac{\omega_{s,i}}{P_{s,i}^2}\right)^{0.8}}{L_b + 0.07 \omega_{s,i}^{0.5} L_{s,i}} \quad (\text{Equação 3})$$

onde,

L é a luminância da fonte de brilho (cd/m<sup>2</sup>);  $\omega_{s,i}$  é o ângulo sólido da fonte de brilho.

10. Probabilidade de ofuscamento da Luz do Dia (*Daylight Glare Probability* - DGP): é uma métrica usada para avaliar o potencial de ofuscamento em um edifício ou espaço externo. Estabelece a probabilidade de que um determinado ponto em um espaço experimente níveis inaceitáveis de ofuscamento por excesso de brilho. Foi descrita pela primeira vez por Wienold & Christoffersen (2005). É composto pela avaliação do brilho e contraste e é estabelecido pela equação:

$$DGP = c_1 E_v + c_2 \log \left( 1 + \sum \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^2 P_i^2} \right) + c_3 \quad (\text{Equação 4})$$

onde,

$E_v$  é a Iluminância vertical na altura dos olhos para uma determinada direção,  $P_i$  é o índice de posição em relação à fonte de brilho.  $c_1$ ;  $c_2$ ;  $c_3$  e  $c_4$  são constantes dadas por  $5.87 \cdot 10^{-5}$ ;  $9.18 \cdot 10^{-2}$ ; 0.16, 1.87 respectivamente.

O DGP é estabelecido a partir da imagem de uma cena, em um ponto e direção específica, por isso é uma métrica difícil de utilizar para avaliar um ambiente anualmente. Por essa razão, um modelo de DGP simplificado ( $DGP_s$ ) foi estabelecido com base na Iluminância Vertical na Altura dos Olhos, porém não há a recomendação de uso quando há visão do brilho refletido do sol, uma vez que desconsidera o componente de contraste (WIENOLD, 2007; WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006). Este modelo foi posteriormente melhorado ( $eDGP_s$ ) para incluir também uma avaliação do contraste através da geração de imagens rápidas utilizando 0 e 1 reflexões internas (*bounces*) (WIENOLD, 2009).  $DGP_s$  é calculado por:

$$DGP_s = 6.22 \cdot 10^{-5} E_v + 0.184 \quad (\text{Equação 5})$$

Posteriormente, um modelo que considera o componente de brilho e o componente de contraste, porém sem necessidade de gerar simulações baseada em imagem foi proposto por Jones (2019). Essa métrica é explicada com mais detalhes no item seguinte.

#### 2.1.4.3 Métricas de desempenho para DCS na literatura recente

Esta etapa apresenta trabalhos relevantes que buscam a análise multicritério de envoltórias, janelas ou dispositivos de controle solar. Foram utilizados como referência artigos científicos de revisão e artigos científicos que avaliam métricas de desempenho nesses campos, além de estudos de caso. Os artigos selecionados são contextualizados no processo de projeto

ou não. O principal critério de escolha foi a avaliação multicritério, a relevância e o período da publicação nos últimos 10 anos entre 2012 e 2023.

O levantamento de 109 artigos feito por Kirimtat et. al (2016) mostra que a maioria das abordagens multicritérios é realizada para estudar elementos de sombreamento combinados com indicadores de desempenho térmico/energético e indicadores de iluminação natural. Alguns deles incluem ganho solar e indicadores de desempenho visual. Al-Masrani et al. (2018) também apresentam uma revisão, porém com foco em otimização de dispositivos de sombreamento. Os autores dividem os requisitos de desempenho em dois grupos: térmico e de iluminação. Sendo relevante no primeiro grupo reduzir carga térmica de resfriamento, preservando a carga térmica de aquecimento. No segundo grupo, aparecem pontualmente indicadores como nível e distribuição da luz, proteção contra ofuscamento, e indicadores mais subjetivos como: qualidade da visão, reprodução de cor, privacidade e modulação da luz no ambiente (possibilitando o escurecimento).

Al-Masrani; Al-Obaidi (2019) apresentam uma revisão sobre parâmetros de desempenho usados em projetos de elementos de sombreamento dinâmicos. Segundo o levantamento de 20 artigos feito pelos autores, os indicadores mais utilizados são a demanda de resfriamento e /ou aquecimento (11 artigos) e indicadores de desempenho de iluminação natural (14 artigos). Os indicadores de iluminação mais utilizados foram o nível de iluminância e indicadores de brilho para estabelecer respostas ao ofuscamento.

Quanto ao **desempenho da luz natural**, a simulação baseada no clima é um marco para uma avaliação mais completa da iluminação natural, uma vez que, considera o ano todo. Por isso, as métricas dinâmicas em iluminação vêm de forma crescente sendo inseridas em normas e certificações de desempenho de edificações, tornando-se cada vez mais diretrizes obrigatórias de projeto. Segundo, Chi; Moreno; Navarro (2018) as métricas dinâmicas mais comuns usadas são UDI e DA.

Quanto ao UDI, Mardaljevic; Roy (2012) argumentam pelo intervalo de 100-3000 lux como eficaz para avaliar um espaço de trabalho, uma vez que pesquisas indicam boa tolerância ao nível de 100 lux (BAKER, 2001; REINHART, 2002; SCHULER, 1995). Porém, também apresentam duas pesquisas que indicam o intervalo de 782-2146 lux (VINE et al., 1998) e 700-1800 lux como desejáveis por usuários para o trabalho em escritórios (ROCHE, 2002). Inicialmente o limite superior de 2000 lux era amplamente utilizado, mas Mardaljevic (2015) argumenta a partir de Lindelöf; Morel (2008) e Wienold; E (2010) o uso do limite superior de 3000 lux por estar associado ao desconforto visual por ofuscamento (MARDALJEVIC, 2015; MARDALJEVIC; ROY, 2012). Apesar disso, Mcneil; Burrell (2016) comparam o índice de

DGP e Iluminância, e suas conclusões encontram que em 2000 lux já há ocorrências nas faixas de ofuscamento perceptível, perturbador e intolerável (Figura 45).

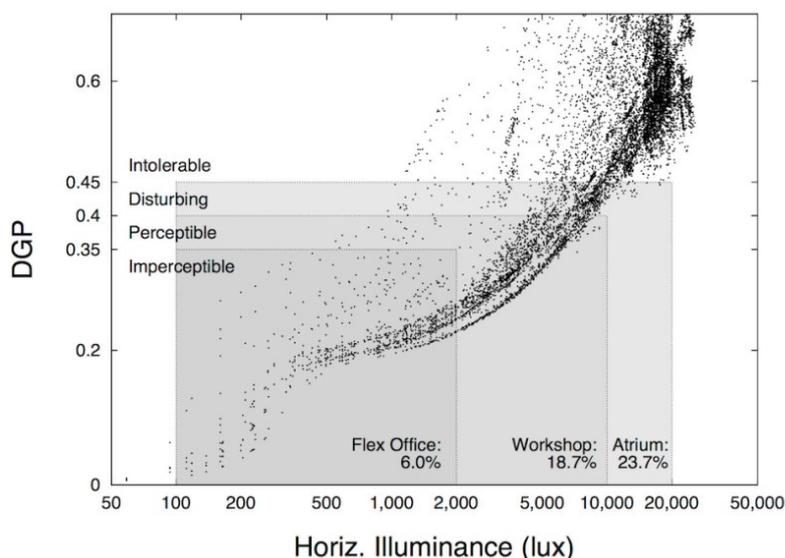


Figura 45. Correlação entre DGP e iluminância. Fonte: Mcneil; Burrell, (2016).

O DA tem sido promovido em normas atuais de avaliação de iluminação natural. Por exemplo, o IES LM-83 (LM, 2013) propõe o sDA, Autonomia de Luz Natural Espacial (*spatial Daylight Autonomy*) que quantifica se em um ponto em um espaço o DA para uma iluminância-alvo de 300 lux, para a ocupação das 8h às 18h atende pelo menos 50% do tempo (em resumo, sDA300,50%). É favorável que o DA deva atender a pelo menos 55 e 75% da área de análise para um espaço (CHI; MORENO; NAVARRO, 2018). A principal limitação do sDA é não considerar o excesso de iluminamento, por isso a IES LM-83 recomenda também o ASE que quantifica a entrada de iluminação acima de 1000 lux dentro do espaço.

Mardaljevic; Roy (2012) examinam a relação entre duas métricas usadas para avaliar a iluminação natural em edifícios: UDI e DGPs. O estudo constata que existe uma correlação entre os dois indicadores. Valores altos de UDI (nível testado de 3000 lux) estão associados à ocorrência de ofuscamento. No entanto, a relação não é linear e pode variar dependendo das condições específicas do edifício e do entorno. O artigo também discute a importância de considerar tanto o UDI quanto DGP ao avaliar a iluminação natural em edifícios, uma vez que fornecem informações diferentes, mas complementares (MARDALJEVIC; ROY, 2012).

Ao considerar modelos simplificados para análises de ofuscamento, pesquisas recentes costumam adotar o indicador de iluminância vertical na altura dos olhos do observador (VEI). A exemplo de pesquisas como as de Giovannini et al. (2018); Karlsen et al. (2016); Tabadkani; Banihashemi; Hosseini (2018). Uma abordagem semelhante é a do DGPs, que é o indicador de VEI convertido para DGP. A vantagem é o menor tempo de processamento, principalmente

considerando o uso de modelos voltados para otimização. O VEI e o DGPs, porém não são recomendados quando há picos de brilho refletidos (WIENOLD, 2007). Karlsen et al. (2015) demonstram que o ofuscamento ocorre de forma mais proeminente com VEI acima de 2000 lux (Figura 46).

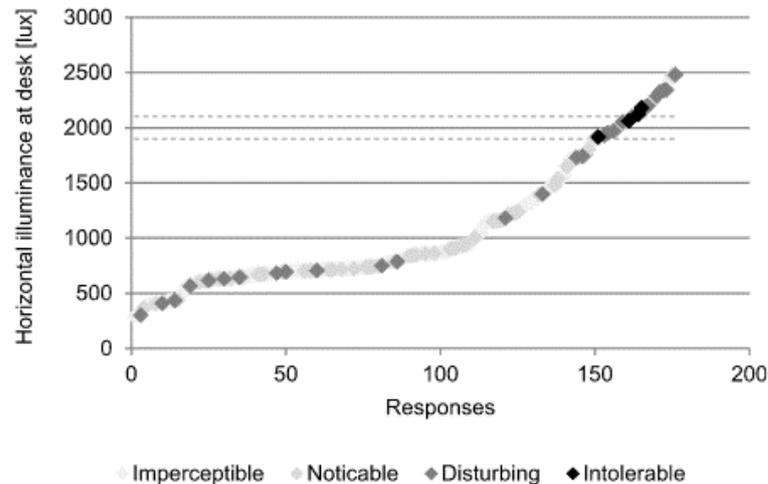


Figura 46. Faixa de distúrbio de ofuscamento com base em análise de iluminância vertical na altura dos olhos. Fonte: Karlsen et al. (2015).

O eDGP<sub>s</sub> também é uma métrica utilizada nos últimos anos, pois considera de forma simplificada adicionalmente picos indiretos de brilho, porém ainda necessitando de geração de imagens, mesmo que rápidas (WIENOLD, 2009). Jones (2019) discute a dificuldade de prever o ofuscamento anualmente em edifícios para vários locais em um ambiente, devido ao tempo necessário para renderizar cada vista. O autor combina considerações para o cálculo de DGPs, eDGP<sub>s</sub> e melhorias no processo de simulação levantadas por Subramaniam (2018) através do método de simulação de duas fases, e propõe o DGP sem imagem (*imageless* DGP). O método combina o cálculo de iluminância vertical na altura dos olhos para avaliar brilho e deduz a posição, tamanho e luminância das fontes de brilho levando em consideração que resultam de visualizações diretas para o sol e o céu, dessa forma, considera também o contraste. O modelo considera cada elemento da subdivisão do céu de Reinhart como uma fonte de brilho em potencial.

O autor define um novo termo chamado "autonomia de ofuscamento" (*glare autonomy* -  $G_{lA}$ ), que é a fração de horas ocupadas em que uma visão está livre de ofuscamento. O ofuscamento é considerado presente quando um limiar de DGP é excedido, como 40%. O autor menciona que a capacidade de calcular rapidamente a autonomia de ofuscamento usando um computador pessoal é nova e possibilita gerar mapas para posições e direções de visualização. A partir da teoria de  $G_{lA}$  é possível estabelecer a "autonomia de ofuscamento espacial" (*Spatial Glare Autonomy* - sGA). O autor adota "sGA40%,5%" para representar a autonomia de

ofuscamento para um limiar de 40% de DGP e autonomia de ofuscamento espacial com uma meta de 5% de horas ocupadas.

Considerando **desempenho térmico**, as análises utilizam amplamente dados horários anuais calculados por simulação computacional. Sendo, o principal indicador de desempenho encontrado, o de consumo de energia. Principalmente em análises integradas de desempenho térmico e luminoso associados a sistemas de dimerização da iluminação (CHEN; JANSSEN; SCHLUETER, 2018; HUANG; NIU; CHUNG, 2014; KIRIMTAT et al., 2019; MANZAN; CLARICH, 2017). A quantificação da carga térmica também é um indicador amplamente utilizado para avaliar termicamente soluções de fachadas (HUANG; FAN; ZHAI, 2021; HWANG; CHEN, 2022; JALALI; NOORZAI; HEIDARI, 2020; SAMAAN; FARAG; KHALIL, 2018; SHAN, 2014). Já carga térmica de resfriamento é o indicador primário, uma vez que, é neste indicador que os dispositivos de controle solar agem prioritariamente, principalmente considerando climas predominantemente quentes (HWANG; CHEN, 2022; SAMAAN; FARAG; KHALIL, 2018; TONG et al., 2021).

A vantagem do indicador de consumo é a possibilidade padronizar a unidade de análise do desempenho térmico e da luz natural e assim normalizar o desempenho térmico e de iluminação. Já a desvantagem é que o indicador é generalista, está diretamente associado a todos os sistemas ativos do edifício, e não demonstra isoladamente o fenômeno do desempenho térmico e luminoso. Hwang; Chen (2022) argumentam a importância de avaliar no início do projeto indicadores específicos como carga térmica de resfriamento e conforto térmico por assimetria radiante. Uma vez que são métricas que analisam o fenômeno isoladamente, o que permite, no caso do estudo, avaliar as estratégias de projeto utilizando análise de sensibilidade (HWANG; CHEN, 2022; KIRIMTAT et al., 2016; PÉREZ-GRANDE; MESEGUER; ALONSO, 2005).

Karlsen et al. (2016) estuda alternativas para o projeto de elementos de sombreamento em climas frios. A pesquisa apresenta estratégias combinadas de controle solar usando venezianas internas e externas automatizadas e apresenta o modelo de redes neurais que combina múltiplos aspectos de desempenho (Figura 47). A pesquisa quantifica carga térmica para aquecimento e utiliza uma rotina do padrão de uso da veneziana interna a partir da diferença de temperatura interna, permissão de ganho de calor solar em períodos frios com disponibilidade de radiação direta, e controle do ofuscamento. O modelo de ofuscamento usado foi Iluminância vertical na altura dos olhos acima de 1700 lux. Os resultados apresentaram uma redução de consumo de energia associado ao uso de elementos de sombreamento mesmo em climas frios.

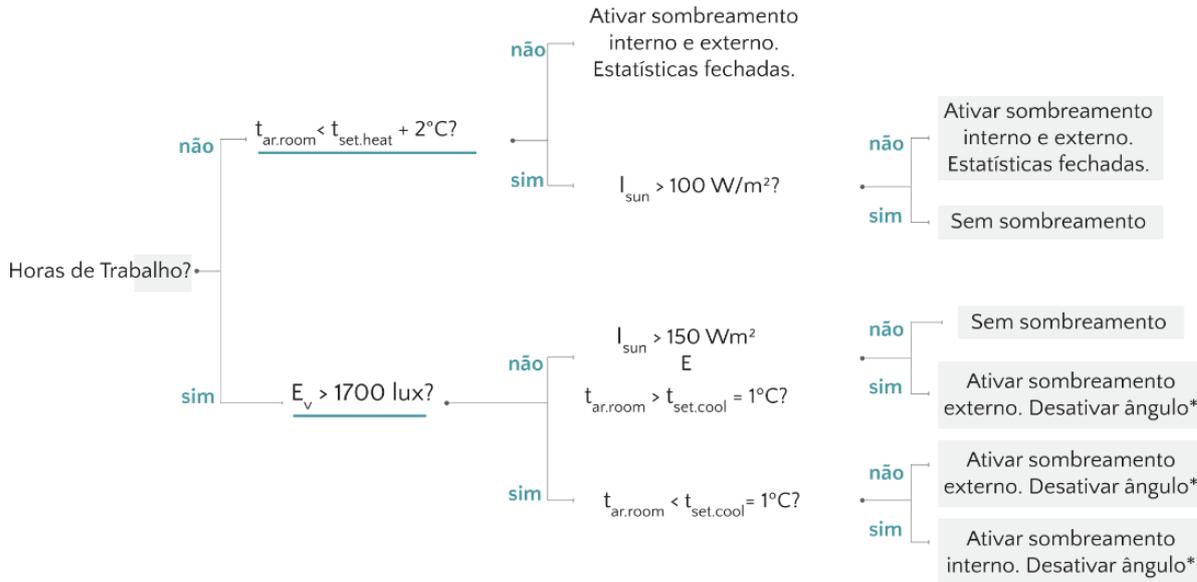


Figura 47. Processo de avaliação da abertura combinando vários critérios de desempenho. Fonte: Karlsen et al. (2016b)

A pesquisa apresentada por Chi (2018), investiga o desempenho de uma abertura sombreada por telas perfuradas com diferentes escalas de sombreamento e traça a correlação de diversos indicadores de desempenho térmico e de iluminação natural. A intenção é identificar a contribuição da luz natural e seu impacto no consumo geral do edifício. Os indicadores utilizados foram o *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) e consumo de energia, incluindo: demanda de iluminação, de aquecimento e resfriamento. Seus resultados encontram uma forte correlação entre situações de excesso de iluminamento (acima de 3000 lux) e demandas de resfriamento (Figura 48).

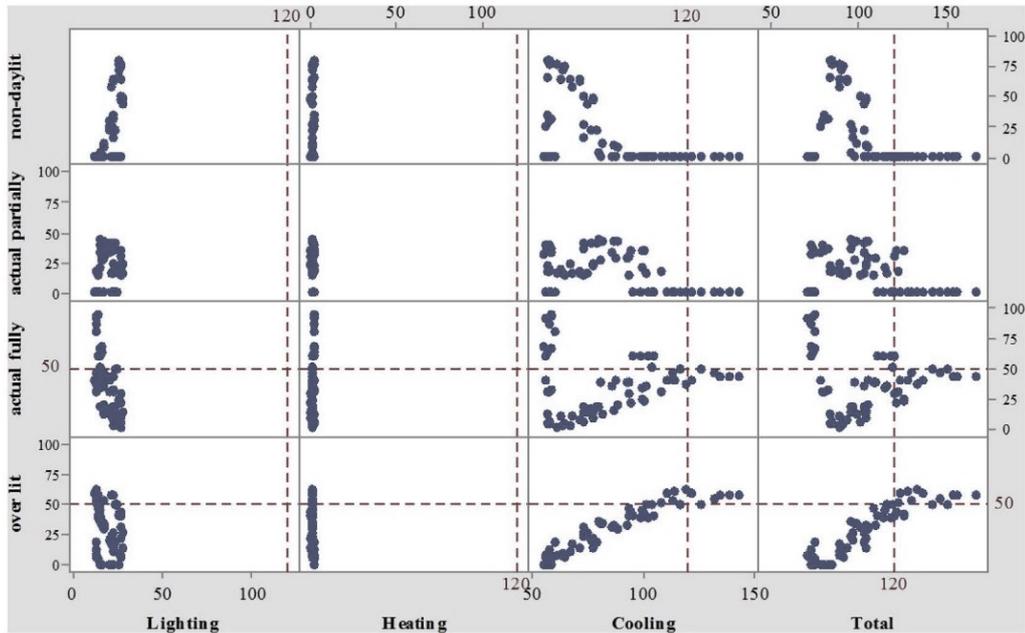


Figura 48. Correlações entre indicadores de desempenho térmico e de iluminação natural. Fonte: Chi, (2018).

Mishra; Loomans; Hensen (2016) realizam uma extensa revisão bibliográfica sobre desconforto localizado e aponta uma série de limitações dos estudos, uma vez que é um fenômeno complexo e subjetivo que muda de forma dinâmica a partir de mudanças bruscas, não-uniformidades, com variações, ciclos, e controle local. A pesquisa indica que a maioria dos estudos simulam um ambiente de escritório, sendo que a área carece de avaliações pós ocupação. As revisões teóricas mostram que os indicadores de conforto mais utilizados, são mais genéricos, tais como o PMV, os quais, não descrevem o fenômeno de assimetria radiante (AL-MASRANI et al., 2018; AL-MASRANI; AL-OBAIDI, 2019; KIRIMTAT et al., 2016).

Hwang; Chen (2022) aplicam um modelo alternativo para avaliar conforto localizado através do EnergyPlus estabelecido por La Gennusa et al. (2005, 2007). O modelo é calculado partir do ajuste do modelo de cálculo da temperatura média radiante distribuído espacialmente, e dessa forma, representar o efeito da radiação solar distribuído no espaço interno com base em um grid de análise. Chan; Mak (2008) avalia o modelo de La Gennusa e conclui que é uma métrica possível de ser utilizada para avaliar a influência da janela na assimetria radiante, mas avalia que o estudo foi realizado para uma sala retangular com uma janela em uma parede, numa orientação específica, sendo que outras configurações espaciais e orientações merecem ser testadas.

A tabela 3 apresenta um resumo da discussão deste tópico levantando prós e contras dos indicadores de desempenho mais utilizados seguidos de novas métricas de acordo com a literatura consultada.

*Tabela 3. Resumo da discussão sobre indicadores de desempenho.*

<b>Desempenho térmico</b>		
<b>Indicador</b>	<b>prós</b>	<b>contras</b>
<i>Consumo de energia</i>	Considera o uso final do edifício com um todo	Indicador generalista
<i>Carga térmica</i>	Considera situações de frio e calor	Indicador generalista
<i>Carga térmica de resfriamento</i>	Indicador mais afetado pelos dispositivos de controle solar	Indicador isolado
<i>Conforto térmico</i>	Métricas matemáticas baseadas na carga térmica/ou condição climática local	Fenômeno subjetivo. As métricas geralmente são diretamente proporcionais a carga térmica. Não considera assimetria radiante, fenômeno relevante na avaliação de envoltórias.
<i>Conforto térmico localizado</i>	Pouco usado na literatura, poucas pesquisas de validação de modelos espaciais.	Complexidade e subjetividade do fenômeno
<b>Desempenho de iluminação natural</b>		
<i>UDI</i>	Considera condições úteis na avaliação da luz natural.	Nem sempre é possível identificar a razão dos valores encontrados.

<b><i>DA</i></b>	Amplamente utilizado em normativas.	Não considera situações de excesso de iluminamento. Deve ser combinado ao ASE.
<b><i>ASE</i></b>	Descreve excesso de iluminamento.	Não computa a qualidade da luz interna. Deve ser combinado ao DA.
<b><i>DGP</i></b>	Métrica mais confiável para prever ofuscamento.	Complexo de calcular. Necessita de imagens para avaliar.
<b><i>DGPs</i></b>	Versão simplificada para avaliar ofuscamento utilizando VEI.	Não é sensível a excessos de brilho indiretos.
<b><i>Iluminância Vertical na altura dos olhos</i></b>	Versão simplificada para avaliar ofuscamento.	Não é sensível a excessos de brilho indiretos.
<b><i>eDGPs</i></b>	Avalia brilho e contraste, componentes avaliados no DGP.	Permite computo anual em um ponto e direção, mas ainda necessita de avaliação por imagem.
<b><i>Imageless DGP</i></b>	Avalia brilho e contraste. rápido de computar e não requer análise de imagens.	Maior erro em relação ao DGP padrão se comparado ao eDGPs.

Qual é a eficácia do processo de projeto guiado por desempenho na otimização de envoltórias arquitetônicas?

## 2.2 Processo de projeto guiado por desempenho

Esta etapa aborda investigações sobre projeto guiado por desempenho (PGD). Está dividida em sete partes. A primeira apresenta conceitos e contextualiza a abordagem dentro do processo de projeto. A segunda apresenta um breve histórico com intenção de demonstrar a evolução do pensamento na área. A terceira aborda simulação no contexto do projeto guiado por desempenho. A quarta aborda técnicas de simulação utilizadas em modelos durante as fases de projeto. A quinta aborda brevemente critérios de validação para ferramentas integradas ao processo de projeto. A sexta discute modelos de otimização integrados a problemática do projeto de arquitetura. A sétima e última apresenta trabalhos na literatura recente que abordam projeto guiado por desempenho no contexto do projeto da fachada.

### 2.2.1 Modelo paramétrico/algóritmico, bases do PGD

Três conceitos são importantes para compreensão desta pesquisa: modelagem paramétrica, modelagem algóritmica e projeto guiado por desempenho. Esses conceitos são explorados nos itens seguintes.

#### 2.2.1.1 Modelagem paramétrica

Segundo Kolarevic (2003), projeto paramétrico designa o uso de parâmetros no processo de projeto. Considerando que qualquer processo projetual é baseado em parâmetros, o termo pode ser redundante. A denominação é utilizada para designar uso de modelos digitais associativos formado por parâmetros variáveis e restrições. Os parâmetros podem ser numéricos baseados na geometria, ou na automação de processos, e também baseados em desempenho, quando associados a base de dados e ciclos de análises (KOLAREVIC, 2003a; MONEDERO, 2000)

Um modelo paramétrico é uma representação computacional de um modelo construído com entidades geométricas com atributos (propriedades), que são fixos e outros que podem variar (HERNANDEZ, 2006). Os atributos variáveis são chamados de “parâmetros” e os atributos fixos são chamados de “restrições”. Pode-se alterar os parâmetros do modelo paramétrico para procurar soluções alternativas e diferentes para um problema em questão. O

modelo paramétrico responde às mudanças, adaptando-se ou reconfigurando-se para o novo cenário sem precisar ser apagado ou remodelado (HERNANDEZ, 2006).

No processo de modelagem paramétrica, o projetista pode ter que inicialmente fazer um esforço a mais para criar o primeiro modelo associativo. Em contrapartida, devido a este investimento, mudar ou refinar o modelo torna-se mais fácil se comparado à modelagem tradicional (AISH, 2011). Nesse sentido, o processo paramétrico torna-se promissor se comparado ao tradicional que possui mais retrabalho associado (MONEDERO, 2000).

Para modelagem associativa ou paramétrica, o modelo criado possui maior valor semântico. Isso requer novas habilidades do modelador: em particular como pensar associativamente. O modelo associativo possui muitas vantagens, no entanto, nem todo processo de projeto é passível de gerar modelos digitais associativos em decorrência da complexidade, sendo que o projetista pode combinar outros processos técnicos e ir além da modelagem associativa auxiliada por computador (AISH, 2011).

Oxman (2017) apresenta uma visão detalhada do conceito de desenho paramétrico integrado ao projeto e discute potenciais benefícios e desafios. O processo paramétrico pode colaborar com projetos mais inclusivos e customizados. Facilita o atendimento às necessidades de uma ampla gama de usuários, uma vez que, a abordagem envolve o uso de algoritmos e ferramentas computacionais que facilitam a criação de processos personalizados e inclusão de dados complexos, podendo ser modificados facilmente com base em parâmetros de entrada. Segundo a autora, o pensamento do projeto paramétrico, como meio estratégico no projeto está na intersecção de três campos de conhecimento: o esquema algorítmico do desenho paramétrico, o esquema cognitivo da tipologia e topologia do conhecimento da arquitetura, e o projeto do processo digital e fluxo de informações (Figura 49).



Figura 49. O pensamento do projeto paramétrico. Fonte: adaptado de Oxman (2017).

### 2.2.1.2 Modelagem algorítmica

O conceito de modelagem algorítmica adotado para esta pesquisa é o estabelecido por Leach (2014). Refere-se ao processo digital de modelagem associada a linguagem de programação textual ou visual. O uso de programação no processo de modelagem permite que o projetista dê um passo além das limitações da interface dos softwares e construa os processos que deseja ser explorado. As soluções de projeto são estabelecidas não pela manipulação direta da forma, mas do código gerador (etapas lógicas) da forma (AISH, 2011; LEACH, 2014).

Modelagem algorítmica explora a capacidade do computador em operar como um motor de busca, e executar tarefas que de outra forma consumiriam tempo excessivo. Presta-se à otimização e outras tarefas, complementando limitações das restrições do processo de projeto padrão (AISH, 2011; LEACH, 2014). É um complemento da modelagem paramétrica, mas os conceitos se diferenciam pois na primeira, não necessariamente há uso de linguagem de programação. O uso de softwares paramétricos que incorporam processos associativos e integrados configura-se em modelagem paramétrica, mas não exatamente algorítmica. No segundo há necessariamente o uso de código que, por sua vez, estabelece um modelo paramétrico (AISH, 2011; LEACH, 2014).

Segundo Delanda (2009) é uma questão de não olhar para a forma em si, mas para os processos de tomada de decisões que levam à geração da solução (LEACH, 2009). O modelo algorítmico requer um pensamento rigoroso, a fim de construir uma estrutura geométrica lógica, sofisticada e flexível para viabilizar variações relevantes. A ação de relacionar elementos exige um pensamento claro sobre o tipo da relação desejada (MONEDERO, 2000). Segundo Hernandez (2006), o projetista deve prever quais tipos de variações quer explorar, a fim de determinar quais transformações o modelo paramétrico deve realizar. Esta é uma tarefa difícil devido à natureza imprevisível do processo de projeto. Woodbury (2010) indica seis habilidades necessárias para realizar modelagem algorítmica:

1. capacidade de conceber o fluxo de dados;
2. capacidade de dividir e conectar partes lógicas;
3. capacidade de nomear essas partes;
4. capacidade de pensar com abstração;
5. capacidade de pensar matematicamente e;
6. capacidade de pensar algoritmicamente.

Discussões sobre integração dos processos digitais projeto na indústria AECO tem o potencial de ampliar o escopo de transformações das soluções com o advento das tecnologias de fabricação digital. Fabricação digital considera inerentemente, processos integrados de

projeto e fabricação auxiliado/controlado por computador visando à aceleração da produção de componentes ou sistemas e possibilitam customização das soluções e fabricação de geometrias complexas (SCHODEK et al., 2005).

Segundo Aish (2011) uso de programação tem duas vantagens dentro do processo de projeto. **Como ferramenta de modelagem de produção:** fornece uma maneira eficiente e pragmática para gerar e avaliar modelos complexos de geometria. **Como ferramenta pedagógica:** ajuda a desmistificar e exercitar processos que levam a determinada solução de projeto. Um dos principais benefícios da modelagem algorítmica é que permite exploração de uma ampla gama de opções de design de forma rápida e eficiente. Dessa maneira, facilita que a equipe de projeto tome decisões informadas quanto a forma e a função de seus projetos. Também permite integração de dados e processos de análise do desempenho sob diferentes condições. No entanto, a modelagem algorítmica requer o uso de software especializado e ferramentas computacionais, o que pode ser uma barreira para alguns arquitetos (AISH, 2011; KOLAREVIC, 2003a; LEACH, 2014).

#### 2.2.1.3 Projeto guiado por desempenho

Muitos termos são utilizados para definir projeto guiado por desempenho: *performance-based design*, *performalism*, *performative architecture* (GROBMAN; NEUMAN, 2008; KALAY, 1999; KOLAREVIC, 2003b, 2003a; KOLAREVIC; MALKAWI, 2005; OXMAN, 2017). Esses termos são utilizados para designar a exploração de dados e simulações computacionais para auxiliar soluções de projeto e geração de geometria associados a determinado(s) objetivo(s). Designa o processo de projeto onde os indicadores de desempenho são os guias-chave da geração da geometria. Os modelos guiados por desempenho se diferenciam do processo tradicional, porque a variação/geração da geometria é diretamente conectada à bases de dados e/ou processos de simulação computacional. A equipe tem retornos rápidos sobre o desempenho da solução e pode ser auxiliada por um processo de otimização que executa loops de análises associados ao problema de projeto (EVE LIN; JASON GERBER, 2014; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

O conceito de desempenho aqui extrapola a abordagem puramente física, ou técnica, intenciona ser uma interpretação holística que pode incorporar aspectos financeiros, espaciais, sociais e culturais desde que sejam quantificáveis (KOLAREVIC; MALKAWI, 2005; OXMAN, 2004). Segundo Deru; Torcellini (2004), pesquisas nesta área buscam desenvolver processos digitais que combinam diferentes abordagens integradas ao modelo 3D e aspira soluções para um desenvolvimento sustentável. Esse tipo de estratégia modifica o processo

tradicional de projeto. Uma vez que, ao invés de “estabelecer uma forma”, o projetista utiliza o computador também para “descobri-la” (KOLAREVIC, 2003b).

O processo de análise aqui passa a contribuir ativamente com a geração da forma arquitetônica. A combinação com processos de otimização permite a integração da geração da forma e a negociação do universo de soluções possíveis com os princípios de desempenho elencados (ANTON; TĂNASE, 2016). O avanço é a possibilidade da exploração “exaustiva” do espaço do problema possibilitando a exploração de objetivos de projeto, da escolha de soluções, do estabelecimento de geometrias customizadas, e da realização de análises estatísticas (AISH, 2011; ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016).

O processo tradicional de projeto muitas vezes tem etapas de caráter linear que inclui retrabalho associados às mudanças de projeto (EASTMAN et al., 2008; VENÂNCIO, 2012). A participação de engenheiros e análises de desempenho muitas vezes ocorrem tardiamente, não participando das etapas iniciais (EASTMAN et al., 2008; ZHAO; DE ANGELIS, 2019). Além disso, o cérebro humano tem dificuldade de prever o resultado de múltiplos objetivos de desempenho ao mesmo tempo (ZHAO; DE ANGELIS, 2019). Na modelagem tradicional por manipulação direta, o projetista imediatamente obtém algum resultado, geralmente com alto grau de subjetividade. Apesar disso, mudar, refinar ou aumentar a complexidade do modelo pode exigir uma quantidade exaustiva de esforço adicional (Figura 50) (AISH, 2011; ZHAO; DE ANGELIS, 2019).

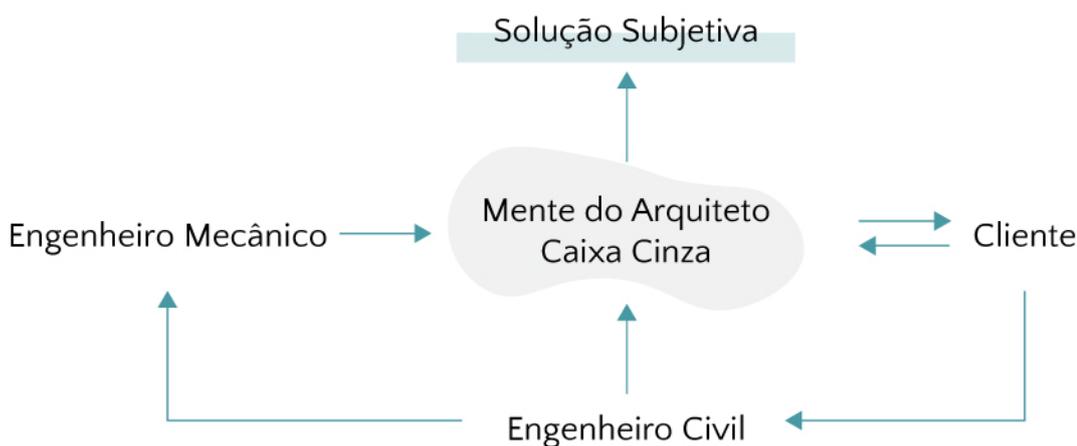


Figura 50. Processo tradicional de projeto. Fonte: modificado de Zhao; de Angelis (2019).

O projeto guiado por desempenho trás as etapas mensuráveis para o processo de geração da solução (Nguyen et al., 2014). Com a programação, o tempo e esforço inicial podem ser aparentemente significativos, mas a construção cognitiva e a capacidade de regenerar o modelo dentro da lógica do projeto gera radicalmente mais possibilidades se comparados a modelagem

tradicional ou mesmo a modelagem paramétrica não-algorítmica (Figura 51) (AISH, 2011; ZHAO; DE ANGELIS, 2019).

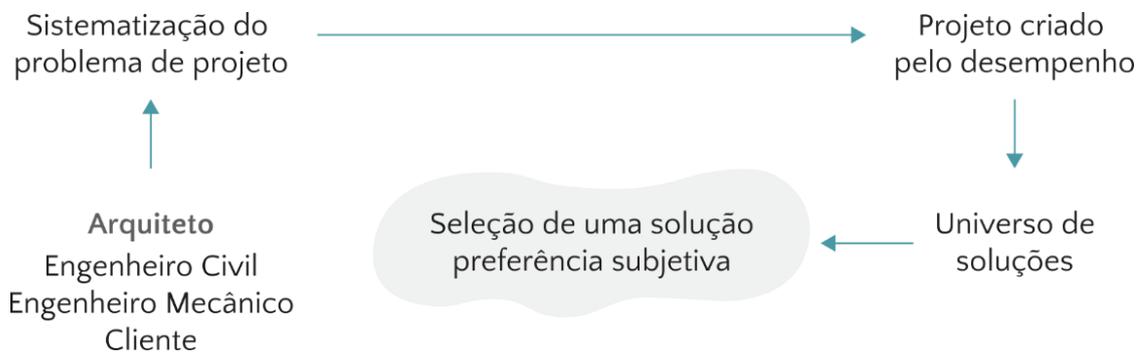


Figura 51. Processo de projeto guiado por desempenho. Fonte: Adaptado de Zhao; de Angelis (2019).

Ao considerar o uso de análises em etapas iniciais, tem o potencial de reduzir retrabalho nos momentos de projeto associados aos maiores custos para mudanças. Também possibilita abordagem integrada associando considerações de arquitetura e engenharia (ZHAO; DE ANGELIS, 2019). Isso se integra a abordagem de Eastman et al. (2008) ao apresentar a curva de custos de Macleamy (2004) (Figura 52).

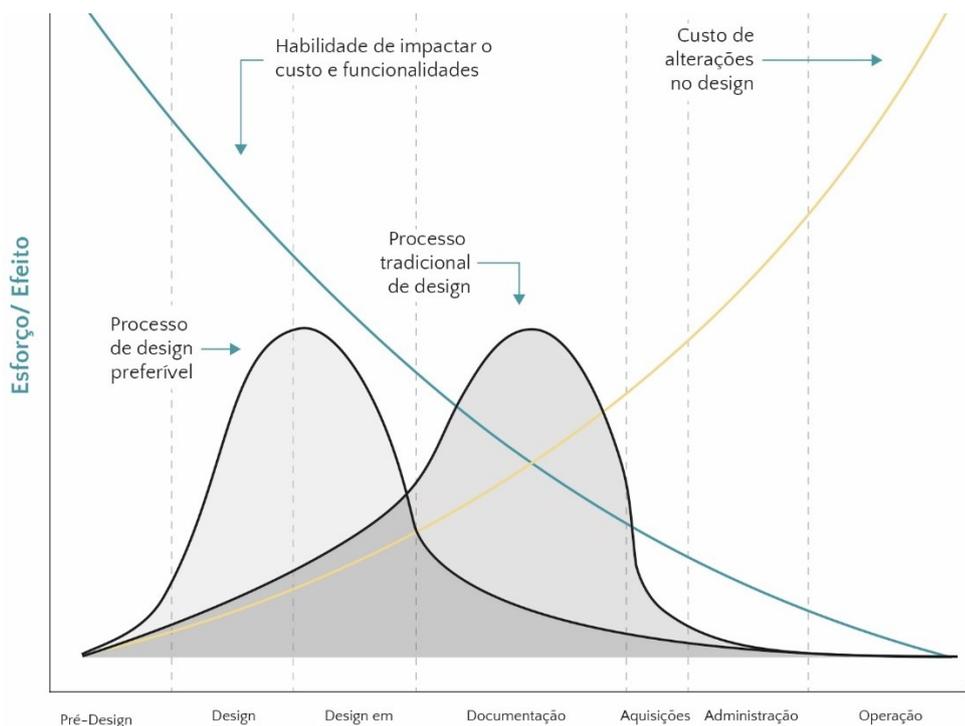


Figura 52. Curva de Macleamy, (2004).

De forma geral, na literatura, quatro técnicas são encontradas em modelos guiados por desempenho: **projeto guiado** por regras (*rule-based design*); **projeto guiado** por dados (*data-driven design*), **projeto guiado** por simulação (*simulation-based design*) e otimização. Elas são encontradas e usadas individualmente ou combinadas em modelos guiados por desempenho.

O **projeto guiado por regras** é uma abordagem que envolve o uso de um conjunto de regras, análises simplificadas ou orientações para guiar o processo de projeto. Essas regras podem ser baseadas em uma variedade de fatores, incluindo estética, funcionalidade, materiais e considerações estruturais. O projetista cria um conjunto de regras que devem ser seguidas durante o processo de projeto. Essas regras podem ser específicas do problema de projeto, como exigências para o atendimento de uma norma, ou tamanho e posicionamento de janelas, ou podem ser mais gerais, como orientações específicas para o partido arquitetônico (DERU; TORCELLINI, 2004; EASTMAN et al., 2009; REINHART; LOVERSO, 2010; SCHUMACHER, 2015).

**Projeto guiado por dados** em arquitetura se refere ao uso de dados para informar e orientar o processo de projeto. Pode envolver coleta de dados sobre o local, edifício ou área circundante e uso desses dados para informar decisões formais, materiais e outros elementos do projeto. Também pode envolver o uso de dados climáticos para auxiliar o desempenho de um edifício ao longo do tempo e fazer ajustes para melhorar sua eficiência e funcionalidade. (BIER; KNIGHT, 2014; BROWN; JUSIEGA; MUELLER, 2020; JUSSELME; REY; ANDERSEN, 2018).

O **projeto guiado por simulação** na arquitetura refere-se à utilização de simulações computacionais complexas para projetar e analisar o desempenho de edifícios e sistemas. É possível considerar simulações de comportamento estrutural, desempenho energético, iluminação, acústica e outros fatores relevantes ao projeto. O projeto guiado por simulação permite que arquitetos e engenheiros testem e otimizem o modelo antes de ser construído, o que pode ajudar a reduzir custos, melhorar o desempenho e garantir atendimento a padrões de eficiência. Também pode ser usado para visualizar e comunicar conceitos (BAHRI et al., 2022; CARTANA; PEREIRA; MAYER, 2018; EL SHEIKH, 2011; KOLAREVIC, 2004; NARANGEREL; LEE; STOUFFS, 2016; NEMBRINI; LABELLE; NYTSCH-GEUSEN, 2013).

A **otimização** refere-se ao processo de ajustar os parâmetros de design de um edifício ou estrutura para alcançar um resultado desejado ou otimizar seu desempenho. Isso pode envolver a otimização de vários aspectos do projeto, como eficiência energética, estabilidade estrutural, custo ou estética. No projeto paramétrico, a otimização é geralmente alcançada variando iterativamente os parâmetros associados a problemática, sendo as variações regidas por diversas técnicas computacionais. Podem ser baseados em técnicas de otimização mais sistemáticas como métodos heurísticos, ou podem ser mais randômicos, como os

Metaheurísticos, dependendo do problema particular que está sendo abordado (ELGHAZI et al., 2014; EVINS, 2013; PAPALAMBROS; WILDE, 2000; YI et al., 2019).

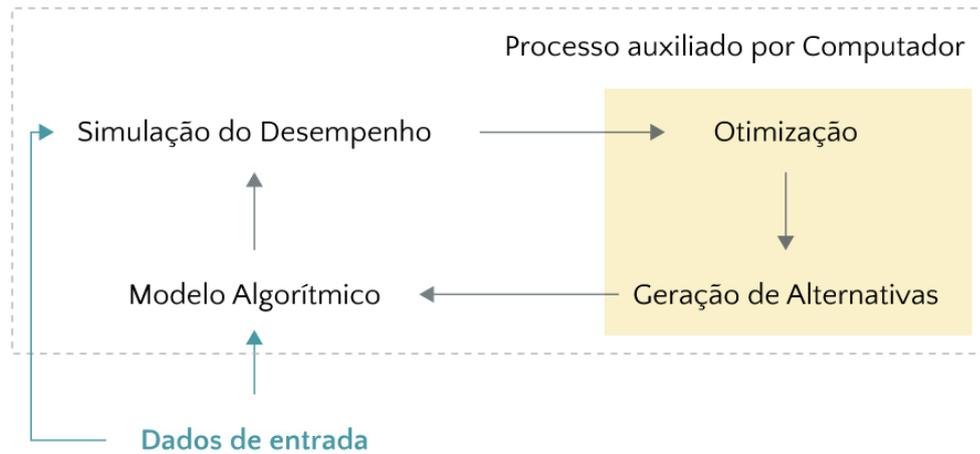


Figura 53. Fluxo de dados do modelo guiado pelo desempenho. Fonte: adaptado de Zhao; de Angelis (2019).

## 2.2.2 Breve histórico

A ideia do projeto guiado por desempenho precede a existência dos computadores e emerge na arquitetura no final do século 19, através do estudo da influência de aspectos físicos-estruturais na forma. Os pioneiros dessa abordagem são Gaudi (1852-1926), Isler (1926-2009), Otto (1925-2015) e Musmeci (1926-1981), que se utilizavam de modelos físicos e lógicas naturais para reproduzir formas otimizadas através de parâmetros como esforços estruturais e naturais, ex. a força da gravidade (TEDESCHI, 2014) (Figura 54).

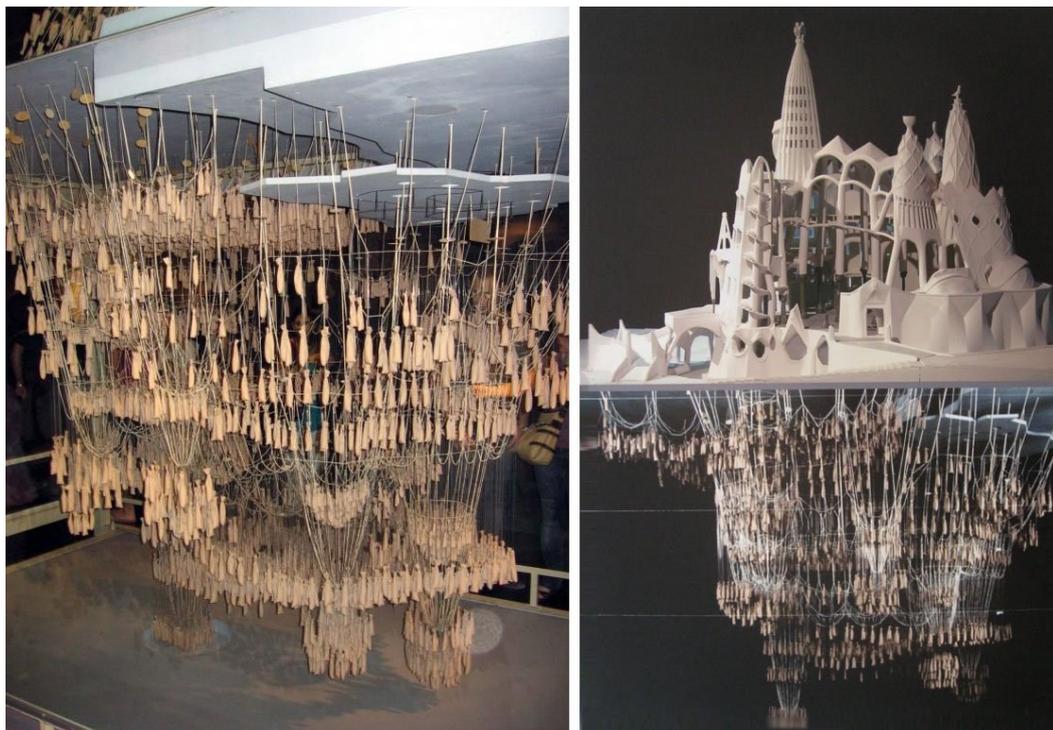


Figura 54. Modelo dos princípios físicos da Sagrada Família de Gaudí baseado em catenárias geradas pela força da gravidade.

O termo “Arquitetura Paramétrica”, aparece nos estudos do arquiteto Luigi Moretti no início da década de 1940, mais precisamente entre 1939 e 1942 (BIANCONI et al., 2020; FRAZER, 2016; GALLO; PELLITTERI, 2018; HEIDARI; SAHEBZADEH, 2018). O termo era utilizado para descrever a relação entre matemática, dimensões, forma e parâmetros de projeto. Sua abordagem de pesquisa precedia a era da informatização, porém já considerava teoricamente preceitos de computação e geometria. O advento do computador possibilitou execução de seus estudos, que culminou numa exposição em 1960 intitulada “Arquitetura Paramétrica”. Foram expostos modelos físicos de estádios gerados e otimizados computacionalmente através de funções como custos do concreto e boas visuais em toda plateia (Figura 55). São os primeiros projetos conhecidos gerados computacionalmente associados a funções de desempenho (FRAZER, 2016). Bianconi et al. (2020) descrevem o processo algorítmico (hipóteses) usado por Moretti para estabelecer os estudos formais dos estádios a partir dos visuais, segundo os autores:

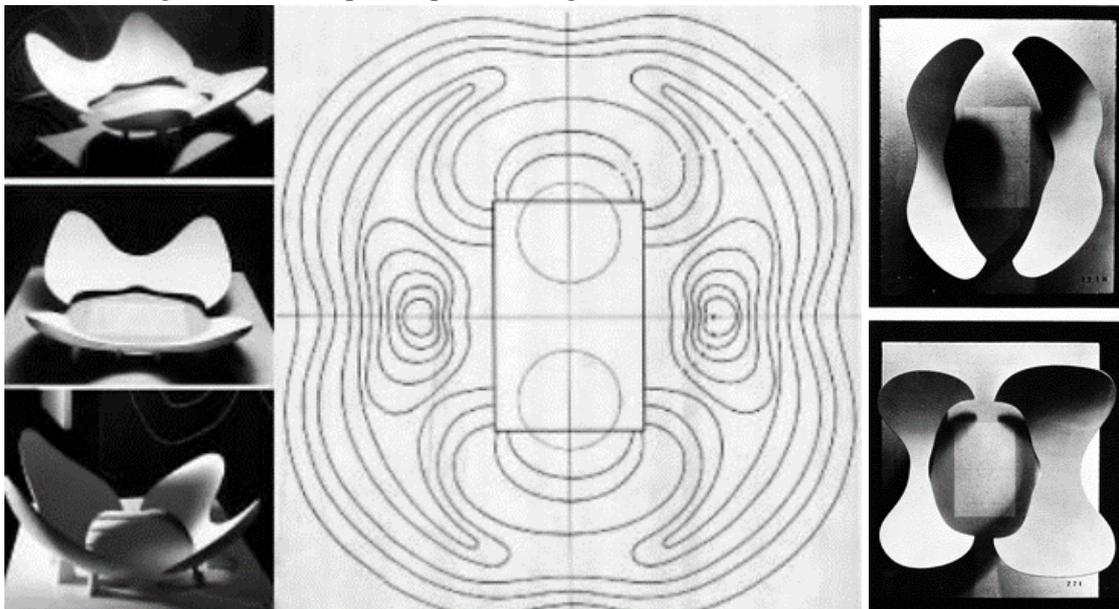
1. Visibilidade de todo o domínio;
2. As áreas mais interessantes encontradas nos dois círculos, cujos centros são C1 e C2, situadas ao longo do eixo do campo longitudinal, a 15 m do lado mais curto e com um diâmetro de 50 m;
3. Ao longo de cada raio para O, a visibilidade anula em O, sobe até um máximo, então cai até reduzir ao infinito.
4. O local com valor máximo é uma elipse com foco em dois pontos C1 e C2. Passa pelo ponto localizado no eixo transversal onde os dois círculos são vistos sob um ângulo de 35°;
5. Quando  $\theta$  varia, os máximos em cada raio também variam, atingindo o valor superior quando  $\theta$  é igual a 36°.

$$W = x^{k(y)} e^{-k(y)x}$$

$$\text{Com } k(y) = 3.5y^2 - 2.5y + 1.5$$

$$x = \frac{\rho}{\rho(\theta)}; y = \frac{2\theta}{\pi}$$

Onde W seria o fator de visibilidade.



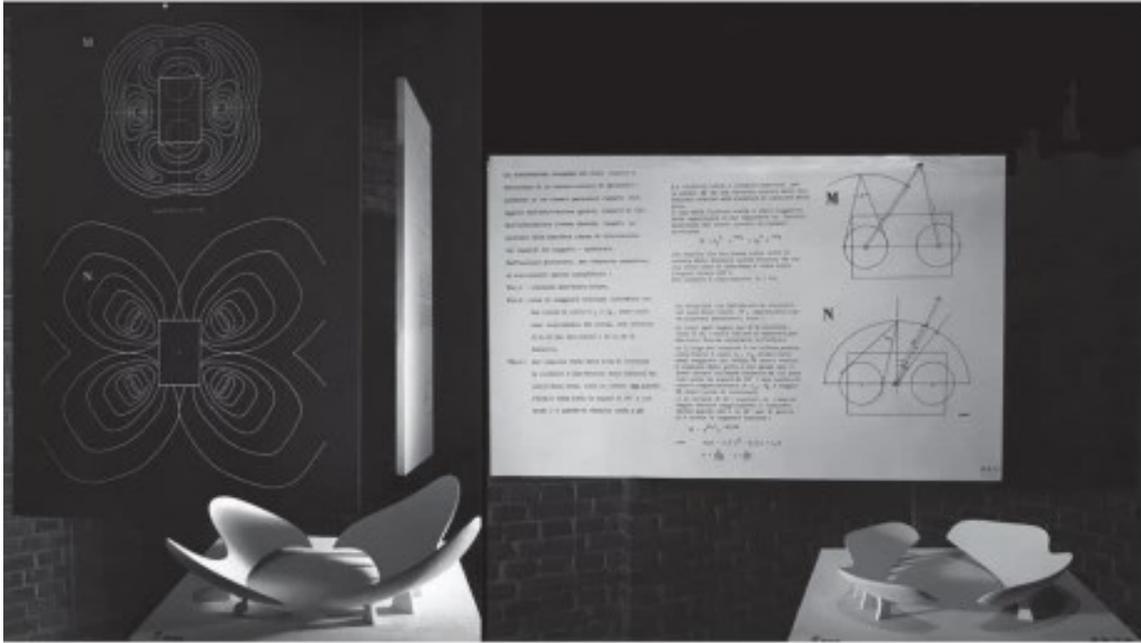


Figura 55. Estádios de Luigi Moretti.

A noção de “restrições” associada a processos de modelagem digital apareceu durante o mesmo período, em 1963. Sutherland apresenta o *Sketchpad a man-machine graphical communication system*, a primeira *interface CAD* conhecida, precursora das ferramentas de modelagem digitais atuais (MONEDERO, 2000; SUTHERLAND, 1963). Era um sistema de desenho com conceitos paramétricos em essência (HEIDARI; SAHEBZADEH, 2018; WOODBURY, 2010).

Na década de 70, dois anos antes de sua morte, Luigi Moretti descreve no periódico *Moebius*15 mais detalhes e questões conceituais sobre arquitetura paramétrica, os quais ainda podem ser contextualizados com processos contemporâneos e são atuais (FRAZER, 2016; TEDESCHI, 2014). Segundo suas ideias, a arquitetura paramétrica baseia-se em oito pontos (GALLO; PELLITTERI, 2018):

1. Rejeição de decisões empíricas.
2. Avaliação dos fenômenos tradicionais como fatos objetivos baseados na interdependência de valores expressivos, sociais e técnicos.
3. Definição exata e completa de temas arquitetônicos.
4. Observação objetiva de todos os elementos de condicionamento (parâmetros) relacionados ao tema arquitetônico e identificação de seus valores quantitativos.
5. Definição das relações entre os valores dos parâmetros.
6. Indispensabilidade de diferentes habilidades e metodologias científicas de acordo com os critérios da pesquisa operacional para definir elementos de condicionamento e suas quantidades.
7. Afirmação da liberdade do Arquiteto na decisão e expressão, somente se não afetar as características determinadas pelas investigações analíticas.

8. Pesquisa de formas arquitetônicas para uma máxima, portanto definitiva, expiação das relações em sua "estrutura" geral.

As discussões sobre parametrização e arquitetura retornam com o surgimento da primeira ferramenta BIM em 1982, o *Archicad*. As discussões passam a ser associadas à automação de processos de modelagem e documentação, integração de equipes interdisciplinares e análise dos custos da edificação (EASTMAN et al., 2008; SMITH, 2014). Roller (1991) relata que no início da década de noventa, os processos paramétricos de modelagem ainda apresentavam exemplares propensos a muitos erros e retrabalho. O objetivo de sua pesquisa era melhoria do método para reduzir esses erros (ROLLER, 1991).

É no final da década de 90 e início dos anos 2000 que ressurgem discussões análogas a abordagem de Moretti, batizadas com termos como: “*performance-based-design*” (KALAY, 1999); “*performative architecture*” (KOLAREVIC, 2004); “*parametricism*” (SCHUMACHER, 2008); “*performatism*” (GROBMAN; NEUMAN, 2008). Termos associados ao uso de modelagem paramétrica integrado a processos e técnicas de análise.

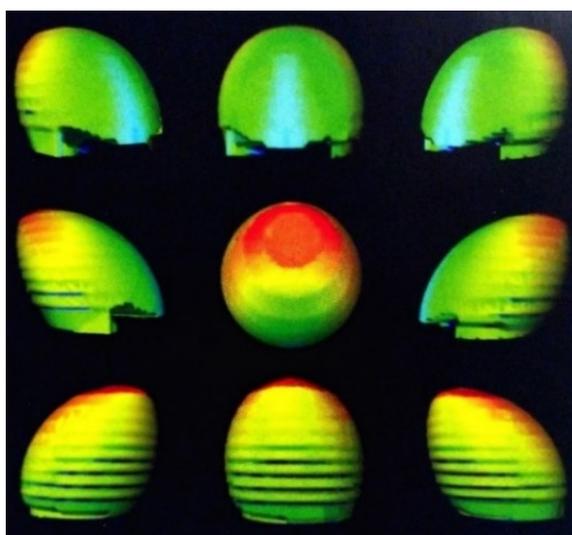
Kalay (1999) faz uma analogia crítica ao “forma-segue-função” apregoada no movimento moderno. Para o autor, a qualidade da solução arquitetônica não seria apenas relacionada a função do edifício, mas determinada por uma série de avaliações de desempenho multicritérios e multidisciplinares integradas a tomada de decisões do projeto. Compreende a uma soma ponderada de várias funções de comportamento e satisfação. Kolarevic (2004) escreve sobre “um paradigma emergente” de projeto em que o desempenho se torna o princípio orientador das soluções. A ligação seria possível através do uso de simulação integrada e de bases de dados. Grobman; Neuman (2008) participam da curadoria de uma exposição de arquitetura intitulada “*Performatism*”, um manifesto sobre o uso de simulação integrada ao processo de modelagem. A abordagem culmina em um livro em 2013 (GROBMAN; NEUMAN, 2008). Já Schumacher (2008) escreve um artigo opinativo onde apregoa “um novo estilo” de arquitetura morfogênica que envolve novos processos de projeto, agora auxiliado por linguagem de programação e uso de modelagem paramétrica.

Em relação ao projeto de fachadas e seu desempenho térmico e energético, o primeiro projeto a declarar uso de um processo integrado de simulação e modelagem algorítmica para definir forma e materialidade foi o *City Hall* do escritório do *Foster and Partners*. Mais especificamente o “*Specialist Modelling Group*”, um grupo de pesquisa parceiro do escritório fundado em 1998 com intuito de reduzir distâncias entre desempenho e modelagem no processo de projeto através do uso de modelos algorítmicos (KOLAREVIC, 2003b). Como estratégia, o

*City Hall* explora fator solar dos vidros da fachada, e soluções de aquecimento solar passivo e auto sombreamento da envoltória. As estratégias foram avaliadas por simulações que foram utilizadas como parâmetros-guia para definição da forma arquitetônica digitalmente (Figura 56, Figura 58, Figura 57).



*Figura 56. City Hall do Foster and Partners.*



*Figura 57. Simulação de radiação incidente do City Hall do Foster and Partners. Fonte: Kolarevic (2003b).*

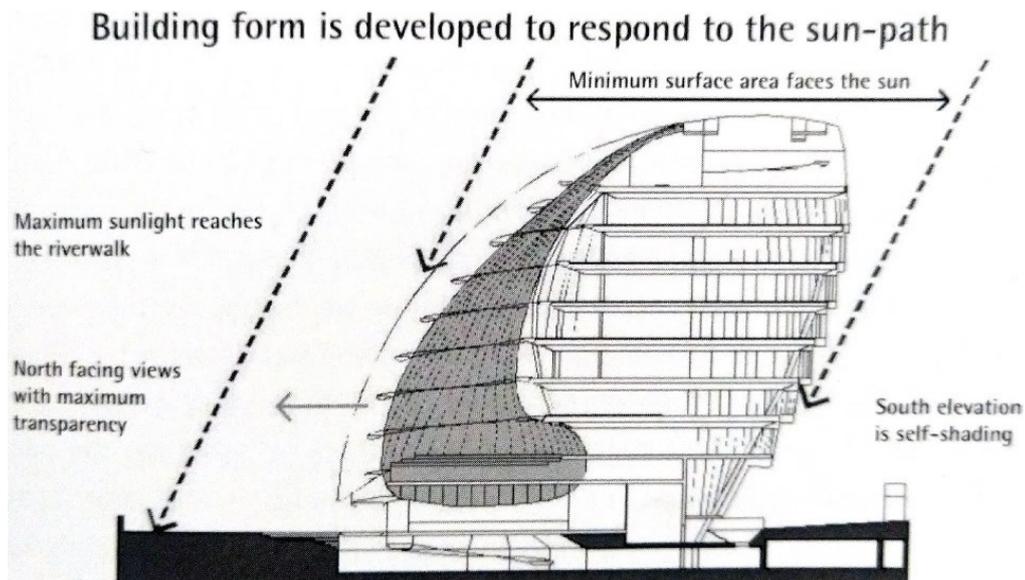


Figura 58. Diagrama de estratégias de City Hall do Foster and Partners. Fonte: Kolarevic (2003b).

O Projeto paramétrico na Arquitetura vem se popularizando apenas a partir dos anos 2000 (KOLAREVIC, 2003b; WOODBURY, 2010). Esta popularização está relacionada com o avanço das ferramentas, processos de fabricação e principalmente dos computadores domésticos. A partir de então, com o desenvolvimento de tecnologias de modelagem paramétrica de edificações, os processos de integração de projetos passam a ter um veículo que habilita a sua implementação prática (EASTMAN et al., 2008).

Muitas ferramentas de modelagem incluíam editores de programação textual desde os anos 2000, os quais permitiam executar processos algorítmicos dentro da etapa de modelagem e automatizar determinadas tarefas. Os processos clássicos que utilizam editores de texto, porém, requerem conhecimento específico em linguagem de programação e por isso, eram e ainda são impopulares entre arquitetos e outros projetistas (OXMAN, 2017).

Nos anos 2000, apareceram ferramentas com métodos para facilitar a inclusão de programação na modelagem, a exemplo do *Generative Components* da Bentley em 2003 e o *Grasshopper* para *Rhinoceros 3D* em 2008. Elas são apontadas como razão da crescente popularização da modelagem algorítmica, pois, possibilitam executar processos algorítmicos sem o advento de um editor de texto (AISH, 2011; OXMAN, 2017). O objetivo era tornar o processo de programação acessível a arquitetos e designers. Os editores são gráficos e possibilitam executar diagramas, onde cada ação é representada por elementos visuais concatenados de acordo com o processo desejado. Esse modelo passou a ser conhecido como *Visual Programming*, ou linguagem de programação visual (LPV) (CELANI; VAZ, 2011; TEDESCHI, 2014). As LPV são baseadas em caixas e setas. Cada objeto representa ações e

parâmetros que podem ser relacionados executando um determinado processo paramétrico (Figura 59).

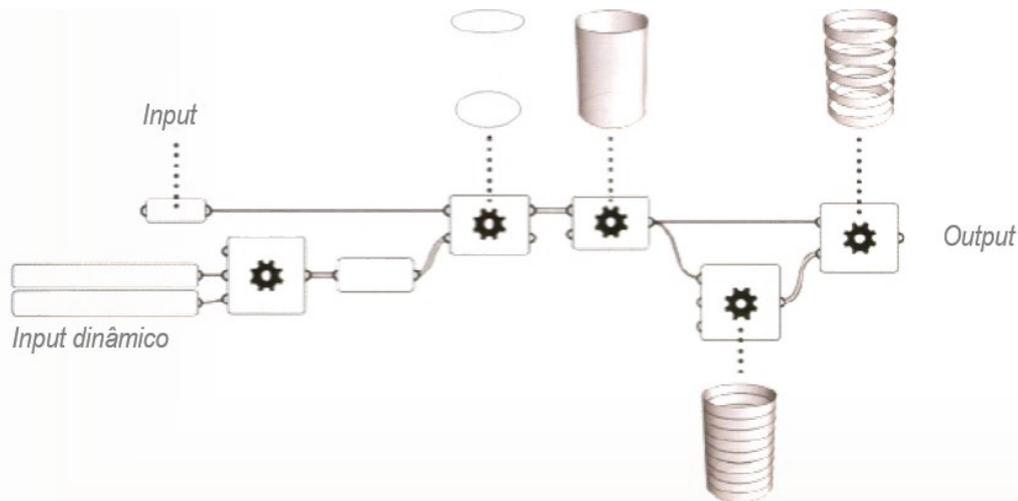


Figura 59. Representação de processo de LPV. Fonte: Tedeschi (2014).

Finalmente, diversos autores compreendem que a evolução dos processos de análise, do processamento dos computadores pessoais e dos modelos paramétricos auxiliados por computador criam um veículo que viabiliza exploração do projeto guiado por desempenho (LUCA, 2019; ZHAO; DE ANGELIS, 2019). Atualmente, há meios facilitados para a execução de experimentos paramétricos que associam cada vez mais métodos de análise ao processo de modelagem nas etapas iniciais de geração da geometria da solução arquitetônica (LUCA, 2019).

### 2.2.3 Simulação integrada ao processo de projeto

Os processos de modelagem e simulação por computador são tecnologias relevantes para antecipar desempenho de soluções arquitetônicas, ambientais, mecânicas e estruturais. A simulação do desempenho da construção pode ajudar na predição do conforto da edificação, eficiência energética, redução de custos e melhoria no gerenciamento de materiais e do seu uso (HENSEN, 2004).

Desde a década de 60, modelos matemáticos e programas de simulação de desempenho foram desenvolvidos para realizar análises e avaliações de edifícios (KUSUDA, 1999). As técnicas de simulação de desempenho estão passando por mudanças rápidas. As melhorias no poder da computação, nos modelos de algoritmos e nos dados de entrada disponíveis tornam possível simular processos com mais detalhes e rapidez que não eram viáveis até então. Ainda assim, há muitas barreiras na sua aplicação prática durante o projeto de arquitetura, pois muitas vezes esses processos estão retidos às fases finais do projeto do edifício, onde há menos

flexibilidade de mudanças e correções do projeto de arquitetura (HENSEN, 2004; MACLEAMY, 2004; VENÂNCIO, 2012).

Os arquitetos idealizam edifícios de alto desempenho através de considerações transdisciplinares com medidas qualitativas (mais subjetivas) e quantitativas (DEMERS, 2006; DILI; NASEER; VARGHESE, 2010). A tomada de decisão precisa satisfazer vários requisitos de desempenho ao mesmo tempo (WETTER, 2012). A crescente demanda por edifícios eficientes e de baixo impacto aumenta a importância de garantir que o desempenho exigido já seja alcançado nas etapas iniciais do projeto. A aplicação prática, no entanto, é reconhecidamente difícil devido à natureza do problema de projeto. O processo de projeto é interconectado, difícil de descrever, classificar e inserir em modelos (AISH, 2011; SHEA; AISH; GOURTOVAIA, 2005; SHI; YANG, 2013; WETTER, 2012). Muitas vezes os parâmetros de desempenho não são completamente conhecidos (MACIEL; FORD; LAMBERTS, 2007). Apesar de reconhecer a importância das considerações de desempenho, poucos arquitetos aplicam etapas analíticas nas fases de esboço, focando em questões puramente estéticas (LI; LIU; PENG, 2020; SHI; YANG, 2013).

Muitos autores indicam a relevância da execução de ciclos rápidos de análise de múltiplos critérios de desempenho simultaneamente nas etapas iniciais do projeto (NEGENDAHL; NIELSEN, 2015; ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016; WETTER, 2012). Por esse motivo, várias ferramentas foram desenvolvidas para permitir maior interoperabilidade e saídas visuais a serem incorporadas ao projeto arquitetônico. A razão fundamental para o uso de ferramentas rápidas e análise multicritério é orientar o processo de projeto, ajudar nas escolhas e possibilitar a comparação de soluções de forma mais iterativa e holística (NEGENDAHL; NIELSEN, 2015). Negendahl (2015) elenca quatro objetivos básicos para modelos de simulação integrados à modelagem:

1. Dar suporte ao projeto, em vez de automatizar;
2. Facilitar rápidas gerações de soluções integradas;
3. Permitir ciclos curtos de análise e síntese;
4. Suportar à interação e seleção de múltiplas alternativas de projeto.

Existem muitas causas para as barreiras relatadas ao uso da simulação durante o projeto. Com a evolução do processamento computacional, as ferramentas disponíveis para simulação agregaram cada vez mais recursos e complexidade ao longo do tempo. (KUSUDA, 1999). Seus usos requerem conhecimentos específicos e a presença de especialistas que dominem ferramentas de simulação e das entradas e manipulação de dados (LI; LIU; PENG, 2020). Muitas ferramentas também evoluíram de forma independente, dessa forma, a falta de

interoperabilidade entre simulação e modelos de arquitetura é um obstáculo que muitas vezes gera retrabalho e perda de tempo (LI; LIU; PENG, 2020; STEEL; DROGEMULLER; TOTH, 2012). A complexidade do processo muitas vezes faz com que o processamento da simulação demore para ser executado.

Atualmente, interfaces de simulação estão sendo desenvolvidas com o objetivo de integrar-se ao modelo arquitetônico e ao processo de projeto. Muitas vezes, implementam simplificações procedimentais e são contextualizadas com melhorias nas saídas visuais, métodos de cálculo, poder computacional, modelos 3D algorítmicos/paramétricos e a disponibilidade de dados de entrada que possibilitam simular com maior detalhe, integração e velocidade, o que antes era inviável (JAKUBIEC; REINHART, 2011; JONES; KENNEDY, 2017; ROUDSARI; PAK; SMITH, 2013; WETTER, 2012).

De acordo com Morbitzer (2003) arquitetos podem usar ferramentas de simulação desde a fase inicial do projeto. Neste momento, os projetistas estão interessados em responder rapidamente perguntas para ajudar a tomada de decisão, tais como, a compreensão da melhor solução para a forma do partido arquitetônico, proporções de áreas envidraçadas, escolha do tipo de vidro, orientação, *layout* e o sistema construtivo (KANTERS; HORVAT; DUBOIS, 2014; TOTH et al., 2011). Nesta etapa, a precisão matemática da análise é secundária, a prioridade é entender quais são as melhores soluções e relações de grandeza entre elas (REINHART, 2017). Em estágios avançados, o processo de análise torna-se mais complexo, demorado, específico e com maior precisão numérica para realizar decisões finas e processos de etiquetagem. Ou seja, o uso de ferramentas de análise, tem critérios que mudam de acordo com a etapa do processo de projeto em que se aplica (VENÂNCIO, 2012).

A simulação integrada a modelos arquitetônicos pode apresentar simplificações que visam permitir ciclos rápidos de análise e síntese de ideias (JONES, 2019; MANZAN; CLARICH, 2017; NEGENDAHL, 2015; NEGENDAHL; NIELSEN, 2015). Portanto, podem apresentar maior erro se comparados às simulações realizadas ao final do processo de projeto, quando o interesse é certificar o desempenho final. Em outras palavras, o processo de projeto permite o uso de modelos de simulação simplificados, ou regras (REINHART, 2019). Apesar disso, os erros e resoluções aceitáveis devem ser mais conhecidos, de modo a não gerar mal-entendidos na interpretação ou na classificação das soluções de projeto (LEACH, 2009; POEHLS, 2017).

O projeto guiado por desempenho propõe a integração da análise das soluções possíveis compatíveis com os interesses do projeto. O processo de simulação é integrado a um algoritmo de otimização, ambos conectados às etapas de elaboração da geometria do edifício ou sistemas.

A adoção dessa abordagem está em crescimento em decorrência da evolução do processamento dos computadores, criação de interfaces de simulação integradas a ferramentas de modelagem com computação rápida ou com processos na nuvem, criação de interfaces de programação, a exemplo da linguagem de programação visual (LPV), e desenvolvimento de ferramentas de otimização para apoio do projeto. (KHEIRI, 2018; LUCA, 2019; XING; WENJIE, 2013).

O processo paramétrico e de otimização associado à simulação pode ser controlado pela equipe de projeto, sendo as soluções cientificamente baseadas, o que reduz subjetividade (AISH, 2011; ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016). O sucesso do modelo 3D integrado a simulação está relacionado com a maneira que o modelo analisado é gerado parametricamente. É fundamental o planejamento das etapas lógicas, da flexibilidade do modelo 3D, e da seleção dos parâmetros e das restrições do sistema (AISH, 2011; PAPALAMBROS; WILDE, 2000). Segundo Aish, (2011) o modelador deve:

1. Identificar explicitamente as variáveis-chave que interessam o projeto;
2. Construir as dependências geométricas e lógicas entre essas variáveis de maneira a construir a lógica da geometria;
3. Definir medidas de desempenho apropriadas que podem representar as soluções resultantes;
4. Exercitar o modelo completo (alterando parâmetros e testando as medidas de desempenho) para explorar soluções mais adequadas.
5. Mudar as dependências geométricas e lógicas, a fim de explorar mais alternativas.

De acordo com as discussões apresentadas nesta seção, a Figura 60 oferece uma síntese das abordagens mencionadas. Para desenvolver um modelo 3D de um determinado projeto integrado à simulação, é necessário seguir três etapas fundamentais. Primeiramente, é essencial compreender o "problema de projeto" em questão. Em seguida, é preciso entender o "desempenho requerido" e identificar indicadores de desempenho relevantes para avaliar a resposta ao problema. Por fim, é fundamental utilizar um "modelo paramétrico" flexível e sensível, capaz de potencializar a geração de soluções de projeto eficazes. Essas soluções devem ser analisadas em ciclos rápidos, atendendo aos indicadores de desempenho estabelecidos, e considerar critérios qualitativos e subjetivos relevantes ao projeto.

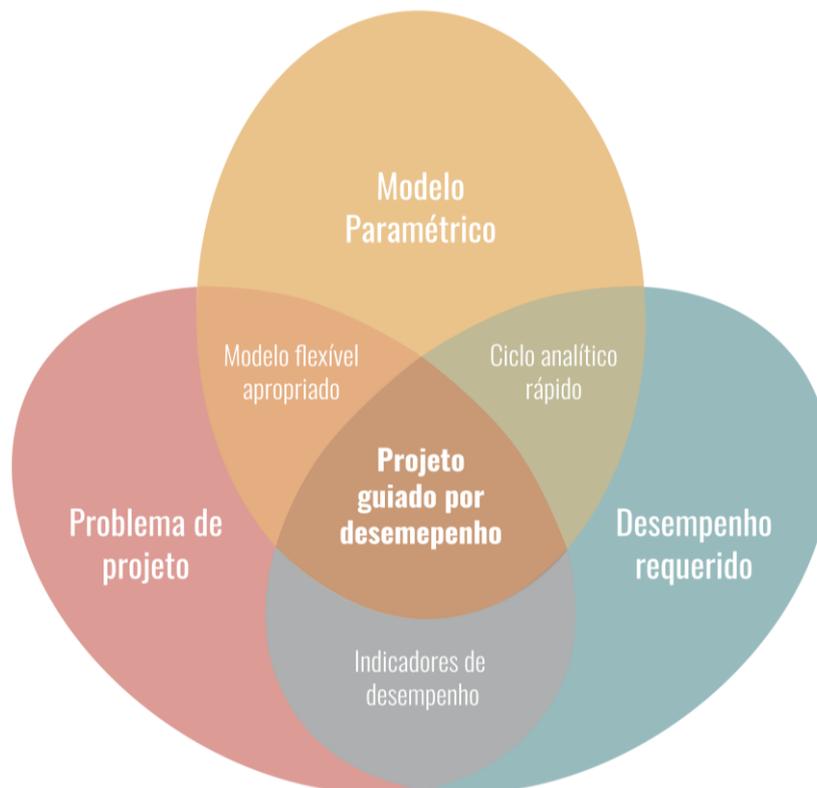


Figura 60. Projeto guiado por desempenho. Fonte: autor.

## 2.2.4 Técnicas de simulação para as primeiras fases de projeto

O uso de modelos matemáticos e de simulação computacional para prever o desempenho da edificação nas primeiras fases de projeto são encontrados em profusão na literatura (ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016). Negendahl; Nielsen (2015) apontam a importância de criar a oportunidade de ciclos rápidos de análises para processos iterativos. Este tópico visa discutir avaliação de edifícios nesse contexto com o foco em DCS. Dois são os maiores entraves encontrados na literatura recente: um relacionado às simulações de desempenho térmico, a interoperabilidade com o modelo de arquitetura. O outro, relacionado às simulações de iluminação natural, é a velocidade de processamento. Visando encontrar soluções, este tópico foi dividido em duas partes: discussão sobre simulações de desempenho térmico/energético e simulações de desempenho de iluminação natural.

### 2.2.4.1 Simulações de desempenho térmico/energético

Dois estratégias principais foram encontradas na literatura para estimar desempenho térmico em modelos integrados ao processo de projeto: O uso de métodos matemáticos e o uso de simulação computacional (NEGENDAHL; NIELSEN, 2015; ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016; PETERSEN; SVENDSEN, 2010). Sendo que, o software mais

amplamente utilizado para prever o desempenho térmico e energético de envoltórias no geral, é o *EnergyPlus* (AL-MASRANI; AL-OBAIDI, 2019; KIRIMTAT et al., 2016). Já as pesquisas que utilizam métodos matemáticos, geralmente computam carga térmica total, ou carga térmica de resfriamento (KIRIMTAT et al., 2016). De modo geral, há duas formas de calcular carga térmica. Usando modelos matemáticos que consideram um estado estacionário (*steady state*), ou usando modelos transientes (ASHRAE, 2021).

Os cálculos de estado estacionário assumem que a temperatura e o fluxo de calor dentro de um edifício permanecem constantes ao longo do tempo. Isso significa que o ganho de calor e a perda de calor de um edifício estão em equilíbrio, e a temperatura dentro do edifício permanece constante. Esses cálculos são normalmente usados para modelar de maneira simplificada o comportamento de um edifício em condições momentâneas, como durante o meio-dia ou durante uma semana de trabalho típica.

Existem vários métodos de estado estacionário que podem ser usados para calcular cargas térmicas, tais como, regras de experiência (*rules-of-thumb*) que agrupam uma série de métodos que utilizam regras matemáticas simplificadas para estabelecer o comportamento térmico do ambiente interno. Costumam ter alto teor de subjetividade e pode não ser sensível as variações do projeto de arquitetura (BELL JR, 2008). Ou o Método Grau-dia/hora de resfriamento/aquecimento que calcula a carga de aquecimento ou resfriamento de um edifício com base na diferença entre a temperatura externa e uma temperatura de referência. O método grau-dia/hora usa dados climáticos para estimar o número de graus-dias/hora de aquecimento ou resfriamento para um local específico, que é então usado para estimar a carga de aquecimento ou resfriamento de um edifício. Um exemplo é o modelo citado por Oktay; Coskun; Dincer (2011), que apresenta método para graus-hora de resfriamento usando como base a temperatura de 24°C. O processo lógico é estabelecido de forma geral por:

$$GC_R = GHR * (G_c + G_i) \quad (\text{Equação 6})$$

$$GHR = \left( \sum_i^d (T_{ext} - T_{ref})^+ \right) * 0.1 * d \quad (\text{Equação 7})$$

Onde,

$GC_R$  é o ganho de calor de resfriamento do período analisado em KWh;  $GHR$  o valor de graus-hora de resfriamento;  $G_c$  é a taxa de ganho de calor por condução, aqui há uma simplificação, onde o ganho é estimado pela área do elemento construtivo vezes sua transmitância térmica,  $G_i$  o ganho de calor por infiltração;  $T_{ext} - T_{ref}$  são os valores positivos da subtração horária entre a temperatura externa e a temperatura interna durante o uso do ar-condicionado em um dia típico;  $d$  é o número de dias analisados.

Já os cálculos transitórios levam em conta as mudanças de temperatura e fluxo de calor ao longo do tempo. Isso significa que o ganho de calor e a perda de calor de um edifício não estão em equilíbrio, e a temperatura dentro do edifício mudará com o tempo. Esses cálculos são normalmente usados para modelar o comportamento de um edifício sob condições transitórias, durante o curso de um dia ou ao longo de um ano. Os cálculos transitórios são mais complexos e computacionalmente onerosos do que os cálculos de estado estacionário, mas fornecem uma representação mais precisa do comportamento térmico de um edifício ao longo do tempo. Eles são comumente usados em software de simulação de energia de edifícios, como o *EnergyPlus*, para modelar o comportamento térmico de um edifício sob diferentes condições climáticas e horários de ocupação. Alguns métodos de cálculo de transferência de calor incluem: diferença numérica finita, elementos finitos, métodos de transformação, e métodos de séries temporais (ASHRAE, 2021).

A ASHRAE (2021) disponibiliza dois métodos de cálculo de carga térmica de resfriamento: o método de balanço de calor, que requer um software para implementação, e um método transiente simplificado baseado no método de balanço de calor. Este é passível de aplicação em uma planilha simples: o método RTS (*radiant time series*) (ASHRAE, 2021). Nele a transferência de calor é estimada utilizando fatores horários que representam as características de transmissão e inércia térmica do sistema construtivo. Para melhor compreensão, os itens seguintes abordarão o *EnergyPlus* e o método RTS no contexto de simulação para DCS.

Os procedimentos descritos pela ASHRAE (2021) são propostos para substituição de métodos apresentados anteriormente, tais como o Método de função de transferência (*transfer function method - TFM*), que requeria muitos passos de cálculo. O Método de diferencial de temperatura equivalente total com média temporal (*Total equivalent temperature differential method with time averaging - TETD/TA*) que intencionava originalmente ser um método manual de cálculo, porém requer uso de métodos computacionais por precisar de banco de dados extenso. O Método de diferencial de temperatura de carga de resfriamento com fatores de carga de resfriamento solar (*cooling load temperature differential method with solar cooling load factors - CLTD/CLF*) que seria uma versão simplificada dos métodos anteriores, estabelecido para calcular poucos passos de tempo. Apesar de não apresentar mais esses métodos, a ASHRAE não invalida seus usos, uma vez que, há uma extensa bibliografia que apresentam aplicabilidades desses métodos (ASHRAE, 2021).

Nos próximos tópicos o foco será um método computacional e um método simplificado de aplicação possível. Nesse contexto, será abordado o *EnergyPlus* que é o software mais utilizado para avaliação térmica de DCS e o método RTS que é o método simplificado mais atual para cálculo de carga térmica de resfriamento apresentado pela ASHRAE.

#### 2.2.4.1.1 *EnergyPlus*

*EnergyPlus* é um programa de simulação térmica e energética de edifícios amplamente validado, inclusive para sistemas construtivos complexos como fachadas duplas ventilada, com uso de materiais com mudança de fase e paredes trombe (ELLIS, 1995; MATEUS; PINTO; DA GRAÇA, 2014; TABARES-VELASCO; CHRISTENSEN; BIANCHI, 2012) . Ele usa uma combinação de métodos matemáticos complexos, para simular os processos de transferência de calor em um edifício. O programa pode simular o comportamento de um edifício ao longo do tempo, levando em conta condições climáticas horárias, padrões de ocupação, sistemas de condicionamento artificial (HVAC), geração de energia, entre outros.

O *EnergyPlus* modela as cargas térmicas do edifício usando o método de balanço de calor. Ele considera o calor gerado internamente pelos ocupantes, luzes e equipamentos, bem como o calor transferido de e para a envoltória através de condução, convecção e radiação. O programa também simula o desempenho detalhado de sistemas HVAC, incluindo dispositivos de resfriamento e aquecimento, ventiladores e dutos.

Além de calcular as cargas térmicas, o *EnergyPlus* também pode ser usado para simular o consumo de energia de um edifício, incluindo o consumo de eletricidade, gás natural e outros combustíveis. O programa também pode ser usado para avaliar a eficácia de várias medidas de conservação de energia, como isolamento, dispositivos de sombreamento e sistemas condicionamento de alta eficiência (ENERGYPLUS, 2022).

Ao utilizar simulação computacional, uma das dificuldades descritas para estimar o desempenho térmico/energético de projetos de arquitetura é a complexidade das ferramentas e a interoperabilidade com o modelo 3D de arquitetura (GERBER; LIN, 2014; UTKUCU; SÖZER, 2020; WETTER, 2012). Geralmente, em casos de análises integradas, é necessário estabelecer dois modelos: um para estimar o desempenho térmico e outro para estimar o desempenho da iluminação natural (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Como o *EnergyPlus* também permite estimar desempenho luminoso de maneira simplificada, alguns autores utilizam como estratégia para conseguir um modelo analítico integrado utilizando apenas um modelo 3D, evitando retrabalho (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014).

Para simular um edifício no EnergyPlus, é necessário estabelecer um modelo 3D que represente o edifício e suas zonas térmicas que devem ser convexas. O modelo deve incluir a geometria geral, e outras características-chave, como aberturas (janelas, portas, claraboias), dispositivos de sombreamento e divisórias internas relevantes. O modelo também deve incluir a localização, orientação do edifício e o ambiente circundante, caracterização de materiais de construção e de equipamentos e sistemas, como HVAC, iluminação e eletrodomésticos. O modelo 3D é formado por um modelo poligonal simples (ver anexo 1), onde os elementos construtivos são representados por superfícies coplanares simples, ou seja, não é recomendável avaliar geometrias complexas (ENERGYPLUS, 2022).

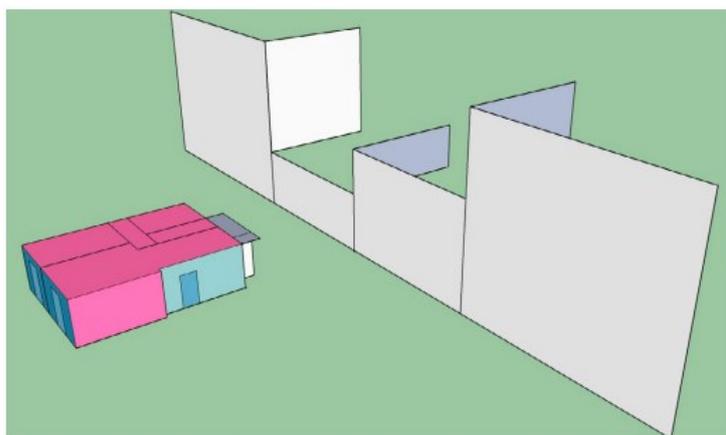


Figura 61. Modelo para simulação no EnergyPlus com representação simplificada de edifícios externos Fonte: Martellotta et al. (2017).

Ao estimar o desempenho de um elemento de sombreamento, no *EnergyPlus*, é possível calcular resultados horários, sendo mais preciso, e mais demorado. É possível, também usar um intervalo de tempo maior para obter resultados mais rápidos. O *EnergyPlus* fornece quatro métodos para calcular sombreamento:

1. Análise poligonal: o algoritmo de sombreamento é baseado em métodos de transformação de coordenadas semelhantes a Groth e Lokmanhekim (1969) e o método de sobreposição de sombra de Walton (1979). Ou seja, computa sombras a partir de cálculos trigonométricos e executa processo de identificação de intersecções de sombras.
2. Contagem de pixels: cálculos baseados em renderização GPU, que estabelecem a “visão do sol” para identificar as superfícies iluminadas com base no método desenvolvido por Jones; Greenberg; Pratt (2012).
3. Adicionando a propriedade da superfície: frações iluminadas pré-calculadas e inseridas através de uma rotina na propriedade do objeto em *SurfaceProperty:LocalEnvironment*.

4. Adicionando uma rotina: frações de sombreamento pré-calculados e inseridos através de uma rotina: *Schedule:File:Shading*.

Quando a opção “com reflexões” é acionada o *EnergyPlus* calcula o efeito dos reflexos e especular (ver anexo 1) usando raio traçado de três categorias de superfícies: elementos de sombreamento, superfícies externas e solo. Os reflexos da radiação difusa são estabelecidos a partir do raio traçado de 90 raios lançados em torno de pontos de referência para cada superfície, chamados de pontos receptores. Os raios se movem para a hemisfério externo em cada ponto receptor em uma superfície receptora. O método de raio traçado determina se cada raio atinge o céu, o solo ou uma obstrução, e calcula a radiação no ponto de impacto a partir da reflexão da radiação solar direta ou do céu. A contribuição da radiação para a superfície receptora é calculada para cada ponto de impacto, adicionada à contribuição de outros pontos de impacto. Finalmente, é feita a média de todos os pontos receptores. O *EnergyPlus* separa cálculos para reflexão solar direta, difusa e especular (ENERGYPLUS, 2022).

Dependendo da geometria analisada é possível que o *EnergyPlus* não estime de forma representativa o desempenho de reflexões. Não seria recomendado, por tanto, explorar formas muito complexas e rebuscadas no *EnergyPlus*. Sendo a recomendação para uso de geometrias convencionais passíveis de representações simplificadas em superfícies coplanares (QUEIROZ; WESTPHAL; PEREIRA, 2020).

#### 2.2.4.1.2 Método RTS

O método RTS (*Radiant Time Series*) é um modelo matemático usado para calcular carga térmica de resfriamento em edifícios (ASHRAE, 2021). É um método simplificado que deriva do método de Balanço de Calor (*Heat Balance*) e vem substituindo outros métodos simplificados, como o método da função de transferência (TFM), o Método de diferencial de temperatura de carga de resfriamento com fatores de carga de resfriamento solar (CLTD/CLF) e o Método de diferencial de temperatura equivalente total com média temporal (TETD/TA)(ASHRAE, 2021; SPITLER; FISHER; PEDERSEN, 1997; WANG; LEE; YUEN, 2018).

Este método simula a transferência de calor através do envelope do edifício (paredes, telhado, janelas etc.) durante um período específico podendo ser utilizado para cálculos horários. É um método transiente estabelecido para ser amigável a planilhas de cálculo convencionais e não necessita de processo iterativos (PEDERSEN; FISHER; LIESEN, 1997). Pode ser usado para prever o desempenho dos sistemas de condicionamento, ventilação e ar-

condicionado (HVAC) de um edifício com acuracidade e auxiliar o processo de projeto (REES; SPITLER; HAVES, 1998).

O processo do método RTS para cálculo de carga térmica de resfriamento, começa dividindo o edifício em zonas térmicas. Cada zona térmica é então dividida em uma série de elementos térmicos, como paredes, telhado, janelas etc. As propriedades térmicas de cada elemento são definidas. Em seguida, o método RTS simula a transferência de calor através do envelope do edifício durante um período específico, como um dia ou um ano. Isso é feito calculando o ganho/perda de calor para cada elemento térmico em intervalos de tempo horários (ASHRAE, 2021).

O ganho/perda de calor é determinado considerando indicadores como ganho de calor solar, ganhos por condução, ganhos internos e ganhos por infiltração. Os ganhos térmicos são divididos para ter uma parcela radiante e outra convectiva. Na parcela radiante é aplicada os fatores horários adimensionais que representam o efeito horário de condução (CTS) (Figura 62) e efeito radiante (RTS) (Figura 63). Estes fatores, demonstram o desempenho do sistema construtivo e efeito da inercia térmica de forma transiente de maneira simplificada (ASHRAE, 2021).

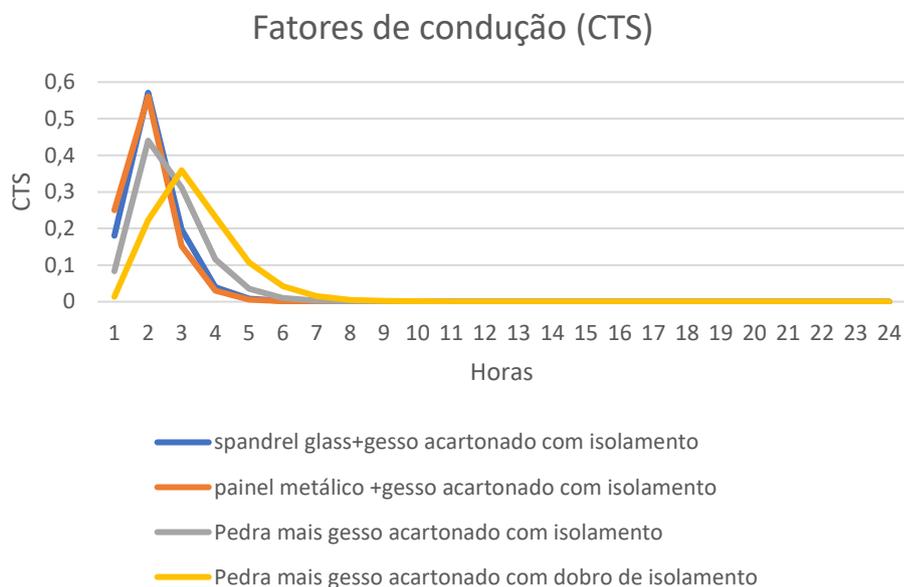


Figura 62. Exemplo de fatores de condução para diferentes paredes. Fonte: autor a partir de Ashrae (2021).

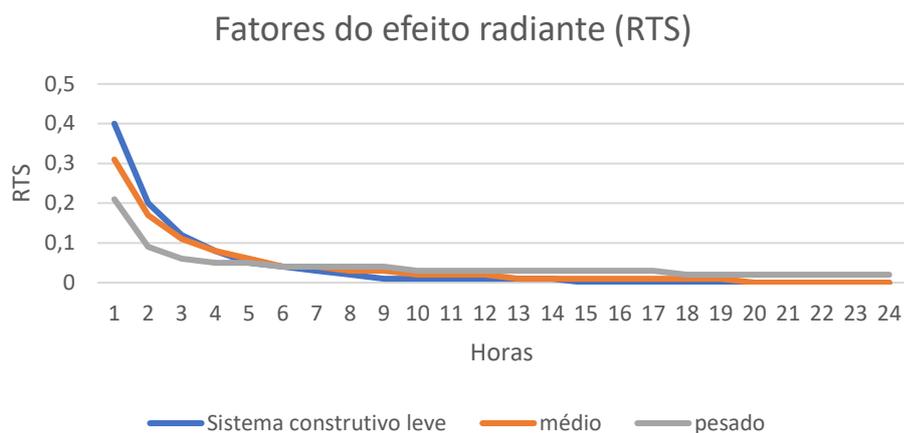


Figura 63. Exemplo de fatores radiante de acordo associado a inércia térmica. Fonte: autor a partir de Ashrae (2021).

$$Q_s = \sum Q_{i,r} + \sum Q_{i,c} \quad (\text{Equação 8})$$

$$Q_{r,\theta} = r_0 q_{r,\theta} + r_1 q_{r,\theta-1} + r_2 q_{r,\theta-2} + \dots + r_{23} q_{r,\theta-23} \quad (\text{Equação 9})$$

$$Q_\theta = c_0 q_{i,\theta} + c_1 q_{i,\theta-1} + c_2 q_{i,\theta-2} + \dots + c_{23} q_{i,\theta-23} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde,

$Q_s$  é a carga térmica de resfriamento sensível na zona térmica;  $Q_{r,\theta}$  é a carga térmica de resfriamento radiante para uma determinada hora;  $Q_\theta$  é o ganho de calor por condução para uma determinada hora.  $r_i$  e  $c_i$  são os fatores radiantes e de condução aplicados para as 24 horas que antecedem o valor do cálculo instantâneo.

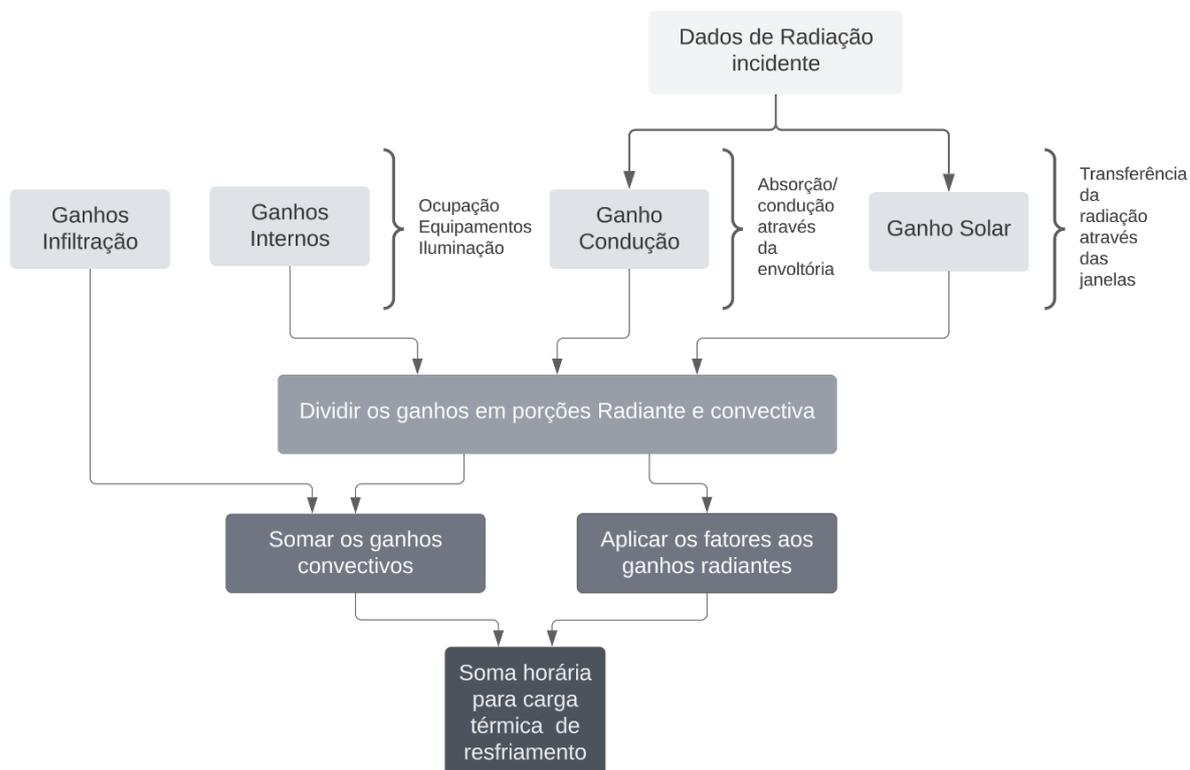


Figura 64. Fluxo de cálculo para o método RTS. Fonte: autor a partir de Ashrae (2021).

O método RTS também leva em conta as interações térmicas entre diferentes zonas térmicas. Por exemplo, o calor ganho por uma parede em uma zona afetará a temperatura da zona adjacente. O método simula essas interações resolvendo as equações de balanço de calor para cada zona e elemento em cada etapa de tempo.

Rees; Spitler; Haves (1998) analisam comparativamente a partir de 2048 modelos os métodos simplificados do RTS e o Europeu de Admitância com o método complexo de Balanço de Calor. Posteriormente, Rees et al. (2000) analisam comparativamente os modelos matemáticos de ambos de forma a avaliá-los também qualitativamente. As avaliações permitiram conclusões sobre a capacidade dos métodos simplificados de prever corretamente as cargas de resfriamento de pico em comparação com o Método de Balanço de Calor.

Segundo os autores, o Método RTS prevê excessivamente as cargas de resfriamento em comparação com o Método de Balanço de Calor, sendo mais conservador. Isso ocorre pois trata a radiação interior e a transferência de calor por convecção de maneira combinada e não leva em conta os ganhos de calor realizados de volta para fora da zona. O método obteve erros médios de 4.95, erros mínimos médios de -2.18 e erros máximos médios de 36.5. O Método de Admitância, por outro lado, considera as perdas através do tecido, mas depende de dados tabulados simplificados e historicamente desenvolvidos para ganhos solares, tornando-o menos preciso em sua forma atual. Um modelo de ganho solar mais sofisticado poderia ser usado para melhorar sua precisão. O método obteve erros médios de -3.14, erros mínimos médios de -25.59 e erros máximos médios de 26.56. O método RTS acertou mais os momentos das horas de pico de carga térmica 86% das vezes em comparação com o Método de Admitância, 64% das vezes.

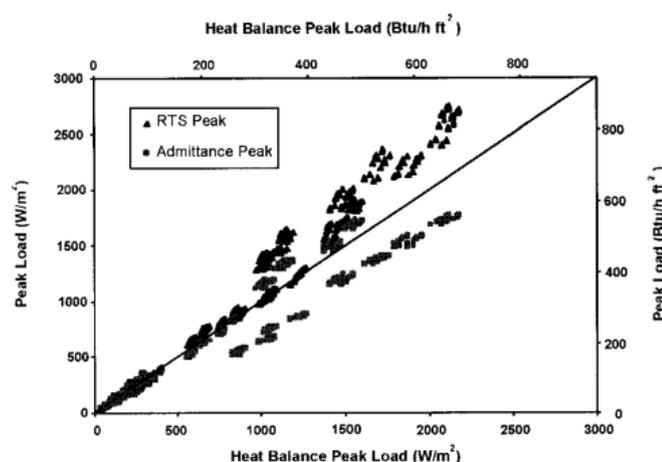


Figura 65. Comparação entre os métodos RTS (ASHRAE) e Admitância (europeu) com o método de Balanço de calor. Fonte: Rees; Spitler; Haves (1998).

#### 2.2.4.2 Simulações de iluminação natural

Simulações na área de iluminação natural são conhecidas por serem de difícil integração com o processo de projeto (OCHOA; ARIES; HENSEN, 2012), uma vez que os métodos

validados e confiáveis, como *ray tracing* e radiosidade, demandam tempo de processamento computacional. Pesquisas recentes exploram estratégias para a resolução deste problema introduzindo métodos mais rápidos para integração com o processo de projeto arquitetônico (JONES; REINHART, 2017; SUBRAMANIAM; MISTRICK, 2017), técnicas de processamento (JONES; KENNEDY, 2017; JONES; REINHART, 2017; ZUO et al., 2014) e explorações de configuração e modelagem (NEGENDAHL; NIELSEN, 2015; SUBRAMANIAM, 2018).

*Radiance* é geralmente o software usado como base para estudos de maior impacto, sendo amplamente validado para simulações de luz natural. *Radiance* é um conjunto de mais de 50 ferramentas gratuitas para modelagem 3D, análise de iluminação e visualização desenvolvida no *Lawrence Berkeley Laboratory* para aplicações de pesquisa. No geral, usa método de *ray tracing* (raio traçado) invertido e é capaz de gerar imagens e dados realistas a partir de modelos 3D complexos e caracterizações matemáticas de superfícies, céu e propriedades óticas (COMPAGNON, 1997; WARD; SHAKESPEARE, 1998). O raio traçado simula raios de luz individuais e representativos em uma cena modelada digitalmente. Extrapola a distribuição global de luz disponível na cena a partir da interação com as superfícies. O feixe de luz é geralmente interrompido quando um certo número de reflexões é alcançado, ou se o peso relativo de uma razão cai abaixo de um certo valor limite (WARD, 1997).

Em simulações anuais, o *Daysim* é a referência para a maioria dos estudos. O *Daysim* é uma ferramenta baseada no *Radiance* que apresenta um modelo de paralelização para simulação anual baseado no clima e é amplamente validado. O *Daysim* foi desenvolvido pelo *National Research Council Canada* (NRCC) e pelo *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems* na Alemanha. O *software* é baseado em coeficientes de iluminação natural (método DDS de duas fases) e simula métricas anuais de iluminação natural usando o método de raio traçado e os modelos de céu baseados no clima desenvolvidos por Perez et al. (PEREZ et al., 1990; REINHART; BRETON, 2009; REINHART; WALKENHORST, 2001). A Simulação é realizada utilizando um modelo tridimensional que descreve a geometria, características das superfícies e propriedades óticas.

Nos últimos anos, algumas simplificações e ajustes foram desenvolvidos para aumentar a velocidade das simulações visando integração em ferramentas de projeto de arquitetura. Subramaniam; Mistrick (2017) descrevem uma modificação do método de duas fases para acelerar a simulação usando uma mudança de discretização do céu (SUBRAMANIAM; MISTRICK, 2017). Zuo et al. (2014) e (JONES; REINHART, 2017, 2019), por outro lado, configuram o *Radiance* para habilitar o processamento da simulação na GPU do computador.

As pesquisas consideram os métodos de duas e três fases baseados no Radiance. Jones implementou experimentalmente um modo de *path tracing* no *Radiance* visando simulação (JONES; REINHART, 2017). A ideia principal da implementação do *path tracing* é a possibilidade de interromper a simulação antes do término para permitir maior controle sobre o tempo (JONES; KENNEDY, 2017). Parte desses estudos inclui integração com ferramentas de modelagem paramétrica para arquitetura, o que indica uma vontade de integração com o processo de projeto.

Outra estratégia presente na literatura é redução do arquivo climático para simulações anuais. Andersen et al (2008) utiliza metodologia chamada de "*time-segmentation*" que consiste em dividir o ano em um número de períodos e gerar médias tanto dos intervalos anuais quanto dos intervalos horários que eles representam, levando em consideração as diferentes condições climáticas estatisticamente. Esse método de divisão resulta em 28 posições do sol únicas, além de outras 56 ao longo do ano (Figura 66). Essa metodologia é inicialmente descrita e validada em detalhes em Kleindienst; Bodart; Andersen (2008). Seu conceito geral é semelhante a uma proposta anterior de Herkel (1997), mas difere desta no objetivo final, pois enquanto o objetivo de Herkel era reduzir o tempo de cálculo, o objetivo de Kleindienst et.al é fornecer ao projetista informações gráficas de desempenho anual a partir de poucos dados. Negendahl; Nielsen (2015) propõe uma simulação anual simplificada para acelerar o processo de cálculo. Sua estratégia reduz os vetores solares anuais horários de 8760 para 103. A amostragem também considerou o padrão de uso do edifício (Figura 66).

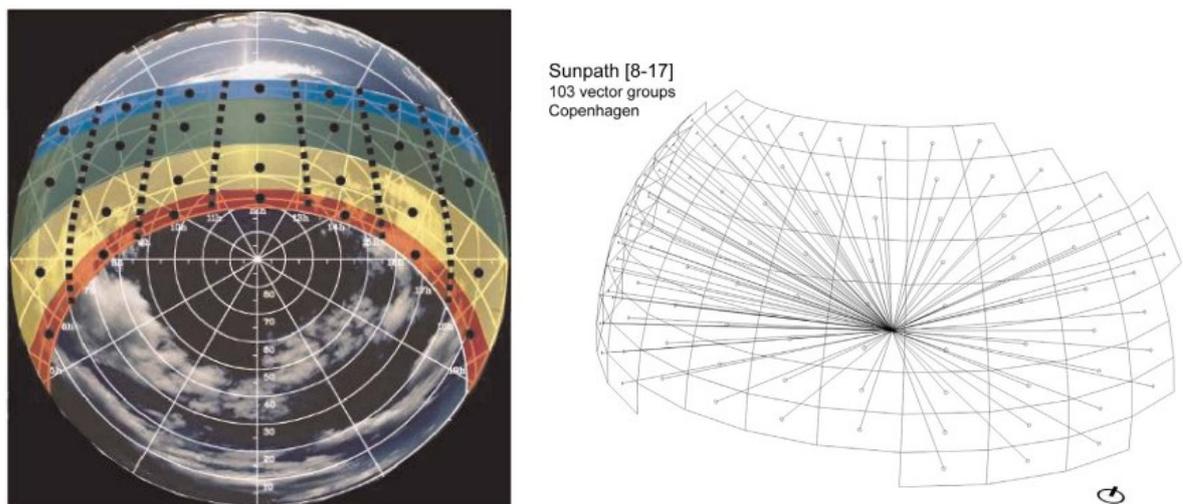


Figura 66. "Time-segregation" de acordo com Andersen et al. (2008) e método usado por Negendahl; Nielsen (2015) respectivamente.

Os próximos parágrafos abordam os três dos métodos rápidos citados de simulação computacional nos parágrafos anteriores e fornecem resumos sobre o funcionamento de cada método: método de duas fases; método de três fases e *path tracing*.

#### 2.2.4.2.1 Simulação de duas fases (*Daylight coefficient*)

O método tradicional de duas fases considera os cálculos do coeficiente da luz natural através do *Radiance* considerando a caracterização de janelas simples. Nele, as contribuições do céu e do sol são estabelecidas em uma única amostragem estocástica e, por isso, esse método permite obter resultados rapidamente (SUBRAMANIAM; MISTRICK, 2017). A simulação baseia-se na caracterização da luminância do céu e nas propriedades ópticas e geometria das superfícies. O raio traçado é calculado em duas etapas: fase externa e a fase interna. Na fase externa, a quantidade de luz direta e difusa do céu é calculada. Isso inclui os efeitos do sol e do céu, bem como os efeitos das nuvens e outras condições atmosféricas. Na fase interna, a quantidade de luz refletida do solo e das superfícies circundantes é calculada. Isso inclui os efeitos da arquitetura do edifício e do terreno, bem como os efeitos do céu e do sol.

No geral, o método de duas fases pode ser considerado quando o modelo de simulação 3D e as configurações do material são estáticos e compostos por superfícies coplanares. A versão tradicional tem menos precisão do que a versão DDS (simulação dinâmica de iluminação natural em inglês) incorporada no *Daysim*. A versão DDS, por sua vez, é adequada para simulações com geometrias orgânicas e materiais dinâmicos. Subramaniam (2017) implementou uma versão modificada do método tradicional de duas fases visando melhorar a precisão e manter a velocidade para uso no projeto arquitetônico. Esta versão está disponível no plugin *Honeybee plus* e *Honeybee* para *Grasshopper 3D* (SUBRAMANIAM; MISTRICK, 2017).

#### 2.2.4.2.2 Simulação de três fases

O método de três fases surge como a primeira técnica baseada no *Radiance* para janelas complexas de caracterização complexa (BSDF - *bidirectional scattering distribution function*) (ver anexo 1) e dinâmicas. Este método calcula o raio traçado entre os ambientes externo e interno em três fases. Cada uma delas é estabelecida em matrizes separadas: a fase exterior a janela; a fase da janela através da descrição no modelo BSDF; e a fase interna (BREMBILLA et al., 2019; SUBRAMANIAM, 2017; WARD et al., 2011).

Cada matriz calcula coeficientes normalizados. A primeira etapa estabelece o modelo do céu e a posição do sol em dados anuais do tipo WEA (*Sky Matrix*). A seguir, são calculados os coeficientes que caracterizam o comportamento da janela a partir da distribuição de luz

descrita no modelo BSDF (Matriz de Transmissão). O próximo passo estabelece o ângulo sólido que representa a contribuição da luz do céu para a janela (*Daylight Matrix*). O cálculo do espaço interno caracteriza o caminho da luz entre a janela e o sensor (matriz de visualização). O resultado é obtido multiplicando-se os coeficientes dessas matrizes com a contribuição da luz do céu, de modo que é possível descrever a contribuição da luz externa no espaço interno simulado (MCNEIL, 2010).

#### 2.2.4.2.3 Simulação *Path tracing*

De acordo com Ayoub (2020), o método *path tracing* foi inicialmente descrito por Kajiya (1986), e implementado inicialmente por Dutré; Lafortune; Willems (1993) para renderização. Aborda um modelo progressivo baseado nos métodos de Monte-Carlo (ver anexo 1). É estabelecido um raio traçado de cada vez, iterativamente, construindo assim uma amostragem da cena, e cada iteração reduz os erros de amostragem. O principal benefício do método é possibilitar a interrupção da renderização/simulação computacional antes de sua conclusão se a margem de erros for aceitável.

No trabalho descrito por Jones (2019) e Jones; Reinhart (2017), o Radiance foi modificado para implementar um modo de *path tracing*. A intenção é estabelecer resultados instantâneos para simulações estáticas para análise de ofuscamento. Além do *Path Tracing*, essa abordagem também combina o uso de processamento de GPU usando NVIDIA Optix para reduzir a velocidade final da simulação. O método *Path tracing* adicionado ao processamento na GPU foi implementado do *software ClimateStudio* (SOLEMMA, 2020). O conjunto de métodos foi utilizado como estratégia para realizar simulações estáticas e dinâmicas de luz visando redução da velocidade de simulação, e integração com modelos de arquitetura paramétrica. Neste modelo, o número de iterações torna-se um parâmetro relevante para a precisão da simulação computacional.

### 2.2.5 Validação de ferramentas de análise para arquitetos

Conforme discutido acima, a simulação integrada a modelos arquitetônicos pode apresentar simplificações que visam possibilitar ciclos rápidos de análise e síntese de ideias. Portanto, podem apresentar maior erro se comparados às simulações realizadas ao final do processo de projeto para certificar seu desempenho final. Em outras palavras, o processo de projeto permite o uso de modelos de simulação simplificados, ou regras práticas (NEGENDAHL; NIELSEN, 2015; REINHART, 2019). Apesar disso, os erros devem ser mais bem conhecidos, para não gerar mal-entendidos na interpretação ou na classificação das

soluções de projeto. Os arquitetos têm também uma abordagem analítica qualitativa durante as etapas iniciais do projeto, onde é importante classificar as soluções e entender quais conjuntos de soluções são mais apropriados em relação a outras soluções de interesse (KANTERS; HORVAT; DUBOIS, 2014).

Existem dois tipos de procedimentos de validação de software na literatura: experimental e comparativo (REINHART, 2018). No primeiro tipo, a validação utiliza dados experimentais para a comparação e considera as incertezas do processo de medição para a validação. O segundo tipo avalia comparativamente os dados de simulação realizados em dois softwares: um validado e outro em revisão. Para simulação de iluminação natural, a *Comissão Internacional d'eclairage* desenvolveu um conjunto de procedimentos de teste apresentados em 2006 CIE 171 que abordam testes de precisão para programas de iluminação. São procedimentos para testar a precisão em um contexto de uso final, e não para análise simplificada para auxiliar o processo de design.

Na busca por um processo de validação de ferramentas simplificadas para arquitetos, Poehls (2017) propôs uma ferramenta de análise de energia e um método para avaliar ferramentas simplificadas para os estágios iniciais de projeto. Foram propostos dois tipos de processos de validação: o método clássico e o método quanti-qualitativo. Na validação clássica é considerado o método clássico. É guiado pela porcentagem de diferenças entre os resultados de um instrumento validado e os do instrumento em análise. Nesse caso, o resultado numérico é o aspecto mais importante, e a diferença entre as saídas de diferentes softwares não deve ultrapassar uma certa margem de erro. A pesquisa utiliza como referência estudos de Picco; Lollini; Marengo (2014) que utilizam 20% como margem de erro aceitável para fases de concepção de projeto.

A validação quanti-qualitativa refere-se à análise heurística. Compara a proporção e posições de um conjunto de simulações em uma ferramenta validada com os desvios obtidos da ferramenta em análise. Nesse caso, o resultado numérico não é necessariamente a principal preocupação; a questão é se os resultados do projeto estão posicionados de forma semelhante em ambos os conjuntos de simulações. Por exemplo, na otimização do projeto arquitetônico, o resultado numérico é usado para classificar um conjunto de soluções possíveis para uma análise comparativa entre soluções. A questão mais importante desse tipo de processo é qual conjunto de soluções de projeto está mais bem posicionado em relação aos demais (POEHLS, 2017).

Hviid; Nielsen; Svendsen (2008) já destacam a importância de ferramentas de análise simplificada rápidas e integradas para uso nas fases iniciais do projeto. O trabalho propõe um

modelo matemático simplificado para prever o desempenho de iluminação natural, térmico e energético de edificações. A fase de validação utiliza o *Radiance* para testar o modelo de iluminação. O modelo térmico baseia-se na pesquisa de Nielsen (2005), que executa um processo de validação utilizando um programa chamado BSim. Ambos os trabalhos, utilizam uma margem de erro de 20% como aceitável no processo de validação de ferramentas para fase inicial do projeto. Já Brembilla e Mardaljevic compararam o estado da arte dos métodos de simulação de iluminação baseados no clima para testar a precisão e consideraram 15% como linha de base para erros (BREMBILLA et al., 2019). No entanto, o estudo não considera o contexto de uso dos métodos durante o processo de projeto.

## 2.2.6 Processos de otimização no PGD

Esta etapa do referencial teórico intenciona discutir modelos de otimização para os problemas de arquitetura no contexto desta pesquisa. A abordagem teórica foca em modelos disponíveis em ferramentas de modelagem 3D para o projeto de arquitetura. Para melhor compreensão dos modelos e algoritmos de otimização, inicialmente será abordado uma breve discussão sobre métodos de otimização. Segundo, será apresentada uma discussão teórica sobre a aplicação de otimização à problemas de projeto.

### 2.2.6.1 Métodos de otimização

Este item propõe uma breve discussão sobre métodos de otimização em projeto. Quatro conceitos metodológicos serão explorados. É possível classificar os métodos de otimização de duas formas: quanto ao número de funções e quanto ao método matemático. Quanto ao número de funções de otimização podem ser unicritério e multicritério. Quanto ao modelo matemático de solução podem ser metaheurísticos e determinísticos (QUEIROZ; PEREIRA, 2021; WORTMANN; NANNICINI, 2017).

**Funções unicritério:** Os primeiros trabalhos sobre otimização de edifícios utilizavam algoritmos com um único critério. Nesse modelo, uma única função matemática guia o processo de otimização. O resultado apresenta uma solução determinada como ótima.

Críticas são formuladas ao uso de funções unicritério em arquitetura, decorrência da natureza complexa do projeto (WORTMANN; NANNICINI, 2017). Nesse sentido, o problema de otimização pode não ser passível de convergência, e/ou uma única função pode não ser representativa para o problema. Quando há mais de um indicador de desempenho, escrever o problema em uma única função pode não ser simples. Nesses casos, se faz necessário a elaboração de uma soma ponderada dos indicadores de modo a transformar o modelo

multicritério em unicritério (ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016). Indicar pesos representativos para os diferentes indicadores é de difícil execução. Ou seja, é limitado para representar os múltiplos problemas característicos do projeto de arquitetura, e a solução encontrada como ideal pode simplesmente não ser de interesse (WORTMANN; NANNICINI, 2017).

**Funções multicritério:** A problemática de arquitetura geralmente possui característica multidisciplinar, de natureza quantitativa e qualitativa. Por essa razão, a literatura recente recomenda a utilização de modelos de otimização multicritério, em detrimento do unicritério (KIRIMTAT et al., 2019; MANZAN; CLARICH, 2017; QINGSONG; FUKUDA, 2016; ZHAO; DE ANGELIS, 2019). O modelo multicritério representa o problema com múltiplas funções de interesse. Dessa forma, não existe uma solução determinada como a melhor, mas um conjunto de soluções apresentadas em um universo de possibilidades de forma a caracterizar o problema. Seria a equipe de projeto quem define soluções de interesse.

A vantagem dos modelos multicritério em possibilitar infinitas funções, também caracteriza uma desvantagem. A complexidade pode gerar problemas difíceis de caracterizar, que consomem muito tempo para análise e com número de variações que impossibilita sua execução. O conjunto de dados gerados pode ser de difícil leitura também (WORTMANN; NANNICINI, 2017).

**Algoritmos metaheurísticos:** Algoritmos de otimização metaheurísticos são modelos não determinísticos, ou seja, seguem a cada loop de simulação de maneira randômica. Em modelos de otimização randômicos, as primeiras iterações das soluções são determinadas aleatoriamente. Dependendo da natureza do problema, podem consumir muito tempo para chegar numa amostragem representativa. São exemplos de técnicas metaheurísticas: Otimização de enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization-PSO*), algoritmos genéticos (*Genetic algorithm – GA*), recozimento simulado (*Simulated Annealing - SA*), otimização de colônia de formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*), busca harmônica (*Harmony Search - HS*).

Otimização de enxame de partículas (PSO) é um algoritmo de otimização que simula o comportamento de um enxame de partículas em movimento em um espaço de pesquisa (baseado no movimento em grupo de pássaros ou peixes). É uma técnica de otimização inicialmente descrita por Kennedy e Eberhart em 1995 (KENNEDY; EBERHART, 1995; PANDA, 2018). Cada solução é um "pássaro" no espaço de busca (partícula). Todas as partículas têm valores avaliados pela função a ser otimizada e têm velocidades que direcionam o voo das partículas. As partículas flutuam através do espaço do problema seguindo as

partículas ótimas da vez. O PSO é inicializado com um grupo aleatório e, em seguida, procura por partículas ótimas a cada geração (PANDA, 2018).

Recozimento simulado (SA) é um algoritmo de otimização que simula o processo de recozimento em metalurgia para encontrar o mínimo global de uma função. O algoritmo foi projetado para encontrar o ótimo global de um problema dado, imitando a forma como os metais são resfriados para atingir sua estrutura ótima. Foi descrito pela primeira vez por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi em 1983 (KIRKPATRICK; GELATT JR; VECCHI, 1983). A ideia do SA é começar com uma solução aleatória e explorar iterativamente o espaço de soluções fazendo pequenas alterações aleatórias na solução atual. O algoritmo usa uma regra de aceitação probabilística que determina se uma nova solução deve ser aceita ou rejeitada e um cronograma de temperatura predefinido (PANDA, 2018).

Otimização de colônias de formigas (ACO) é um algoritmo de otimização inspirado no comportamento das colônias de formigas. É usado para encontrar soluções aproximadas para problemas de otimização difíceis. Foi descrito pela primeira vez no início da década de 1990 por Marco Dorigo (DORIGO, 1992). O algoritmo simula o comportamento das formigas enquanto elas procuram comida. Cada formiga constrói uma solução para o problema fazendo uma sequência de decisões probabilísticas baseadas na informação coletada de seu ambiente. As soluções construídas pelas formigas são então usadas para atualizar o “rastros de feromônio”, que é usado pelas outras formigas para guiar sua busca por uma solução. O processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Busca harmônica (HS) é um algoritmo de otimização que foi inspirado no processo de improvisação de músicos. A ideia da busca harmônica é gerar um conjunto de soluções candidatas, chamadas de harmonias, e melhorá-las iterativamente ajustando suas notas. Foi descrito pela primeira vez em um artigo de 2001 por Zong Woo Geem (GEEM; KIM; LOGANATHAN, 2001). O algoritmo usa uma memória da harmonia que armazena as melhores soluções encontradas até agora, e uma operação de ajuste de notas que gera novas soluções modificando ligeiramente as notas das harmonias existentes previamente.

Os algoritmos genéticos (GA) foram apresentados pela primeira vez por John Holland na década de 1960, e mais tarde desenvolvido por Holland e colegas da Universidade de Michigan na década de 1970 (HOLLAND, 1992). São os modelos metaheurísticos mais utilizados na solução de problemas de otimização em arquitetura (KHEIRI, 2018; WORTMANN; NANNICINI, 2017; ZHAO; DE ANGELIS, 2019). Os algoritmos evolutivos são procedimentos baseados na teoria da evolução de Darwin, ou seja, na sobrevivência dos mais aptos. Uma geração randômica de combinações possíveis ocorre. Na sequência, o universo

de possibilidade é analisado para identificar soluções representativas para próximas gerações. Há o cruzamento de pares e geração de novos resultados. O algoritmo também prevê possibilidade de mutações nas novas gerações. Em cada geração seguinte, os operadores de seleção e recombinações são usados entre as soluções candidatas para procurar as de mais alto desempenho (CALDAS; NORFORD, 2002) (Figura 67).

Algoritmos genéticos, apesar de largamente utilizados em pesquisas de otimização de desempenho de edifícios, vem sendo criticados na literatura especializada por ser um modelo metaheurístico (WORTMANN et al., 2018). Suas principais desvantagens são a falta de garantias de desempenho além daqueles que derivam de sua aleatoriedade; a necessidade de ajustar muitos parâmetros de otimização para cada algoritmo e problema; e a necessidade de inúmeras avaliações para efetivar a função, associado ao tempo para realizar os inúmeros ciclos. Algumas abordagens podem ser simplesmente impraticáveis. Melhoramentos para reduzir número de simulações necessárias foram propostos por Zitzler; Laumanns; Thiele (2001) para o Spea-2 e Bader; Zitzler (2011) para o Hype. Os trabalhos descrevem cada algoritmo e demonstram as melhorias. A Tabela 4 apresenta os termos comumente associados aos algoritmos genéticos (FORREST, 1996; RENNER, 2004; SCHMITT, 2001).

Tabela 4. Termos associados aos algoritmos evolutivos.

<i>Natureza</i>	<b>Algoritmos genéticos</b>
<i>Indivíduo</i>	Solução para um problema
<i>População</i>	Número de indivíduos
<i>Método de seleção</i>	Método usado para selecionar indivíduos para reprodução, como roleta, seleção por torneio ou baseada em classificação
<i>Método de Reprodução</i>	Método usado para substituir a população antiga pela nova, como elitismo, truncamento ou steady-state
<i>Número de gerações</i>	Número de vezes que o algoritmo iterará sobre a população antes de parar.
<i>Fitness</i>	função usada para avaliar a qualidade de um indivíduo
<i>Cromossomo</i>	Conjunto de genes que representam uma solução
<i>Gene</i>	Uma parte da representação de uma solução (parte do cromossomo)
<i>Crossover</i>	Probabilidade para recombinação de dois indivíduos para produzir descendentes
<i>Mutação</i>	Probabilidade de que um gene (ou variável) de um indivíduo seja aleatoriamente mutado
<i>Crítérios de término</i>	As condições que determinam quando o algoritmo deve parar.

Fonte: Forrest (1996); Renner (2004); Schmitt (2001).

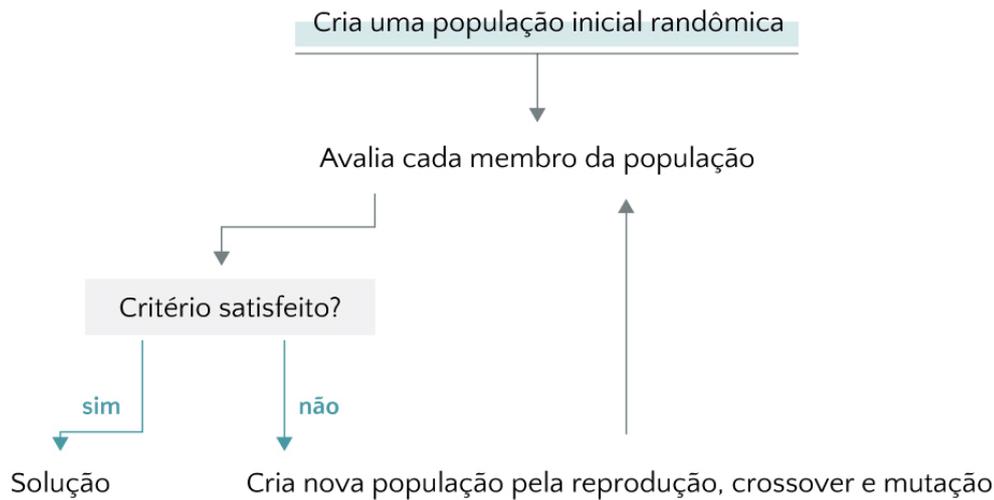


Figura 67. Fluxo do algoritmo evolutivo. Fonte: adaptado de Renner (2004).

Apesar das críticas, os métodos de otimização devem ser selecionados com base na natureza do problema a ser analisado. Métodos baseados em modelos contínuos exigem funções com problemas lineares passíveis de convergência, enquanto problemas não lineares e descontínuos podem ser avaliados através de métodos livres como os metaheurísticos (KHEIRI, 2018b).

**Algoritmos determinísticos:** Modelos determinísticos utilizam processos que seguem uma determinada direção. Os cálculos decorrem até a convergência das funções. Utilizam heurística para buscar melhorias nas proximidades e as melhores soluções recentes. Exemplos de técnicas determinísticas são o gradiente descendente (*Gradient Descent – GD*) e o método conjugado (*Conjugate method – CM*).

O modelo gradiente descendente (GD), posiciona novas soluções em pontos em uma grade multidimensional e compara o valor da função atual com o melhor valor obtido até então. É comumente usado em *machine learning* para encontrar os melhores parâmetros e minimizar os erros nos dados de treinamento (RUDER, 2016). Em cada iteração, o algoritmo calcula o gradiente da função de análise em relação aos parâmetros, que é a direção da maior inclinação na função de otimização. O algoritmo, então, atualiza os parâmetros subtraindo uma pequena fração do gradiente. Esse processo é chamado de passo. O tamanho do passo é chamado de taxa de aprendizado. Esse processo é repetido até que os valores estejam abaixo de um determinado limite ou que o número máximo de iterações seja alcançado (EMMERICH et al., 2008; WORTMANN et al., 2018).

O método do gradiente conjugado (CM) é um algoritmo de otimização utilizado para encontrar o mínimo de uma função que é definida em um espaço vetorial. Ele pode ser útil para problemas em grande escala, onde a função pode ser dispendiosa para ser avaliada. Ele começa

com uma suposição inicial dos parâmetros ótimos e, em seguida, melhora iterativamente a suposição movendo-se na direção do gradiente da função. Em cada iteração, o algoritmo escolhe uma nova direção que é conjugada à direção anterior, ou seja, ortogonal à direção anterior. Isso permite que o algoritmo faça um progresso rápido nas primeiras iterações, sendo apropriado para problemas lineares (SHEWCHUK, 1994) .

Desvantagens do uso de modelos determinísticos em arquitetura estão na complexidade dos problemas de projeto. Muitas vezes as funções têm problemas conflitantes entre si e podem não serem passíveis de convergência. Emmerich et al. (2008) indicam que modelos determinísticos funcionam bem para problemas unicritério com objetivos diretamente proporcionais e problemas lineares.

As pesquisas com processos de otimização para edificações costumavam utilizar funções simples de otimização com funções unicritério, porém a natureza complexa do projeto, em geral, demanda a elaboração de mais funções de otimização, sendo as funções multicritério uma tendência em pesquisas na área (KHEIRI, 2018; WORTMANN; NANNICINI, 2017; ZHAO; DE ANGELIS, 2019).

Emmerich et al. (2008) comparam algoritmos de otimização para uso na arquitetura. Sua pesquisa utilizou algoritmos unicritério com modelos determinísticos e metaheurísticos. Testou funções com indicadores diretamente proporcionais (consumo de energia) e também conflitantes entre si (consumo de energia x conforto ambiental). Seus resultados indicam que técnicas adaptativas e determinísticas são favoráveis à problemas com indicadores diretamente proporcionais. Já a otimização com objetivos conflitantes obteve um resultado favorável ao algoritmo evolutivo defendido no artigo, o SMS-EMOA (Seleção multiobjetivo baseado no hiper volume dominado)(BEUME; NAUJOKS; EMMERICH, 2007; EMMERICH et al., 2008).

Wortmann (2017a) e Wortmann; Natanian (2020) testam diversos modelos de otimização metaheurísticos e determinísticos disponíveis para o Grasshopper. O Grasshopper é hoje a ferramenta disponível em arquitetura mais utilizada para realizar otimização no contexto de projeto guiado por desempenho (WORTMANN, 2017a; ZHAO; DE ANGELIS, 2019). Wortmann (2017a) utiliza simulações computacionais para testar soluções para iluminação (UDI) e ofuscamento (DGP). O trabalho propõe um modelo de otimização determinístico baseado em *machine learn* para solucionar problemas de otimização com alto consumo de tempo (RBFOpt). O modelo proposto desempenhou melhor entre todos, com resultados mais próximos à fronteira de Pareto ideal (duas funções) (ver anexo 1), estabelecida utilizando todos

os algoritmos testados. Em Wortmann; Natanian (2020) o RBFOpt é comparado aos algoritmos Hype e Nsga-II. O RBFOpt apresentou melhor desempenho geral, sendo que o algoritmo evolutivo multicritério Hype também apresentou desempenho próximo, ou seja, ambos obtiveram robustez e velocidade.

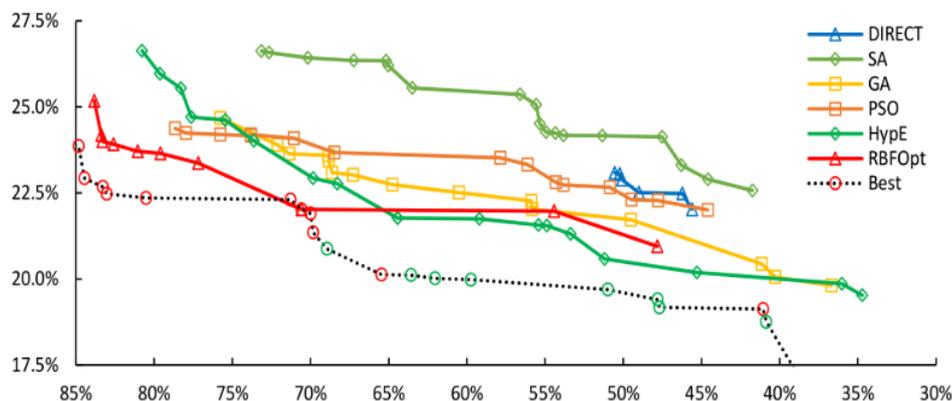


Figura 68. Comparação de algoritmos determinísticos e não determinísticos disponíveis no Grasshopper. A fronteira de Pareto foi definida através da combinação de todos os algoritmos, e foi utilizada para estabelecer a curva de Pareto com os melhores resultados (best). Fonte: Wortmann (2017).

A Tabela 5 apresenta um resumo das ferramentas de otimização disponíveis integradas a softwares de modelagem 3D disponíveis na atualidade. É uma atualização desde os trabalhos apresentados por Wortmann (2017a) e Cichocka (2017):

Tabela 5. Programas e algoritmos de otimização integrados a ferramentas de arquitetura.

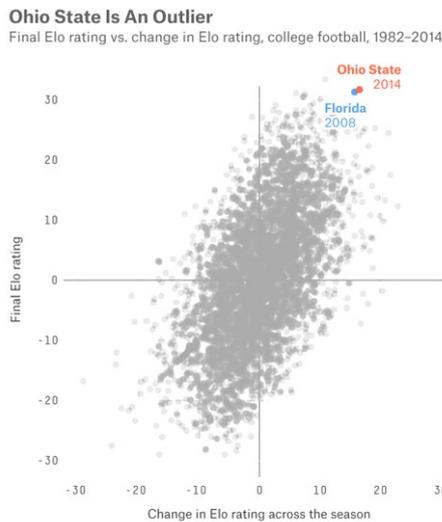
Programa de modelagem	Nº funções	Tipo	Algoritmos	Nome
Grasshopper	Uni critério	Metaheurístico	GA e SA	Galápagos
	Multicritério	Metaheurístico	Spea-2; Hype	Octopus
	Multicritério	Metaheurístico	NSGA-II	Wallacei
	Multicritério	Metaheurístico	PSO	Silvereeye
	Unicritério	Determinístico	NLopt; COYBLA; BOBYQA; SUBPLEX; CRS2	Goat
Dynamo	Unicritério	Determinístico	RBFOpt	Opossum
	Multicritério	Metaheurístico	NSGA-II	Optimo
DesignBuilder Generative Components	Multicritério	Metaheurístico	NSGA-II	Generative design
	Unicritério	Metaheurístico	GA	Prototype Design Evolution

Fonte: Modificado a partir de Cichocka et al. (2017); Wortmann; Nannicini (2017).

### 2.2.6.2 Visualização dos dados

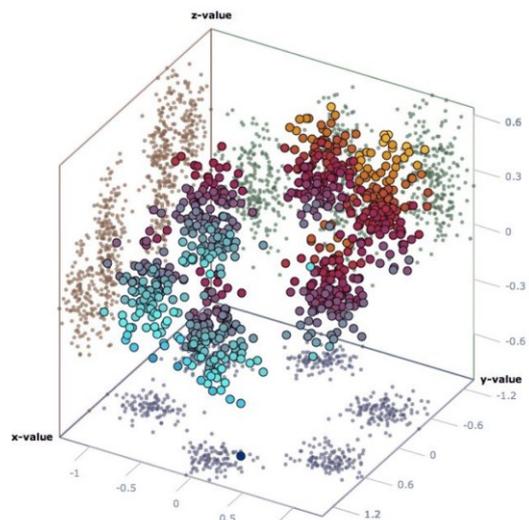
Processos de otimização podem gerar algumas centenas ou milhares de dados. Algoritmos com funções multicritério adicionam um fator de multiplicação aos inúmeros resultados. Nesse sentido, uma preocupação no projeto guiado por desempenho é a visualização dos diversos dados de modo a facilitar a compreensão imediata do problema e das informações geradas (WORTMANN; NANNICINI, 2017).

A literatura apresenta diferentes maneiras de representar os dados gerados nos processos de otimização. Dentre elas, podem-se citar os gráficos de dispersão bidimensionais (CALDAS, 2008; MANZAN; CLARICH, 2017) e tridimensionais (ELMQVIST; DRAGICEVIC; FEKETE, 2008; NEGENDAHL; NIELSEN, 2015), gráficos de dispersão em matriz (ELMQVIST; DRAGICEVIC; FEKETE, 2008; HUANG; FAN; ZHAI, 2021; WORTMANN, 2017b), os diagramas de coordenadas paralelas (FLAGER et al., 2009; WORTMANN, 2017b), e os gráficos radiais muitas vezes utilizados para comparar soluções individualmente (WORTMANN, 2017b) (Figura 69).



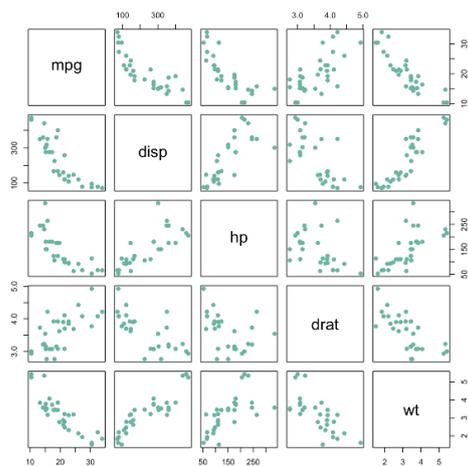
a

Fonte: <https://datavizproject.com/data-type/scatter-plot/>.



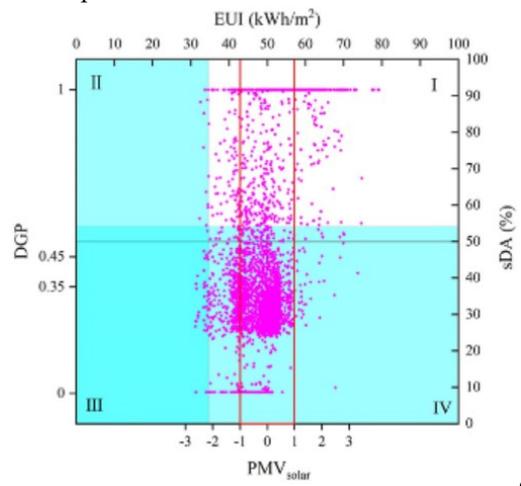
b

Fonte: <https://datavizproject.com/data-type/3d-scatterplot/>.



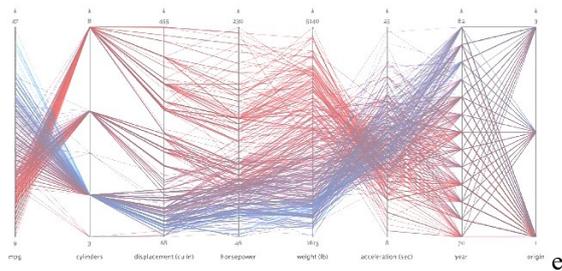
c

Fonte: <https://r-graph-gallery.com/98-basic-scatterplot-matrix.html>.



d

Fonte: Huang; Zan; zhai (2021).



Fonte: <https://datavizproject.com/data-type/parallel-coordinates/>.



Fonte: <https://datavizproject.com/data-type/polar-chart/>.

Figura 69. Tipos de visualizações encontradas utilizadas para representar resultados em otimizações multicritérios: a) gráfico de dispersão simples. b) gráfico de dispersão 3D. c) gráfico de dispersão em matriz. d) proposta de Huang; Zan; zhai (2021), um gráfico de dispersão em matriz integrado para otimizações com quatro critérios de desempenho. e) diagrama de coordenadas paralelas. f) gráfico polar.

Geralmente, os gráficos de dispersão são utilizados em funções multicritérios de forma a representar as soluções dominantes através da fronteira de Pareto, que representa o limite do universo do problema e apresenta as combinações otimizadas entre os critérios avaliados (ver anexo 1) (EVINS, 2013; WORTMANN; NANNICINI, 2017). Um problema de duas funções possui a fronteira de Pareto em forma de curva (Figura 70). Um problema de mais funções, estabelece uma superfície (Figura 71).

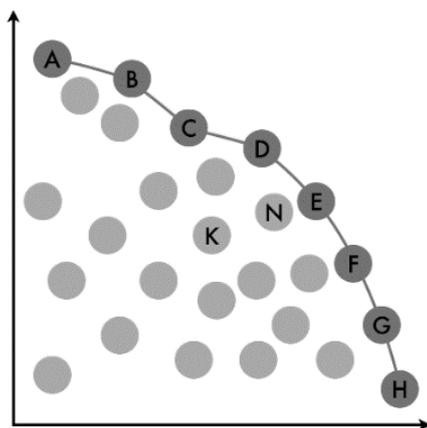


Figura 70. Fronteira de Pareto nos pontos escuros interligados.

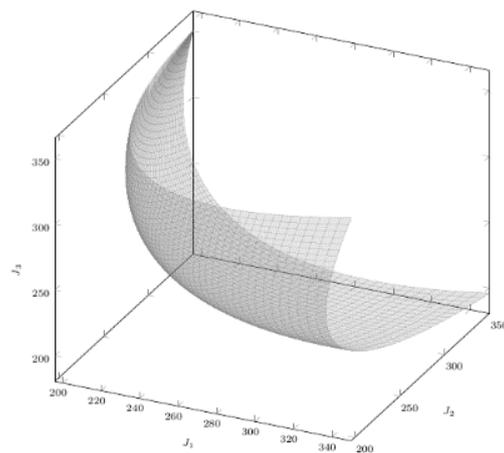


Figura 71. Fronteira de Pareto tridimensional.

O estabelecimento da fronteira de Pareto não implica na definição de ponderações entre as funções, mas sim demonstra o comportamento de todos os objetivos. Frequentemente, os objetivos são inversamente proporcionais, e a otimização baseada em Pareto revela compensações entre os mesmos. Isso auxilia na seleção de soluções em situações que, para

melhorar um dos objetivos, é necessário comprometer o desempenho de outros. A fronteira de pareto destaca as opções que oferecem o melhor equilíbrio entre os objetivos, permitindo que o tomador de decisão escolha a solução mais adequada de acordo com suas preferências e restrições (NEGENDAHL; NIELSEN, 2015; WORTMANN; NANNICINI, 2017; ZITZLER, 1999).

## 2.2.7 Breve revisão de literatura sobre otimização de envoltórias em Arquitetura

Evins (2013) executa uma extensa revisão sobre métodos de otimização utilizados para resolver problemas multicritério em edificações e para o projeto urbano. Seu trabalho levanta 74 artigos, sendo que 21 abordam discussões sobre geometria, não apenas puramente numéricos, 03 (três) trabalhos dos 21 incluem processos integrados com ferramentas de modelagem. Ou seja, ainda em 2013 o número de explorações do projeto guiado por desempenho era tímido. Kheiri (2018) e Zhao; de Angelis (2019) realizaram uma extensa revisão de artigos e verificam um aumento de publicações a partir do ano de 2014 (Figura 72). Segundo os autores, os algoritmos genéticos são os métodos de otimização mais amplamente utilizados nas pesquisas.

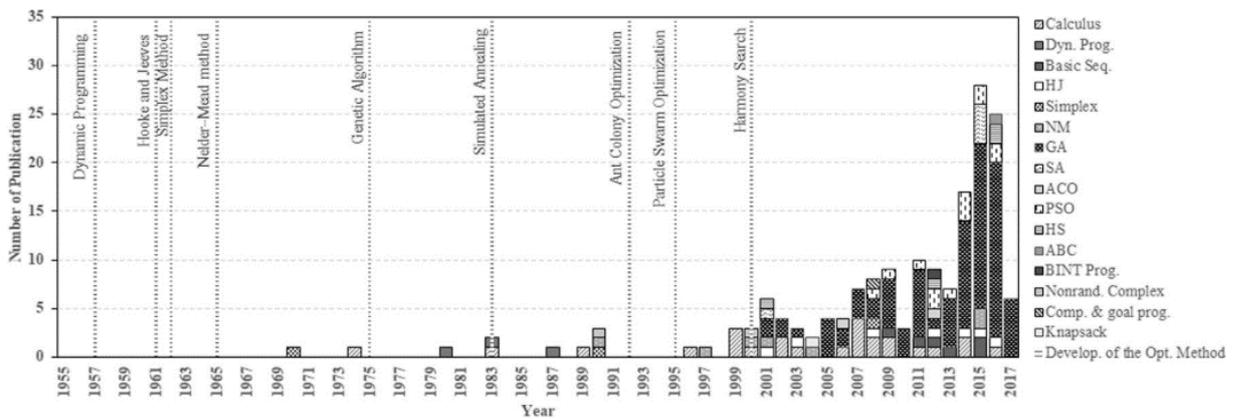


Figura 72. Aumento de publicações do uso de otimização para desempenho de fachadas. Fonte: Kheiri (2018).

Já Li; Liu; Peng (2020) fornecem uma revisão dos métodos de projeto guiado por desempenho e otimização no contexto de sustentabilidade. O artigo discute os vários critérios de desempenho que são comumente usados no projeto de edifícios e revisa os diferentes métodos de otimização que são usados para otimizar o desempenho de edifícios sustentáveis, incluindo algoritmos evolutivos, programação matemática e mais recentemente, métodos baseados em inteligência artificial. Sua revisão encontra 37 artigos que abordam otimização da envoltória dos edifícios. Desses, 14 mostram estudos integrados a ferramentas de modelagem 3D em arquitetura, 8 utilizando ferramentas de modelagem paramétrica.

O projeto dos elementos da envoltória depende fortemente da consciência projetual do arquiteto e requerimentos do cliente. Pode-se criar uma estética estilizada para fornecer uma visão atraente aos usuários, ao mesmo tempo que, o impacto da envoltória no ambiente físico deve receber a devida atenção. A seguir, é apresentada uma revisão sistemática considerando o contexto deste problema de projeto. Foi feita uma seleção de artigos mais representativos encontrados para construção de conhecimento no contexto desta pesquisa.

Bouchlaghem; Letherman (1990) estabelecem um modelo numérico simplificado para otimizar a envoltória de edifícios com base em seu desempenho térmico usando temperatura horaria como indicador. O trabalho testa seis métodos para escrever funções de otimização: média absoluta, média quadrática (ver anexo 1), usando exponencial, separando situações de picos (inverno e verão), utilizando média cúbica e estabelecendo diferença entre temperatura de pico interna e temperatura de conforto. Suas conclusões apontaram as primeiras estratégias como mais apropriadas no caso testado. Pois apresentaram situações otimizadas dentro de uma margem aceitável de temperatura para verão e inverno.

Al-homoud (1997) apresenta resultados da aplicação de um modelo de otimização de desempenho térmico para edifícios de escritórios em diferentes regiões climáticas para testar o impacto de parâmetros do projeto da fachada. A desconsideração de indicadores de desempenho luminoso fez com que as otimizações indicassem percentuais mínimos inicialmente estabelecidos pelo autor para área de aberturas (15%). Apenas um clima frio testado indicou um percentual maior que o mínimo estabelecido. Ou seja, é relevante para o sucesso da resposta de otimização a formulação complexa do problema de projeto. Indicadores unicritério podem gerar resultados menos representativos para qualidade da solução otimizada.

Coley; Schukat (2002) apontam algoritmos genéticos como uma possibilidade de gerar múltiplas alternativas otimizadas de projeto de forma a possibilitar a escolha da solução final através da equipe de projeto de forma mais subjetiva. Park, et al (2003) propõem indicadores de desempenho de iluminação para soluções de fachadas inteligentes. Os autores separam cinco classificações de critérios visuais com base na sua revisão de literatura: iluminância no plano de trabalho, razão de iluminância, uniformidade, índice de ofuscamento e a probabilidade de conforto visual. Seu trabalho seleciona três indicadores: nível de iluminância no plano de trabalho, DA de 500 lux; Uniformidade da luz de 80%; e o brilho da superfície da janela de até 850 cd/m<sup>2</sup>. Seu trabalho descreve os algoritmos de cálculo, propõe e testa um modelo de otimização multicritério para arquitetura. A otimização utilizou o FMINCON, um modelo Metaheurístico de otimização no *Matlab* (PARK, CHEOL-SOO; AUGENBROE, GODFRIED; MESSADI, 2003).

Mahdavi; Mahattanatawe (2003) apresentam um ambiente para executar análises para projeto-baseado-em-desempenho de fachadas utilizando interface baseado em planilhas. Seu trabalho descreve o modelo de otimização e seleção de soluções possíveis para fachadas, incluindo parâmetros como área de abertura, desempenho térmico da parede e tipo de elemento de sombreamento da janela. Dois softwares são utilizados para simulação: NODEM e LUMINA. Cinco indicadores foram utilizados: temperatura, iluminância, ofuscamento, uniformidade e consumo de energia. Pesos para cada nível de desempenho foram estabelecidos para cada indicador no algoritmo de otimização. Seu trabalho destaca a rapidez do modelo e utiliza um modelo unicritério e determinístico (MAHDAVI; MAHATTANATAWE, 2003). A função de otimização unicritério foi descrita na equação a seguir:

$$OBJ_p = \frac{s_t w_t + s_e w_e + s_g w_g + s_u w_u}{W_t + W_e + W_g + W_u} \quad (\text{Equação 11})$$

$$OBJ_a = \frac{s_l w_l + s_e w_e + s_g w_g + s_u w_u}{W_l + W_e + W_g + W_u} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde,

$OBJ_p$  é o objetivo para edifícios passivos.  $OBJ_a$  é o objetivo para edifícios ativos. S representa o valor de preferéncia, W o peso do requisito. “t” representa temperatura, “l” representa demanda de energia, “e” representa iluminância, “g” representa ofuscamento, “u” representa uniformidade.

Diakaki; Grigoroudis; Kolokotsa (2008) investigam o uso de otimização multicritério para o projeto de edifícios eficientes energeticamente. Suas conclusões mostram que não existe uma solução ótima necessariamente devido à competitividade dos critérios de decisão envolvidos. O processo, na verdade, pode ser utilizado para identificar pontos fortes e fracos da proposta e destacar possíveis problemas que possam surgir. Já Caldas (2008) apresenta o GENE\_ARCH uma plataforma que incluía visualização e modelagem tridimensional para realizar otimização multicritério de soluções arquitetônicas. A integração com a modelagem da geometria permite melhores possibilidades de variações de solução, não apenas seleção de geometrias simples e abstratas. O domínio e variações possíveis utilizaram o método de gramática da forma. A simulação considera ao DOE2 como plataforma, incluindo um modelo de otimização multicritério, evolutivo com leitura dos dados baseado na fronteira de Pareto (Figura 73). Os indicadores são baseados no cômputo do consumo de energia para iluminação e o cômputo de carga térmica para aquecimento (CALDAS, 2008).

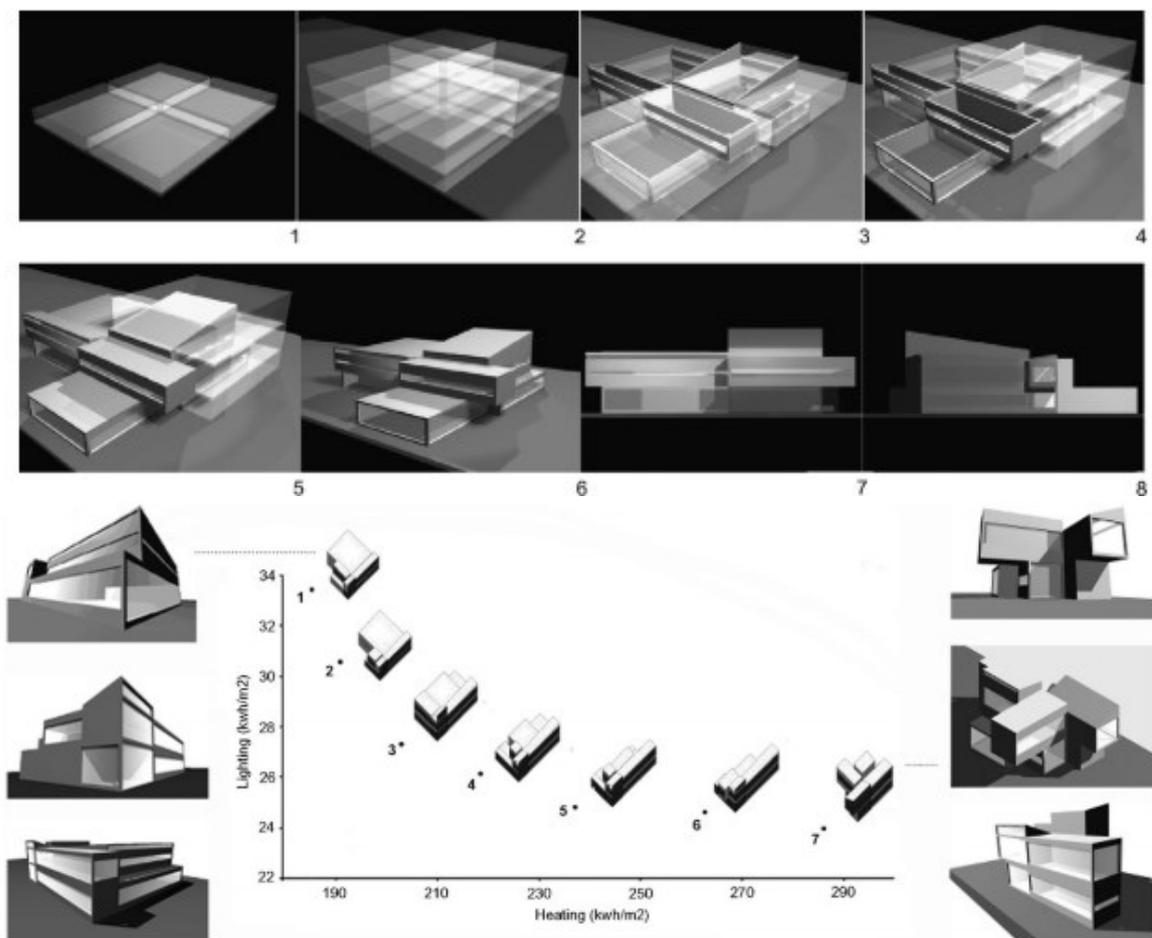


Figura 73. GENE\_ARCH proposto por Caldas, (2008).

Zemella et al. (2011) utilizam redes neurais integradas a algoritmos evolutivos. As Redes Neurais Evolutivas (ENNs) são um tipo de técnica de otimização que combina os princípios da computação evolutiva com as redes neurais. A ideia básica é usar algoritmos evolutivos, como algoritmos genéticos, para evoluir a estrutura e os pesos de uma rede neural, a fim de otimizar o desempenho da otimização. O trabalho testa dois objetivos para o projeto da envoltória: demanda de iluminação e de carga térmica de resfriamento. Os autores concluem que a combinação com redes neurais pode eficientizar o processo de otimização tanto para modelos unicritério, quanto multicritérios.

Turrin; Von Buelow; Stouffs (2011) apresentam o ParaGen, uma ferramenta que integra desenho paramétrico, análise e algoritmos genéticos para realizar otimização de dois objetivos. A combinação possibilita gerar uma grande gama de possibilidades de projeto através dos indicadores de desempenho. O artigo aborda dois estudos de casos: um estudo estrutural para um domo e um estudo de uma cobertura complexa através da análise do sombreamento e módulos da estrutura (Figura 74).

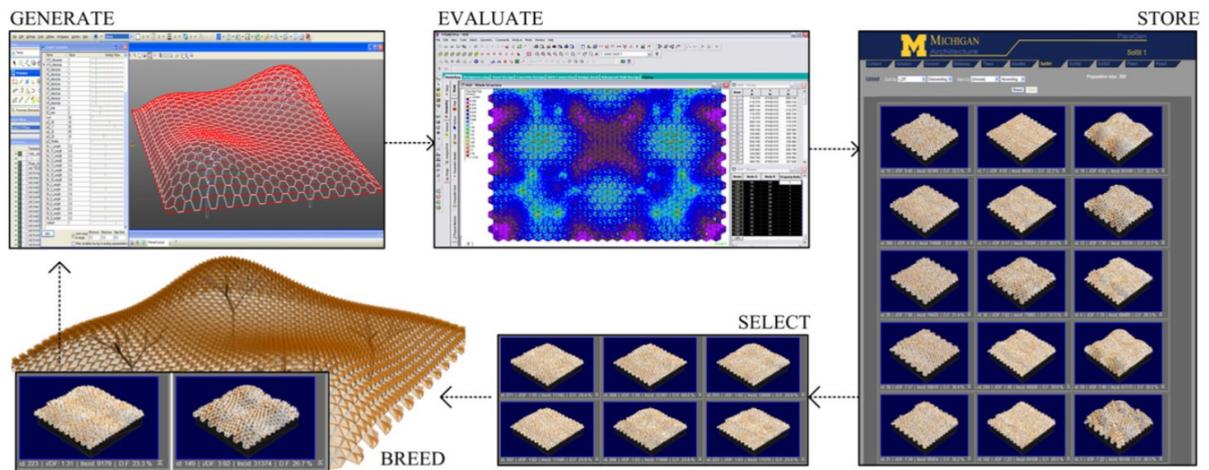


Figura 74. ParaGen proposto por Turrin, (2013).

A exceção de Caldas (2008) e Turrin et al. (2011) as abordagens de otimização descritas anteriormente testam procedimentos computacionais para o projeto, porém utilizam modelos extremamente simplificados, a exemplo de *shoebox* com uma janela e superfícies retangulares representando elementos geradores de sombra. A evolução de ferramentas paramétricas e o lançamento do *Grasshopper* para *Rhinoceros 3D* colabora para inserção das discussões associadas a processos de modelagem mais complexas. Jakubiec; Reinhart (2011) descrevem o *Diva*, *plugin* que integra o *Daysim* e o *EnergyPlus* ao *Rhinoceros 3D*. Já Roudsari; Pak; Smith (2013) descrevem o lançamento do *plugin* *opensource* *Ladybug* que propõe a conexão paramétrica/algorítmica do *Radiance*, *Energyplus*, *Therm* e o *Grasshopper 3D*. O artigo já demonstra um processo de otimização multicritério integrado. Provavelmente, o lançamento desses *plugins* estão relacionados ao aumento de publicações após o ano de 2014 (KHEIRI, 2018; ZHAO; DE ANGELIS, 2019).

Glassman; Reinhart (2013) realizam uma otimização integrada ao *Grasshopper* para *Rhinoceros 3D* usando algoritmo unicritério através do *plugin* *Diva* para *Grasshopper 3D* associado ao *EnergyPlus* para computar consumo de energia. O modelo do estudo de caso é uma sala retangular com superfícies adiabática, a exceção de uma que contém uma janela que é exposta ao exterior. A pesquisa utiliza o processo de otimização para fazer prospecções as próximas décadas, considerando o custo e produção de carbono associado aos componentes construtivos. Apesar de usar uma ferramenta que permite modelagem complexa, o estudo de caso repete a receita da maioria das pesquisas anteriores: avalia uma janela isolada com um elemento horizontal de beiral retangular. Posteriormente, Glassman (2015) apresenta um estudo multicritério considerando o pavimento tipo de um edifício. A pesquisa avalia indicadores de iluminação, DA e ASE usando *DIVA* e de consumo de energia usando o *EnergyPlus*, mas descreve a grande demora para estabelecer simulações de DA que duraram até 7 horas cada.

Lauridsen; Petersen (2014) Descrevem um processo de otimização considerando modelagem paramétrica e geometria complexa de maneira experimental. O estudo descreve a integração multicritério de requisitos de conforto, iluminação natural e desempenho energético visando o processo de projeto. O modelo utilizou uma zona térmica e otimizou a geometria considerando uma malha triangular considerando quatro indicadores de desempenho: consumo de energia, horas de temperatura interna abaixo de 26C°, *Daylight Autonomy*, e qualidade do ar interno (Figura 75). O artigo questiona se será possível um dia que os computadores substituam a mente do projetista, uma vez que, as soluções finais não foram estabelecidas por uma pessoa. Mas sinaliza que isso não se encaixa no trabalho, uma vez que a mente do projetista aqui está no estabelecimento do processo: das conexões das ações e do sistema de restrição que geram a geometria final.

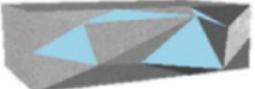
Iteration number	Energy Consumption [kWh/m2/year]	Above 26 °C [hours]	Poor air quality [hours]	Daylight Autonomy [-]	Visual appearance of the façade
8	25.3	20	1	0.95	
76	24.0	17	1	0.96	
102	24.8	17	1	0.95	
121	24.8	17	1	0.95	
163	26.8	7	6	0.94	
199	26.6	12	5	0.94	
234	26.1	3	8	0.95	

Figura 75. Resultado da otimização integrada a modelagem discutido por Lauridsen; Petersen (2014).

Negendahl; Nielsen (2015) estabelecem um modelo integrado à modelagem paramétrica também utilizando *Grasshopper* e apresentam um modelo de otimização multicritério utilizando 4 (quatro) indicadores de desempenho: energia, custos, iluminação, térmica. A pesquisa busca uma maneira rápida de realizar ciclos de análises. Usa uma combinação de dois métodos de cálculo matemático estacionários para avaliações de energia e carga térmica, o *Radiance* para simulações de iluminação usando cálculo de *Daylight Factor*, e um algoritmo

matemático para avaliações de custo. O modelo paramétrico apresentado é uma representação da projeção de uma edificação, há a programação da variação do ângulo de janelas projetantes em “zigzag” distribuídas ao longo da fachada. O trabalho não explora a razão pela escolha dos indicadores de desempenho. Limitações do modelo é discutir o universo de análise considerando apenas um pavimento, não o edifício como um todo e desconsiderar obstruções externas (Figura 76).

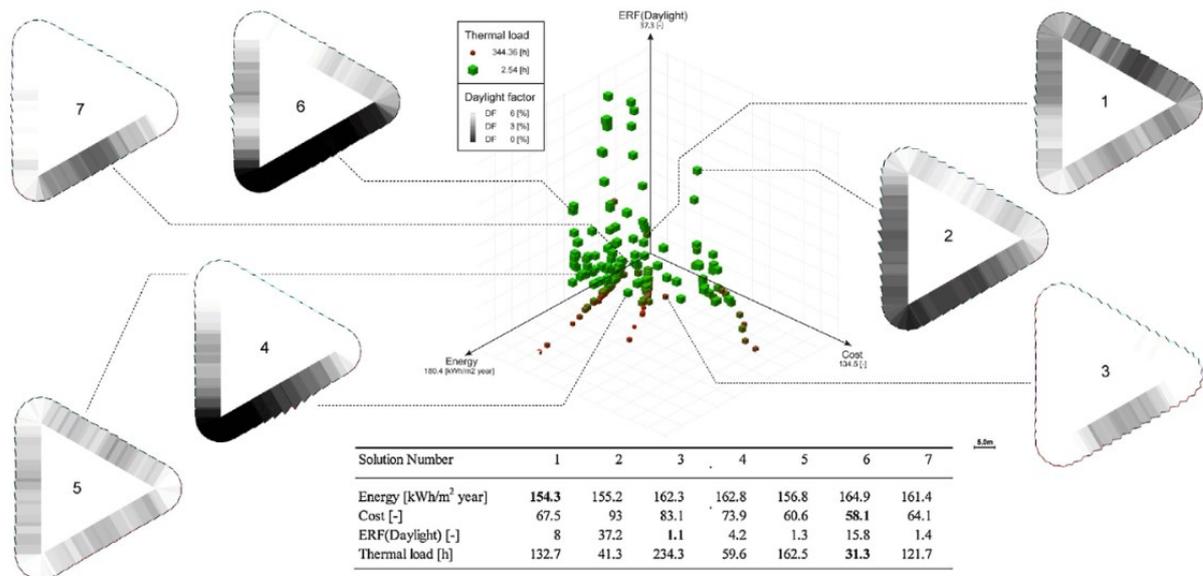


Figura 76. Processo de otimização integrado a modelagem discutido por Negendahl; Nielsen (2015).

Toutou; Fikry; Mohamed (2018) apresentam a descrição de processo de otimização utilizando algoritmo genético integrado ao projeto paramétrico para um edifício residencial de cinco andares. O trabalho utilizou dois critérios: um de iluminação natural e outro desempenho energético. Parâmetros de construção como percentual de área envidraçada, sistema construtivo, tipo de vidro e configurações de dispositivos de sombreamento foram otimizados utilizando plugins *Ladybug* e *Honeybee* que utilizaram o *Radiance* e *Daysim* na simulação de iluminação natural, e o *EnergyPlus* na simulação de energia. A modelagem foi feita para uma pavimento-tipo realizada duas vezes: a primeira para fazer o modelo térmico e energético e a segunda para o modelo de iluminação natural. Apesar de utilizar modelagem algorítmica o trabalho não explora geometria complexa (Figura 77).

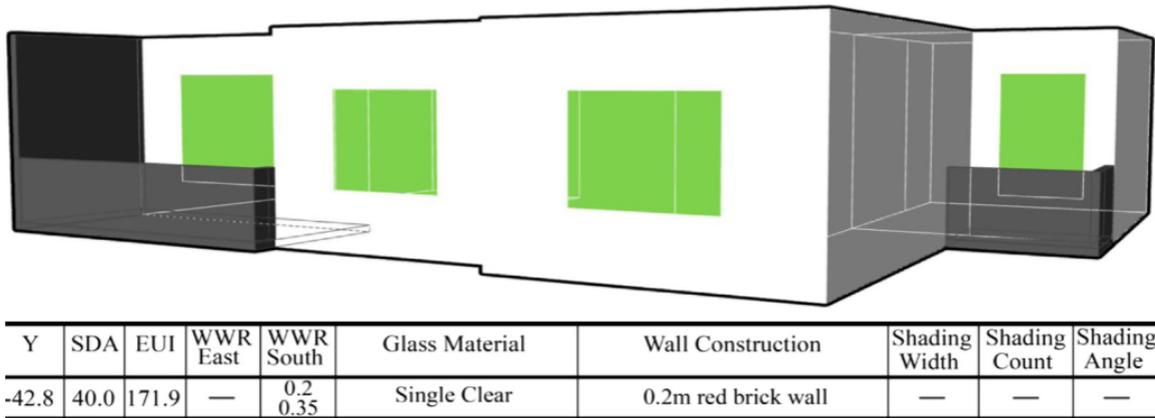


Figura 77. Processo de otimização visando aplicação em projeto discutido por Toutou; Fikry; Mohamed (2018) mostrando solução otimizada.

Santos et al. (2020) descrevem a otimização de um sistema de modelagem curvo que faz referência a trama de um tecido. Os autores argumentam que a otimização de dispositivos de sombreamento complexos que se adequam a diferentes orientações e ângulos solares é geralmente limitada ao controle da densidade de impressão nos vidros ou perfuração em elementos de sombreamento do tipo tela. Apesar de descrever uma solução de otimização para esses casos, o artigo considerou apenas os indicadores de DA e ASE nas otimizações com base no *Daysim*, possivelmente em decorrência de limitações na predição do desempenho de elementos complexos por softwares validados de desempenho térmico. Outro ponto relevante é a descrição de apenas uma zona ou parte da fachada como um problema de otimização, sendo que a fachada deve ser considerada como um todo na maioria das vezes. O artigo visa testar três algoritmos de otimização: Nsga-II, OMOPSO, e GPR\_SPEA2. Sendo que o Nsga-II o que obteve melhor desempenho, apesar de apresentar resultados semelhantes aos demais testados.

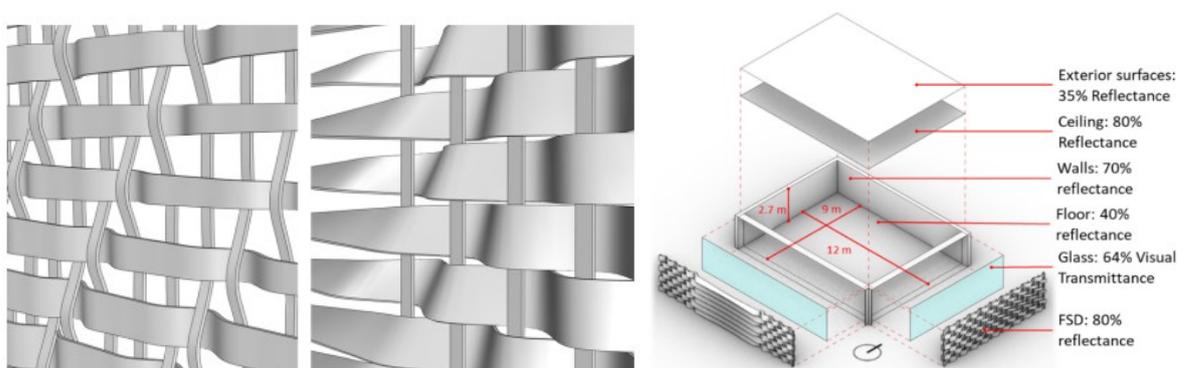


Figura 78. Processo de otimização de modelagem complexa apresentado por Santos et al. (2020).

Já Queiroz; Pereira (2021) apresentam uma solução flexível para otimização de toda fachada da edificação de uma única vez. Os autores distribuem um sistema de 12 pontos ao longo da fachada e solicitam ao processo de otimização que escolha 5 tipos distribuições de

projeção ao longo da fachada e dessa forma estabelecer as soluções otimizadas. Foram otimizados os indicadores de UDI, radiação em períodos quentes e área de varandas. Outra preocupação dos autores era a velocidade das simulações, uma vez que o Daysim é proibitivo para estabelecer muitas gerações de simulações. Dessa forma, os autores utilizaram o modelo de duas fases baseado no *Radiance* descrito por Subramaniam (2018), que permitiu simulações até 10 vezes mais rápidas. Segundo os autores, o indicador de radiação em períodos quentes seria um indicador de desempenho térmico simplificado, uma vez que se buscava um modelo interoperável (que utilizasse um único modelo 3D).

Liu; Wang; Ji (2022); Wang et al. (2022) apresentam processos de otimização que combinam técnicas de modelagem para possibilitar o cômputo de toda a fachada do edifício estudado. Tornar o sistema de modelagem aleatório, aumenta significativamente o problema matemático para otimização, por isso, a estratégia de modelagem pode até impossibilitar a otimização. Em ambos os artigos, a estratégia foi usar a incidência de radiação como um padrão fixo somado a modularização da fachada. Usando um padrão fixo o sistema de otimização distribuiu a densidade de aletas para solução de sombreamento (Figura 79). Estratégia de modelagem semelhante pode ser vista em Queiroz et al. (2015) que descreve a possibilidade de usar esse tipo de análise como padrão para solução de fachada.

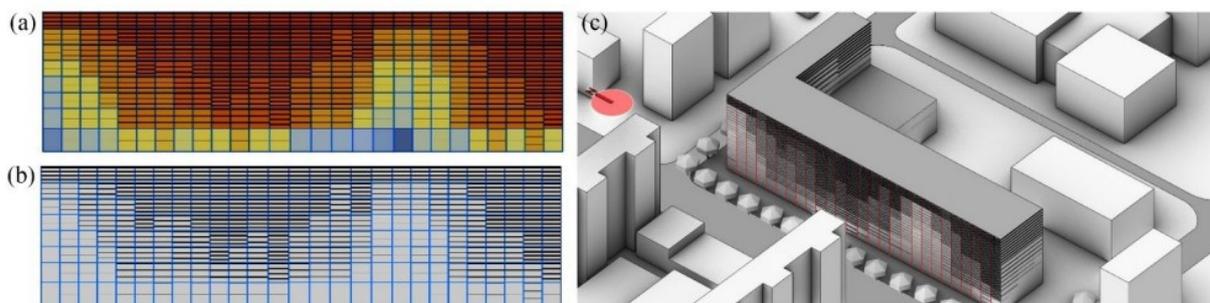


Figura 79. Solução otimizada explorada por Wang et al. (2022).

A partir dos trabalhos levantados das pesquisas anteriores visando otimização para o projeto da fachada, é possível verificar limitações em quesitos importantes que ajudam a caracterizar uma lacuna de estudo:

1. Complexidade do problema de design: Algoritmos de otimização podem se tornar impraticáveis para problemas de projeto muito grandes e complexos, pois os recursos computacionais necessários para resolvê-los podem ser proibitivos. Por essa razão, poucas pesquisas exploram soluções considerando toda a fachada da edificação, ou mesmo o impacto urbano. Geralmente os estudos são executados em *shoeboxes* (a representação de apenas uma sala). O que pode não

representar adequadamente a complexidade de fatores, como a busca projetual, a variabilidade e a escala envolvidas no projeto da fachada. Organizar metodologicamente estratégias de modelagem paramétrica considerando toda a envoltória pode auxiliar essa abordagem.

2. Tempo e recursos computacionais: Cada ciclo de análise para realizar uma otimização pode ser computacionalmente oneroso e, portanto, exige tempo e recursos significativos para serem executados. Por essa razão, muitas pesquisas utilizam simplificações e modelos matemáticos para substituir métodos complexos de simulação. Esses modelos simplificados devem ser mais bem compreendidos.
3. Dificuldade em definir objetivos e restrições: Definir objetivos e restrições claros e representativos pode ser desafiador e, se eles não forem bem delimitados, a otimização poderá não ser capaz de encontrar uma solução satisfatória. Pesquisas ainda tratam a formulação do problema de forma exploratória.
4. Falta de modelos altamente flexíveis: Para que os algoritmos de otimização sejam eficazes, são necessários modelos que variem amplamente dentro do sistema projetado. Se os modelos não forem suficientemente flexíveis, a otimização não será capaz de encontrar a solução ótima ideal representativa.

Como modelar fachadas para o processo de projeto guiado por desempenho?

## 2.3 Modelagem de fachadas no PGD

Esta etapa aborda investigações que incluem descrições sobre o processo de modelagem paramétrica de fachadas. Está dividida em duas partes. A primeira apresenta conceitos e contextualiza a abordagem dentro do processo de projeto. A segunda apresenta pesquisas que associam o processo de modelagem e de otimização de desempenho de fachadas. O foco é a discussão metodológica do processo de modelagem de forma a entender passos lógicos comuns em sistemas paramétricos de modelagem de fachadas no contexto do PGD na literatura recente.

### 2.3.1 Modelagem de fachadas paramétricas

Cada janela em uma fachada é passível de ter uma resposta única para abordar aspectos de desempenho. Dependendo de sua posição na fachada e relação com o contexto urbano, diferentes estratégias podem ser consideradas de forma a customizar a solução final. Ao contextualizar em um sistema paramétrico, os parâmetros de modelagem podem ser difíceis de caracterizar, pois devem possibilitar uma resposta para cada elemento da fachada. Dependendo do sistema lógico, isso pode gerar um problema matemático quase impossível de otimizar devido ao número de possibilidades (KHEIRI, 2018b; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014b). Outra questão é o aspecto estético, um sistema completamente estocástico (ver anexo 1) de modelagem, pode gerar soluções ruidosas e pouco coesas. Devido às dificuldades, a modelagem paramétrica é muitas vezes considerada apenas sob aspectos estéticos com alto conteúdo de subjetividade. Isso justifica a importância de estabelecer estratégias de modelagem paramétricas para fachadas visando desempenho.

Ao longo da evolução da modelagem paramétrica, diferentes autores teorizaram aspectos críticos sobre modelagem de fachadas. Em comum, existe a compreensão da forma geral da fachada que pode ser representada por uma superfície geratriz. Esta é subdividida por um sistema de coordenadas com variáveis  $U, V$  que caracterizam os elementos a serem distribuídos e modificados no sistema da fachada (AISH, 2011; CAETANO, 2016; CAETANO; LEITÃO, 2020, 2021; GIANTINI et al., 2019; KIRIMTAT et al., 2019b; QIAN, 1999; QUEIROZ; PEREIRA, 2021).

Para explicar o paragrafo anterior, é possível mostrar o experimento de Qian (1999). O autor apresenta um estudo pioneiro sobre padrões e demonstra um protótipo onde a superfície

foi subdividida em uma matriz de elementos retangulares. Na sequência, um módulo amorfo de base retangular com uma abertura é distribuído usando a subdivisão como ancoragem. Há a aplicação de quatro variáveis paramétricas ao módulo amorfo: altura, orientação da abertura, tamanho e projeção vertical. Além do número de unidades presentes na fachada (matriz de subdivisão), os módulos podem ter diferentes níveis de sistemas combinatórios disponíveis (Figura 80).

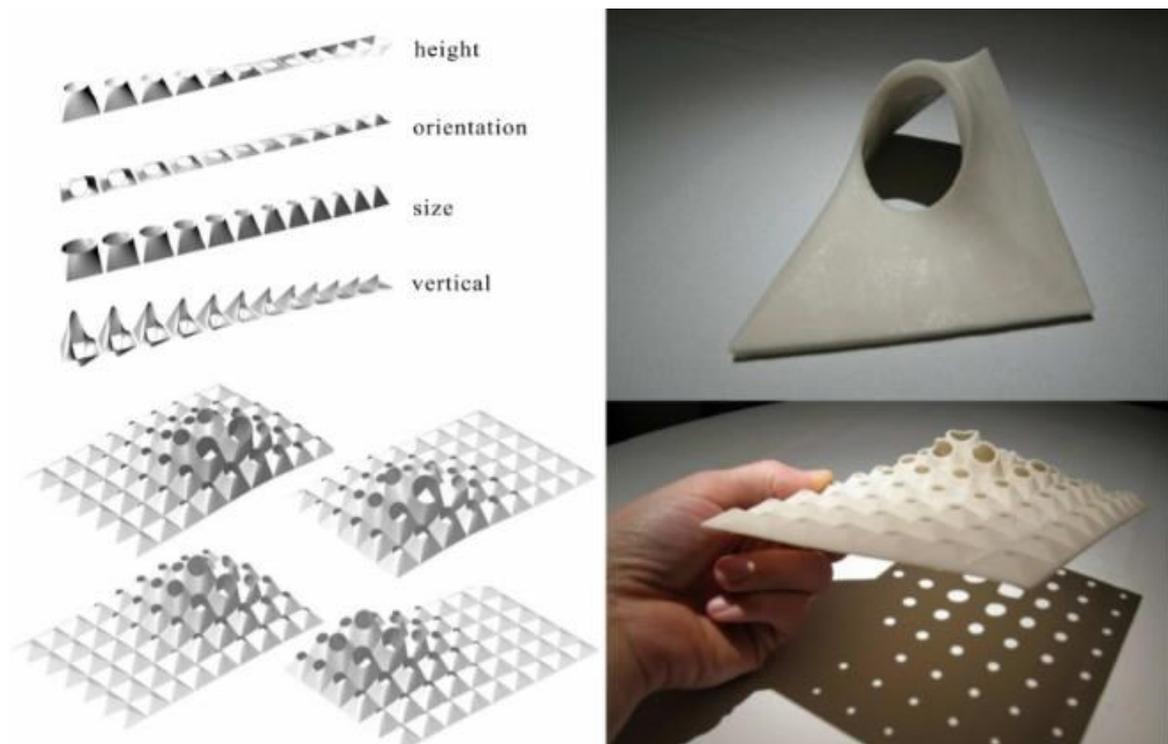


Figura 80. Estudo de elementos complexos de fachada com quatro variáveis. Fonte: Qian (1999).

Em sua tese Qian (1999), apresenta conceitos para variação dos elementos da fachada e criação de padrões variáveis, os quais chama de sistemas responsíveis. Um deles, o uso de uma terceira geometria (também paramétrica), a qual está associada aos parâmetros de manipulação da forma principal, a exemplo de pontos atratores. Nessa estratégia, a proximidade de um ponto de referência com cada módulo distribuído em uma matriz é proporcional a mudança dos parâmetros variáveis no sistema de modelagem paramétrica (Figura 81a). O movimento do ponto rege o sistema. Essa estratégia é vantajosa, pois reduz o número de possibilidades do sistema paramétrico, além de criar um padrão esteticamente coeso com característica pontual. Além de pontos, é possível usar linhas, curvas ou outras geometrias (Figura 82) (CAETANO; LEITÃO, 2020; PAYNE; ISSA, 2009; QIAN, 1999; TEDESCHI, 2014).

O uso de pontos atratores é utilizado em profusão em modelos presentes na literatura. Queiroz et al. (2018) utiliza pontos atratores para representar as principais articulações

humanas, e dessa forma, manipular um sistema de fachada cinética responsivo ao movimento humano e movimento do sol (Figura 81c). Giantini et al. (2019), por exemplo, utilizam um modelo com 10 pontos atratores para otimizar uma parede com módulos cerâmicos (Figura 81b). Caetano; Leitão (2020) executam experimentalmente uma série de estratégias utilizando pontos e linhas atratoras para manipular a geometria de fachadas (Figura 81). Apesar de comum, não é a única estratégia possível. Qualquer modelo matemático que produza uma variação numérica em formato de matriz pode ser utilizado como estratégia de variação do sistema paramétrico (CAETANO; LEITÃO, 2021; QIAN, 1999).

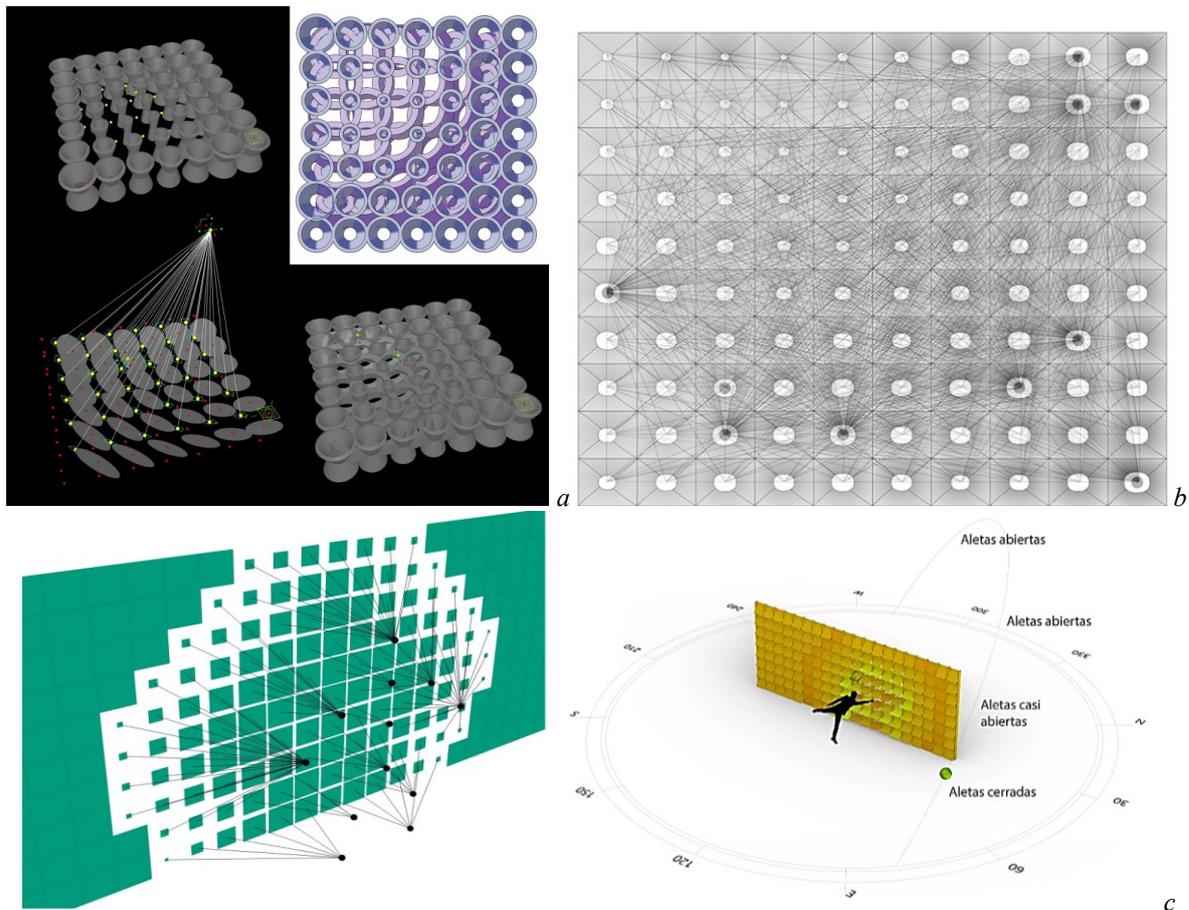
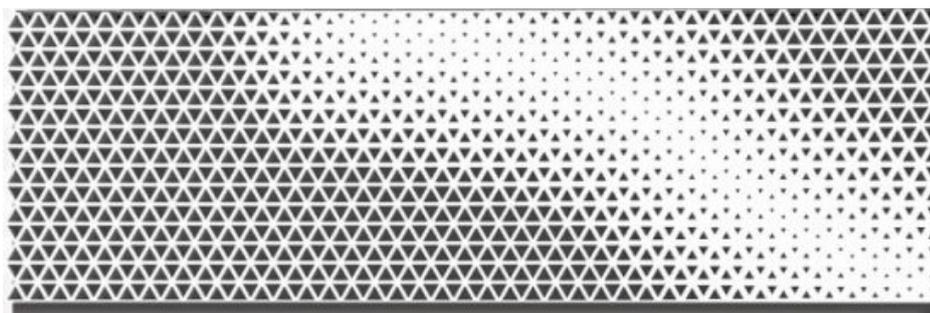


Figura 81. Ponto atrator e variação da geometria apresentado por Qian, (1999) em “a” e Giantini et al., (2019) em “b” e Queiroz et al. (2018).



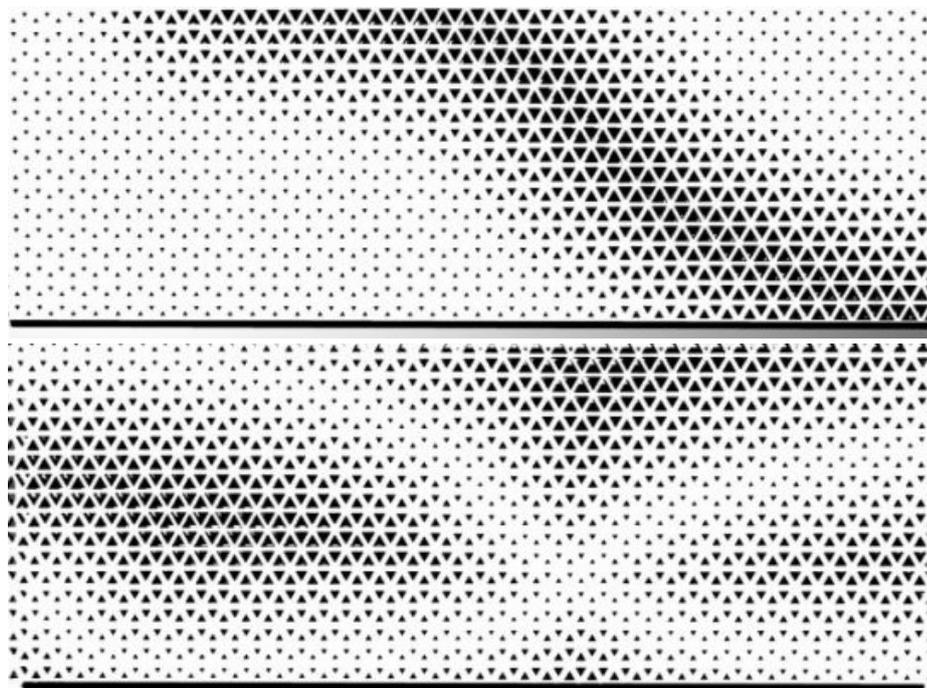


Figura 82. Uso de linhas atratoras. Fonte: <https://www.iaacblog.com/programs/parametric-facade-triangular/>.

Vizando um ordenamento metodológico do processo de modelagem paramétrico de fachadas, Caetano e Leitão (2021) organizam uma classificação considerando quatro etapas principais de projeto: **Geometria**, **Distribuição**, **Padrão** e **Otimização e Racionalização**. **Geometria** é a categoria que define a forma geral da fachada. Muitas vezes representada por uma superfície. **Distribuição** é o conjunto de algoritmos estabelecidos para distribuir elementos na superfície em uma fachada. A superfície é geralmente subdividida em uma matriz de elementos sobre os quais a distribuição é feita. **Padrão** é o grupo de algoritmos para criar diferentes variações de dados. Geralmente, o padrão é o resultado da distribuição de informações numéricas em um domínio bidimensional (QIAN, 1999). Por fim, **Otimização e racionalização** contêm algoritmos para analisar, otimizar e racionalizar a solução. Eles produzem mudanças no sistema de acordo com o interesse do projetista (CAETANO; LEITÃO, 2021).

### 2.3.2 Modelagem de fachadas visando otimização

O design guiado por desempenho traz etapas mensuráveis para o processo de geração de solução (KALAY, 1999; NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; SHEA; AISH; GOURTOVAIA, 2005). Cabe ao projetista idear um modelo com alta **flexibilidade** para possibilitar soluções com maior potencial de otimização e alta **Diversidade** para solucionar uma gama de problemas (CAETANO; LEITÃO; BASTOS, 2020). Ao mesmo tempo, é importante gerar um sistema de regras que reduzam o problema matemático de forma a

possibilitar o computador a encontrar soluções otimizadas com maior facilidade. Isso é possível através do projeto de padrões aplicados a modelagem paramétrica. Segundo Christopher Alexander em seu livro Linguagem de Padrões:

*Cada padrão descreve um problema que ocorre repetidamente em nosso ambiente e, em seguida, descreve o núcleo da solução para esse problema, de tal forma que você pode usar essa solução um milhão de vezes, sem nunca o fazer da mesma maneira duas vezes (ALEXANDER, 1977).*

Apesar de explorar aplicações de padrões de maneira distinta, a abordagem de Alexander pode fazer um paralelo aqui: na modelagem paramétrica, a idéia em estabelecer um projeto de padrões está associado a geração de um sistema lógico e flexível passível de implementação em muitas soluções. Os padrões podem ser estocásticos ou guiados, criados por um terceiro sistema. É possível usar geometrias atratoras, tais como, uso de pontos (GIANTINI et al., 2019; QIAN, 1999), ou linhas (CAETANO; LEITÃO, 2020); usar imagens; ou implementar um modelo matemático através de equações (QUEIROZ; PEREIRA, 2021; TSAY; WU; LIN, 2022), operações booleanas (CAETANO; LEITÃO, 2020), ou associação com base de dados de uma determinada resposta de desempenho (QUEIROZ et al., 2015; WANG et al., 2022).

Para exemplificar, A Figura 83a mostra o uso de curvas e operações booleanas apresentados por Caetano; Leitão (2020). A Figura 83b representa um processo de modelagem livre onde cada elemento tem um comportamento individual guiado por um processo de otimização metaheurístico (KIRIMTAT et al., 2019b). Figura 83c mostra a estratégia de usar progressões senoidais distribuídas verticalmente para estabelecer soluções para as quatro fachadas de um edifício vertical em um único processo de otimização (QUEIROZ; PEREIRA, 2021). A Figura 83d mostra a estratégia apresentada por Giantini, et. all (2019) onde se utiliza a manipulação de 10 pontos atratores. A partir da literatura pesquisada, é possível classificar a modelagem de padrões com base no sistema de restrição. Dessa forma, três estratégias gerais de modelagem associadas a otimização foram encontradas na literatura:

1. Uso de um padrão fixo pré-definido, ou seja, alta restrição.
2. Utilização de um sistema estocástico ou livre guiado por um processo de otimização, com baixa restrição.
3. Utilização de sistema misto, com sistema de padrão flexível que obedece a algumas regras.

a

b

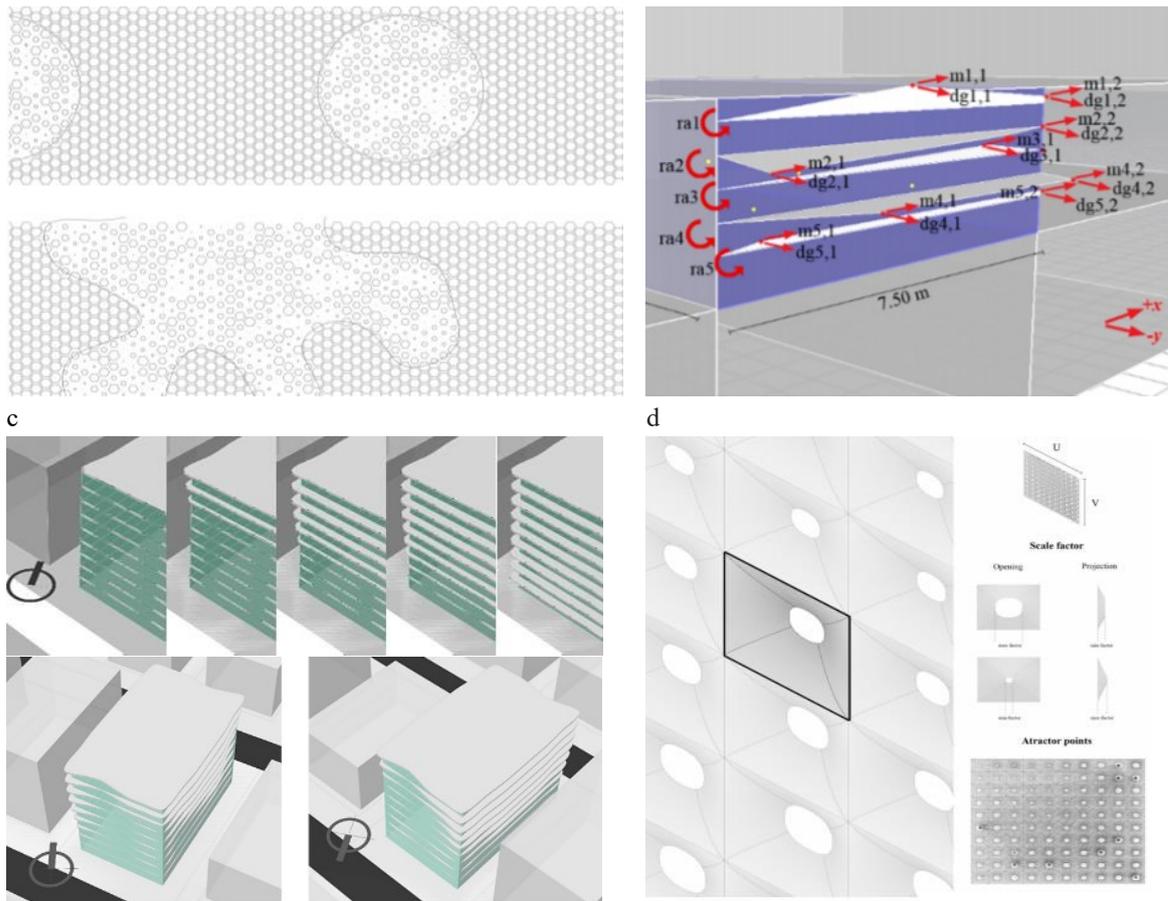


Figura 83. a- Mostra uma solução de padrão fixo com alta restrição. b - mostra uma solução de sistema livre com padrões a serem definidos por um processo de otimização. c e d - mostra soluções de padrões mistos que permitem uma diversidade de soluções de padrões com sistemas de restrição limitados.

A primeira estratégia seria mais fácil de otimizar, uma vez que o padrão é fixo, mas não necessariamente o padrão tem relação com o desempenho requerido. A Figura 83a exemplifica um padrão fixo que é delimitado por curvas pré-definidas fixas. Uma operação booleana define a distribuição dos elementos de perfuração. Neste caso, um processo de otimização tem o potencial de explorar a densidade da perfuração, mas não atua no padrão pré-estabelecido. A Figura 79 também explora um padrão fixo, porém estabelecido com base nos resultados da distribuição da radiação incidente na fachada. Neste caso, o modelo de otimização age sobre a densidade dos elementos de proteção solar obedecendo o padrão previamente informado (WANG et al., 2022). Já a Figura 84 exemplifica o uso de imagens na geração de padrões fixos.



Figura 84. Uso de imagem na geração de padrões fixos. Fonte: <https://www.grasshopper3d.com/m/photo/large?id=2985220%3APhoto%3A1293568>.

A segunda estratégia, a estocástica, o padrão encontrado pode estar atrelado ao processo de otimização e desempenho exigido, porém o problema matemático gerado pode ser de difícil solução, uma vez que, o número de possibilidades em um sistema de modelagem estocástico pode ser significativo. A Figura 83b exemplifica um sistema livre. Cada elemento passível de variação possui possibilidades livres entre si, ou seja, possibilita o máximo de combinações matemáticas do sistema durante a otimização.

Ercan; Elias-Ozkan (2015) executa um processo de otimização a partir da análise de desempenho de luminoso para dispositivos de sombreamento usando o *Grasshopper* e o Algoritmo genético Galapagos. Os dispositivos de sombreamento foram gerados usando quatro parâmetros: o sorteio randômico de ângulos para inclinação dos dispositivos de sombreamento, a profundidade dos dispositivos de sombreamento, o número de dispositivos de sombreamento ao longo de cada fachada, e uma função de divisão para ajustar a distância entre os dispositivos. O resultado da solução otimizada demonstra a caracterização estocástica do modelo paramétrico (Figura 85).

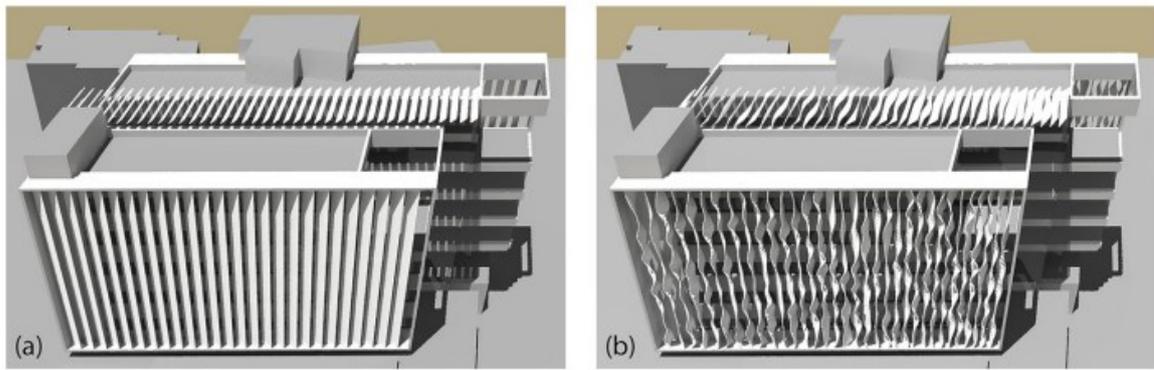


Figura 85. Resultado de otimização com caracterização randômica proposta por Ercan; Elias-Ozkan (2015).

Já Pantazis; Gerber (2018) descreve um processo de otimização que combina exploração de sistemas multiagente que tem característica mais randômica, combinado a um algoritmo de otimização determinístico. Apesar de randômico o sistema multiagente foi combinado a algumas regras, tais como o sorteio de uma área desobstruída. Segundo os autores, essa combinação demonstrou, que é possível desenvolver um sistema de projeto multiagente que pode gerar modelos 3D de fachadas complexos que são inteligíveis. A associação com um processo determinístico de otimização tornou o experimento mais rápido (Figura 86).

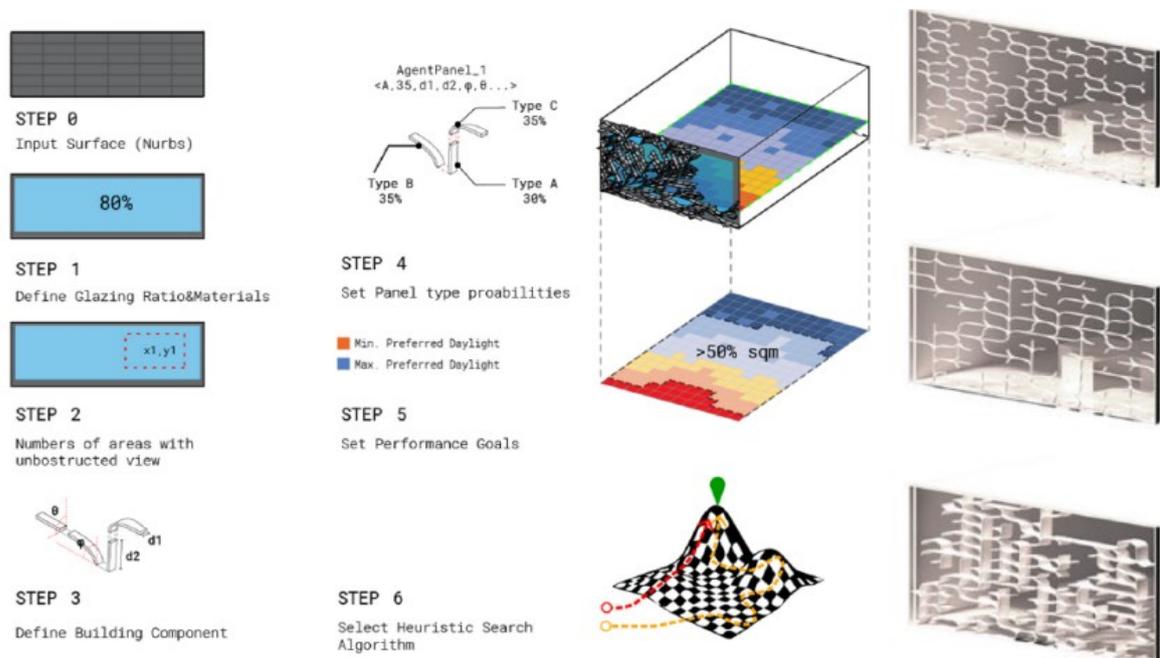


Figura 86. Uso de sistema multiagentes descritos por Pantazis; Gerber (2018).

A terceira estratégia, a solução mista, estabelece uma plano de restrição para toda matriz, esse plano, porém permite padrões flexíveis e atendem a um determinado sistema de regras. Dependendo do desejo, essa combinação pode estabelecer a estratégia mais adequada para um processo de otimização baseado em desempenho e para construir uma estética coesa. Principalmente ao considerar algoritmos de otimização metaheurísticos que são mais

demorados de processar. Tsay; Wu; Lin (2022) descrevem um modelo matemático com intenção de gerar curvas baseadas em funções lineares associadas a seno e cosseno (Figura 87). Já Fathy et al. (2015) descrevem o uso de autômato celular para gerar perfurações em painéis de fachada. As lógicas utilizadas nesse caso, são as regras de geração, número de elementos cheios iniciais, e o recorte da solução final (Figura 88).

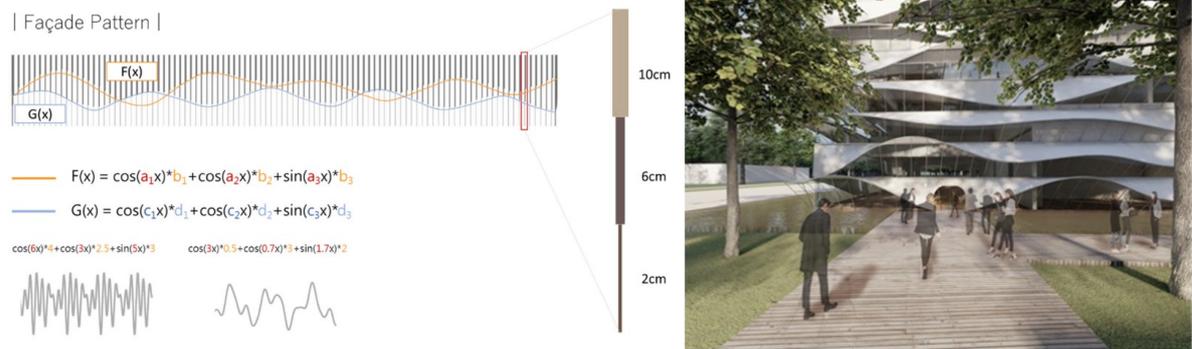


Figura 87. Modelagem de fachada com padrão flexível e restrição estabelecida matematicamente. Fonte: Tsay; Wu; Lin (2022).

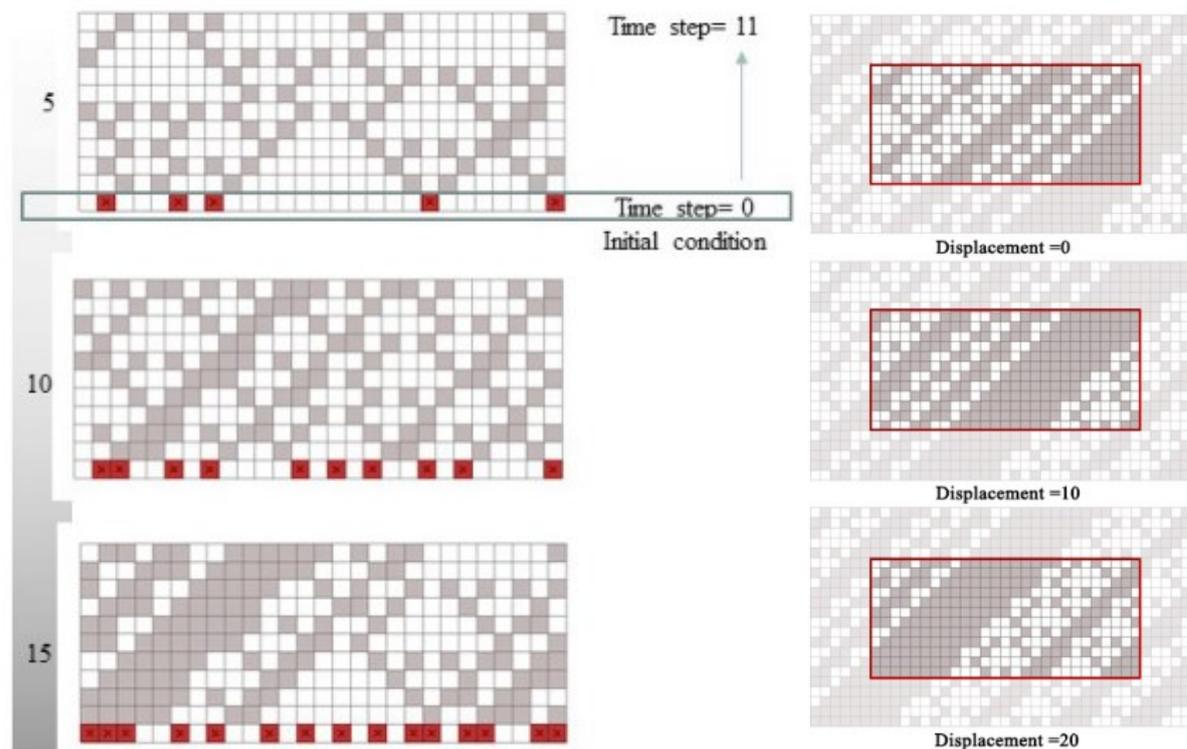


Figura 88. Modelagem de fachada com padrão flexível e restrição estabelecida utilizando autômatos celulares. Fonte: Fathy et al. (2015).

Em conclusão, a modelagem paramétrica de fachadas é uma abordagem que requer uma estratégia metodológica para garantir o desempenho e a estética desejados. Em geral, a fachada é representada por uma superfície geratriz subdividida em uma matriz representada por um sistema de coordenadas com variáveis U,V que caracterizam os elementos a serem distribuídos e modificados no sistema da fachada. A variação dos elementos pode ter como estratégia

padrões fixos pré-definidos, sistemas estocásticos guiados por processos de otimização, ou sistemas mistos que combinam elementos de ambos. O processo de otimização pode ser estabelecido de forma a variar o sistema desde a criação da superfície geratriz. A aplicação de padrões em modelagem paramétrica é importante para gerar sistemas lógicos e flexíveis, possibilitando a implementação de soluções otimizadas com maior facilidade, principalmente quando associado a otimização metaheurística (Figura 89).

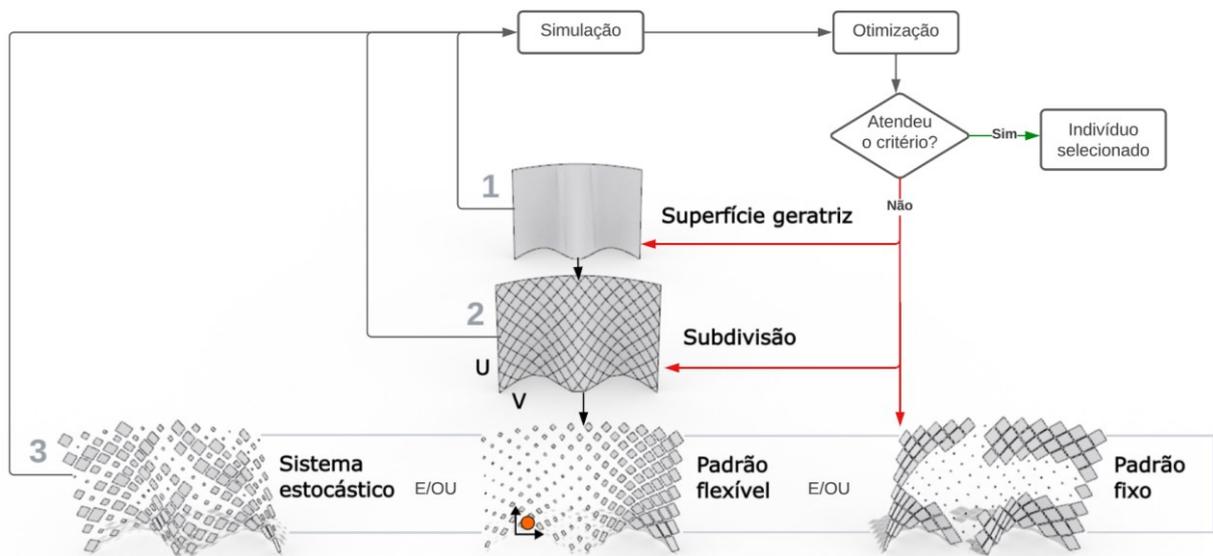


Figura 89. Otimização de fachadas paramétricas: diagrama do processo geral. Fonte: autor.

# Capítulo 3

## Método

O capítulo 3 fornece as bases essenciais da pesquisa, abrangendo a construção de um sistema algoritmo-paramétrico que apoia o projeto de elementos de controle solar em envoltórias. Está dividido em três seções principais, começando pela seção 3.1, que aborda a construção da revisão de literatura. Nessa seção, são apresentados os passos tomados para realizar uma revisão abrangente e atualizada dos estudos relevantes. A seção 3.1.1 descreve a definição das perguntas de pesquisa que guiaram a investigação. Em seguida, a seção 3.2 aborda o desenvolvimento do estudo, começando pela definição dos indicadores de desempenho utilizados na análise. A seção 3.2.2 apresenta as etapas lógicas estabelecidas para a modelagem do problema. A definição dos métodos e ferramentas de análise é discutida na seção 3.2.3, destacando as técnicas e software utilizados. A seção 3.2.4 trata da definição do algoritmo de otimização empregado na pesquisa. O problema de otimização de experimento é abordado na seção 3.2.5. Em seguida, a seção 3.3 concentra-se na validação da proposta do modelo de otimização.

Este capítulo aborda a natureza da pesquisa, as etapas práticas, o detalhamento dos modelos de análise, do algoritmo de otimização e da escolha das ferramentas. De maneira geral, a partir de Creswell (2013) é possível dizer que a pesquisa segue uma tendência que incorpora métodos mistos quantitativos e qualitativos e utiliza procedimentos sequenciais. Já segundo Groat; Wang (2013) tem abordagem de pesquisa mista com aspectos experimentais, correlacionais e de simulação, majoritariamente quantitativa:

*“A pesquisa experimental é frequentemente retratada como a norma contra a qual todas as outras estratégias de pesquisa devem ser julgadas. Em geral, os leitores que aderiram ao sistema de inquérito pós-positivista veem a estratégia experimental como a essência da pesquisa "científica" credível. (...) A pesquisa experimental tem objetivo de testar hipóteses e identificar os efeitos causais das variáveis-chave sobre as medidas de desfecho. A este respeito, uma limitação da pesquisa experimental é que é necessariamente redutiva; Isola as variáveis reais a fim de estudar as ligações causais essenciais no fenômeno do estudo. (...) A pesquisa correlacional busca iluminar as relações entre as variáveis discretamente medidas em circunstâncias de ocorrência natural. Já a estratégia de simulação visa replicar de forma holística todas as variáveis relevantes em um cenário ou fenômeno. (...) Quando o comportamento desse holismo é simulado, podemos então observar quão significativo são variáveis em jogo, e assim, postular outras etapas (GROAT; WANG, 2013).*

O capítulo foi dividido em três etapas. A primeira apresenta o caráter investigativo do referencial teórico. Aborda a definição das áreas afins, contextualização e descrição das técnicas sistemáticas de revisão. A segunda trata do desenvolvimento do estudo. Será detalhado os procedimentos de análises, escolhas das ferramentas e a escolha do caso-base para execução da pesquisa. A terceira parte diz respeito aos procedimentos executados para validação da pesquisa. Descreve procedimentos de análise que visa traçar pontos positivos e limitações dos modelos paramétricos gerados, do processo de simulação e de otimização.

### **3.1 Construção da Revisão de literatura**

A revisão de literatura é fundamental para estabelecer as questões de pesquisa. Ela sintetiza os temas, traça as abordagens mais recentes na área e é formulada de forma a apresentar lacunas no campo de estudo. Essas sínteses implicam na avaliação crítica e oferecem novas ideias e permitem estabelecer perguntas originais de pesquisa. A revisão desta pesquisa utilizou técnicas de sistematização de artigos de revistas e anais de congressos, livros e documentos governamentais. Os artigos científicos foram selecionados com base no impacto dos periódicos, número citações e enquadramento com a área de estudo da tese.

A revisão iniciou-se a partir dos objetos de estudo: a fachada e o controle da insolação. Dois questionamentos foram estabelecidos para decompor o objeto de estudo: **O que é? Como projetar?** As respostas para essas perguntas, dividem o referencial teórico em duas partes. O primeiro aborda o objeto de estudo semanticamente<sup>1</sup>. Conceitua, elenca teóricos e apresenta diagramas elaborados pelo autor, que visam sintetizar o conteúdo do referencial e estabelecer relações de causa e efeito<sup>2</sup> para uso de elementos de controle solar com base na leitura realizada. O estado-da-arte explora a literatura recente, estabelece classificações e lista indicadores de desempenho associados ao desempenho térmico e luminoso para aberturas e elementos de controle solar. O critério para o estado da arte é de pesquisas executadas nos últimos 10 anos.

A segunda parte aborda o método de projeto que é o “guarda-chuva” desta pesquisa: o processo de projeto auxiliado por computador e guiado por desempenho. De maneira similar a etapa anterior, aborda conceitos, realiza um breve histórico e apresenta as últimas pesquisas na área associada ao objeto de estudo ou similar, ou seja: a envoltória, aberturas e elementos de controle solar. O projeto auxiliado por desempenho está associado à integração de múltiplas análises, construção de um Sistema Paramétrico (SP), processos de otimização e visualização das múltiplas informações. Por isso, esses tópicos também são abordados visando o contexto do objeto de estudo. A Figura 90 mostra etapas do método associados as etapas práticas da execução da pesquisa. Já a Tabela 6 apresenta um resumo associado aos objetivos da pesquisa.

---

<sup>1</sup> Semântica: Ciência que estuda a evolução do significado das palavras, signos e símbolos que estão a serviço da comunicação; semiologia.

<sup>2</sup> Causa e efeito: relação entre um evento A e um segundo evento B, sendo o segundo evento, uma consequência do primeiro.

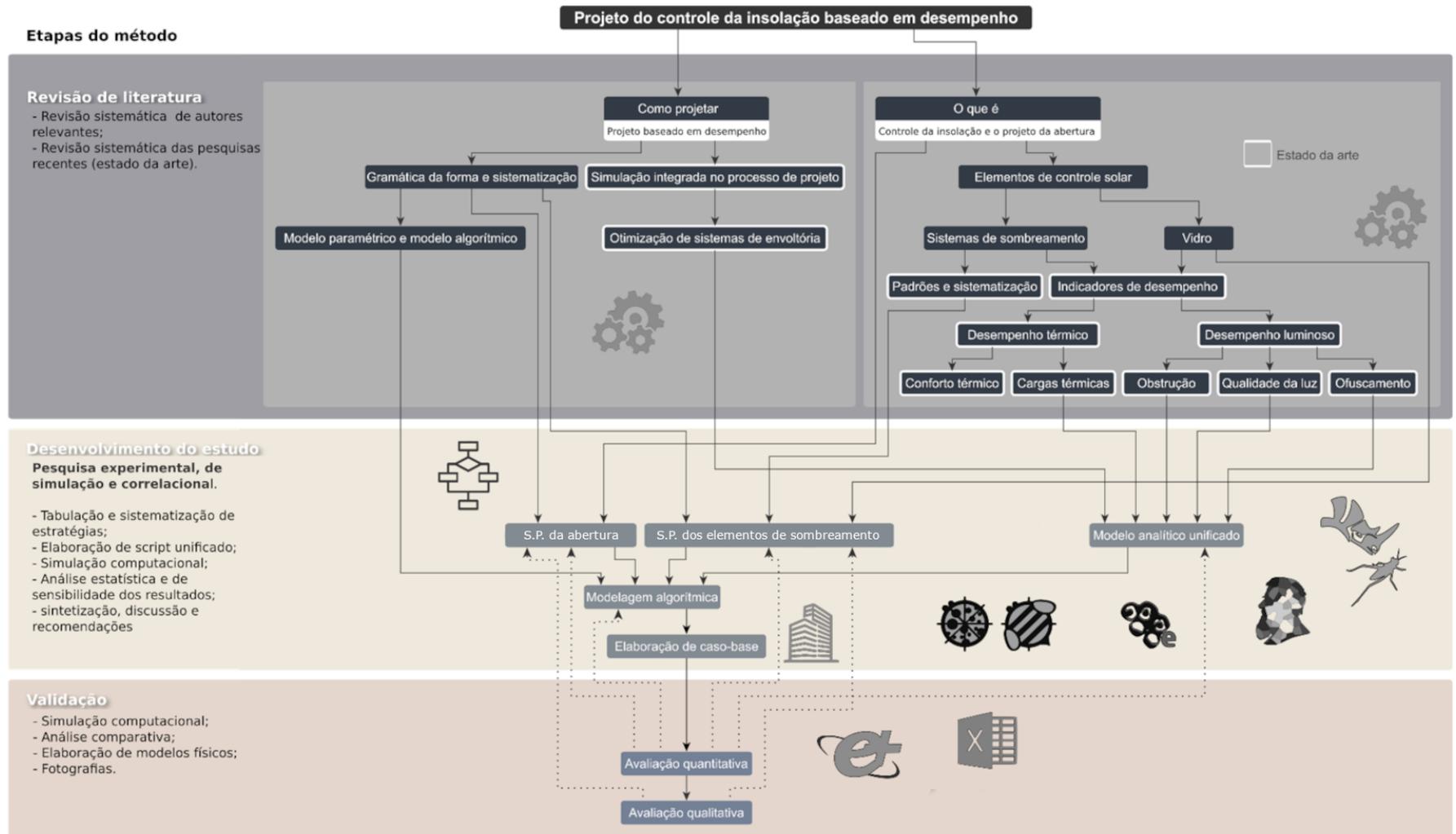


Figura 90. Diagrama da tese com etapas do método.

Tabela 6. Resumo do método com base nos objetivos.

*Desenvolver processo analítico e indicadores multicritério de desempenho térmico e luminoso de elementos de controle solar para processos de tomada de forma baseados em desempenho.*

<i>Objetivos específicos</i>	<b>Procedimento metodológico</b>	<b>Ferramenta utilizada</b>	<b>Resultados esperados</b>
<i>Caracterizar função e parâmetros relevantes para desempenho térmico e luminoso de elementos de controle solar para envoltória no edifício.</i>	Sistematização de literatura prévia recente	Bases on-line de documentos científicos, livros e documentos governamentais	Sistematização de parâmetros e indicadores de desempenho apropriados a otimização
<i>Estabelecer biblioteca de elementos de controle solar associados à princípios geradores da forma apropriados ao processo de projeto guiado por desempenho.</i>	Sistema paramétrico de modelagem (SPM) Observação de casos pré-existent	Yed para elaboração de fluxogramas, <i>Grasshopper</i> para aplicação.	Sistematização de passos lógicos para modelos 3D flexíveis para uso em processos de projeto guiados por desempenho
<i>Estabelecer processo analítico multivariável integrando desempenho térmico e luminoso</i>	Simulação computacional	<i>Radiance</i> <i>Grasshopper</i> ; <i>Ghpython</i> ; <i>Ladybug</i> / <i>honeybee+</i>	Descrição de processo analítico rápido compatível com otimização multivariável
<i>Estabelecer algoritmos de otimização adequados a análise de multivariáveis compatível com problema arquitetônico</i>	Sistematização de literatura prévia recente; Experimentos exploratórios.	Bases on-line de documentos científicos; <i>Grasshopper</i> ; <i>Ghpython</i> ; <i>Octopus</i> .	Sistematização da literatura na área e discussão sobre modelos de otimização compatível com a problemática de arquitetura. Discussão sobre limitações
<i>Estabelecer indicadores de desempenho e sensibilidade dos diferentes elementos de controle solar estudados para edifícios não residenciais altamente envidraçados.</i>	Simulação computacional; Otimização; Análise da fronteira de pareto considerando diferentes parâmetros de projeto	<i>Radiance</i> ; <i>Grasshopper</i> <i>Octopus</i> ; <i>Excel</i>	Metamodelos, indicadores, ou análise dos parâmetros de projeto.

### 3.1.1 Definição das perguntas de pesquisa

As perguntas de pesquisa foram estabelecidas conforme relata Groat; Wang (2013), sendo fruto de três grupos de considerações: A contextualização e as motivações da pesquisa; a proposta de investigação; e a revisão de literatura (Figura 91). A partir da definição das perguntas de

pesquisa, foi possível estabelecer os objetivos do estudo e na sequência, as etapas práticas para execução desta tese.



Figura 91. Desenvolvimento da pergunta de pesquisa. Fonte: elaborado pelo autor a partir de Groat; Wang (2013).

## 3.2 Desenvolvimento do estudo

Este tópico descreve as etapas práticas propostas pela pesquisa. Como mencionado anteriormente, se adequam ao formato apresentado por Groat, Wang (2013), ou seja utiliza **técnicas mistas** associadas a aspectos **experimentais**, **correlacional** e de **simulação**. Os aspectos experimentais da pesquisa dizem respeito as etapas de escolha dos procedimentos de análise, otimização e ferramentas. A etapa de simulação perpassa toda a pesquisa e é base para a etapa correlacional associada ao estudo das relações dos parâmetros de geometria e indicadores de desempenho estabelecidos através dos resultados das simulações e a variação do modelo paramétrico.

Cinco etapas sequenciais são descritas neste tópico: primeiro, a definição de indicadores de desempenho. Segundo, a definição da ferramenta e procedimentos de modelagem algorítmica. Terceiro, a definição dos métodos e ferramentas de simulação. Quarto, definição dos algoritmos de otimização. Quinto e último, a definição dos casos-base.

### 3.2.1 Definição dos indicadores de desempenho

A escolha de indicadores de desempenho para otimização de fachadas é um aspecto crítico, pois determina os objetivos e metas do processo de otimização. A escolha dos indicadores de desempenho mais apropriados depende dos requisitos específicos do edifício, bem como do clima local e de aspectos culturais. Por exemplo, em regiões com climas quentes, o conforto térmico ao calor e o sombreamento podem ser indicadores de desempenho mais importantes, enquanto em regiões com climas mais frios, o isolamento e o aquecimento solar podem ser mais relevantes. O padrão de uso e presença ou não de condicionamento artificial também importa. É importante considerar também as relações entre diferentes indicadores de desempenho, pois a otimização de um indicador pode afetar outros negativamente. Por isso, o uso de técnicas de otimização multiobjetivo colabora para equilibrar vários indicadores simultaneamente.

Este trabalho tem como *background* **edifícios não residenciais**, **verticais** e **altamente envidraçados**, portanto, fenômenos relacionados à exposição solar são relevantes. A análise dos indicadores de desempenho permite avaliar a performance do projeto da fachada em relação à

exposição solar e outros aspectos qualitativos, possibilitando a identificação de soluções para melhorar o desempenho, a qualidade ambiental interna e atender anseios de design.

Os indicadores de desempenho foram selecionados com base na primeira parte revisão de literatura. Quatro categorias de desempenho foram elencadas como preponderantes para as funções de otimização para o projeto do controle da insolação em fachadas: **uniformidade da luz natural**, **ofuscamento (conforto visual)**, **desempenho térmico** e a **vista**. As categorias foram estabelecidas com base nas conclusões de Markus (1967), Al Horr et al, (2016) e Dogrusoy; Tureyen, (2007). Os três primeiros compreendidos como exigências de desempenho e o último como um indicador qualificador da solução, podendo variar conforme projeto. Com base nos grupos listados no diagrama do projeto da fachada na Figura 14, foram identificados dois critérios para a seleção de indicadores de desempenho:

- Três indicadores de desempenho primários estão relacionados diretamente ao fenômeno físico relevante ao projeto da fachada;
- Dois indicadores qualitativos, que não necessariamente têm relação direta com o fenômeno de desempenho selecionado, mas são relevantes para o projeto de arquitetura e colaboram para estabelecer a escolha de soluções de destaque com bom desempenho nos indicadores anteriores.

Através dos dois critérios de desempenho, cinco indicadores foram considerados através da sistematização de trabalhos listados nos itens 2.1.1; 2.1.2; 2.1.3 e 2.1.4 da primeira parte da revisão de literatura. Os indicadores estão elencados nos parágrafos seguintes e foram avaliados através de quatro critérios estabelecidos com base na segunda parte da revisão de literatura. Os critérios de escolha dizem respeito a representatividade da complexidade do fenômeno estudado, a simplicidade do modelo de cálculo e interoperabilidade para extração de parâmetros através do modelo digital 3D. Neste sentido, os requisitos para escolha dos indicadores de desempenho considerados para a pesquisa são:

- I. Indicadores que isolam o fenômeno físico relevante, permitindo realizar análise de sensibilidade se desejado;
- II. Permitir análises anuais representativas;
- III. Possibilitar cálculos mais rápidos dentro do possível;
- IV. Possuir parâmetros de entrada passíveis de extração direta no modelo de arquitetura.

Para escrever as funções de otimização, duas estratégias foram utilizadas: médias ponderadas (em indicadores qualitativos) e média quadrática (nos indicadores de desempenho principais). Os indicadores escolhidos para a realização dos experimentos são:

1. **Carga térmica de resfriamento (CTR)** em KWh/m<sup>2</sup> (Desempenho térmico). Para o indicador de desempenho será utilizado os valores dos picos de carga térmica de resfriamento diários que ocorrem entre as 8:00 e 18:00 horas. O cálculo do indicador utilizará a média quadrática dos valores pico do dia coletados. Este indicador faz referência direta ao efeito da proteção solar e permite estimar o consumo referente ao condicionamento artificial;
2. **Iluminação Útil da Luz do Dia (UDI)** em percentual (Desempenho da luz natural). Para o indicador de desempenho será considerado o intervalo entre 300 e 2000 lux para os horários das 8:00 às 18:00 horas. O cálculo do indicador utilizará a média quadrática dos valores de UDI por sensor. Este indicador condensa situações de benefício da luz natural e é sensível a situações de baixa luminosidade e de excesso de luminosidade, por isso reduz necessidade de indicadores adicionais e conseqüentemente aumento do processamento;
3. **Autonomia de ofuscamento Espacial (sDGPa)** em percentual (conforto visual). Para o indicador de desempenho será considerado valores de excedem 40% para 5% das horas ocupadas ou seja, entre 8:00 às 18:00 horas (sGA40%, 5%).
4. **Obstrução da vista em percentual (V<sub>O</sub>)**. Nos experimentos será utilizado o percentual de visão de céu como indicador de qualidade da vista. Vale destacar que dependendo do apelo visual do entorno, é possível incluir no cômputo do percentual de visão para outros elementos naturais ou urbanos (mar, praça, pôr do sol, parque verde, monumento, etc). Para exemplificação, o **anexo 5** desta tese descreve uma análise experimental da visão do pôr do sol ao longo do ano. Uma abordagem semelhante pode ser considerada para explorar outros elementos visuais. Dessa forma, a indicador da qualidade da vista pode ser dado por:

$$V_O = \frac{V_{ceu} * P_{ceu} + V_i * P_i + V_{i+1} * P_{i+1} + \dots V_n * P_n}{P_{ceu} + P_i + P_{i+1} + \dots P_n}$$

Sendo, V o percentual de visão para elementos de interesse. V<sub>ceu</sub> o percentual de visão de céu, P<sub>ceu</sub> um peso subjetivo para a importância da visão do céu no projeto. V<sub>i</sub> o

percentual de visão para algum elemento de interesse.  $P_i$  um peso subjetivo para a importância do elemento de interesse para o projeto.

5. **Quantidade de material** utilizado para estratégia de sombreamento em área ( $m^2$ ). Este é um indicador parcial que pode ser utilizado para estabelecer métricas de custo-benefício e análise de uso de materiais empregados na construção.

Estes cinco critérios não abarcam todas as exigências de desempenho para o projeto da abertura, conforme Tabela 1. e Figura 14, porém, entende-se que o projeto guiado por desempenho pode ser associado a outras técnicas, incluindo técnicas tradicionais de projeto de maneira a complementar a abordagem. A Figura 92 indica as áreas contempladas pelos indicadores de desempenho elencados de acordo com o diagrama do projeto da janela estabelecido anteriormente a partir do referencial teórico.

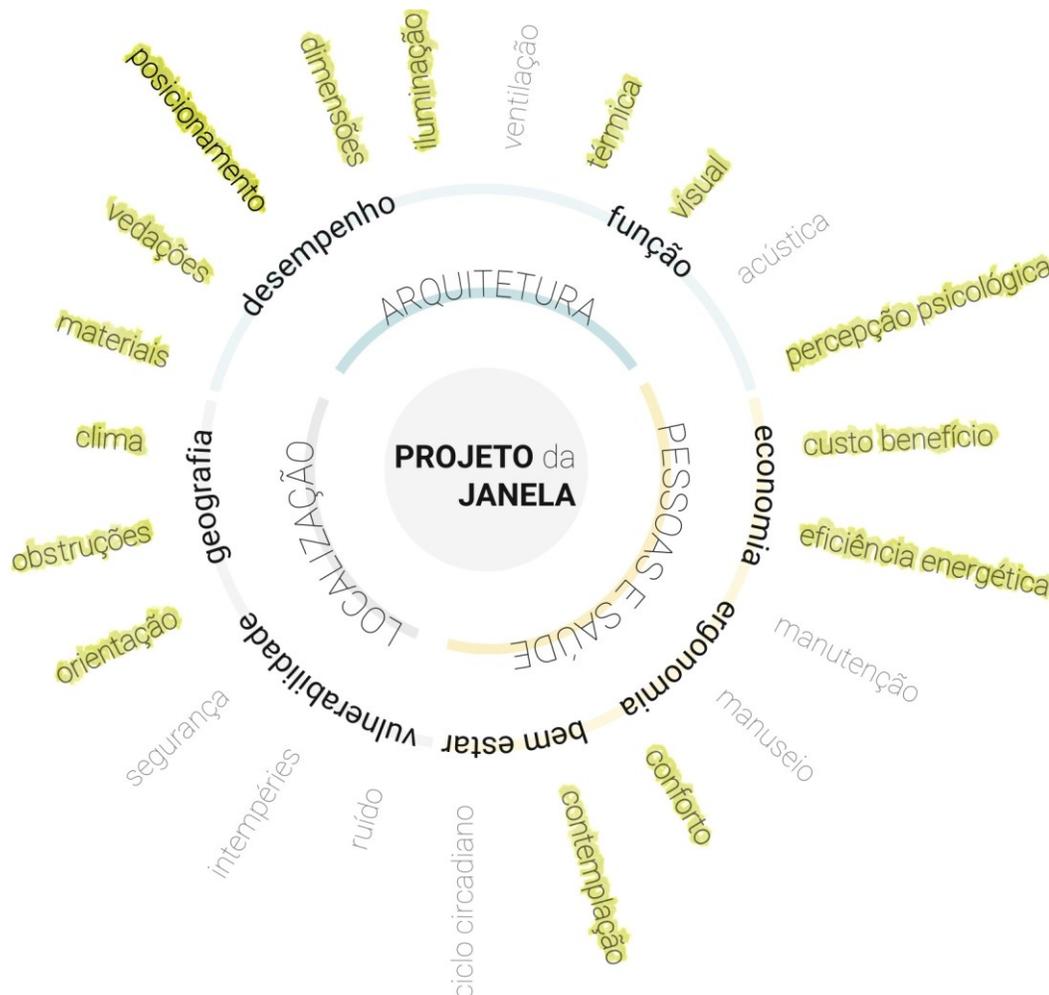


Figura 92. Diagrama do projeto da janela grifando áreas contempladas pelo modelo unificado.

### 3.2.2 Definição das etapas lógicas para modelagem

A etapa metodológica de modelagem vai considerar a criação de um Sistema Paramétrico de Modelagem (SPM). Um sistema paramétrico de modelagem é relevante para arquitetura performativa, pois permite explorar e analisar várias opções de projeto de forma eficiente evitando retrabalho. Com esse sistema, é possível definir e ajustar parâmetros de projeto como a forma, a orientação, a relação com o sol, o uso de materiais, entre outros. Isso facilita a análise do impacto dessa mudança no desempenho do edifício. Isso possibilita que os arquitetos identifiquem e otimizem as soluções de design que apresentam melhor desempenho, contribuindo para um projeto mais sustentável e eficiente. Além disso, o SPM permite testar diferentes cenários e condições climáticas, possibilitando que o projeto seja adaptado a diferentes contextos e situações, aumentando sua resiliência e eficácia.

O desenvolvimento de um SPM vai utilizar o *Grasshopper* para *Rhinoceros 3D* e linguagem *Python* aplicado ao *Grashopper* (*Ghpython*). O processo de modelagem será estabelecido para três elementos relevantes para tese: a modelagem matemática de padrões, a modelagem da janela e a modelagem dos elementos de sombreamento. A construção do sistema paramétrico envolve várias etapas lógicas e metodológicas, incluindo:

1. **Definição dos objetivos e requisitos do projeto:** Nesta etapa, são definidos os objetivos de desempenho do projeto da fachada e são identificadas as necessidades e restrições do projeto.
2. **Identificação dos parâmetros de entrada:** Os parâmetros de entrada são variáveis que podem ser facilmente modificadas pelos usuários para gerar diferentes opções de projeto, como a altura do edifício, o tamanho das janelas, a orientação solar, clima, entre outros.
3. **Desenvolvimento dos algoritmos:** Os algoritmos são desenvolvidos e implementados em *Grasshopper* para automatizar a geração e a modificação dos modelos, permitindo uma análise rápida e precisa de várias opções de projeto.
4. **Testes e validação dos algoritmos:** Os algoritmos são testados e validados para garantir que eles estejam gerando modelos precisos e consistentes.
5. **Desenvolvimento de interface do usuário:** A interface do usuário é desenvolvida para facilitar que os usuários modifiquem os parâmetros do modelo de forma clara e intuitiva. Esta etapa utilizará a produção de componentes de *Grasshopper* em *Python*, ou elaboração de clusters (agrupamentos de componentes de *Grasshopper*).

O *Grasshopper* para o *Rhinoceros 3D* possui código aberto e permite elaborar processos tanto por LPV quanto por linguagem de programação textual (LPT), permitindo utilizar *C#*, *Visual Basic* e *Python*. Em razão do código aberto, possui uma série de plugins que visam integração com simulação computacional como o *Diva*, *ClimateStudio* e o *Ladybug* e *Honeybee*. Todos amplamente utilizados por pesquisas (ANTON; TĂNASE, 2016; CICHOCKA; BROWNE; RODRIGUEZ, 2015; GERBER; EL SHEIKH, 2011; KIRIMTAT et al., 2019; WORTMANN, 2017a). O primeiro, integra o *Grasshopper* ao *Daysim*, porém foi descontinuado, o segundo apresenta conexão com *EnergyPlus* e implementação do método de *path tracing* para aumentar a velocidade das simulações de iluminação. O terceiro e quarto, apresentam a conexão com um pacote de simuladores: o *Radiance*, *Daysim*, *Energyplus*, *Openstudio* e o *Therm*. O *Grasshopper* é a escolha mais popular em processos algorítmicos associados a modelagem 3D encontrado na literatura (KIRIMTAT et al., 2016). Pelas razões expostas neste parágrafo, o *Grasshopper* foi considerado para esta pesquisa.

### **3.2.3 Definição dos métodos e ferramentas de análise**

Esta etapa visa apresentar as ferramentas utilizadas no modelo unificado para análise do projeto guiado por desempenho. Duas categorias foram consideradas: desempenho térmico e desempenho da luz natural. A seleção de métodos de simulação para desempenho térmico e desempenho da luz natural em edifícios é um aspecto importante para o andamento do modelo de otimização, pois podem afetar a precisão dos resultados e conseqüentemente, as decisões gerais de projeto tomadas. A escolha e validação dos métodos se apoia na literatura pesquisada, em caso de ausência de informações disponíveis, testes comparativos utilizando com base os *softwares* *EnergyPlus* e *Radiance* serão executados. O *EnergyPlus* como software de simulação amplamente utilizado para modelar o desempenho térmico e consumo de energia. Já o *Radiance* como ferramenta de simulação de alta fidelidade para a análise do desempenho da iluminação natural.

A escolha do método de simulação depende dos requisitos específicos de desempenho e dos objetivos da otimização, bem como, o nível de detalhe e precisão necessários, a disponibilidade de recursos computacionais e a experiência da equipe de projeto. É importante avaliar a adequação dos métodos de simulação para um determinado projeto e escolher o que melhor atende ao uso durante as primeiras fases de projeto. Dessa forma, os critérios de escolha dos métodos de

simulação foram estabelecidos com base nas considerações encontradas nas pesquisas de (KIRIMTAT et al., 2019; MANZAN; CLARICH, 2017; NEGENDAHL; NIELSEN, 2015), descritos na revisão de literatura no item 2.2.3. Com base nesses trabalhos, os requisitos para as ferramentas de análise buscados para esta pesquisa são:

- I. Executar cálculos de análises anuais rápidos dentro do possível;
- II. Possuir acuracidade razoável compatível com a exigência das primeiras fases de projeto;
- III. Possibilitar integração com uma interface de modelagem de arquitetura, possuindo sensibilidade a elementos de sombreamento com geometrias complexas;
- IV. Solicitar nível de detalhamento compatível com modelo de arquitetura;
- V. Possibilitar interoperabilidade com outra ferramenta de análise.

O método de duas fases baseado no *Radiance* descrito por Subramaniam (2018) foi utilizado como base para o modelo de simulação unificado. Para integração com o *Grasshopper* foi utilizado o plugin *Honeybee+*. A descrição da aplicação foi dividida em dois grupos. O primeiro, a descrição de simulação para desempenho térmico. E o segundo, a descrição de simulação para desempenho da luz natural.

#### 3.2.3.1 Desempenho térmico

O *EnergyPlus* foi inicialmente descartado como opção de simulador de desempenho térmico para aplicação do método de projeto guiado por desempenho, pois é limitado para descrever o comportamento de elementos de sombreamento complexos na modelagem 3D (BUENO et al., 2015). As entradas de dados de radiação e sombreamento nesses casos, devem ser realizadas através de rotinas pré-estabelecidas em um segundo *software* de raio traçado mais complexo como o *Radiance*. Vale salientar que o *EnergyPlus* também não é compatível com a integração direta com o modelo 3D de arquitetura. Devido a essa característica, o modelo escolhido para a simulação foi o método matemático RTS da ASHRAE implementado no *Grasshopper* para *Rhino 3D* utilizando linguagem *Python*. Os dados de entrada de ganho solar são obtidos utilizando o método de duas fases do *Radiance*, de forma a melhorar a qualidade dos dados de entrada de ganho solar para caracterizar elementos de sombreamento complexos. A Tabela 7 apresenta um comparativo entre as opções avaliadas.

Tabela 7. Comparativo para ferramenta de desempenho térmico.

Requisitos	Modelo matemático	EnergyPlus
<i>Cômputos anuais rápidos;</i>	Sim	Sim
<i>Acuracidade compatível</i>	Sim (deve ser validado)	Sim (ferramenta validada)
<i>Integração com ferramenta de modelagem de arquitetura</i>	Sim	Sim (possível integração, porém a natureza do modelo térmico é diferente do modelo arquitetônico)
<i>Nível de detalhamento da modelagem</i>	Simplificado (o cálculo realizado através da energia radiante admitida pela janela, permite estabelecer um modelo sensível a geometrias complexas de elementos de sombreamento).	Simplificado (requer modelagem de zonas térmicas e há limites para modelagem de elementos de sombreamento)
<i>Interoperabilidade com outra ferramenta de análise</i>	Sim	Sim (possui modelos de avaliação do desempenho luminoso e ofuscamento)

Para implementação do método RTS no *Grasshopper* foi elaborado dois componentes usando linguagem de programação Python para *Grasshopper*: um que descreve o ganho de calor solar e outro que descreve os ganhos internos (Figura 93). Como o método RTS desconsidera as trocas internas com o exterior através da fachada, é possível separar essas duas etapas como independentes. O primeiro componente tem como dados de entrada os dados de desempenho térmico do sistema construtivo, os valores de irradiação calculados no *Radiance* e as temperatura externas e de *setpoint*. Já o segundo componente tem como dados de entrada rotinas e densidade de pessoas e de instalação dos equipamentos e sistema de iluminação.

A Figura 97 mostra como foi feito a integração geral no *Grasshopper* do modelo 3D estabelecido com o *Rhinoceros 3D*. Os parâmetros de simulação no *Radiance* foram definidos com base em considerações definidas por Subramaniam; Mistrick (2017), sendo que o número de *bounces* (reflexões) foi definido com base no processo de validação da tese, descrito no item 3.3 (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros do *Radiance* para o método de duas fases no modelo térmico

-ab	-lw	-ad	-c
3	1/(-ad * 0.01)	50e4	1

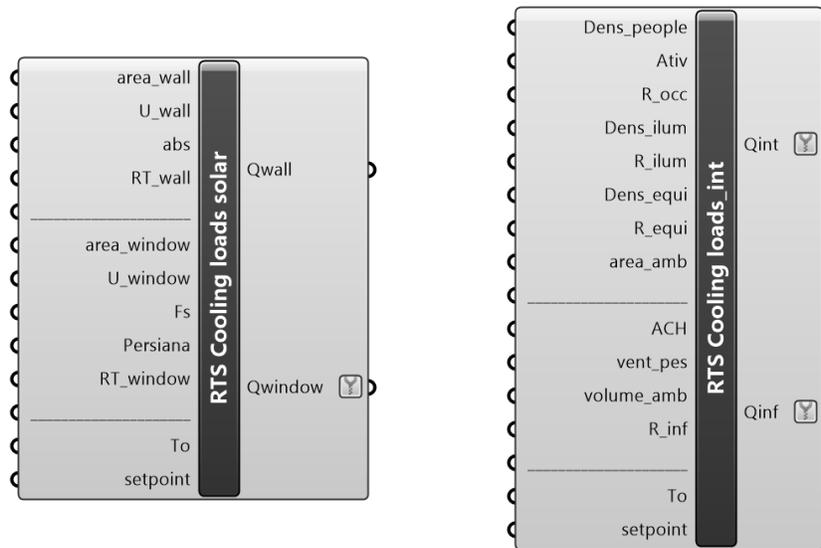


Figura 93. Componentes realizados em GhPython para cálculo do método RTS. Fonte: autor

A Figura 94 mostra os fatores de condução e do efeito radiante do sistema construtivo utilizados para o modelo RTS. Os coeficientes estão relatados detalhadamente no anexo 02. Os dados de entrada para cômputo das cargas internas estão descritos na Tabela 9. Já as rotinas de uso de equipamentos e ocupação humana, bem como a temperatura de termostato estabelecida para análise de carga térmica de resfriamento estão descritos nas Figura 95 e Figura 96.

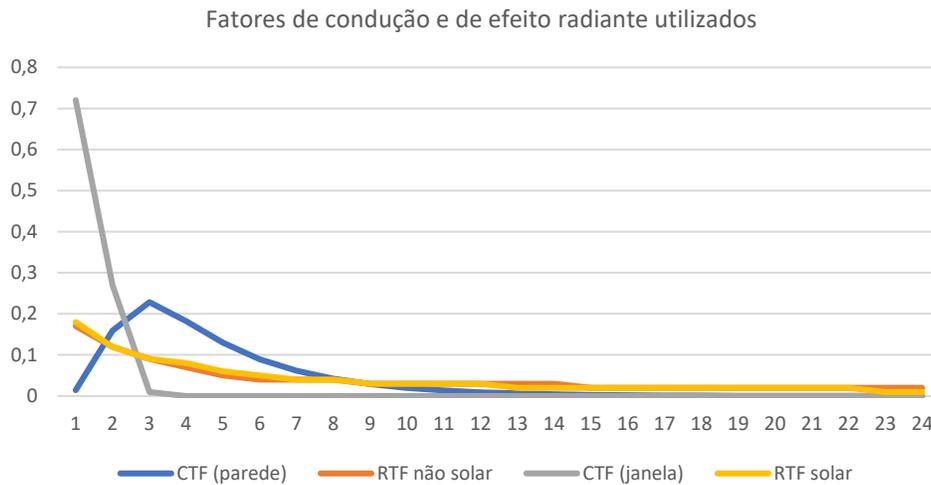


Figura 94. Fatores de condução e do efeito radiante.

Tabela 9. Dados de entrada para cargas internas.

	DENSIDADE	FRAÇÃO RADIANTE
<b>PESSOAS</b>	0,22 Pessoa/m <sup>2</sup>	0,60
<b>ILUMINAÇÃO</b>	9 W/m <sup>2</sup>	0,35
<b>EQUIPAMENTOS</b>	11 W/m <sup>2</sup>	0,30
<b>INFILTRAÇÃO</b>	0,0006 m <sup>3</sup> /s por m <sup>2</sup> de fachada	-

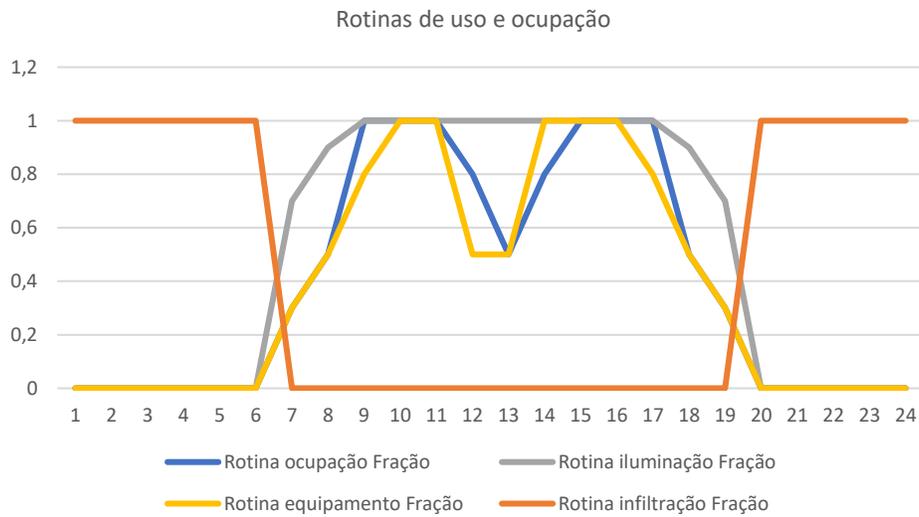


Figura 95. Rotinas de uso de equipamentos e ocupação humana.

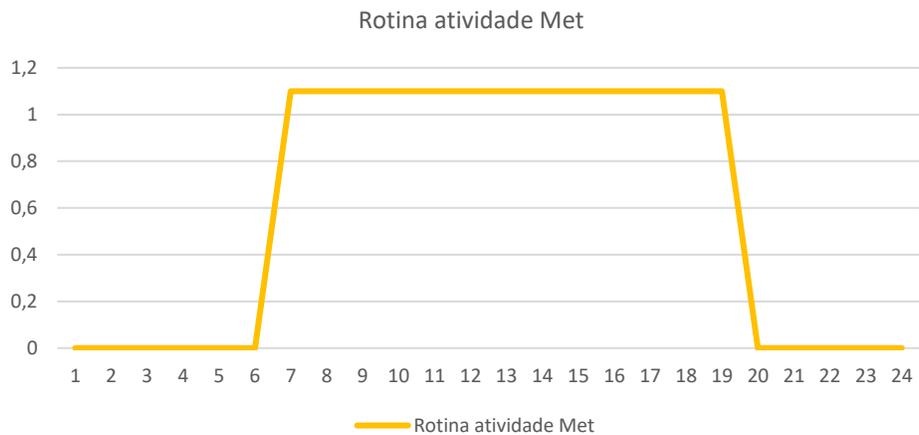


Figura 96. Rotina de atividade metabólica.

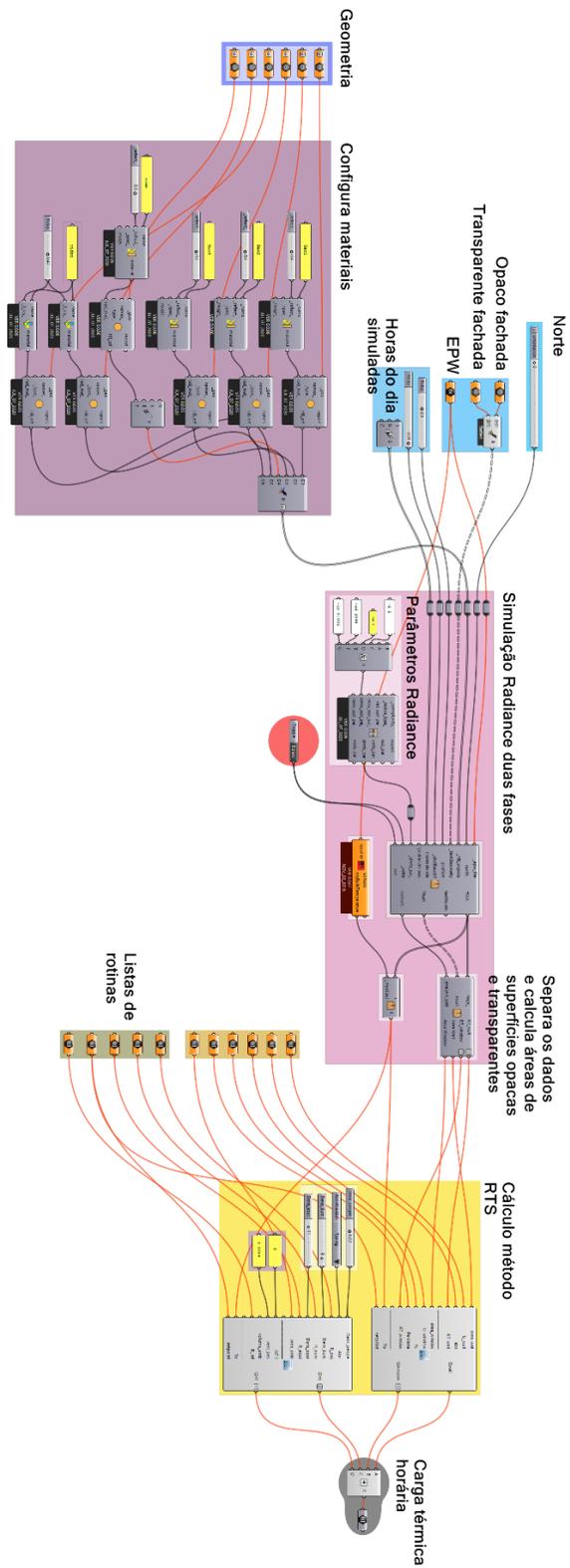


Figura 97. Modelo de desempenho térmico mostrando integração do Grasshopper com o Radiance através do Honeybee+.

### 3.2.3.2 Desempenho da luz natural

Com base na análise comparativa descrita no item de validação da proposta (item 3.3); o método de duas fases foi adotado para as análises de iluminação natural e de ofuscamento. A integração com o *Rhinoceros 3D* e o *Grasshopper* foi estabelecida através do *plugin Honeybee+*, que permite a modelagem dos métodos de duas, três e cinco fases conforme descritos por Subramaniam (2018). Tal qual o item anterior, os parâmetros do *Radiance* utilizados nas configurações consideram contribuições do autor anterior e reflexões descritas no item de validação desta tese (Tabela 10). O modelo para simulações de ofuscamento sem imagens e os parâmetros do *Radiance* foram estabelecidos conforme descrito por Jones (2019) (Tabela 11). O *script* de integração do modelo para cálculo de UDI é apresentado na Figura 98. Já o *script* de integração para avaliação de ofuscamento é apresentado na Figura 99.

Tabela 10. Parâmetros do Radiance para o modelo para UDI.

-ab	-lw	-ad	-c
5	$1/(-ad * 0.01)$	50e4	1

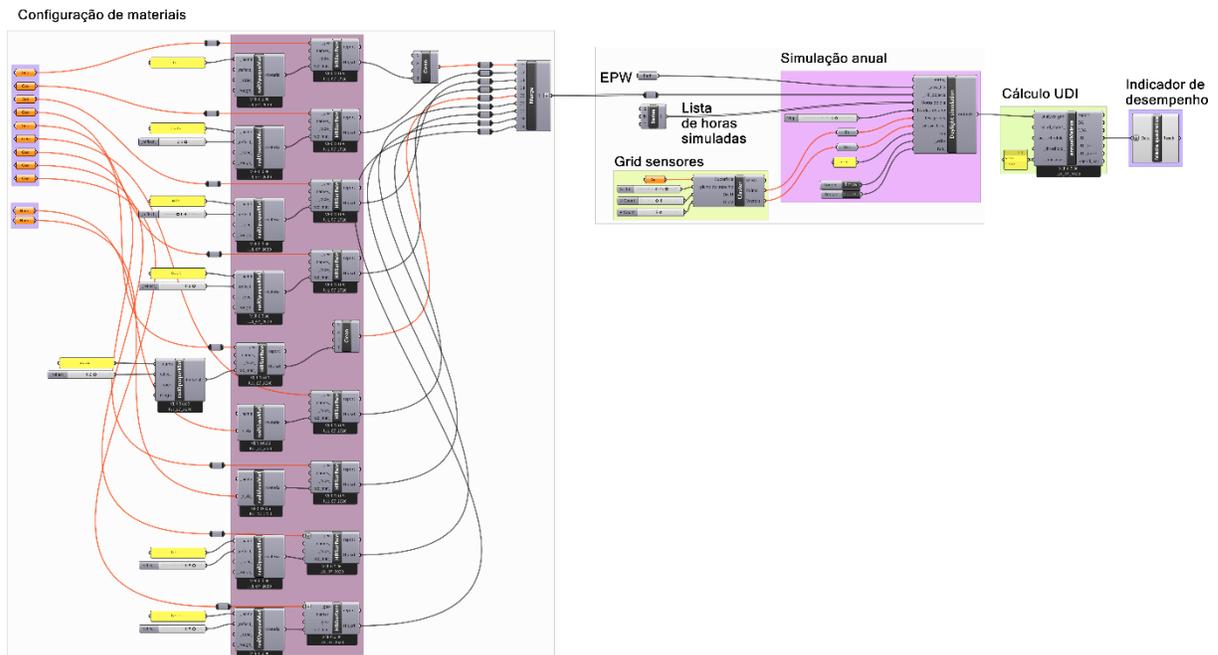


Figura 98. Integração do Grasshopper com o Radiance através do Honeybee+ para UDI.

Tabela 11. Parâmetros do Radiance para o modelo para ofuscamento sem imagem.

-ab	-lw	-ad	-c
8/1	2e-5	50e4	1

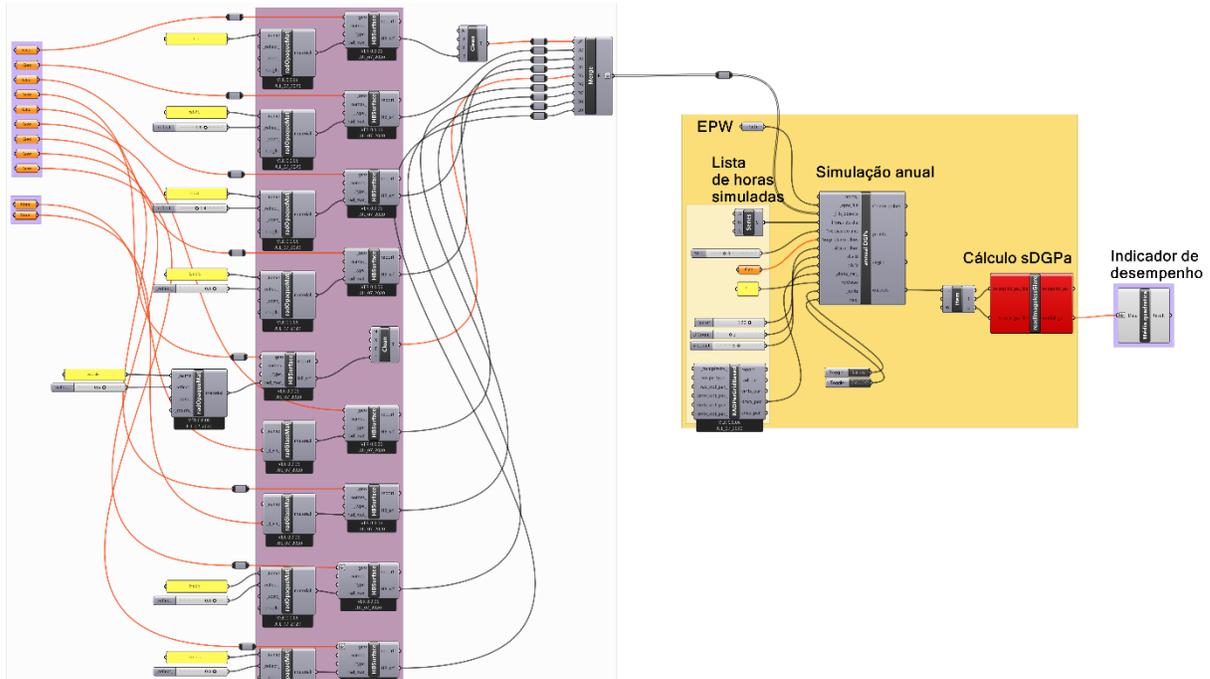


Figura 99. Integração do Grasshopper com o Radiance através do Honeybee+ para ofuscamento.

### 3.2.3.3 Redução do arquivo climático para otimização

Uma opção acessível para melhorar a velocidade computacional de simulações é a redução do tamanho do arquivo climático usado na entrada de dados. Isso é conseguido selecionando um conjunto representativo de dados que representa as condições climáticas relevantes para condições anuais. Ao usar dados climáticos reduzidos, a simulação é executada mais rapidamente e usa menos recursos computacionais, tornando mais viável a realização de várias simulações em um curto período. Isso pode ser útil na otimização de fachadas de edifícios, uma vez que centenas de simulações são necessárias para encontrar as soluções otimizadas.

A redução de dados climáticos pode ser realizada usando métodos estatísticos, como amostragem e agrupamento. A escolha da técnica de redução de dados climáticos depende dos requisitos específicos da simulação, incluindo a precisão e a resolução dos resultados necessários. Em qualquer caso, é importante validar os dados climáticos reduzidos para garantir que eles representem com precisão as condições anuais e que os resultados obtidos usando os dados

reduzidos sejam representativos dos resultados que teriam sido obtidos usando o conjunto completo de dados climáticos. Para as simulações foi considerado uma amostragem dos dados horários com subtração de dias do arquivo climático estabelecido por um fator de redução. O fator de redução estabelece o intervalo de dias que serão subtraídos do arquivo. A Tabela 12 apresenta o fator de redução utilizado para cada indicador de desempenho simulado. Os fatores foram definidos com base nos processos de validação descritos no item 3.3 da tese.

Tabela 12. Fator de redução utilizado nas simulações.

<b>INDICADOR DE DESEMPENHO</b>	<b>FATOR UTILIZADO</b>
<b>CARGA TÉRMICA</b>	<i>1/5 dos dias = 0.20</i>
<b>UDI</b>	<i>1/3 dos dias = 0.33</i>
<b>SDGPA</b>	<i>1/3 dos dias = 0.33</i>

### 3.2.4 Definição do algoritmo de otimização

O modelo de otimização utilizado deve ser apropriado a natureza do problema de projeto e das funções analisadas. Com base no que foi exposto no item 1.2.4 do referencial teórico, foram considerados o uso de modelos de otimização multicritério baseados na fronteira de Pareto. Três algoritmos foram considerados: dois metaheurísticos, Hype, Spea-II e o modelo determinístico apresentado por Wortmann (2017). O primeiro é possível integrar ao *Grasshopper* utilizando o plugin *Octopus* (Figura 101). Já o segundo, é possível integrar através do *plugin Wallacei*. Já o terceiro permite integração a partir do *Opossum* (Figura 100). O critério de escolha foi estabelecido por dois critérios: o primeiro, os resultados comparativos estabelecidos por Wortmann (2017a). O segundo, a interface dos plugins em relação a possibilidades de estabelecer múltiplos critérios de desempenho e sua estabilidade ao longo do processo de otimização.

Ao final, resolveu-se adotar o Hype através do *Octopus* por apresentar uma interface integrada ao modelo 3D, estável, baseada na fronteira de Pareto para até cinco critérios e interativa ao processo paramétrico. Ambos o Hype e SPEA-II apresentaram bons resultados em avaliações realizada por Wortmann (2017b); Wortmann; Natanian (2020), porém a interface do *Octopus* permite interromper o processo e reiniciá-lo durante o processo de otimização, isso foi visto como vantajoso. Com base na escolha dos indicadores, ferramentas de análise e algoritmo de otimização,

a Figura 102 mostra o funcionamento esquemático do modelo analítico integrado proposto para pesquisa.

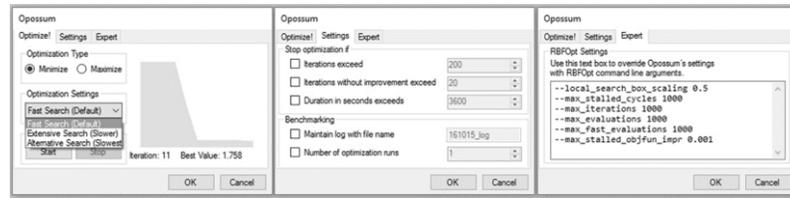


Figura 100. Interface do Opossum.

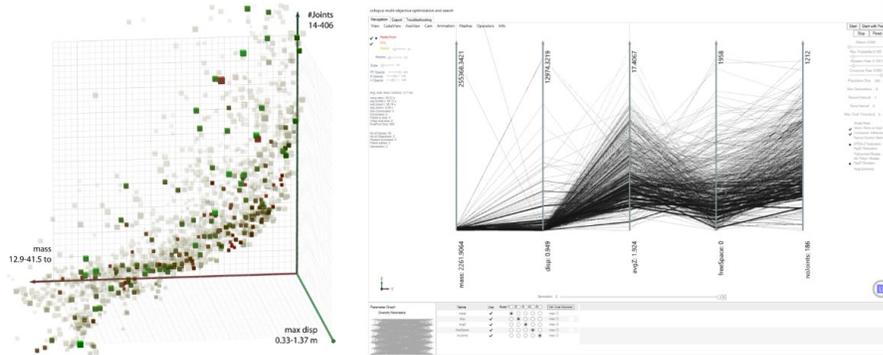


Figura 101. Interface do Octopus mostrando universo de soluções gerados no modelo de otimização.

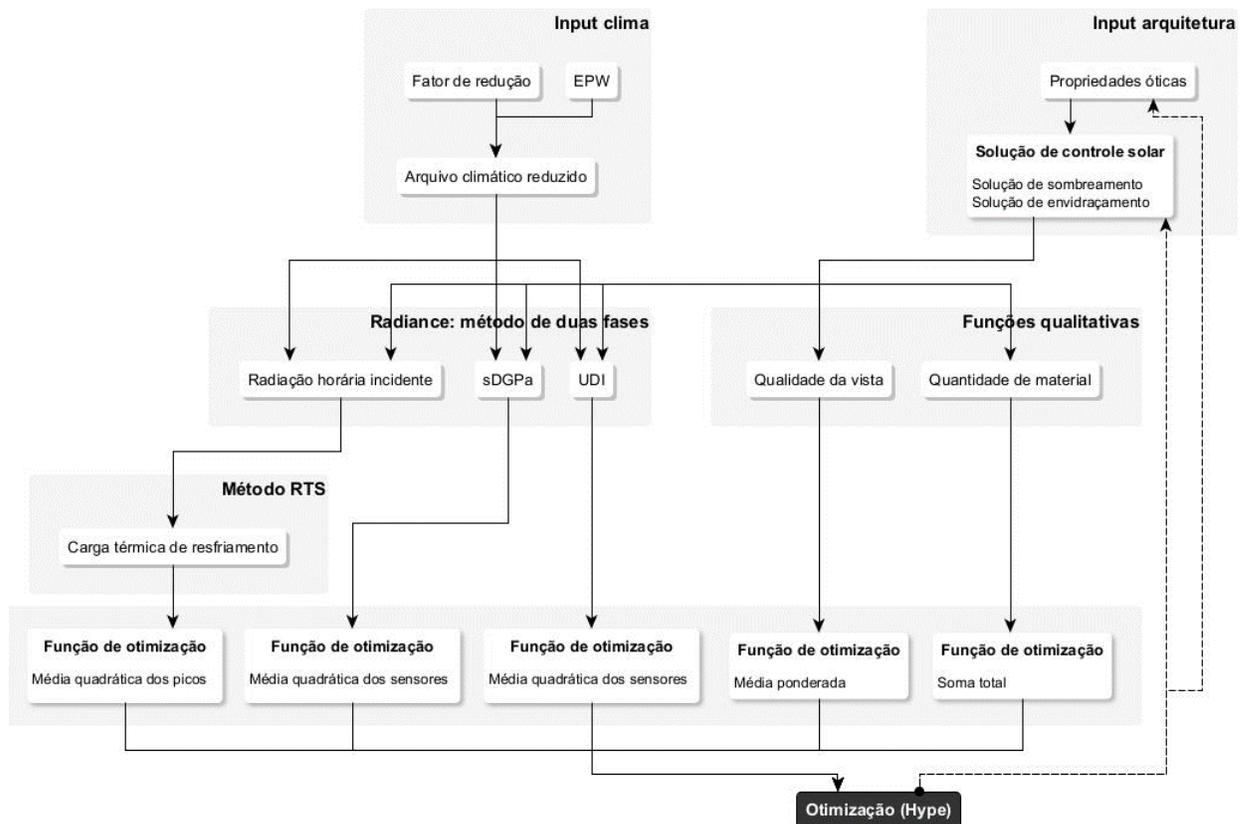


Figura 102. Fluxograma do modelo integrado.

### 3.2.5 Definição do problema de otimização

Foram realizados três ciclos de otimização, utilizando o mesmo caso-base, com variação em três climas distintos. O objetivo da otimização é colaborar com a investigação cujo a pergunta é: "Qual a importância dos parâmetros de controle solar em fachadas otimizadas altamente envidraçadas?". Para definir o caso-base, foram consideradas as características e objetivos específicos do experimento, principalmente a modelagem da estratégia de sombreamento e envidraçamento. Assim, foram estipulados os parâmetros envolvidos para os resultados desejados, definindo os valores iniciais e limites de variação de cada variável de projeto. As cidades escolhidas para a realização das otimizações foram Salvador, São Paulo e Porto Alegre.

Salvador, localizada na Bahia, possui as coordenadas geográficas de 12.9722° S, 38.5014° W. A cidade está localizada no litoral atlântico, o que influencia o clima tropical úmido da região, classificado como Af na classificação de Köppen. Isso significa que a cidade possui temperaturas quentes e úmidas durante todo o ano, com médias de temperatura que variam de 23 a 28 graus Celsius. A cidade também recebe uma alta incidência de radiação solar ao longo do ano, com uma média dos picos diários de radiação direta de aproximadamente 6,86 kWh/m<sup>2</sup> e radiação difusa de 2,05 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

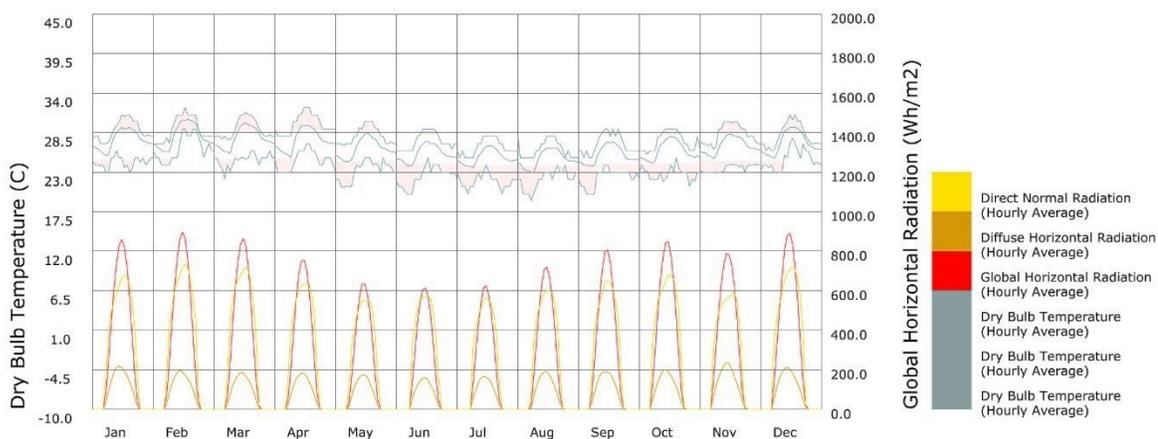


Figura 103. Resumo do clima de Salvador-BA.

São Paulo, localizada no estado de São Paulo, possui as coordenadas geográficas de 23.5505° S, 46.6333° W. A cidade está localizada em uma área de planalto, a uma altitude média de 760 metros acima do nível do mar, o que influencia no clima da região. O clima de São Paulo é classificado como Cwa na classificação de Köppen, o que significa que a cidade possui verões

quentes e úmidos e invernos frios e secos. As médias de temperatura variam de 13 graus Celsius no inverno a 26 graus Celsius em dias de verão. A cidade recebe uma média dos picos de radiação direta de aproximadamente 6,0 kWh/m<sup>2</sup> e radiação difusa de 2,23 kWh/m<sup>2</sup>.

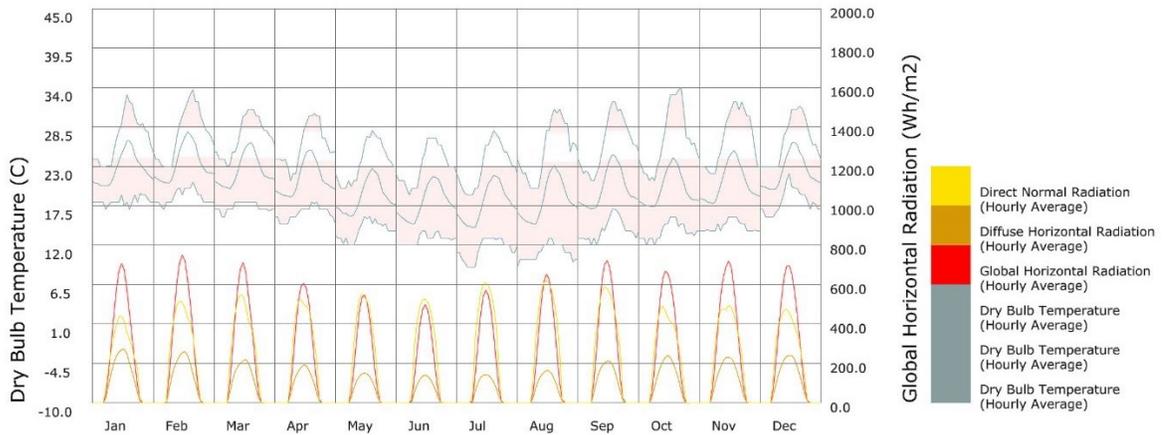


Figura 104. Resumo do clima de São Paulo-SP.

Porto Alegre, localizada no Rio Grande do Sul, possui as coordenadas geográficas de 30.0346° S, 51.2177° W. A cidade está localizada em uma área de planalto, a uma altitude média de 10 metros acima do nível do mar. O clima da região é classificado como Cfa na classificação de Köppen, o que significa que a cidade possui verões quentes e úmidos e invernos frios e úmidos. As médias de temperatura variam de 16 graus Celsius no inverno a 28 graus Celsius no verão. A cidade recebe uma média anual de radiação direta de aproximadamente 6,09 kWh/m<sup>2</sup> e radiação difusa de 2.04 kWh/m<sup>2</sup>.

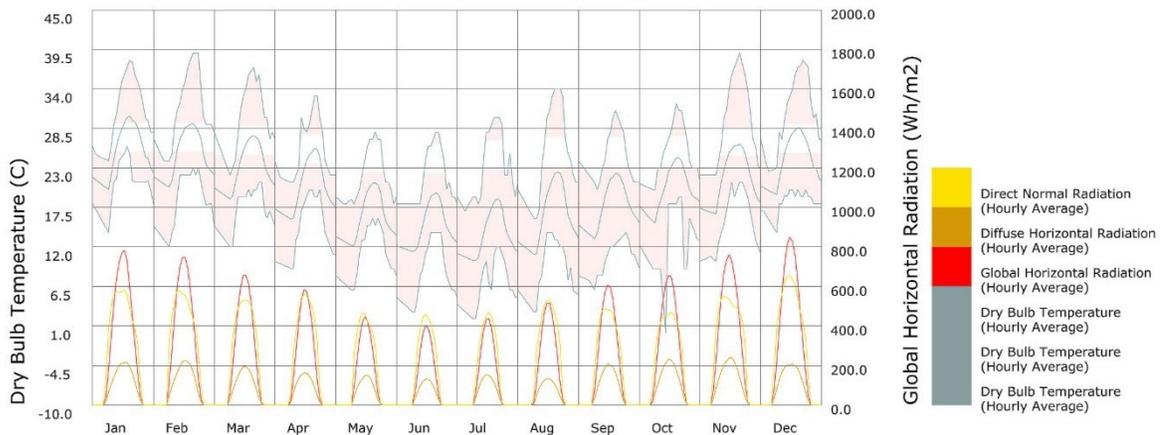


Figura 105. Resumo do clima de Porto Alegre-RS.

O experimento considerou 45 gerações e uma população de 100 indivíduos para cada geração. Os processos de otimização foram executados até a convergência, ou seja, os resultados não estavam sofrendo variações significativas nas últimas gerações. O que permitiu que os casos-bases escolhidos para cada experimento representassem de forma adequada o problema de projeto guiado por desempenho, possibilitando a obtenção de soluções ótimas e próximas a fronteira de Pareto verdadeira para os objetivos estabelecidos. Os itens seguintes detalham o caso-base, e análise da fronteira de Pareto.

#### 3.2.5.1 Caso-Base

O modelo utilizado para essa otimização foi a versão mais complexa, que está descrita no item 3.3.1, que consiste em um edifício hipotético de 10 pavimentos associado a um contexto urbano também hipotético (Figura 106). O detalhamento do edifício e contexto urbano estão descritos no item 3.3.1. As definições de propriedades óticas, rotinas de uso e ocupação e sistemas construtivos utilizados nos casos-bases são os mesmos também descritos no item 3.3.1. As alternativas de vidros consideradas estão descritas na Tabela 13.

O estudo considera um edifício não-residencial hipotético altamente envidraçado. Nele a fachada Norte recebe brises paramétricos estabelecidos com o componente que gera elementos de sombreamento torcidos descrito no item 4.1.3, associado a modelagem de janela e geração de padrões harmônicos descritos nos itens 4.1.1 e 4.1.2. O pavimento térreo não recebeu brises, já os nove pavimentos restantes foram divididos em três partes: os três últimos pavimentos, os três pavimentos centrais e os três pavimentos inferiores. Cada agrupamento recebeu um padrão harmônico distinto. Ou seja, foram utilizados três padrões harmônicos.

Para fins de comparação, foram estabelecidas as soluções sem brises utilizando os vidros considerados na otimização como condição inicial. Essa escolha foi feita para permitir a comparação do desempenho da fachada após a otimização e possibilitar a análise da fronteira de Pareto, comparando-a também com o desempenho da condição inicial. As Figura 107 e Figura 108 detalham características do impacto do entorno nas condições iniciais para as três cidades mostrando o percentual de visão de céu na altura dos olhos em cada pavimento; o número de horas ensolaradas e a incidência de radiação solar total nas fachadas.

Tabela 13. Vidros considerados nas otimizações

Vidro	TVis	FS	U (Wh/m <sup>2</sup> K)
Vidro 4	0,72	0.59	5.63
Vidro 3	0,47	0.39	5.63
Vidro 2	0,39	0.35	5.63
Vidro 1	0,20	0.28	4.88
Vidro 0	0,14	0.22	4.24

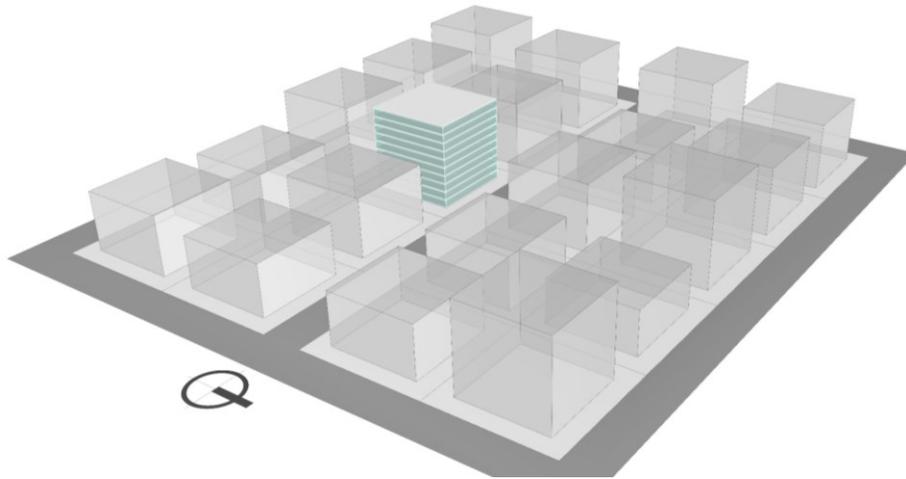


Figura 106. Caso-Base

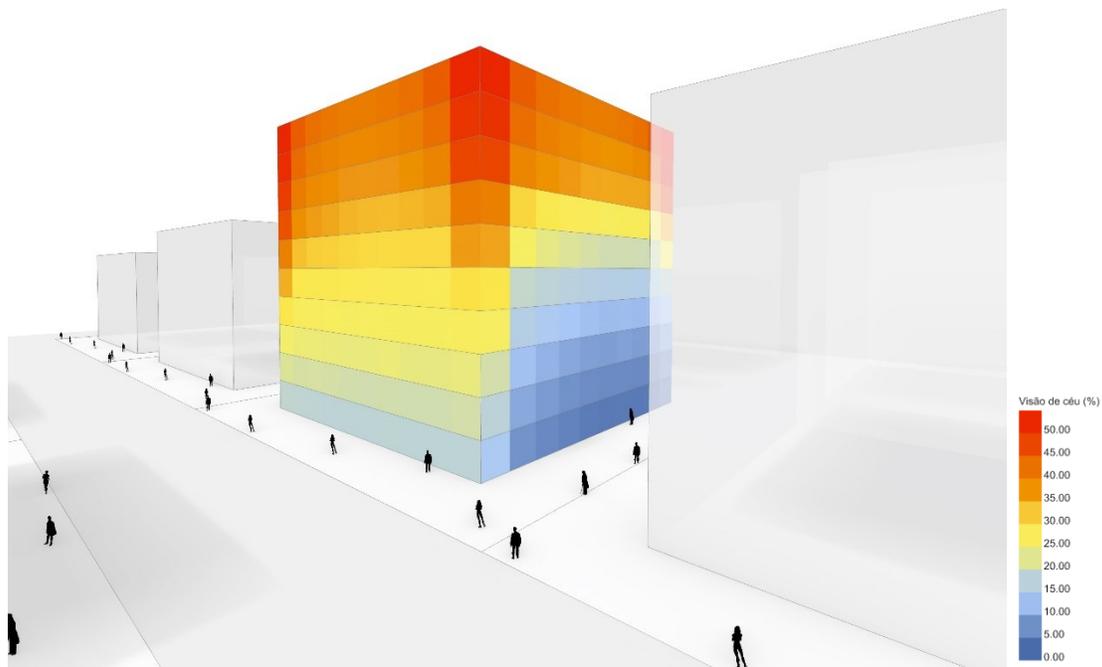
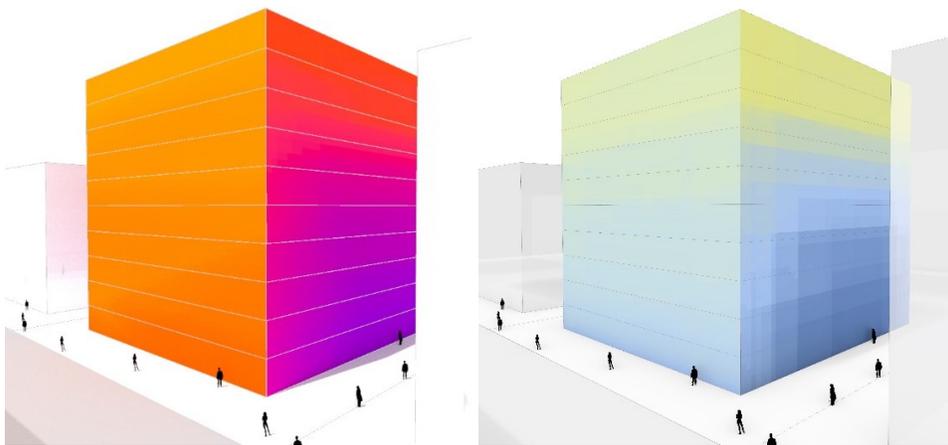
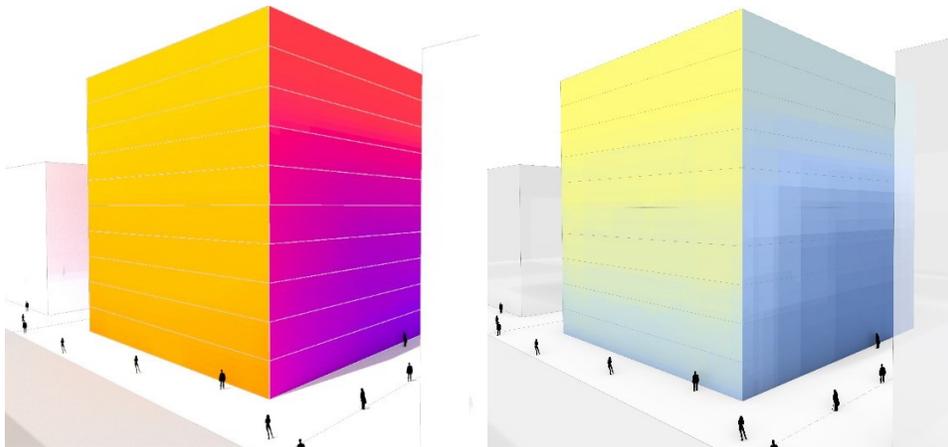


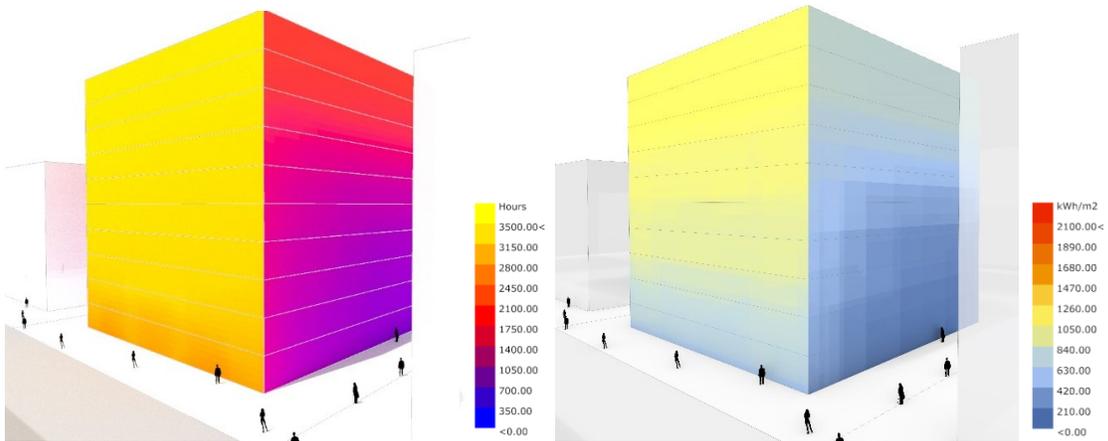
Figura 107. Percentual de visão do céu na altura do centro das aberturas a uma distancia de 0,5m das janelas pelo lado interno .



*Salvador*



*São Paulo*



*Porto Alegre*

*Figura 108. Número de horas ensolaradas (esquerda) e Radiação incidente (direita) para as três cidades consideradas.*

Nas simulações de desempenho térmico, foi considerado um grid de análise com sensores distribuídos ao longo das quatro fachadas. A grade de sensores está localizada a uma distância de 0,02 m do plano da fachada e antes de atravessar o plano envidraçado. Na avaliação, foram consideradas as zonas térmicas voltadas para o norte em todos os pavimentos. Foram distribuídos 276 sensores por fachada em uma grade regular de 2,5 x 2,5 m. Para as análises de ofuscamento, foram distribuídos 22 sensores por pavimento (220 sensores no total) em uma grade regular (3,5 x 5,0 m) localizada no plano de trabalho para a porção voltada para o norte em todos os andares, a uma altura de 0,75 m. A grade foi mantida fixa em todas as cidades otimizadas (figura 109).

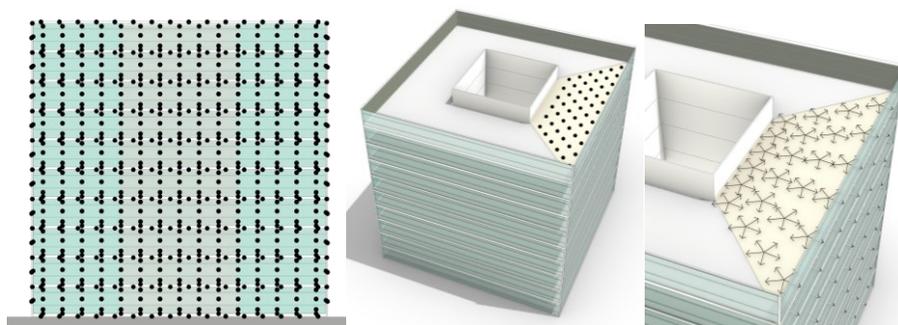


Figura 109. Grade de análise utilizada. Da esquerda para direita: Carga térmica de resfriamento, UDI, e autonomia de ofuscamento.

### 3.2.5.2 Compilação de soluções otimizadas.

Para avaliar os casos na fronteira de Pareto, inicialmente foi calculado o percentual de economia das soluções otimizadas. Esse indicador considerou a comparação do resultado otimizado com a solução com caso-base sem sombreamento e vidro mais transparente (equação 13). Também foi estabelecida uma avaliação que considera as soluções extremas no universo de possibilidades. Nesse caso, os casos extremos são o caso-base sem elementos de sombreamento combinado ao vidro mais transparente e o caso-base com a combinação da área máxima de elementos de sombreamento e vidro de menor transparência. Esses casos extremos foram utilizados como referência quanto às possibilidades permitidas pelo modelo paramétrico estabelecido. Dessa forma, é possível calcular a posição relativa do resultado otimizado em comparação com os extremos delineados no modelo paramétrico.

Os indicadores de desempenho de UDI, carga térmica de resfriamento e DGP foram comparados ao qualificador de visão do céu. Para avaliação relacional, houveram dois passos. Primeiro, foi realizada a normalização dos resultados avaliados, variando entre 0 (referente ao

resultado mínimo com base nas soluções extremas) e 100 (referente ao resultado da combinação extrema máxima). Essa normalização considera as combinações extremas, sendo utilizada para estabelecer percentuais proporcionais dos indicadores analisados em relação a população de dados (equação 14). Em seguida, foi estabelecida uma função de preferência, dada pela diferença entre o indicador normalizado de desempenho e o indicador normalizado de visão do céu. Um valor igual a zero indica uma relação indiferente; um valor acima de zero indica que a otimização encontrou uma solução onde o indicador de visão de céu se sobrepõe ao resultado de desempenho. Um valor negativo indica uma sobreposição do indicador de desempenho em relação à visão de céu (equação 15). As análises descritas foram estabelecidas considerando as seguintes equações:

$$E_s = (R_n - R_{\min})/R_{\min} * 100 \quad (\text{Equação 13})$$

$$P_s = 100 - [(R_{\max} - R_n)/(R_{\max} - R_{\min}) * 100] \quad (\text{Equação 14})$$

Onde,

$E_s$  é a economia em percentual comparado ao resultado de referência mínimo;  $P_s$  é a posição da solução normalizada considerando o domínio (valores extremos) de projeto estabelecido no modelo paramétrico [%];  $R_n$  é o resultado da solução otimizada.  $R_{\max}$  é o resultado referência máximo.  $R_{\min}$  é o resultado referência mínimo.

Já a função de preferência, que estabelece vantagens obtidas na otimização em relação à obstrução da janela é dado por:

$$S = P_{n,s} - P_{n,\text{obstrução}} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde,

$S$  é o ganho considerando a posição da solução de desempenho normalizada e a posição da solução da obstrução normalizada [%];  $P_{n,s}$  é o valor da solução normalizada dos resultados de desempenho [%];  $P_{n,\text{obstrução}}$  é o valor da referente solução normalizada para obstrução da abertura [%].

Esse procedimento de cálculo e a função de preferência foram estabelecidos com base no método estatístico PROMETHEE para auxílio de decisões multicritério descrito por Vincke; Braans (1985), os quais descrevem 6 funções de preferência para auxílio de decisões multicritério. A função utilizada na tese é a função de “critério usual” para tomada de decisão. Ela descreve a relação de dominância relativa entre dois indicadores. A relação de dominância é uma relação binária que compara duas alternativas, “a” e “b”, e indica se “a” é preferida a “b”, indiferente a “b”

ou dominada por “b” em relação as outras possibilidades. Como o método estabelece uma relação relativa entre os indicadores, é importante estabelecer uma comparação também com resultados absolutos para referência, aqui no caso, a função de preferência será contraposta a economia da solução analisada em relação ao caso-base.

### 3.3 Validação da proposta do modelo de otimização

Este item apresenta a sequência de procedimentos de validação executados para garantir a qualidade e a confiabilidade dos processos de otimização de fachadas paramétricas propostos com base em desempenho térmico e de iluminação natural. O item está dividido em três partes principais: descrição do caso-base usados para os testes de validação, validação da redução do arquivo climático, validação do modelo térmico e validação do modelo de iluminação natural. Cada uma dessas partes é fundamental para testar a precisão do modelo para que possa ser replicado em outras pesquisas futuras na área da otimização de fachadas paramétricas.

#### 3.3.1 Caso-base

O modelo para o caso-base da pesquisa será um edifício não residencial de planta livre, com dimensões de 35 x 35m e o núcleo técnico central ocupando 15% da área do edifício. O edifício está localizado no centro de um terreno hipotético de 50 x 50m (Figura 75). A fachada do edifício é altamente envidraçada, alcançando 75% de área envidraçada. O sistema construtivo utilizado para as superfícies opacas é detalhado na Tabela 14. Dependendo da avaliação apresentada, o modelo do caso-base apresentará níveis de complexidade diferentes:

- apenas um pavimento com quatro zonas térmicas sem elementos de sombreamento (Figura 111),
- edifício inteiro com adição de elementos de sombreamento e um contexto urbano hipotético.

A razão é que o modelo de um único pavimento permite o isolamento das variáveis avaliadas quando relevante para análise. Já o modelo do edifício completo representa o nível de detalhamento do processo de projeto durante as primeiras fases. Já a adição do entorno permite considerar a influência do contexto urbano nas soluções de controle da insolação no projeto baseadas em desempenho, colaborando com a compreensão da customização da solução. É

importante lembrar que o aumento da complexidade do modelo aumenta a especificidade da solução encontrada pelo algoritmo de otimização. A tabela 13 apresenta a combinação de elementos adotados para o caso-base para cada avaliação comparativa estabelecida ao longo da tese.

Tabela 14. Sistema construtivo utilizado.

<i>Identificação</i>	<i>Sistema construtivo</i>	<i>Troca térmica</i>	<i>Refletância da superfície</i>	<i>Transmitância térmica</i>	<i>Capacidade térmica</i>
<i>Parede externa</i>	Spandrell glass   0.006 Reboco   0.02 Câmara de ar   0.03 Bloco cerâmico   0.13 Reboco   0.02	sim	Ext: 0.6 Int: 0.6	2.38 W/m <sup>2</sup> K	59.5 kJ/m <sup>2</sup> K
<i>Parede interna</i>	Bloco de gesso   0.08	Adiabático	0.6	4.9 W/m <sup>2</sup> K	62.6 kJ/m <sup>2</sup> K
<i>Pisos</i>	Piso cerâmico   0.0075 Contrapiso   0.02 Concreto maciço   0.1 Poliestireno expandido   0.03	Adiabático	0.4	1.0 W/m <sup>2</sup> K	295 kJ/m <sup>2</sup> K
<i>Cobertura</i>	Piso cerâmico   0.0075 Contrapiso   0.02 Concreto maciço   0.1 Poliestireno expandido   0.03	Adiabático	Ext: 0.6 Int: 0.8	1.0 W/m <sup>2</sup> K	295 kJ/m <sup>2</sup> K

O contexto urbano é um modelo paramétrico definido com base no tamanho do terreno e uma taxa de ocupação. A altura dos edifícios circundantes e das vias é estabelecida com base em quatro parâmetros de entrada: taxa de ocupação, que define o percentual do terreno ocupado; índice de aproveitamento, que define a altura máxima; fator de variação da altura em relação à altura máxima; e largura das vias. Dessa forma, os parâmetros do modelo urbano hipotético são: 50% de área ocupada do terreno e índice de aproveitamento de 5. Para gerar rugosidade, foi aplicado um fator randômico de 20% de variação em relação ao potencial máximo. A largura das vias adotada foi de 12 metros (Figura 110).

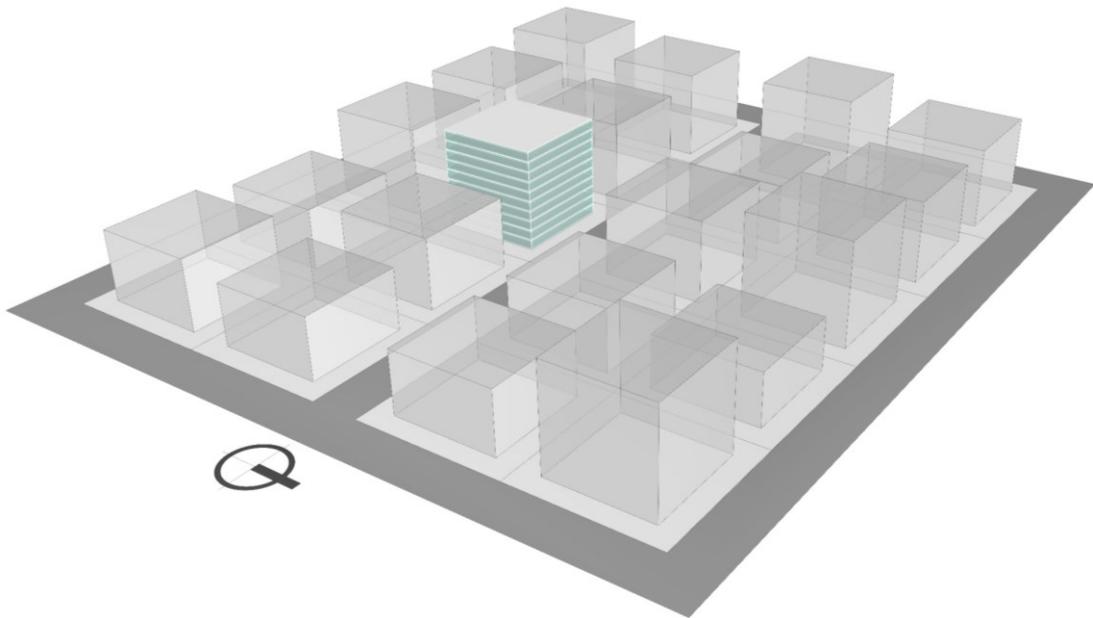


Figura 110. Caso-base com contexto urbano.

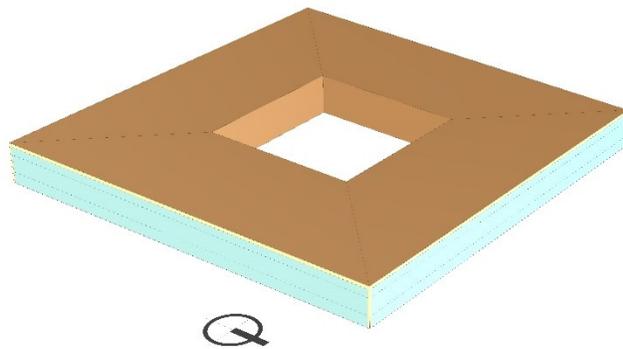


Figura 111. Caso-base com modelo de um pavimento e quatro zonas térmicas.

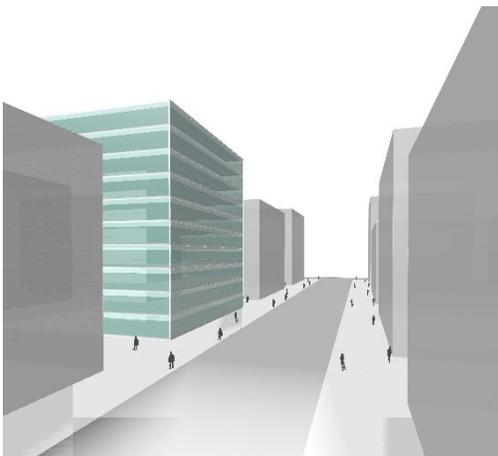


Figura 112. Caso-base

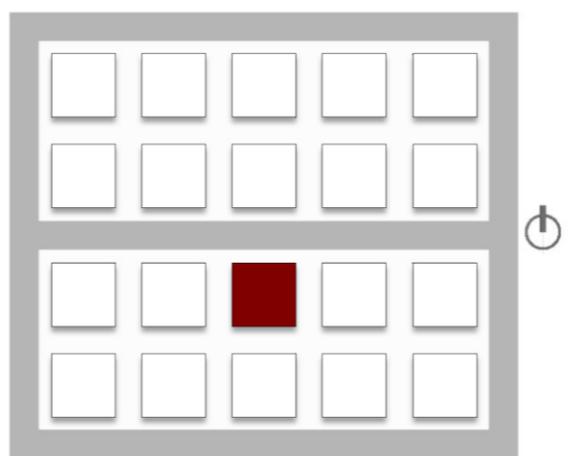


Figura 113. Vista de topo com contexto urbano.

### **3.3.2 Redução do arquivo climático**

Foi realizada a redução do arquivo climático para os dados de entrada com o objetivo de acelerar a velocidade das simulações. A estratégia adotada para essa redução foi a de amostragem de dias extraídos em períodos regulares. Para validar essa abordagem, foram estabelecidos dois conjuntos de análises: a avaliação da redução nos dados do arquivo climático e seu impacto nos dados de radiação solar e a avaliação da redução do arquivo climático nas simulações computacionais para os indicadores de desempenho selecionados.

#### 3.3.2.1 Redução do arquivo climático nos dados de radiação

Foi realizada a comparação de várias amostragens do arquivo climático com o original de maneira a entender qual amostragem mantém as características do arquivo-base. Cinco arquivos climáticos foram utilizados para as análises e cinco amostragens foram estabelecidas. Para preservar o perfil horário das simulações, as amostragens subtraem periodicamente os dados diários do arquivo climático. A amostragem se deu da seguinte maneira:

1. uso de metade dos dias do ano
2. uso de um terço dos dias do ano
3. uso de um quarto dos dias do ano
4. uso de um quinto dos dias do ano
5. uso de um sexto dos dias do ano

A comparação usou como critério de escolha o erro quadrático médio (ver anexo 1) dos dados menores que 2%. Os cinco arquivos climáticos utilizados são do tipo TMYx, referentes às cidades de Fortaleza, Salvador, Brasília, São Paulo e Porto Alegre. As amostragens levaram em consideração o período horário entre 8h e 18h. Foram analisadas três características climáticas: Radiação Direta Normal (RDN), Radiação Difusa Horizontal (RDH) e Radiação Total Horizontal (RTH).

#### 3.3.2.2 Redução do arquivo climático nas simulações computacionais

As comparações considerando o arquivo climático reduzido nas simulações computacionais utilizaram os mesmos critérios de amostragens do item anterior. Sendo os resultados comparados com simulações com o arquivo climático completo. As simulações utilizaram o método de duas fases para simular utilizando o clima de Porto Alegre e o arquivo TMYx. A comparação considerou

como critério de escolha o erro quadrático médio dos dados menor que 5%. O caso-base utilizado é o descrito no item 3.3.1 e Tabela 15. Os indicadores simulados foram: carga térmica de resfriamento para 24 horas do dia; UDI (300 a 2000 lux) para o período de 8h e 18h; e autonomia de ofuscamento espacial utilizando DGP para o período entre 8 e 18h (sDGPa40%, 5%). O grid de análise para as simulações são os mesmos relatados nos itens 3.3.3 e 3.3.4 e consideram o sétimo andar como referência.

Para as análises, elementos de sombreamento foram aplicados a fachada norte e foram combinados ao caso-base considerando avaliação paramétrica com elementos regulares. Nesse caso, como considerou um método rápido de simulação, utilizou-se inúmeras análises paramétricas que variavam os aspectos geométricos dos elementos de sombreamento tais como: ângulo, direção, largura e densidade de aletas. A análise paramétrica considerando elementos de sombreamento regulares inclui a distribuição de aletas coplanares formando brises horizontais ou verticais. A variação paramétrica é descrita na Tabela 15. Ao todo foram consideradas 90 variações de soluções de sombreamento.

*Tabela 15. Combinações utilizadas para análises paramétricas com elementos de sombreamento regulares.*

Vidro		Direção	Nº de aletas por pavimento	Ângulo (°)	Largura (m)
Tvis	FS	Vertical	1(superior a janela)	0	0.1
0.47	0.39	Horizontal	6	30	0.2
			11	60	0.3
					0.4
					0.5

### 3.3.3 Modelo de desempenho térmico

O processo de validação do modelo matemático utilizou o modelo de uma zona térmica com as características do caso-base descritas no item 3.3.1 e Tabela 17. Foi realizada uma análise comparativa entre o modelo matemático integrado ao *Radiance* com o *EnergyPlus* (utilizado como referência). A fachada considera as janelas sem elementos de sombreamento para as quatro orientações (norte, sul, leste e oeste) e vidro com transmissão visível de 0,47 e fator solar de 0.39. A análise comparativa estabeleceu o erro quadrático médio, *box-plot* e medidas de centralidade, considerando a carga térmica de resfriamento 24 horas durante todo ano, ou seja, para as 8670 horas anuais.

Para análise, os sensores foram distribuídos ao longo das quatro fachadas. A grade de sensores está localizada a uma distância de 0.02 m do vidro antes de atravessar o plano envidraçado. Foram distribuídos 80 sensores por fachada em uma grade regular de 2.5 x 2.5 m. Os dados de entrada para as simulações no EnergyPlus e modelo RTS são idênticas as descritas no item 3.2.3.1, com exceção que a carga térmica de resfriamento foi estabelecida para uma rotina de 24 horas, ou seja, o termostato foi deixado constantemente a uma temperatura de 24°C.

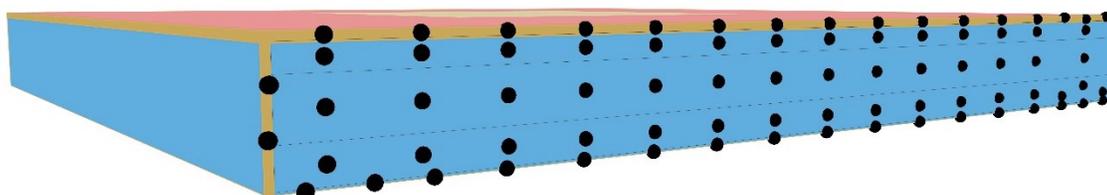


Figura 114. Grade de sensores na fachada.

### 3.3.4 Modelo de desempenho da luz natural

As ferramentas de simulação de iluminação natural amplamente validadas, geralmente utilizam métodos de raio traçado e radiosidade. Esses processos consomem tempo considerável para realizar avaliações, principalmente as que consideram todo ano (JONES; REINHART, 2017, 2019). Nos últimos anos, algumas iniciativas aparecem com intenção de reduzir este tempo, e são descritas resumidamente a seguir.

*Radiance* é a ferramenta reconhecidamente validada referência em pesquisas na área de simulação em iluminação natural. É um *Software* desenvolvido por Greg Ward no *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Já o *Daysim* é baseado no *Radiance*, mas paraleliza etapas de cálculo, visando executar análises anuais mais rápidas (JONES; REINHART, 2017). Mais recentemente iniciativas utilizaram os métodos de múltiplas fases para viabilizar simulações rápidas. Subramaniam (2018) customiza o método de duas fases de modo a operar simulações rápidas e mais confiáveis que outros métodos disponíveis. Também considerando os métodos de múltiplas fases, que o *Accelerad* adiciona velocidade ao incorporar cálculos paralelizados na GPU do computador. A intenção é reduzir tempo de simulações anuais em relação ao *Daysim* e realizar simulação estática em tempo real (JONES; REINHART, 2017). O *Accelerad* incorpora velocidade em relação ao método de duas fases descrito por Subramaniam (2018), porém requer uso de um computador com placa de vídeo dedicada de alta capacidade para operar. Ainda mais recente,

Solemma (2020) utiliza explorações experimentais feitas por Jones, 2019 para implementar o método de *path tracing* de modo a realizar simulações rápidas tendo com pressuposto, a possibilidade de interromper a simulação ao obter um certo número de raios traçados na cena analisada.

Considerando o número de iniciativas visando aumentar a velocidade de simulações de iluminação natural que ocorreram durante o percurso dessa tese, foi realizado uma comparação de dois métodos de simulação para iluminação natural considerando resultados obtidos em um software de referência amplamente validado, o *Daysim*. Os métodos avaliados são o *path tracing* e o método de duas fases. A comparação deu enfoque nos resultados para soluções estáticas de janelas representadas pelos métodos de duas fases e *path tracing*.

As análises foram realizadas considerando o sétimo andar para a fachada norte. As janelas voltadas para o sul, leste e oeste são protegidas por venezianas internas fechadas durante todo o ano, enquanto as janelas voltadas para o norte permanecem recolhidas até o topo durante todo o ano. Para as análises, foram distribuídos 492 sensores em uma grade regular (1,2 x 1,2 m) localizada no plano de trabalho voltado para o norte, a uma altura de 0,75 m. A grade foi mantida nesta posição em todas as simulações e métodos testados.

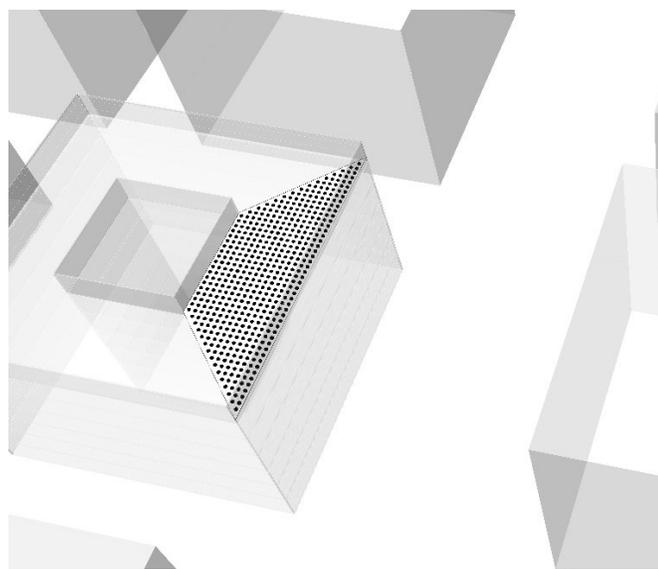


Figura 115. Grade de sensores no plano de trabalho.

A fachada norte foi equipada com elementos de sombreamento, incluindo elementos curvos modelados parametricamente e avaliados comparativamente com os métodos de simulação rápida para iluminação natural e o *Daysim*, que é um método mais demorado. Seis soluções de

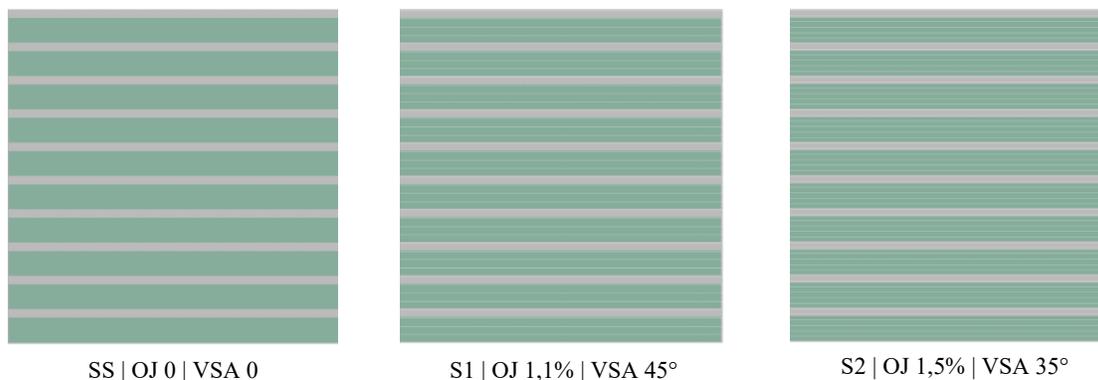
sombreamento foram consideradas na análise, cada uma associada a cinco tipos diferentes de vidro (Tabela 16). Para representar elementos com geometrias mais complexas, os elementos curvos foram modelados usando a modelagem NURBS (ver anexo 01) e convertidos em modelagem poliédrica (ver anexo 01) com elementos coplanares. A seguir, apresentamos a descrição dos elementos de sombreamento utilizados na análise.

1. uma solução sem sombreamento (SS);
2. dois brise-soleil horizontais regulares (S1, S2);
3. três brise-soleil horizontais torcidos (S3, S4, S5).

A Figura 116 descreve cada dispositivo de sombreamento e relata as porcentagens de obstruções de janela (OJ) e o ângulo vertical de sombreamento médio (AVS)<sup>3</sup>. O S1 e S2 são brises horizontais regulares com AVS fixo ao longo das aletas. Já o S3, S4 e S5 são elementos curvos com AVS variável ao longo das aletas. O S3 e S5 têm o mesmo AVS médio, mas geometrias opostas.

Tabela 16. Vidros considerados para combinação com elementos curvos.

Vidro	TVis
Vidro 01	0,696
Vidro 02	0,530
Vidro 03	0,381
Vidro 04	0,173
Vidro 05	0,071



<sup>3</sup>AVS é o ângulo formado entre dois planos na base do plano envidraçado e o dispositivo de sombreamento horizontal. O primeiro é o plano vertical na base do vidro. A segunda é formada pela extremidade mais distante da proteção solar horizontal até a base do vidro.

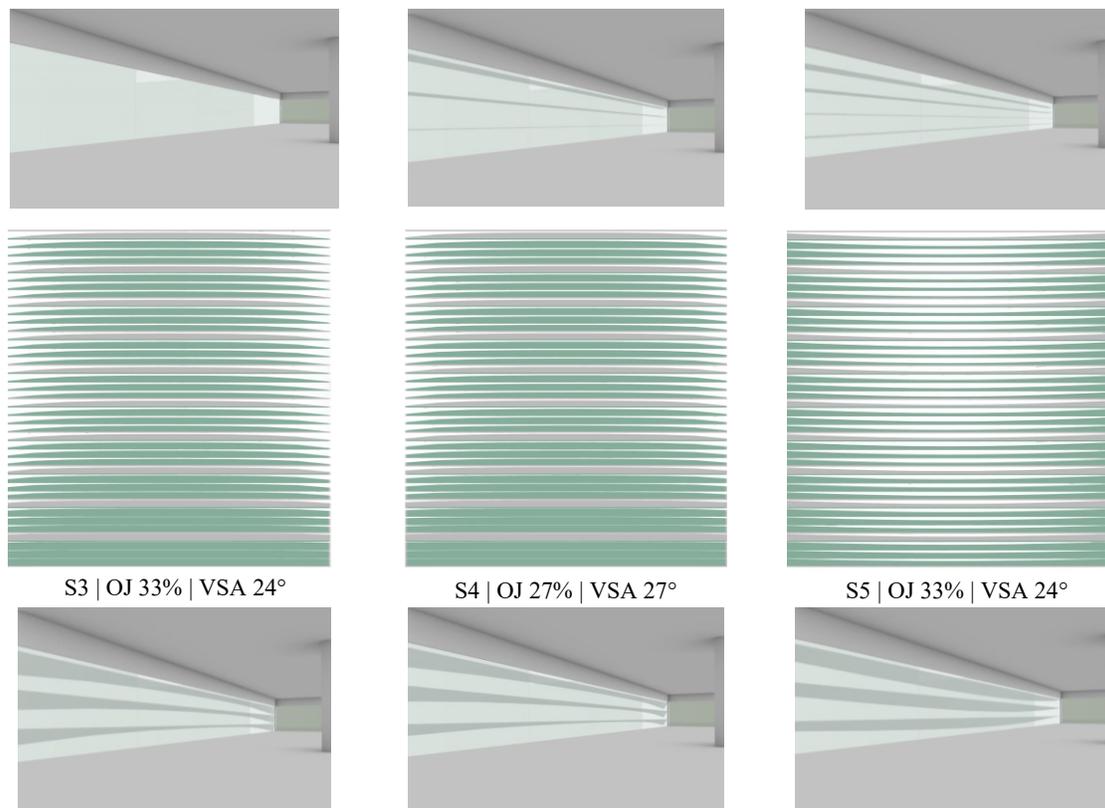


Figura 116. Soluções de dispositivos de sombreamento externos consideradas. A solução WSD não possui dispositivo de sombreamento. SD1, SD3, SD4 e SD5 tem 4 aletas por andar. SD2 tem 6 aletas, usando mais material. As soluções SD3, SD4 e SD5 possuem efeito torcido ao longo da fachada.

A tabela a seguir apresenta um resumo com as combinações de solução de controle solar e contexto urbano aplicadas nos casos-base para cada avaliação comparativa executada.

Tabela 17. Caso-base adotado por análise.

<i>Avaliação</i>	<i>Caso base</i>	<i>Grid de análise</i>	<i>Contexto urbano</i>	<i>Vidro</i>	<i>Elementos de sombreamento</i>
<b>Validação do modelo térmico</b>	Um pavimento com quatro zonas térmicas	Sétimo pavimento, distribuído ao longo da fachada a cada 2.5 m	Não	Um vidro	Sem elementos de sombreamento
<b>Validação do modelo de iluminação natural</b>	Modelo completo	Sétimo pavimento, distribuído no plano de trabalho (h=0,75) na porção sul a cada 1.2 m	Sim	Seis variações	Seis combinações
<b>Validação da redução dos arquivos climáticos</b>	Modelo completo	Combinação das opções	Sim	Um vidro	90 combinações

# Capítulo 4

## Resultados

O objetivo da tese é desenvolver processo analítico integrado a modelagem e indicadores multicritério de desempenho térmico visual e luminoso de elementos de controle solar para processos de geração da forma guiados por desempenho. Para alcançar esse objetivo, foram realizados diversos procedimentos cujo resultados são descritos a seguir. Esta etapa está dividida em três partes. Inicia-se com a seção 4.1, que aborda a modelagem de fachadas, com subseções específicas sobre modelagem de padrões, modelagem de janelas e modelagem dos elementos de sombreamento. Em seguida, na seção 4.2, são apresentados os resultados do experimento de otimização, com subseções que discutem o tempo da otimização e a análise dos dados na fronteira de pareto e discussões. Por fim, na seção 4.3, encontra-se a validação do modelo de otimização, com subseções sobre o arquivo climático e a seleção dos métodos de simulação.

## 4.1 Modelagem de fachadas

A flexibilidade é um aspecto importante para modelos 3D paramétricos no contexto do projeto guiado pelo desempenho. Um modelo flexível permite que mudanças variadas e mudanças finas sejam feitas nos parâmetros de projeto, possibilitando a exploração de uma ampla gama de opções de soluções, permitindo que as decisões de projeto sejam baseadas em bons resultados encontrados na otimização. Em outras palavras, a capacidade de alterar amplamente os parâmetros de projeto permite que os projetistas testem diferentes soluções e avaliem as compensações entre vários critérios de desempenho. No geral, a flexibilidade no modelo 3D de fachadas paramétricas é essencial para um processo de projeto eficiente baseado em desempenho. Neste sentido, esta seção apresenta as soluções desta pesquisa para estabelecer modelos flexíveis para otimizações baseadas em desempenho, e está dividida em três partes:

1. Modelagem de padrões, que apresenta componentes para estabelecer padrões flexíveis e variados baseados em modelagem matemática;
2. Modelagem de janelas, que apresenta componentes com parâmetros de modelagem relevantes para criar variações de soluções para otimização de janelas;
3. Modelagem de elementos de sombreamento, que apresenta estratégias para criar variações na modelagem de elementos de sombreamento, permitindo uma ampla gama de combinações de soluções possíveis em um único modelo.

### 4.1.1 Modelagem de padrões

Visando facilitar a criação de padrões para processos de otimização metaheurísticos, como os algoritmos genéticos em modelagem paramétrica, foram estabelecidos dois componentes no *Grasshopper*. Ambos foram elaborados em *Python* (ghpython) e são baseados em equações paramétricas para estabelecer os padrões ao longo de superfícies 3D (ver anexo 1). Um dos componentes é inspirado em padrões harmônicos e o outro é inspirado na estratégia de pontos atratores (Figura 117). Esses componentes não apenas estabelecem a geração dos padrões, mas também possibilitam manipular o comportamento da progressão numérica entre os valores mínimos e máximos do domínio estabelecido, permitindo realizar um ajuste fino na otimização.

Por exemplo, no princípio do ponto atrator geralmente aplicado em Grasshopper, o valor final é diretamente proporcional à distância do sistema de coordenadas e um ponto de referência (ponto atrator). Nessa estratégia, geralmente, a progressão se dá de forma linear, ou seja os valores variam de forma fixa entre o menor e o maior número. Com o componente estabelecido no *Grasshopper* nesta pesquisa, é possível variar a progressão que é exponencial, tornando-a mais ou menos acentuada, aumentando as possibilidades de ajuste fino da otimização. Dessa forma, os componentes inspirados em padrões harmônicos e pontos atratores possibilitam uma maior flexibilidade na criação e ajuste de padrões para otimização metaheurística, tornando o processo mais eficiente e efetivo na busca de soluções para problemas complexos de modelagem paramétrica.

Os padrões estabelecidos por processos matemáticos para modelagem paramétrica de fachadas facilitam a realização de operações e combinações com múltiplas camadas de padrões, ampliando as possibilidades na obtenção de soluções baseadas em desempenho. Ou seja, é possível criar mais de um padrão, desde os mais simples até os mais complexos, e combiná-los ou sobrepô-los de forma a atender às necessidades específicas de cada projeto. Além disso, a representação matemática dos padrões facilita a automação dos processos, compatível com o processo de otimização.

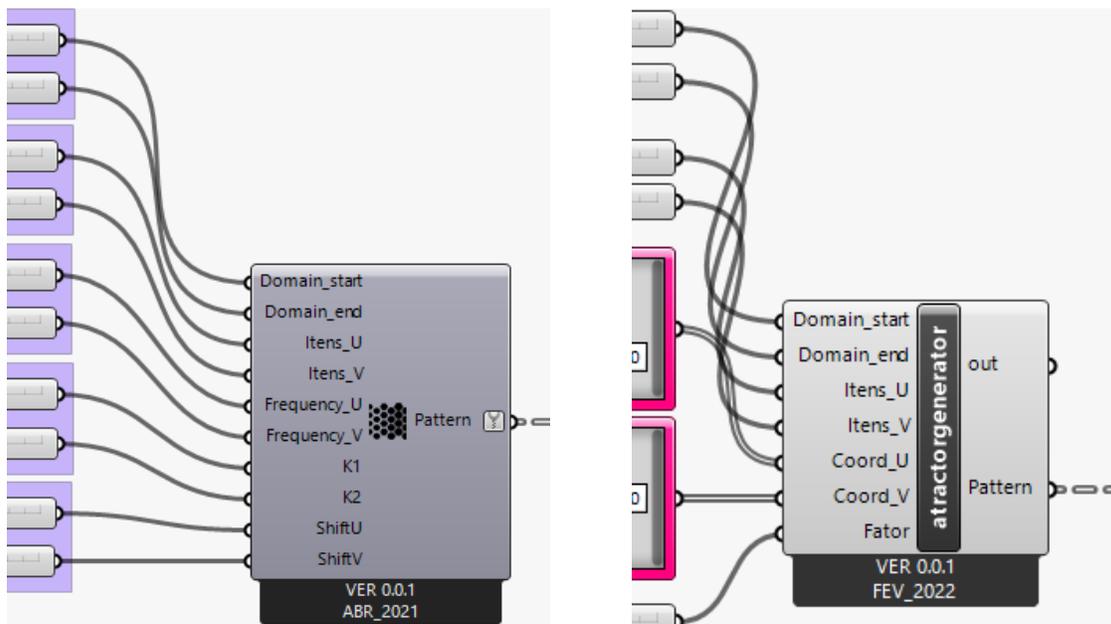


Figura 117. Componentes elaborados em ghpypthon. A esquerda estabelece padrões harmônicos e a direita, estabelece padrões não harmônicos inspirado na estratégia de pontos atratores.

O primeiro componente considera padrões harmônicos baseados em senoides. Os padrões harmônicos baseados em senoidais são uma classe de padrões matemáticos que se repetem periodicamente ao longo do sistema. São descritos por equações paramétricas que usam funções trigonométricas, como seno e cosseno, para modelar a variação da variável dependente em relação a frequência. Um exemplo de padrão harmônico baseado em senoidal é a onda senoidal simples. O componente, por sua vez, utiliza uma equação paramétrica baseada na função seno que gera resultados em uma matriz, permitindo a manipulação dos parâmetros principais, tais como: amplitude, frequência, posicionamento do padrão e o domínio de números adequado ao processo paramétrico. As coordenadas  $u$  e  $v$ , são descritas pela equação:

$$f(u, v) = (|\sin(\text{list}_u * \pi)| + t_s)^{2k_1} * (|\sin(\text{list}_v * \pi)| + t_s)^{2k_2} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde,

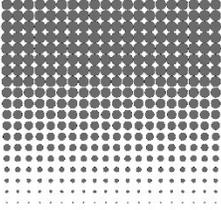
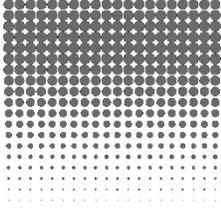
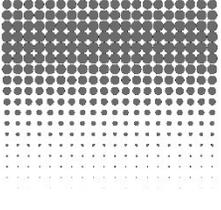
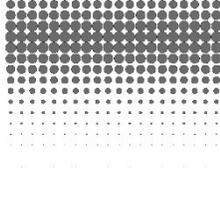
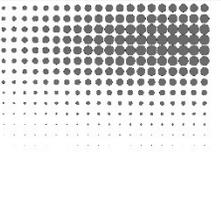
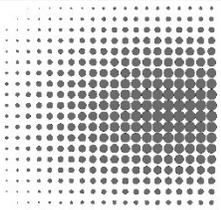
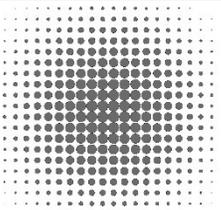
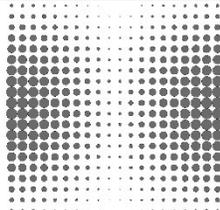
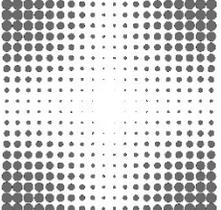
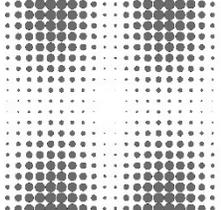
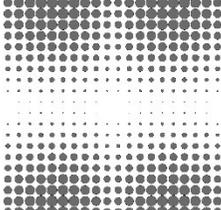
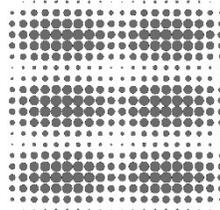
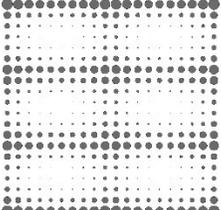
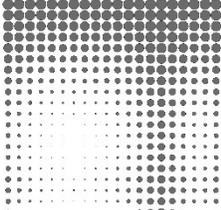
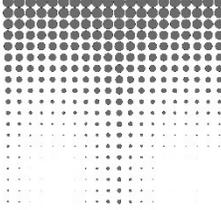
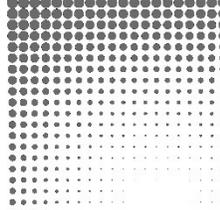
$\text{list}_u$  é uma lista de números com quantidade de itens de acordo com o eixo U. O domínio varia de 0 a um número que represente a frequência no eixo U.  $\text{list}_v$  é uma lista de números com quantidade de itens de acordo com o eixo V. O domínio varia de 0 a um número que represente a frequência no eixo V.  $t_s$  é uma constante de transição e é igual a 0,5.  $k_1$  é a Constante para amplitude no eixo U.  $k_2$  é a constante para amplitude no eixo V.

A saída (*output*) é uma matriz em forma de árvore de dados (*datatree*) com um padrão numérico. Como dito anteriormente, além do cálculo da matriz com o padrão de acordo com a equação 16, duas outras ações são estabelecidas pelo componente: o deslocamento do padrão para mover a solução ao longo do eixo U ou V e o mapeamento do padrão para o domínio numérico quadrático compatível com a ação estabelecida para a fachada paramétrica. A Tabela 18 mostra 20 soluções estabelecidas aplicadas em um *array* de círculos (20 und x 20 und) com raios variados. A primeira linha exemplifica soluções com as mesmas frequências, porém com critérios (pesos) de distribuição distintos entre o menor valor e o maior valor da matriz no eixo  $v$ . As opções de variações são infinitas. O componente tem como entradas:

1. Número de unidades no eixo U (int).
2. Número da unidade no eixo V (int).
3. Número inicial do domínio final (float).
4. Número final do domínio final (float).
5. Número de constante K1 (flutuação).
6. Número de constante K2 (flutuação).
7. Frequência no eixo U (flutuação).

8. Frequência no eixo V (flutuação).
9. Número que representa o deslocamento no eixo U (int).

Tabela 18. Exemplo de aplicação dos padrões harmônicos aplicados a um array de círculos.

 <p>Frequência em U: 0 Frequência em V: 0.6 Fator progressão em U: 0 Fator progressão em V: 0.2 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>	 <p>Frequência em U: 0 Frequência em V: 0.6 Fator progressão em U: 0 Fator progressão em V: 0.9 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>	 <p>Frequência em U: 0 Frequência em V: 0.6 Fator progressão em U: 0 Fator progressão em V: 2 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>	 <p>Frequência em U: 0 Frequência em V: 0.6 Fator progressão em U: 0 Fator progressão em V: 4.1 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>
 <p>Frequência em U: 0.6 Frequência em V: 0.6 Fator progressão em U: 0.4 Fator progressão em V: 4.1 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>	 <p>Frequência em U: 0.6 Frequência em V: 1 Fator progressão em U: 0.4 Fator progressão em V: 0.4 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>	 <p>Frequência em U: 1 Frequência em V: 1 Fator progressão em U: 0.4 Fator progressão em V: 0.4 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>	 <p>Frequência em U: 1 Frequência em V: 1 Fator progressão em U: 0.4 Fator progressão em V: 0.4 Deslocamento em U: 50 Deslocamento em V: 0</p>
 <p>Frequência em U: 1 Frequência em V: 1 Fator progressão em U: 0.4 Fator progressão em V: 0.4 Deslocamento em U: 50 Deslocamento em V: 50</p>	 <p>Frequência em U: 2 Frequência em V: 1 Fator progressão em U: 0.4 Fator progressão em V: 0.4 Deslocamento em U: 50 Deslocamento em V: 50</p>	 <p>Frequência em U: 2 Frequência em V: 1 Fator progressão em U: 0.1 Fator progressão em V: 0.4 Deslocamento em U: 50 Deslocamento em V: 50</p>	 <p>Frequência em U: 2 Frequência em V: 3 Fator progressão em U: 0.1 Fator progressão em V: 0.2 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>
 <p>Frequência em U: 2 Frequência em V: 3 Fator progressão em U: 0.1 Fator progressão em V: 0.2 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 0</p>	 <p>Frequência em U: 1.2 Frequência em V: 0.6 Fator progressão em U: 0.5 Fator progressão em V: 2 Deslocamento em U: 11 Deslocamento em V: 89</p>	 <p>Frequência em U: 1.6 Frequência em V: 0.5 Fator progressão em U: 0.2 Fator progressão em V: 1.5 Deslocamento em U: 11 Deslocamento em V: 89</p>	 <p>Frequência em U: 0.7 Frequência em V: 0.5 Fator progressão em U: 0.3 Fator progressão em V: 0.7 Deslocamento em U: 0 Deslocamento em V: 100</p>

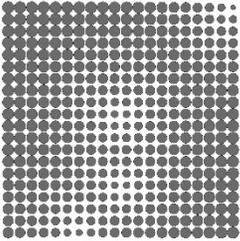
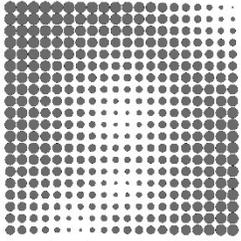
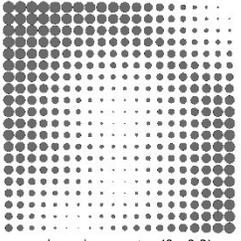
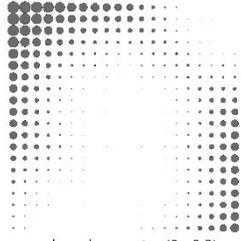
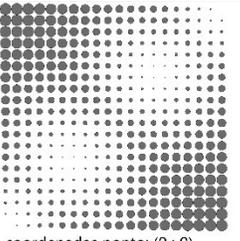
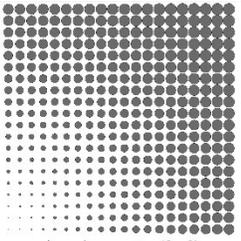
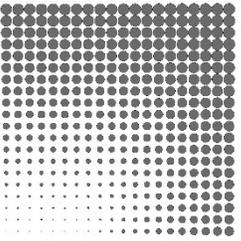
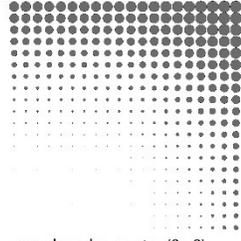
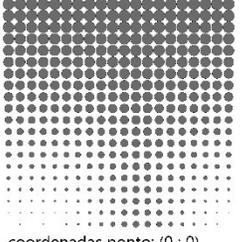
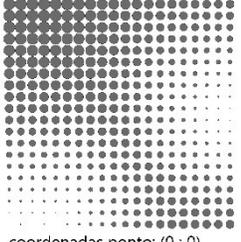
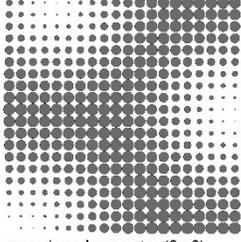
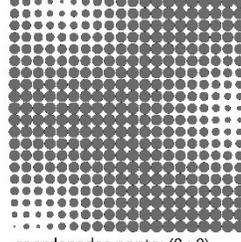
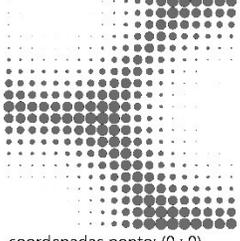
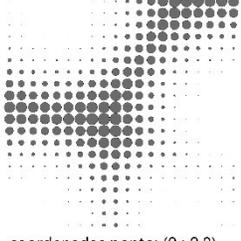
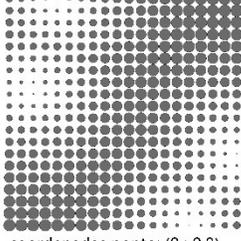
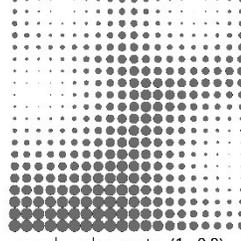
O segundo componente estabelece matematicamente um comportamento semelhante a estratégia de múltiplos pontos atratores, e permite também a variação do comportamento da progressão entre o menor valor e o maior valor do domínio numérico. O componente dispensa a necessidade de usar geometrias secundárias reduzindo o tamanho do processo de programação visual. Diferente do componente anterior, essa estratégia estabelece soluções não-harmônicas, onde a repetição deixa de ser necessariamente uma característica. O modelo matemático também se baseia em trigonometria para estabelecer a relação entre a matriz numérica e as coordenadas relativas que representam pontos atratores. As coordenadas são relativas, pois os valores de entrada variam de 0 a 1, onde 0 representa uma posição no início do sistema de matriz, 0,5 a metade e o 1 se posiciona no final do sistema. As opções de geração de padrões também são infinitas. O componente tem como entradas:

1. Número de unidades no eixo U (int).
2. Número da unidade no eixo V (int).
3. Número inicial do domínio numérico (float).
4. Número final do domínio numérico (float).
5. Gene pool em U (múltiplos slides numéricos) que representam as coordenadas relativas dos pontos atratores no eixo U. Deve variar entre 0 e 1. Sendo que o número de pontos atratores será igual a quantidade de slides do gene pool (float). O componente permite quantos pontos atratores forem desejados.
6. Gene pool em V (múltiplos slides numéricos) que representam as coordenadas relativas dos pontos atratores no eixo V. Deve variar entre 0 e 1. Sendo que a quantidade de slides do gene pool deve ser idêntica à anterior (float).
7. Fator que representa o comportamento da progressão entre o menor valor e o maior valor (float).

É possível utilizar infinitos pontos atratores. A quantidade de pontos é igual a quantidade de slides de *input* nas entradas “Coord\_U” e “Coord\_V”, que representam as coordenadas relativas dos pontos. O anexo 4 apresenta *QR code* para *download* dos componentes, que permitem acesso ao código-fonte em *Ghpython*. A Tabela 19 demonstra 20 soluções de padrões utilizando 4 pontos atratores sendo que a primeira linha mostra as mesmas posições para os pontos atratores, porém

com progressões distintas entre o menor valor e o maior valor da matriz. O padrão está aplicado a um array de círculos onde os valores estão aplicados aos raios dos círculos.

Tabela 19. Exemplo de aplicação dos padrões não harmônicos aplicados a um array de círculos.

 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0.3) coordenadas ponto: (0.2 ; 0.5) coordenadas ponto: (0.5 ; 0.5) coordenadas ponto: (1 ; 1) Fator progressão: 0.2</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0.3) coordenadas ponto: (0.2 ; 0.5) coordenadas ponto: (0.5 ; 0.5) coordenadas ponto: (1 ; 1) Fator progressão: 0.5</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0.3) coordenadas ponto: (0.2 ; 0.5) coordenadas ponto: (0.5 ; 0.5) coordenadas ponto: (1 ; 1) Fator progressão: 1</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0.3) coordenadas ponto: (0.2 ; 0.5) coordenadas ponto: (0.5 ; 0.5) coordenadas ponto: (1 ; 1) Fator progressão: 4</p>
 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0.3 ; 0.3) coordenadas ponto: (0.7 ; 0.7) coordenadas ponto: (1 ; 1) Fator progressão: 1</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0) Fator progressão: 1</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (0 ; 0.2) coordenadas ponto: (0 ; 0.3) Fator progressão: 1</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (0 ; 0.2) coordenadas ponto: (0 ; 0.3) Fator progressão: 4</p>
 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (0 ; 0.2) coordenadas ponto: (0 ; 1) Fator progressão: 1</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (0 ; 0.2) coordenadas ponto: (0.5 ; 1) Fator progressão: 1</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (1 ; 0.2) coordenadas ponto: (0.5 ; 1) Fator progressão: 1</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (1 ; 0.2) coordenadas ponto: (0.5 ; 1) Fator progressão: 0.4</p>
 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (1 ; 0.2) coordenadas ponto: (0.5 ; 1) Fator progressão: 5</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0.8) coordenadas ponto: (0 ; 0.1) coordenadas ponto: (1 ; 0.2) coordenadas ponto: (0.5 ; 1) Fator progressão: 5</p>	 <p>coordenadas ponto: (0 ; 0.8) coordenadas ponto: (0.6 ; 0.1) coordenadas ponto: (1 ; 0.2) coordenadas ponto: (0.3 ; 1) Fator progressão: 0.6</p>	 <p>coordenadas ponto: (1 ; 0.8) coordenadas ponto: (0.6 ; 0.1) coordenadas ponto: (1 ; 0.2) coordenadas ponto: (0.3 ; 1) Fator progressão: 1.3</p>

Os modelos matemáticos facilitam sobreposição e operações entre diferentes padrões, e podem ser usados para gerar combinações que incluem aplicação de variações paramétricas em diferentes camadas da modelagem, ou uso de operações matemáticas entre padrões. A Figura 118 exemplifica uma possibilidade de operação matemática. O primeiro padrão responderia a questões de visibilidade e privacidade, e o segundo padrão responderia às necessidades de sombreamento. A soma dos dois traz uma resposta complexa que integraria ambas as discussões. A Figura 119 exemplifica a aplicação em um elemento de sombreamento composto por brises horizontais. O padrão resultante é aplicado para gerar ângulos de rotação das aletas. É possível utilizar em uma variedade de situações na modelagem de fachadas, seja para manipular elementos de sombreamento de forma paramétrica, seja para manipular janelas ou realizar impressões em vidros.



Figura 118. Soma de dois padrões, estabelecendo uma nova solução.

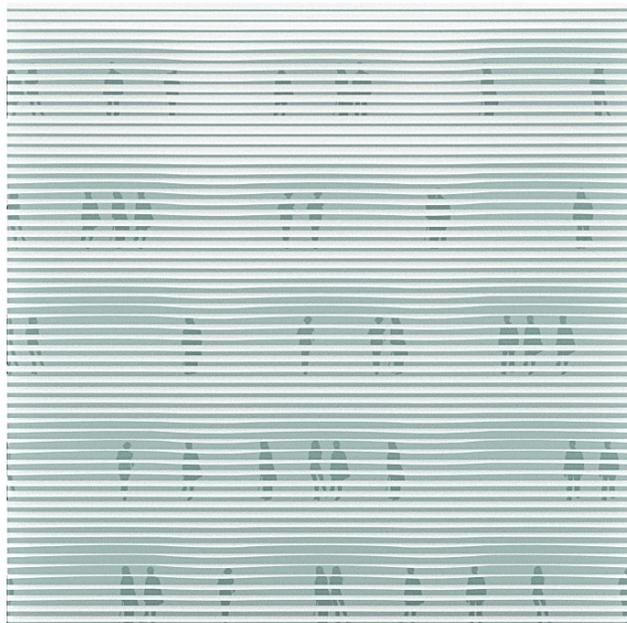


Figura 119. Aplicação similar em um brise horizontal curvo.

Em conclusão, os componentes descritos são relevantes porque fornecem uma abordagem matemática para a geração de padrões harmônicos e não-harmônicos, baseados em senoidais e em múltiplos pontos atratores, respectivamente. Esses componentes possibilitam a manipulação de diversos parâmetros, tais como amplitude, frequência, posicionamento e característica da progressão, a fim de gerar soluções matriciais numéricas flexíveis que possibilitam ampla variação e ajuste fino. Além disso, eles reduzem a complexidade do processo de programação visual, uma vez que permitem a variação do comportamento dessas soluções matematicamente sem a necessidade de modelar geometrias secundárias. De maneira geral, os componentes descritos podem ser inspiração para o desenvolvimento de outros similares para aplicação em arquitetura, engenharia e design.

#### **4.1.2 Modelagem de janelas**

O componente de modelagem paramétrica das janelas é uma ferramenta importante para o processo de PGD, pois permite, zonear, gerar variações de vidros e personalizar as características da janela de acordo com as necessidades do projeto. O componente estabelecido inclui uma representação da janela na parede, baseada na razão de abertura de vidro (RAV), que pode ser dividida em três áreas: superior, intermediária e inferior. Isso possibilita o uso de diferentes tipos de vidro em cada área, permitindo customizar soluções, por exemplo: é possível maximizar a entrada de luz usando um vidro mais transparente na área superior, enquanto se controla a entrada de calor nas áreas intermediária e inferior, ou configurar combinações com peitoril envidraçado ou opaco. Ao utilizar esse componente, é possível realizar otimizações de forma mais flexível também para variação de características geométricas e óticas das janelas. Isso permite que as simulações sejam realizadas com maiores opções possíveis, contribuindo para a obtenção de soluções otimizadas representativas.

O componente da janela foi desenvolvido utilizando o *Grasshopper* e permite ajustar diversos parâmetros, incluindo a altura do peitoril, a altura da janela intermediária e a altura da bandeira (janela superior), bem como definir se o peitoril é envidraçado ou não. Além disso, é possível escolher o percentual de área de abertura da janela (RAV) de acordo com as necessidades do projeto. A Figura 120 mostra a aparência do componente e exemplifica duas situações: uma em que a combinação de abertura é possível e outra onde a combinação de parâmetros não atende o

RAV requerido. Nessas situações o componente não gera a geometria final e apresenta uma mensagem de erro. Já a Figura 121 demonstra 6 combinações de resultados e os parâmetros de entrada utilizados para uma fachada de 3.5 x 3.7 metros. O componente tem como entradas:

1. Superfície da fachada (geometria).
2. Razão de abertura de vidro – RAV (float).
3. Largura da fachada (float).
4. Altura do piso (float).
5. Altura da janela intermediária (float).
6. Altura da bandeira (janela superior) (float).
7. Booleano para definir se o peitoril é envidraçado ou não (booleano).

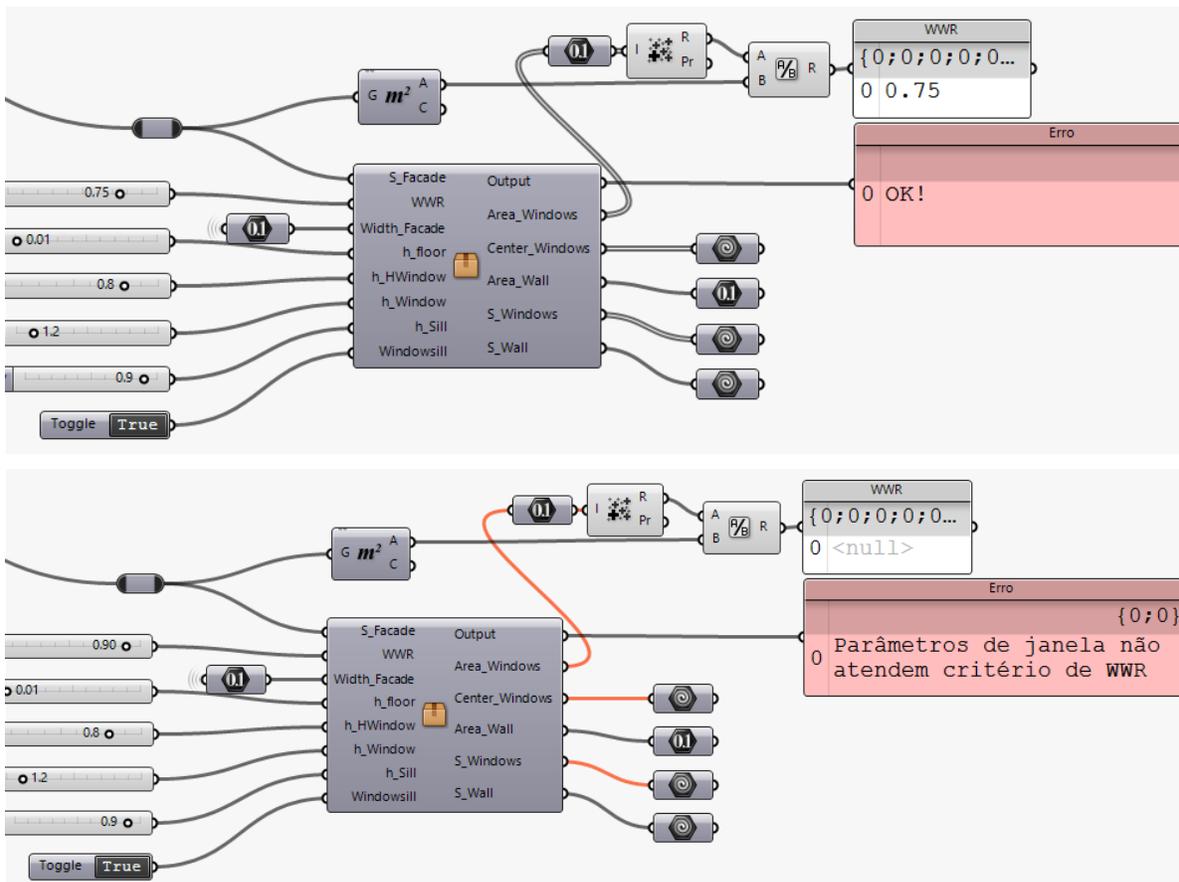
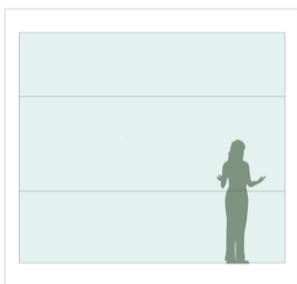
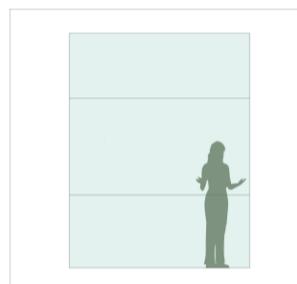


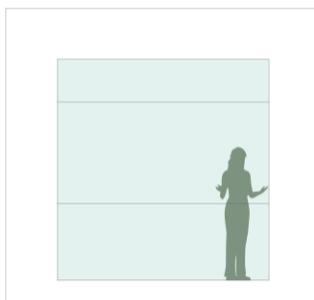
Figura 120. Componente estabelecido para modelagem de janelas.



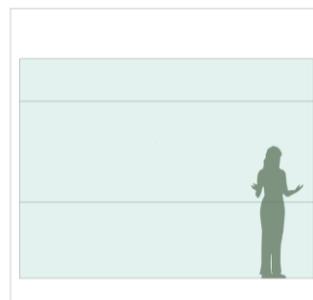
Paft 0.75  
 h piso 0.3m  
 h peitoril 0.9m  
 h janela 1.2m  
 h bandeira 0.8m  
 Com peitoril envidraçado



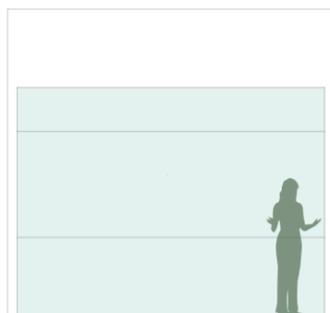
Paft 0.5  
 h piso 0.3m  
 h peitoril 0.9m  
 h janela 1.2m  
 h bandeira 0.8m  
 Com peitoril envidraçado



Paft 0.5  
 h piso 0.3m  
 h peitoril 0.9m  
 h janela 1.2m  
 h bandeira 0.5m  
 Com peitoril envidraçado



Paft 0.7  
 h piso 0.3m  
 h peitoril 0.9m  
 h janela 1.2m  
 h bandeira 0.5m  
 Com peitoril envidraçado



Paft 0.7  
 h piso 0.01m  
 h peitoril 0.9m  
 h janela 1.2m  
 h bandeira 0.5m  
 Com peitoril envidraçado



Paft 0.45  
 h piso 0.01m  
 h peitoril 0.9m  
 h janela 1.2m  
 h bandeira 0.5m  
 Sem peitoril envidraçado

Figura 121. Exemplos de soluções estabelecidas com componente de modelagem de janelas.

### 4.1.3 Modelagem dos elementos de sombreamento

Foram estabelecidos três componentes de modelagem para elementos de sombreamento: o primeiro, que gera brises paralelos com possibilidade de implementar aletas torcidas (Figura 122a). O segundo, que gera brises modulares intertravados (Figura 122b). Terceiro, um componente que gera brises de largura variável (Figura 122c). Os componentes permitem gerar diferentes ângulos de sombreamento verticais e horizontais, sendo que o primeiro e o terceiro componentes permitem rotação do sistema de aletas em relação a fachada, gerando elementos verticais, inclinados ou horizontais. A ampla variação em cada componente visa atender necessidades específicas de cada projeto. O segundo componente é modulado em relação a fachada e permite aberturas horizontais, ou verticais. Em todos, é possível aplicar diferentes densidades de aletas, larguras e impressão dos padrões paramétricos, ampliando a flexibilidade na obtenção de soluções complexas e customizadas.

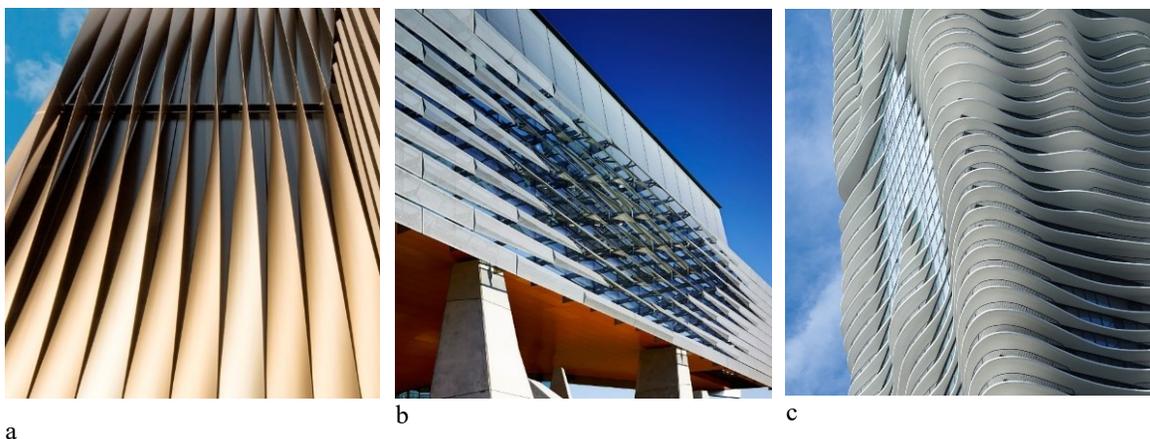


Figura 122. Exemplo de soluções passíveis de serem modeladas com os três componentes estabelecidos.

Os dados de entrada comuns aos três componentes são a superfície geradora da fachada, os valores do padrão paramétrico que podem representar ângulos de abertura ou as larguras do elemento de sombreamento dependendo do componente. Além disso, é solicitado o número de aletas por distância e uma distância de referência.

O primeiro e o terceiro componentes também solicitam um eixo de rotação, que pode ser o vetor normal da fachada, bem como um ângulo de rotação do sistema de brises em relação à fachada. Além disso, adicionalmente, o primeiro componente solicita a largura das aletas. Os dados de saída são três: o sistema de pontos de controle dos elementos de sombreamento onde os valores do padrão

são aplicados, os valores finais do padrão de acordo com o sistema de sombreamento e a geometria final dos elementos de sombreamento (Figura 123).

O sistema de pontos de controle dos elementos de sombreamento é criado independentemente do projeto do padrão paramétrico, sendo os valores finais ponderados de acordo com a quantidade de pontos. Isso permite que a matriz do padrão paramétrico seja mantida mesmo com variações na densidade, distribuição do grid e geometria dos elementos de sombreamento. Isso evita a necessidade de reprocessar o gerador de padrões sempre que ocorrerem mudanças nos elementos de sombreamento.

Os pontos de controle da modelagem dos elementos de sombreamento recebem valores ponderados pela distância do sistema UV dos padrões, o que permite ajustar a densidade dos elementos de sombreamento de acordo com a resolução da matriz do padrão. Dessa forma, os elementos de sombreamento podem ser posicionados de maneira independente em relação ao padrão mesmo quando a inclinação das aletas varia em relação a fachada. (Figura 124).

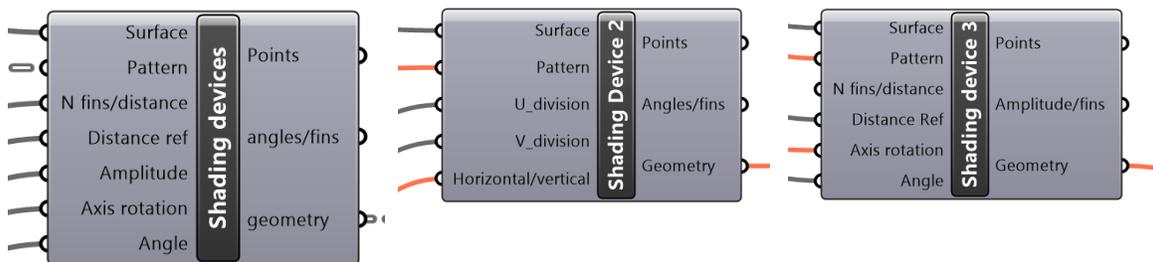


Figura 123. Componentes estabelecidos em Grasshopper para modelagem de elementos de sombreamento. Componente 1 (esquerda), componente 2 e componente 3 (direita).

Os componentes que estabelecem os elementos de sombreamento permitem a automação dos processos para otimização, resultando em maior eficiência. Esses componentes oferecem grande flexibilidade para personalizar os elementos de sombreamento de acordo com as necessidades do projeto. A lógica de modelagem é estabelecida conforme o diagrama apresentado na Figura 124, que deve ser seguido, caso deseje-se elaborar outro sistema paramétrico de elemento de sombreamento. Os três componentes apresentados não têm a intenção de serem exaustivos em relação às possibilidades de modelagem paramétrica de elementos de sombreamento, mas permitem uma ampla gama de soluções possíveis. A Figura 125 exemplifica o uso dos componentes estabelecidos e mostra o *script* no *Grasshopper* do modelo de brise horizontal com dois padrões combinados apresentado na Figura 119.

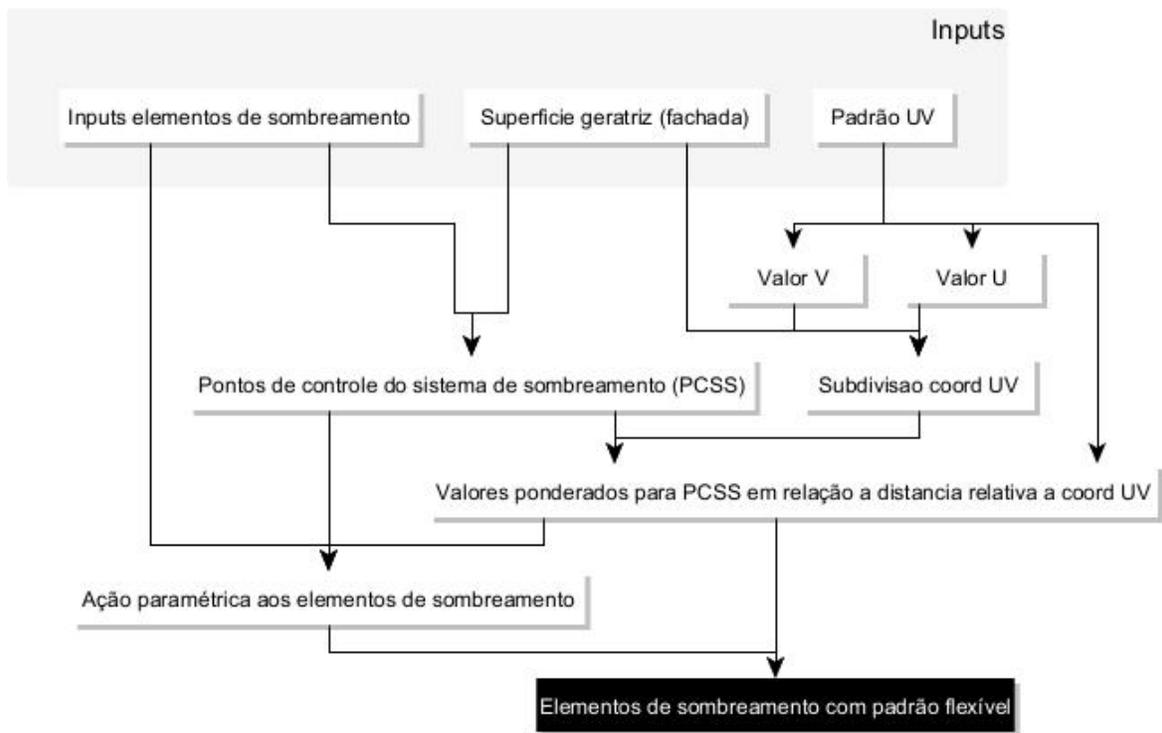


Figura 124. Diagrama mostrando lógica para aplicação dos padrões a modelagem de elementos de sombreamento.

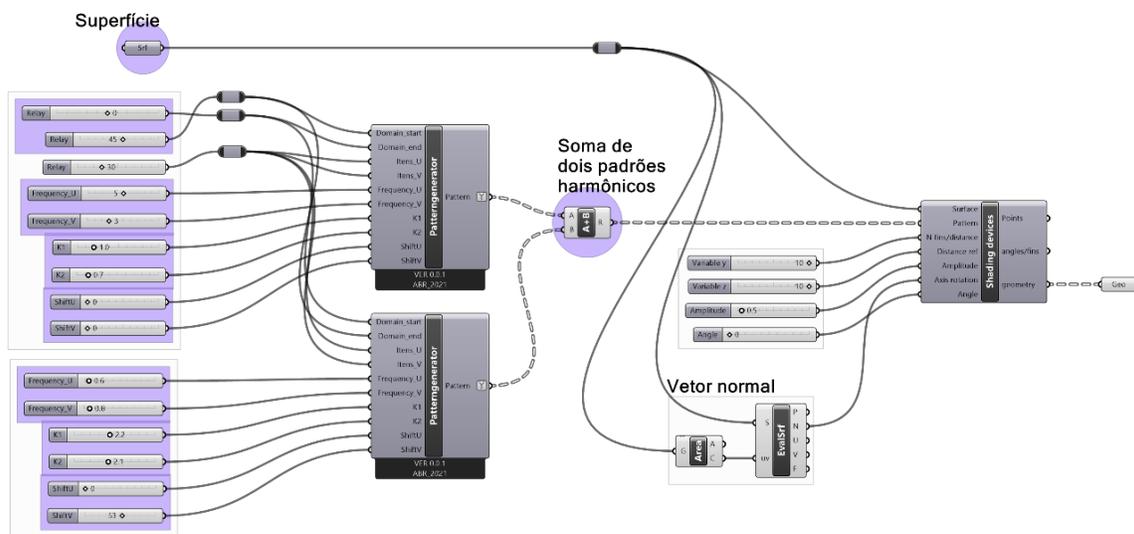
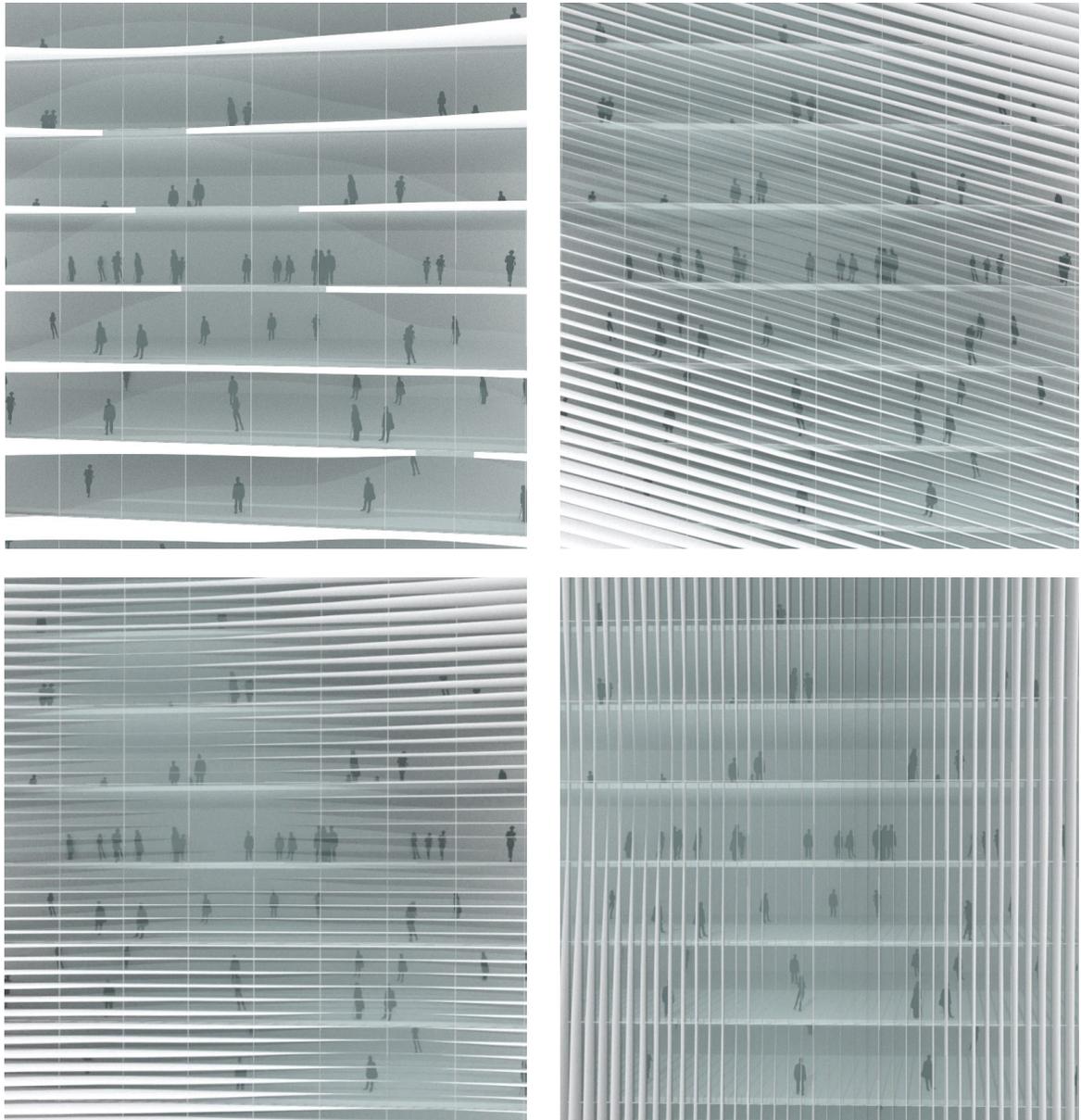


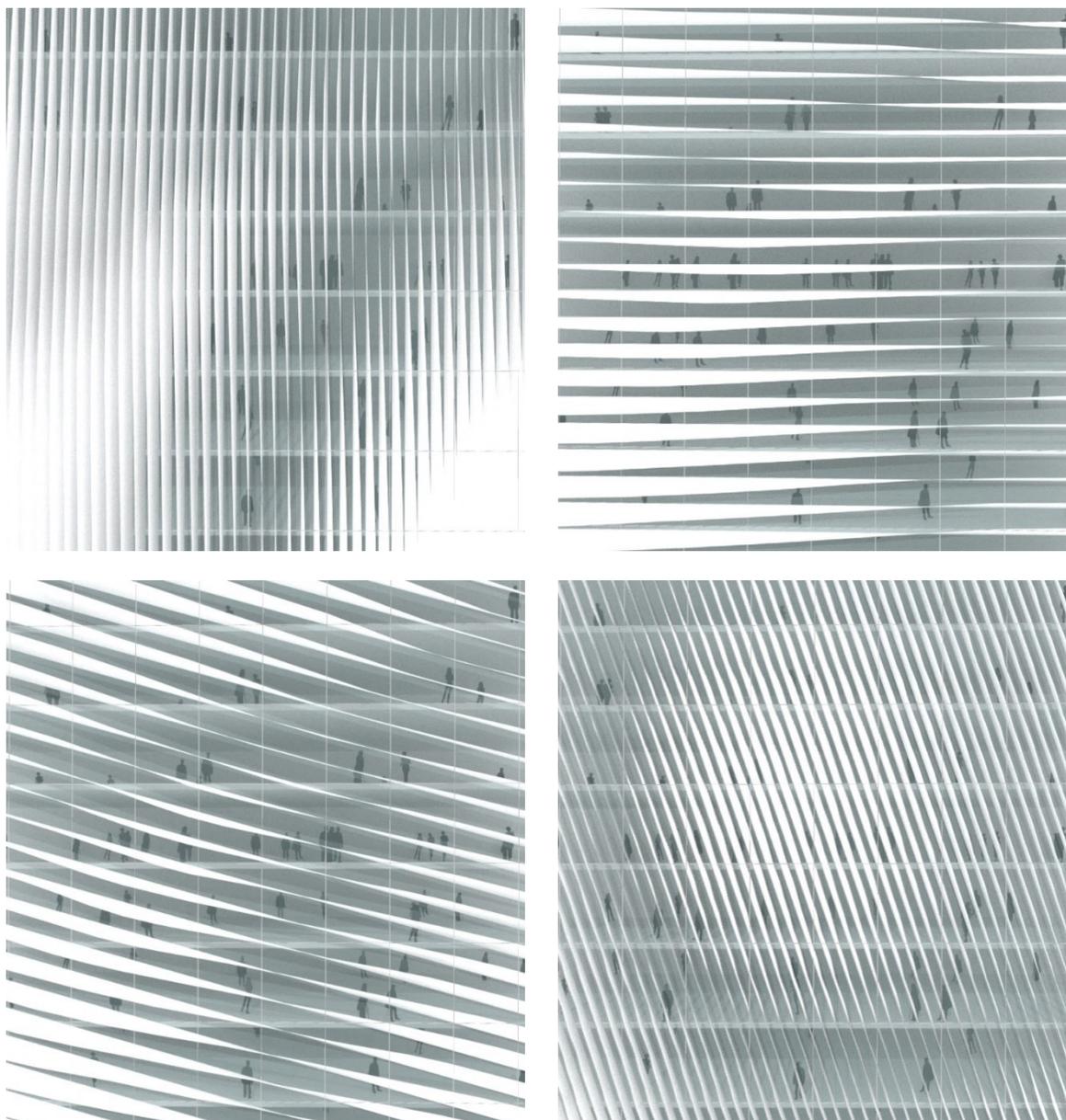
Figura 125. Script exemplificando a lógica de aplicação da soma de dois padrões harmônicos combinados à modelagem de elementos de sombreamento apresentado na figura 119.

Em resumo, os componentes de modelagem para elementos de sombreamento permitem a criação de soluções personalizadas para cada projeto. Incluindo customização de diferentes ângulos de sombreamento, densidades de aletas, larguras e direções (vertical, inclinados e horizontais).

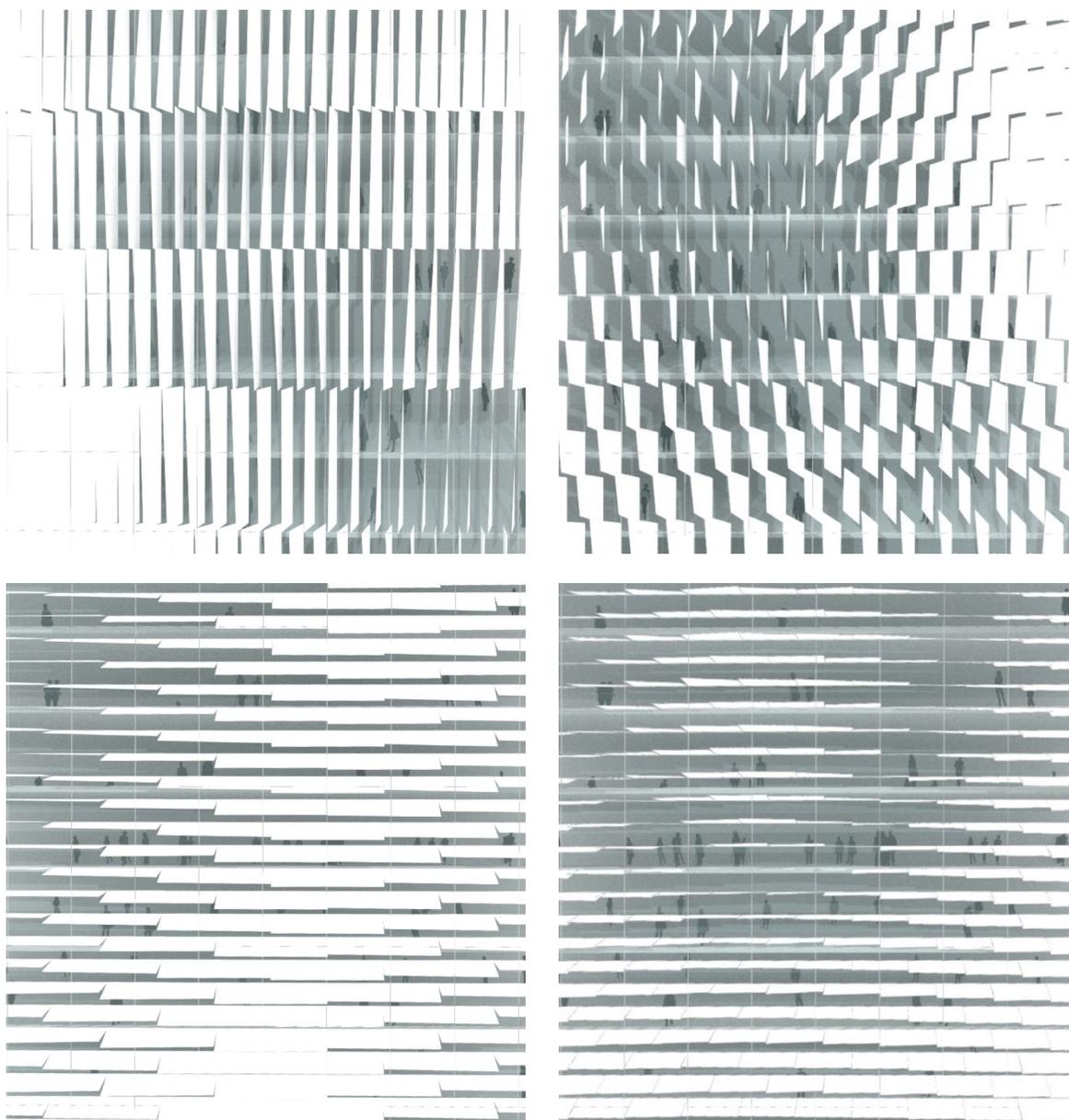
Podem gerar elementos regulares e uniformes, ou possibilitam impressão de padrões paramétricos. Os componentes abarcam parâmetros relevantes, gerando um sistema flexível para processos de otimização. As Figura 126, Figura 127 e Figura 128 demonstram resultados da aplicação dos componentes exemplificando quatro soluções para cada componente apresentado. O anexo 04 desta pesquisa dá acesso a detalhes de cada componente e apresenta *QR code* para download.



*Figura 126. Exemplos de resultados para o componente que gera soluções com largura variável.*



*Figura 127. Exemplos de resultados para o componente que gera soluções com aletas torcidas parametricamente.*



*Figura 128. Exemplos de resultados para o componente que gera soluções modulares intertravadas com abertura na horizontal ou vertical.*

## 4.2 Experimento de otimização

Qual a importância dos parâmetros de projeto de controle solar em fachadas altamente envidraçadas?

O estudo executado está associado a investigação da importância dos parâmetros de projeto de controle solar em fachadas otimizadas altamente envidraçadas em diferentes climas. Para alcançar esse objetivo, foi realizado um experimento de otimização de projeto da fachada em um edifício hipotético de 10 pavimentos, associado a um contexto urbano hipotético, considerando três cidades com climas distintos: Salvador-BA, São Paulo-SP e Porto Alegre -RS. O modelo utilizado é a versão mais complexa descrita no item 3.3.1. Após a otimização, foi realizada uma análise da fronteira de pareto para identificar a importância de cada parâmetro de projeto de controle solar para o desempenho da fachada em termos de desempenho térmico, visual e luminoso.

Com base nos resultados, espera-se avaliar o desempenho do modelo de otimização proposto pela tese. Adicionalmente, é possível contribuir inicialmente para a compreensão de estratégias de projeto mais eficientes para fachadas altamente envidraçadas no contexto brasileiro, com foco na otimização do desempenho luminoso, visual e térmico. Este experimento está descrito em duas partes. A primeira descreve o tempo associado ao processo de otimização. A segunda apresenta os dados e discussões dos resultados do processo de otimização.

### 4.2.1 Tempo da otimização

Para melhorar o desempenho de fachadas em diferentes climas, foram realizados três experimentos de otimização, cada um corresponde a um clima específico. Cada experimento consistiu em 45 gerações de análise, com uma população de 100 indivíduos em cada geração. Durante cada ciclo de análise, a geometria foi variada para a fachada norte e para dez andares e cinco indicadores de desempenho foram avaliados. Cada ciclo (com cinco indicadores analisados em cada) levou de 62 a 71 segundos para execução. Ao total, os processos de otimização com cerca de 4600 ciclos, levaram 84 horas para serem concluídos.

Após as 45 gerações, foram identificadas as soluções ótimas formadas na fronteira de pareto para cada clima, que foram posteriormente analisadas em relação aos diferentes parâmetros de

projeto de controle solar. Com o processo de otimização, foi possível obter cerca de 200 soluções eficientes para as fachadas em cada um dos diferentes climas. Na sequência, é mostrado que houve uma melhoria significativa em relação aos casos-base sem elementos de sombreamento.

## 4.2.2 Análise dos dados e discussões

As matrizes de dispersão dos cinco objetivos avaliados (UDI, sDGPa, Carga Térmica de Pico de Resfriamento, Visão de Céu e Área dos Elementos de Sombreamento) e para as três cidades, revelaram correlações dos resultados com o indicador de área dos elementos de sombreamento. Também demonstram que os vidros usados geram agrupamentos dos dados. Essas características evidenciam a relevância desses parâmetros no projeto da fachada.

A Tabela 20 apresenta os resultados dos indicadores de desempenho para os casos-base sem elementos de sombreamento para as três cidades e para os cinco vidros considerados. Os resultados grifados em cinza são os melhores resultados entre os indicadores encontrados para os casos-base. Nas cidades consideradas, o vidro 3 apresentou melhor resultado para UDI, já o vidro 0, os melhores resultados para DGP e CTR. Ao retirar os elementos de sombreamento, o percentual máximo de visão de céu é de 30% consequência da obstrução urbana.

Tabela 20. Resultados dos caso-base sem elementos de sombreamento para cada vidro considerado.

<b>Porto Alegre</b>					
	<b>Vidro 0</b>	<b>Vidro 1</b>	<b>Vidro 2</b>	<b>Vidro 3</b>	<b>Vidro 4</b>
<b>UDI</b>	39.5	49.1	60.5	61.9	58.5
<b>sDGPa</b>	85.0	81.6	67.0	63.6	53.8
<b>CTR</b>	109734.1	131488.8	157131.4	171848.9	246616.5
<b>São Paulo</b>					
<b>UDI</b>	38.1	48	59.9	61.6	59.1
<b>sDGPa</b>	93.4	82.4	74.8	65.6	56.0
<b>CTR</b>	108322.9	130024.3	155396.5	170114	244299.2
<b>Salvador</b>					
<b>UDI</b>	35.2	46.8	62.8	63.2	61.7
<b>sDGPa</b>	100	100	85.0	78.8	70.4
<b>CTR</b>	113624.1	132685.4	154986.5	166017.4	221593.2

Os gráficos nas Figura 129, Figura 130 e Figura 131 mostram as fronteiras de pareto e soluções próximas para as 3 cidades avaliadas (cerca de 200 variações por cidade). Cada ponto representa uma solução paramétrica. A fronteira de Pareto representa as soluções ótimas, ou seja,

aquelas que oferecem o melhor compromisso entre os objetivos avaliados. Em todas as cidades é possível visualizar que os dados se dividem em cinco grupos gerados pelas combinações de vidros utilizadas. Os quais, foram representados com cores distintas.

As mínimas e máximas dos resultados para os objetivos para a fronteira de Pareto foram de 9,10 e 66,20 para o UDI; 54 e 100 para o DGP; 49,02 a 246,61 KW pico para a carga térmica de resfriamento; 4,50 a 29,50 para o percentual de visão de céu e 31 a 3258 m<sup>2</sup> de área de elementos de sombreamento para Porto Alegre. De 9,20 a 66,50 para o UDI, 55.80 a 100.00 para o DGP, 45,51 a 243,21 kW pico para a carga térmica de resfriamento, 4.60 a 29.30 para o percentual de visão de céu e 31 a 3254m<sup>2</sup> para a área dos elementos de sombreamento para São Paulo. E de 9.70 a 68.10 para o UDI, 70.60 a 100.00 para o DGP, 61,65 a 221,71 KW pico para a carga térmica de resfriamento, 4.80 a 29.30 para o percentual de visão de céu e 32 a 3240 para a área dos elementos de sombreamento para Salvador.

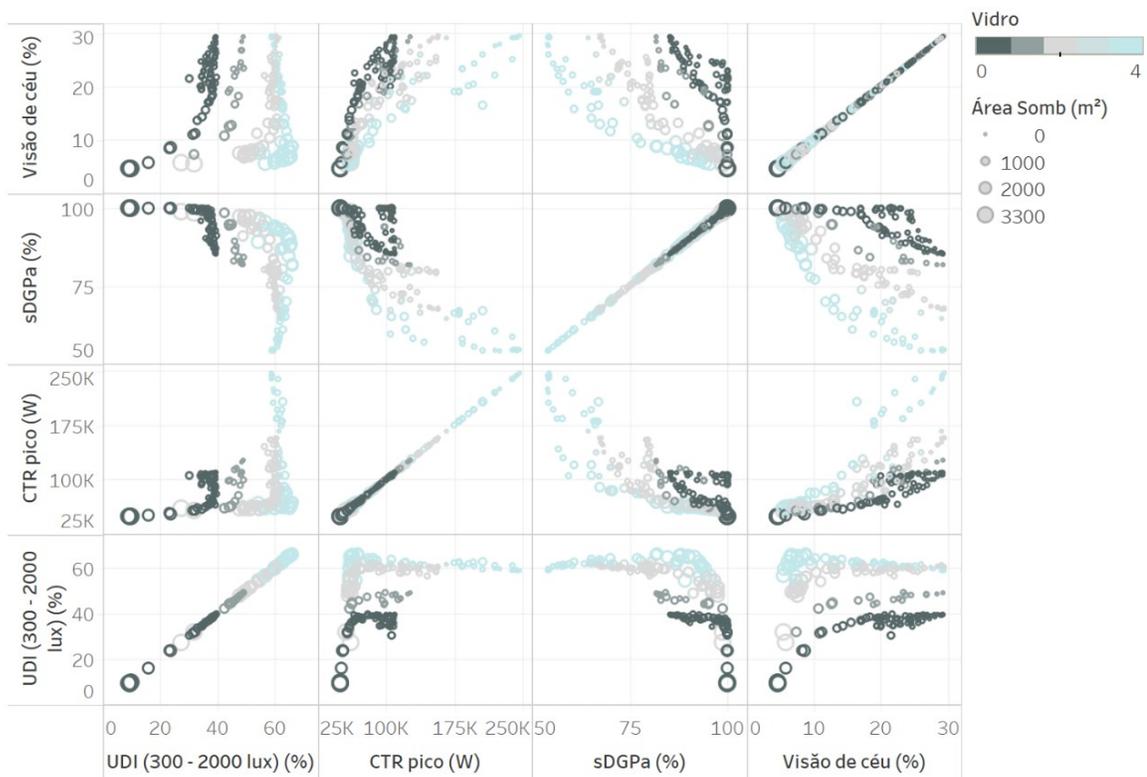


Figura 129. Matriz de dispersão dos resultados da otimização para a cidade de Porto Alegre.

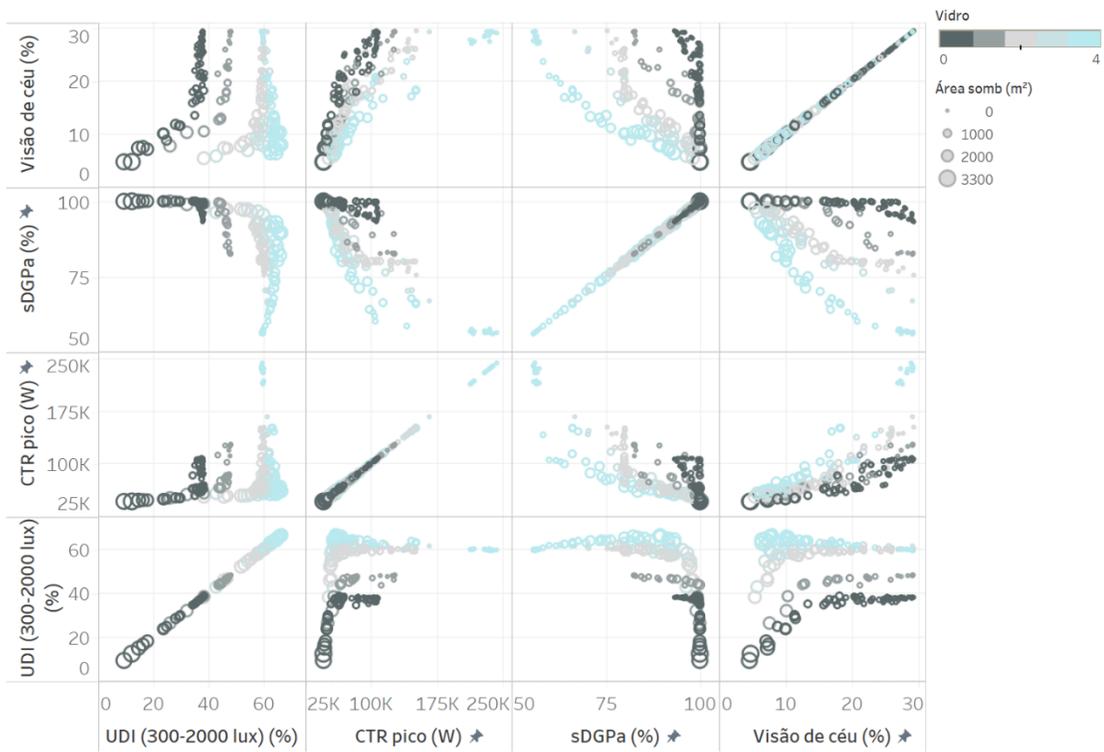


Figura 130. Matriz de dispersão dos resultados da otimização para a cidade de São Paulo.

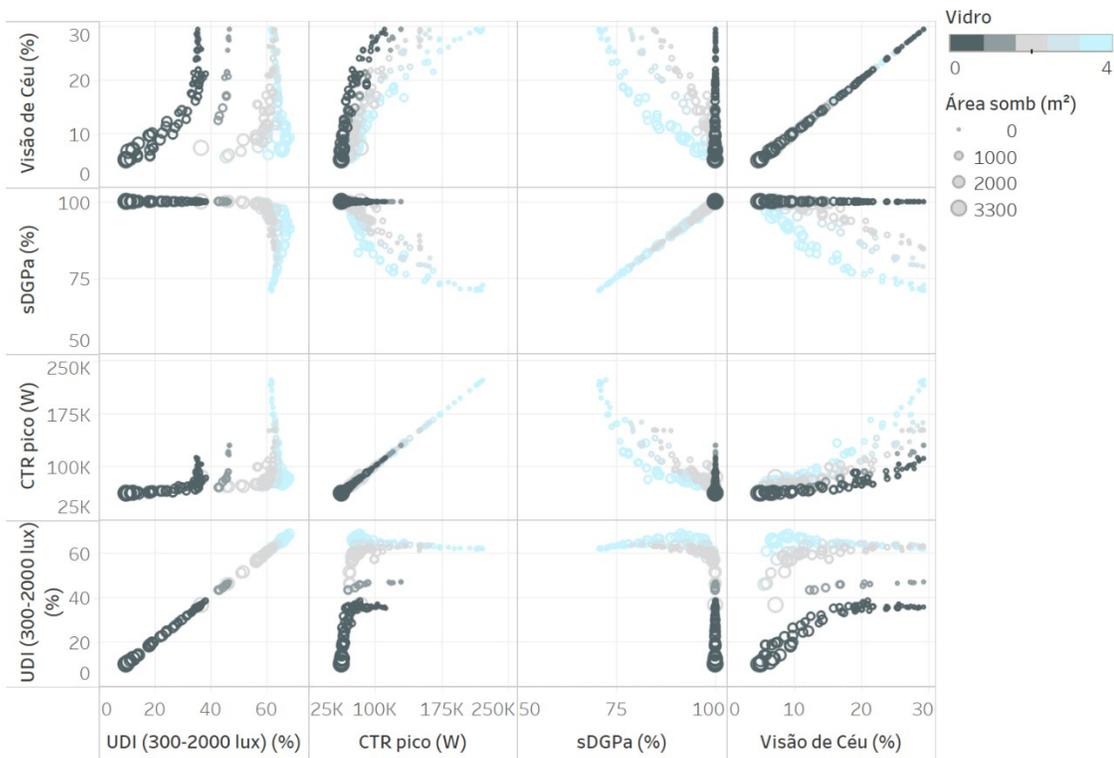


Figura 131. Matriz de dispersão dos resultados da otimização para a cidade de Salvador.

Observa-se que a cidade de Salvador obteve os valores mais altos de boas ocorrências para DGP e UDI. Também obteve os valores mais baixos de  $CTR_{pico}$ . Vale salientar que os dados mais baixos de  $CTR_{pico}$  foram alcançados ao combinar o vidro mais escuro e áreas altas de elementos de sombreamento, o que gerou os piores índices para UDI das simulações para as três cidades. Isso evidencia que a preocupação exclusiva com o CTR pode gerar prejuízos ao ambiente interno quanto à luminosidade. A escolha do vidro e a utilização de elementos de sombreamento devem ser feitas de forma balanceada, considerando não apenas a redução do CTR, mas também a melhoria dos índices de conforto visual e desempenho luminoso, como o UDI e o DGP. Além disso, é importante levar em conta as particularidades climáticas de cada região e as necessidades dos usuários do edifício para se obter soluções de desempenho satisfatório e eficiente.

A Tabela 21 mostra coeficientes de correlação linear para otimizações em Porto Alegre, São Paulo e Salvador. Os coeficientes consideram todos os dados de otimização juntos e agrupamentos para cada um dos cinco tipos de vidro analisados separadamente. Ao analisar os dados, é possível observar que as correlações são fracas quando todos os dados são considerados juntos. A exceção é das correlações, para as três cidades, entre CTR e sDGPa que são de 65%, 61% e 73%, respectivamente. Ou seja, correlações moderadas.

Há correlações lineares fracas entre todos os outros indicadores de desempenho ao considerar os dados como um todo. Ao filtrar as combinações de vidros, alguns indicadores passam a apresentar correlações média e altas. Sendo que, o modelo de otimização encontrou combinações que desviaram de um padrão de dispersão linear para muitos indicadores. Alguns resultados se encaixam mais em um modelo de correlação de tipo exponencial. Os indicadores que apresentam padrão exponencial indicam que há uma maior influência da variação da geometria paramétrica associada as combinações de desempenho.

As correlações lineares aumentam ao isolar os dados por vidro para alguns indicadores, o que demonstra a influência deste parâmetro no projeto da fachada. Além disso, é possível observar que as correlações variam também dependendo da cidade. De modo geral, as correlações aumentaram para as relações de visão de céu versus sDGPa e  $CTR_{pico}$  e para área de sombreamento versus UDI, sDGPa e  $CTR_{pico}$ . Apesar dos coeficientes de correlação não indicar necessariamente causalidade, os dados demonstram o aumento da influência dos elementos de sombreamento nos indicadores à medida que o vidro vai ficando mais transparente. A correlação também aumenta

para as relações entre sDGPa e CTR<sub>pico</sub>, o que sugere tanto causas comuns para os dois fenômenos associado ao projeto da fachada, como também que a influência dos vidros escuros provoca redução da sensibilidade da variação da geometria paramétrica no desempenho final. Salvador é a cidade que apresentou os maiores índices de correlação entre os indicadores de desempenho citados.

Tabela 21. Correlação linear entre os indicadores de desempenho para todos os dados e para agrupamentos de cada vidro simulado.

Porto Alegre					São Paulo					Salvador							
Todos																	
	UDI	CTR	sDGPa	V.C.	Área		UDI	CTR	sDGPa	V.C.	Área		UDI	CTR	sDGPa	V.C.	Área
UDI		0.15	0.48	0	0	UDI		0.11	0.5	0	0	UDI		0.25	0.39	0.06	0.09
CTR	0.15		0.65	0.43	0.31	CTR	0.11		0.61	0.48	0.35	CTR	0.25		0.73	0.55	0.43
DGP	0.48	0.65		0.21	0.18	DGP	0.5	0.61		0.09	0.08	DGP	0.39	0.73		0.21	0.16
V.C.	0	0.43	0.21		0.79	V.C.	0	0.48	0.09		0.85	V.C.	0.06	0.55	0.21		0.77
Vidro 0																	
UDI		0.31	0.28	0.69	0.92	UDI		0.36	0.16	0.69	0.92	UDI		0.48	1	0.8	0.85
CTR	0.31		0.2	0.75	0.47	CTR	0.36		0.33	0.82	0.51	CTR	0.48		1	0.83	0.56
DGP	0.28	0.2		0.54	0.23	DGP	0.16	0.33		0.44	0.2	DGP	1	1		1	1
V.C.	0.69	0.75	0.54		0.78	V.C.	0.69	0.82	0.44		0.77	V.C.	0.8	0.83	1		0.73
Vidro 01																	
UDI		0.42	0.66	0.66	0.5	UDI		0.38	0.42	0.56	0.78	UDI		0.64	1	0.75	0.78
CTR	0.42		0.5	0.87	0.91	CTR	0.38		0.66	0.87	0.75	CTR	0.64		1	0.94	0.85
DGP	0.66	0.5		0.79	0.75	DGP	0.42	0.66		0.9	0.74	DGP	1	1		1	1
V.C.	0.66	0.87	0.79		0.93	V.C.	0.56	0.87	0.9		0.91	V.C.	0.75	0.94	1		0.95
Vidro 02																	
UDI		0.29	0.56	0.46	0.74	UDI		0.28	0.6	0.49	0.6	UDI		0.2	0.33	0.41	0.71
CTR	0.29		0.67	0.87	0.6	CTR	0.28		0.62	0.82	0.63	CTR	0.2		0.84	0.89	0.58
DGP	0.56	0.67		0.91	0.79	DGP	0.6	0.62		0.87	0.92	DGP	0.33	0.84		0.94	0.63
V.C.	0.46	0.87	0.91		0.75	V.C.	0.49	0.82	0.87		0.88	V.C.	0.41	0.89	0.94		0.75
Vidro 03																	
UDI		0.11	0.39	0.21	0.31	UDI		0.15	0.31	0.28	0.26	UDI		0.21	0.29	0.35	0.55
CTR	0.11		0.56	0.8	0.64	CTR	0.15		0.84	0.94	0.8	CTR	0.21		0.9	0.93	0.82
DGP	0.39	0.56		0.9	0.97	DGP	0.31	0.84		0.96	0.93	DGP	0.29	0.9		0.97	0.82
V.C.	0.21	0.8	0.9		0.92	V.C.	0.28	0.94	0.96		0.9	V.C.	0.35	0.93	0.97		0.88
Vidro 04																	
UDI		0.18	0.07	0.19	0.08	UDI		0.81	0.74	0.84	0.72	UDI		0.62	0.48	0.59	0.46
CTR	0.18		0.78	0.92	0.76	CTR	0.81		0.78	0.94	0.75	CTR	0.62		0.81	0.95	0.82
DGP	0.07	0.78		0.9	0.9	DGP	0.74	0.78		0.92	0.96	DGP	0.48	0.81		0.93	0.92
V.C.	0.19	0.92	0.9		0.84	V.C.	0.84	0.94	0.92	V	0.87	V.C.	0.59	0.95	0.93		0.87

Os gráficos na Figura 132, Figura 133 e Figura 134 mostram as análises iniciais para a tomada de decisão multicritério, conforme descrito no item 3.2.5. O eixo x mostra a economia de desempenho em percentual ao comparar os resultados com o caso-base, ou seja, a solução sem elementos de sombreamento e vidro mais transparente. Já o eixo y mostra a função de preferência que baliza os resultados normalizados e compara os indicadores de desempenho com o qualificador de visão de céu e indica uma relação de dominância entre o indicador de desempenho e visão de céu entre a população de dados. Valores negativos indicam que o resultado de visão de céu é dominante em detrimento do indicador de desempenho no domínio de resultados encontrados na otimização. O resultado positivo indica uma dominância do indicador de desempenho em detrimento da visão de céu. Um resultado igual a zero indica uma relação neutra.

De forma geral, para as três cidades, as soluções com menos área de sombreamento para os cinco vidros considerados apresentam valores negativos na função de preferência nos indicadores de  $CTR_{pico}$  e DGP. Isso indica as soluções onde o uso de elementos de sombreamento ainda não apresenta respostas com benefício desses indicadores de desempenho comparados às outras opções. Já para o indicador de UDI, apenas no vidro escuro há dominância da visão de céu em detrimento do indicador de desempenho. Isso indica que os elementos de sombreamento combinados a vidros mais transparentes são relevantes se a intenção é beneficiar o UDI. É importante salientar que esse dado deve ser avaliado juntamente com a economia obtida em relação ao caso-base, uma vez que a função de preferência avalia de maneira qualitativa, e deve ser comparada também a outros valores de referência. No caso do indicador de UDI, apenas os vidros 3 e 4 apresentam resultados que são ganhos reais ao comparar com o caso-base.

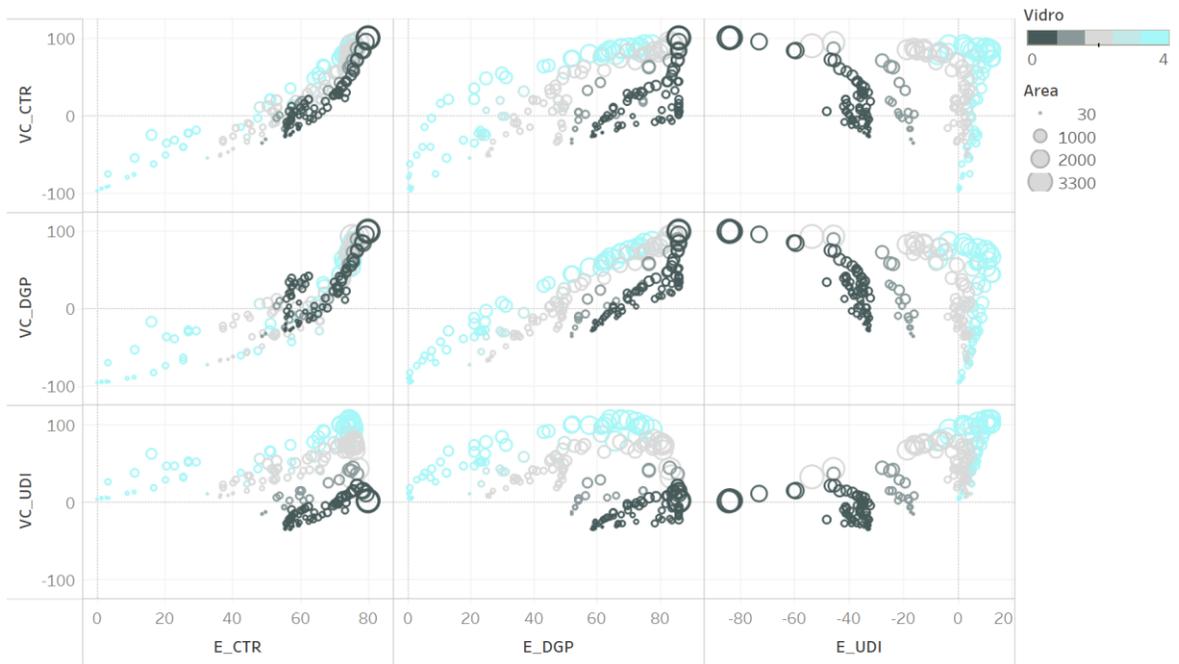


Figura 132. Função de preferência entre os indicadores de visão de céu comparado a  $CTR_{pico}$ , UDI e DGP versus a economia em relação ao caso-base para Porto Alegre.

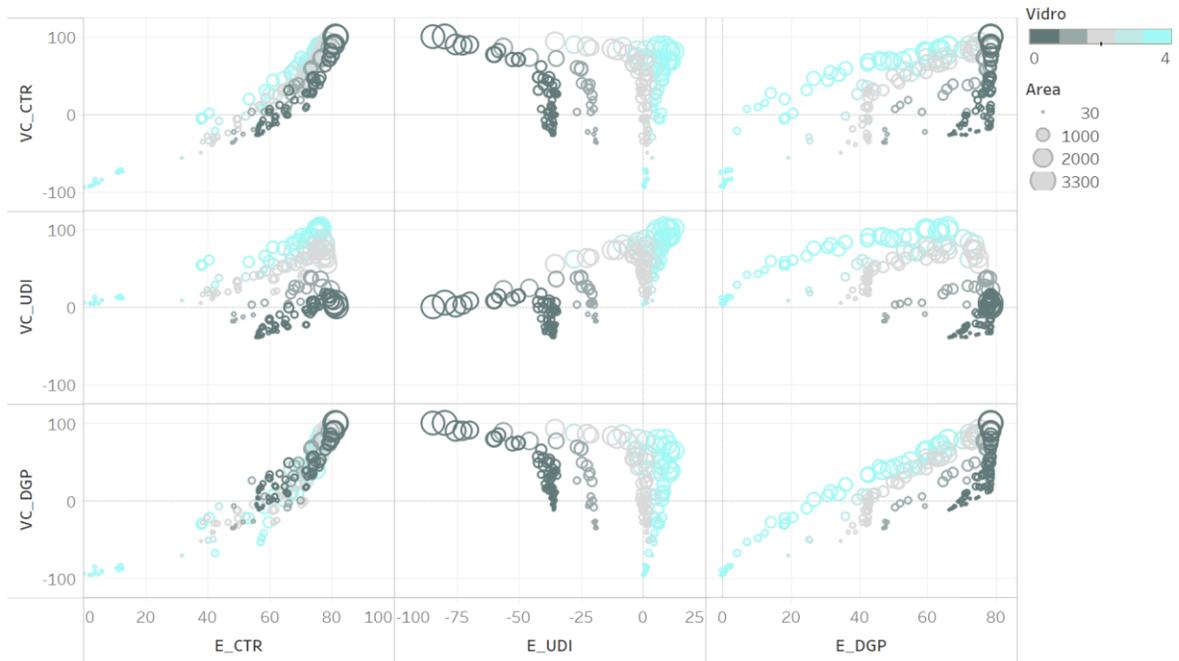


Figura 133. Função de preferência entre os indicadores de visão de céu comparado a  $CTR_{pico}$ , UDI e DGP versus a economia em relação ao caso-base para São Paulo.

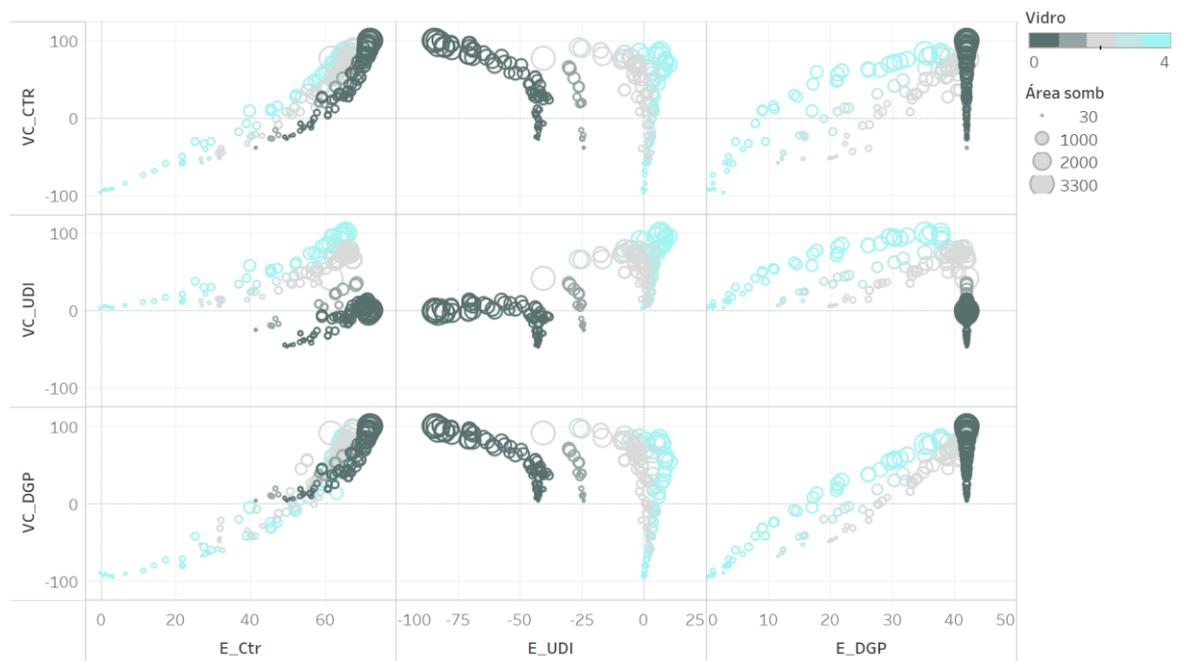


Figura 134. Função de preferência entre os indicadores de visão de céu comparado a  $CTR_{pico}$ , UDI e DGP versus a economia em relação ao caso-base para Salvador.

A função de preferência e a comparação com o caso-base colaboram com a seleção de alternativas de interesse que melhor balanceia os indicadores de desempenho e os qualificadores, principalmente em indicadores conflitantes. Com base nesses resultados, três soluções para cada cidade foram selecionadas. A primeira visando encontrar uma solução que melhor baliza  $CTR_{pico}$ , DGP e UDI. A segunda, uma solução que baliza bem os indicadores anteriores, porém considera menos elementos de sombreamento, ou seja, prioriza uma relação neutra com a visão de céu. A terceira, uma solução que prioriza uma fachada que elimina ofuscamento e atendendo esse critério, obteve indicadores superiores de  $CTR_{pico}$  e UDI (Figura 135, Figura 136, Figura 137).

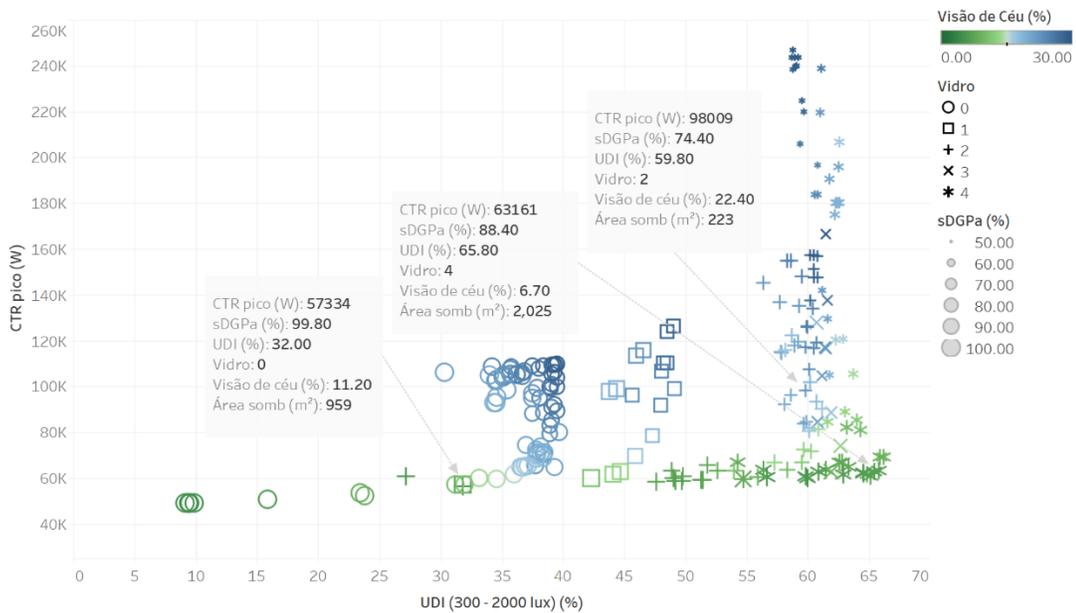


Figura 135. Gráfico de dispersão dos resultados da otimização mostrando três soluções selecionadas para a cidade de Porto Alegre.



Figura 136. Gráfico de dispersão dos resultados da otimização mostrando três soluções selecionadas para a cidade de São Paulo.

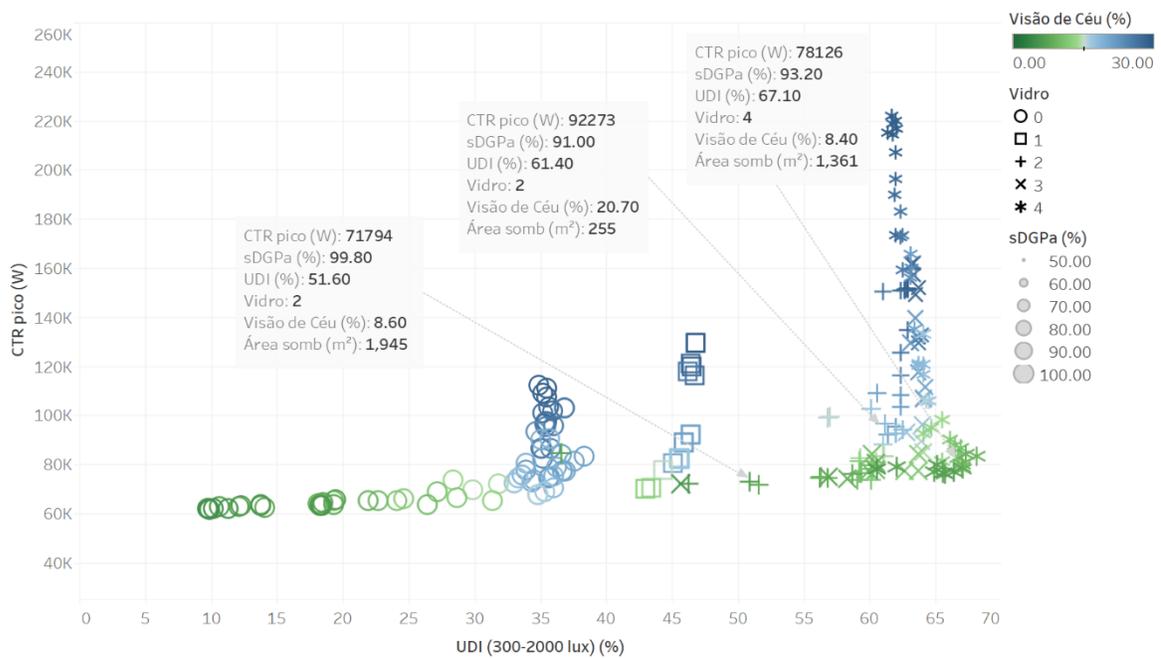


Figura 137. Gráfico de dispersão dos resultados da otimização mostrando três soluções selecionadas para a cidade de Salvador.

Para todas as cidades, as soluções que melhor equilibraram os três indicadores foram aquelas que combinaram o vidro mais claro com áreas de elementos de sombreamento que variaram de 2025 m<sup>2</sup>, 1927 m<sup>2</sup> e 1361 m<sup>2</sup> para Porto Alegre, São Paulo e Salvador, respectivamente. A segunda solução selecionada combinou o vidro 2 com elementos de sombreamento com áreas de 223m<sup>2</sup>, 195m<sup>2</sup> e 255m<sup>2</sup>, respectivamente. As soluções que eliminaram o ofuscamento e preservaram melhor os outros indicadores estavam associados ao vidro mais escuro para a cidade de Porto Alegre, o vidro 1 para a cidade de São Paulo e o vidro 2 para a cidade de Salvador, com áreas de elementos de sombreamento de 959m<sup>2</sup>, 1545m<sup>2</sup> e 1945m<sup>2</sup>, respectivamente. As fachadas das soluções descritas estão demonstradas na Figura 138, Figura 139 e Figura 140.

Para comparar esses resultados com os casos sem elementos de sombreamento descritos na Tabela 20, foram realizadas duas estimativas de economia. A primeira comparou os resultados indicadores da seleção de casos otimizados com os melhores indicadores de desempenho encontrados entre os cinco vidros simulados sem elementos de sombreamento. A segunda comparou os resultados otimizados com a respectiva solução sem elementos de sombreamento utilizando o mesmo vidro da solução otimizada.

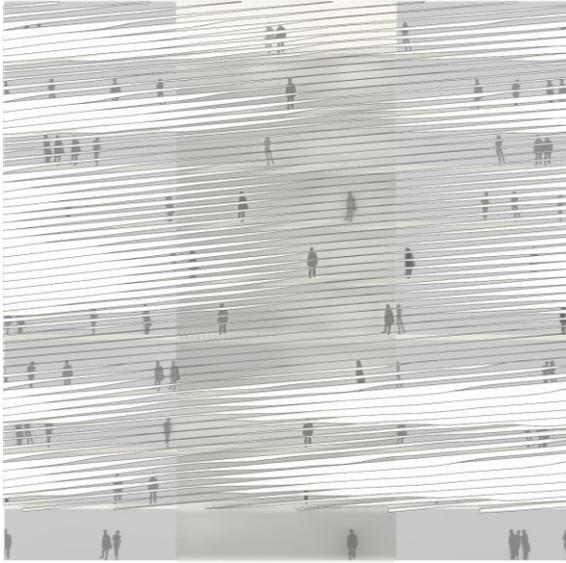
Observa-se que, para as três cidades, as soluções que apresentaram economias em relação aos melhores indicadores de desempenho demonstraram grandes reduções para  $CTR_{pico}$ , variando entre 10,69% e 48,06%. Também apresentaram economias para UDI apenas na primeira solução, com variações entre 6,17% e 7,95%. Em relação ao ofuscamento, somente a cidade de Porto Alegre apresentou melhoria também na primeira solução selecionada (a que melhor equilibra os indicadores), por tanto, esta solução supera todos os indicadores de desempenho encontrados nas soluções sem elementos de sombreamento para Porto Alegre. A segunda solução foi superior apenas para  $CTR_{pico}$  em comparação com o melhor indicador entre os cinco vidros para as três cidades. Já a terceira solução foi superior para  $CTR_{pico}$  e  $sDGPa$  nas cidades de Porto Alegre e São Paulo, enquanto Salvador apresentou um valor semelhante para DGP se comparado a melhor solução sem elementos de sombreamento (Tabela 22).

A comparação anterior, porém, não é realista pois compara os melhores indicadores entres os cinco vidros sem elementos de sombreamento. Por isso, as soluções foram comparadas aos indicadores dos respectivos vidros utilizados nas soluções otimizadas. Nesta comparação, as seleções apresentam grandes economias em relação ao respectivo caso-base para os três indicadores de desempenho. Variaram entre 64,74% e 75,38% para  $CTR_{pico}$ ; 32,39% e 64,31% para ofuscamento e 8,75% e 12,52% para UDI. Já as segundas e terceiras soluções apresentaram decréscimos para o indicador de UDI, com exceção da segunda solução que apresentou uma pequena melhoria de 0,17% em São Paulo e pequenos decréscimos de -1,16% e -2,23% para Porto Alegre e Salvador, ou seja, indicadores similares a dos respectivos casos-base sem elementos de sombreamento. Já a terceira solução apresenta melhorias para  $CTR_{pico}$  e  $sDGPa$ , porém obteve uma grande queda de desempenho em UDI que variou de -17,835 a -33,33% (Tabela 22).

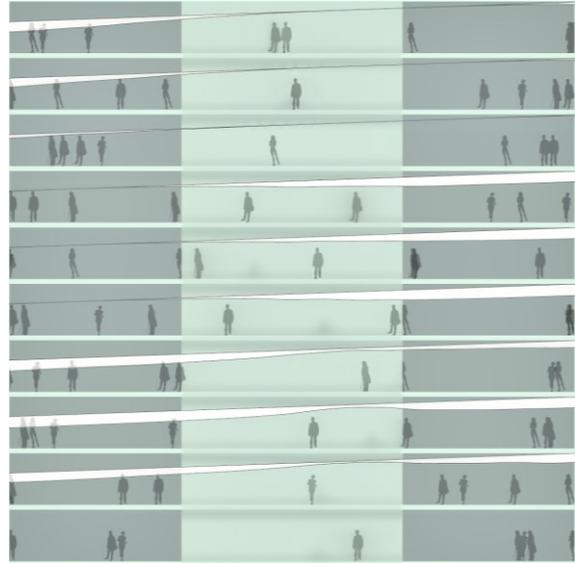
Apesar de a fronteira de pareto apresentar todas as melhores relações entre os indicadores testados, esse exercício demonstra que os critérios de escolha da fachada dentre as opções otimizadas exercem uma grande influência no balanço final dos resultados. Isso demonstra que o processo de otimização baseado na fronteira de pareto permite ainda exercer critérios subjetivos de escolhas. Essa abordagem é relevante dentro do processo de projeto, uma vez que não é o computador quem estabelecer a melhor solução, mas a combinação entre as opções otimizadas que caracterizam fenômenos conflitantes e as preferências de projeto que podem ser metrificadas, ou mesmo, subjetivas.

Tabela 22. Economias entre casos selecionados e casos-base para as três cidades.

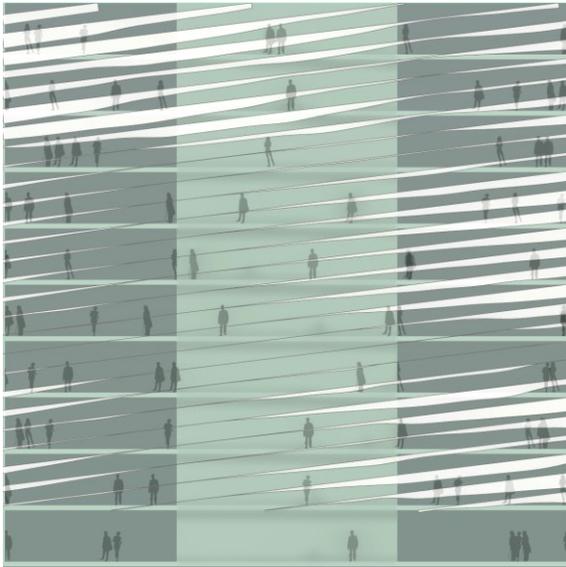
	<i>Melhores indicadores</i>			<i>Mesmo vidro</i>		
<i>Porto Alegre</i>						
	<i>Primeira solução</i>	<i>Segunda solução</i>	<i>Terceira solução</i>	<i>Primeira solução</i>	<i>Segunda solução</i>	<i>Terceira solução</i>
UDI		-3.39%	-48.30%	12.48%	-1.16%	-18.99%
sDGPa	6.30%	-12.47%	17.41%	64.31%	11.04%	17.41%
CTR	4.00%	10.69%	47.75%	74.39%	37.63%	47.75%
	42.44%					
<i>São Paulo</i>						
UDI		-2.60%	-48.05%	12.52%	0.17%	-33.33%
sDGPa	7.95%	-14.56%	6.00%	59.64%	6.68%	20.15%
CTR	-4.28%	14.88%	48.06%	75.38%	40.67%	56.73%
	44.47%					
<i>Salvador</i>						
UDI		-2.85%	-18.35%	8.75%	-2.23%	-17.83%
sDGPa	6.17%	-9.00%	-0.20%	32.39%	7.06%	17.41%
CTR	-6.80%	18.79%	36.81%	64.74%	40.46%	53.68%
	31.24%					



a

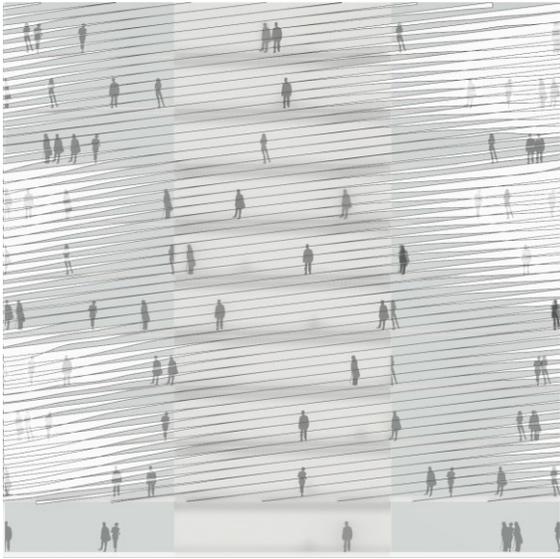


b

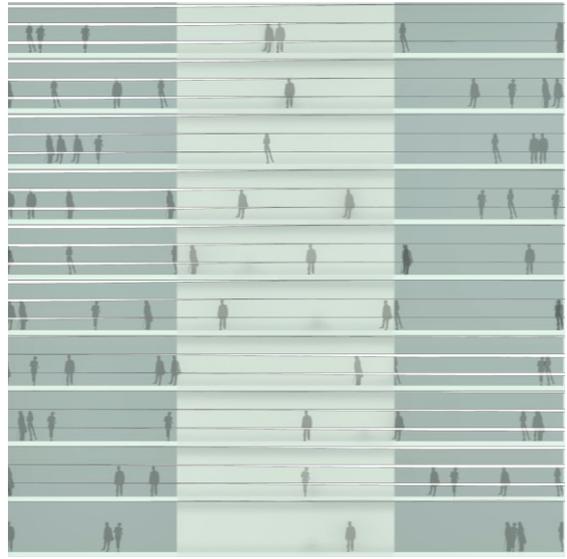


c

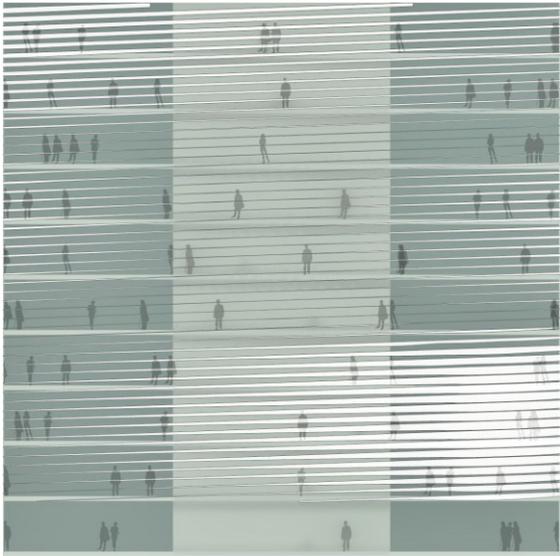
*Figura 138. Fachadas das soluções selecionadas para a cidade de Porto Alegre.*



a

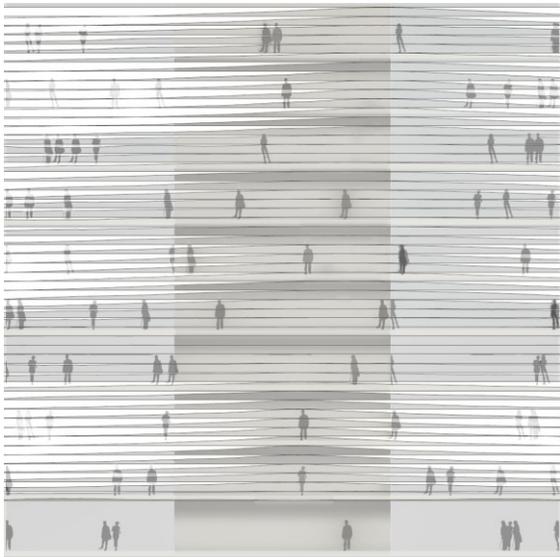


b

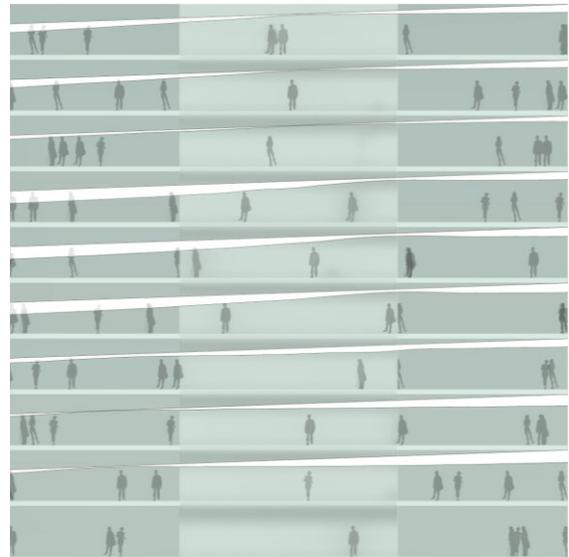


c

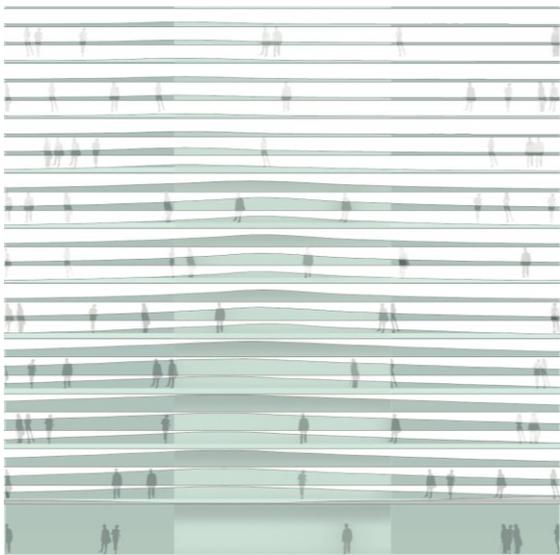
*Figura 139. Fachadas das soluções selecionadas para a cidade de São Paulo.*



a



b

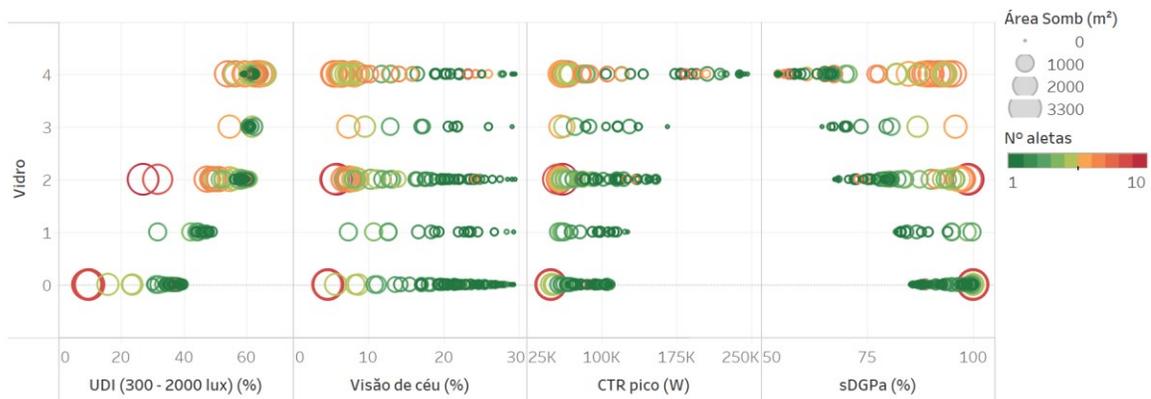


c

*Figura 140. Fachadas das soluções selecionadas para a cidade de Salvador.*

Os gráficos na Figura 141, Figura 142, Figura 143 mostram a variação dos resultados encontrados para cada indicador de desempenho agrupados por vidro. Os gráficos incluem informações sobre a variação geométrica dos elementos de sombreamento, tais como área e número de aletas utilizados na solução. Apesar de o número de aletas impactar na área, a largura do elemento de sombreamento também é um parâmetro variável, portanto, um número elevado de aletas não necessariamente indica uma área elevada, e vice-versa.

Para as três cidades, os gráficos mostram uma clara tendência de melhoria nos indicadores de desempenho de  $CTR_{pico}$  e ofuscamento à medida que o vidro utilizado nas soluções otimizadas se torna mais escuro. Apesar da tendência, a relação entre a melhoria no desempenho e a escolha do vidro não é linear forte, indicando também a influência do sombreamento nesses indicadores. Vale frisar que essas soluções não apresentaram os melhores resultados para todos os indicadores de desempenho, uma vez que para UDI, o efeito é inverso há uma grande piora. Os melhores resultados para UDI estão entre os vidros mais claros. Ao associar com elementos de sombreamento, os vidros claros também apresentaram relações de  $CTR_{pico}$  e  $sDGPa$  entre as de destaque. Os gráficos demonstram que o uso de elementos de sombreamento pode ter um impacto significativo no desempenho e são fundamentais em soluções que balanceiam indicadores conflitantes. Podem impactar tanto positivamente quanto negativamente, dependendo da sua configuração. Portanto, é importante considerar cuidadosamente a interação entre vidro e elementos de sombreamento na busca por soluções ótimas.



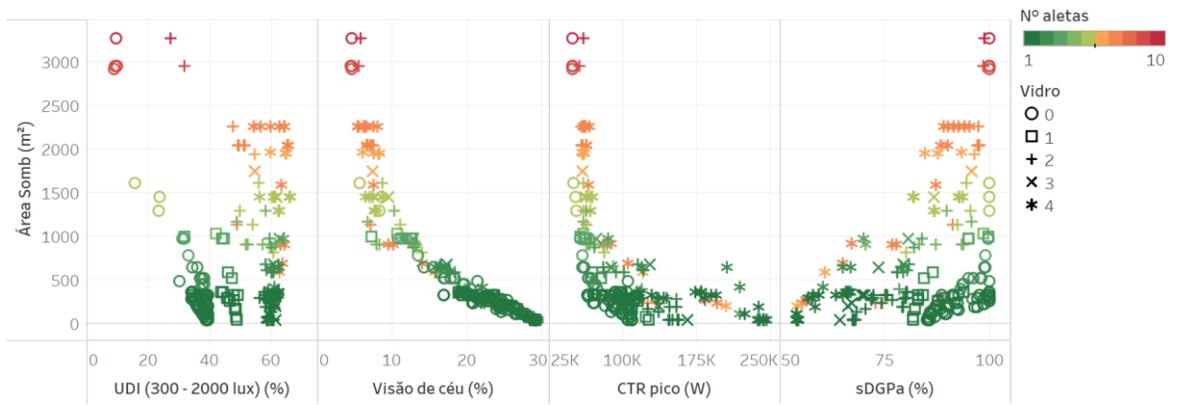


Figura 141. Fachadas das soluções selecionadas para a cidade de Porto Alegre.



Figura 142. Fachadas das soluções selecionadas para a cidade de São Paulo.

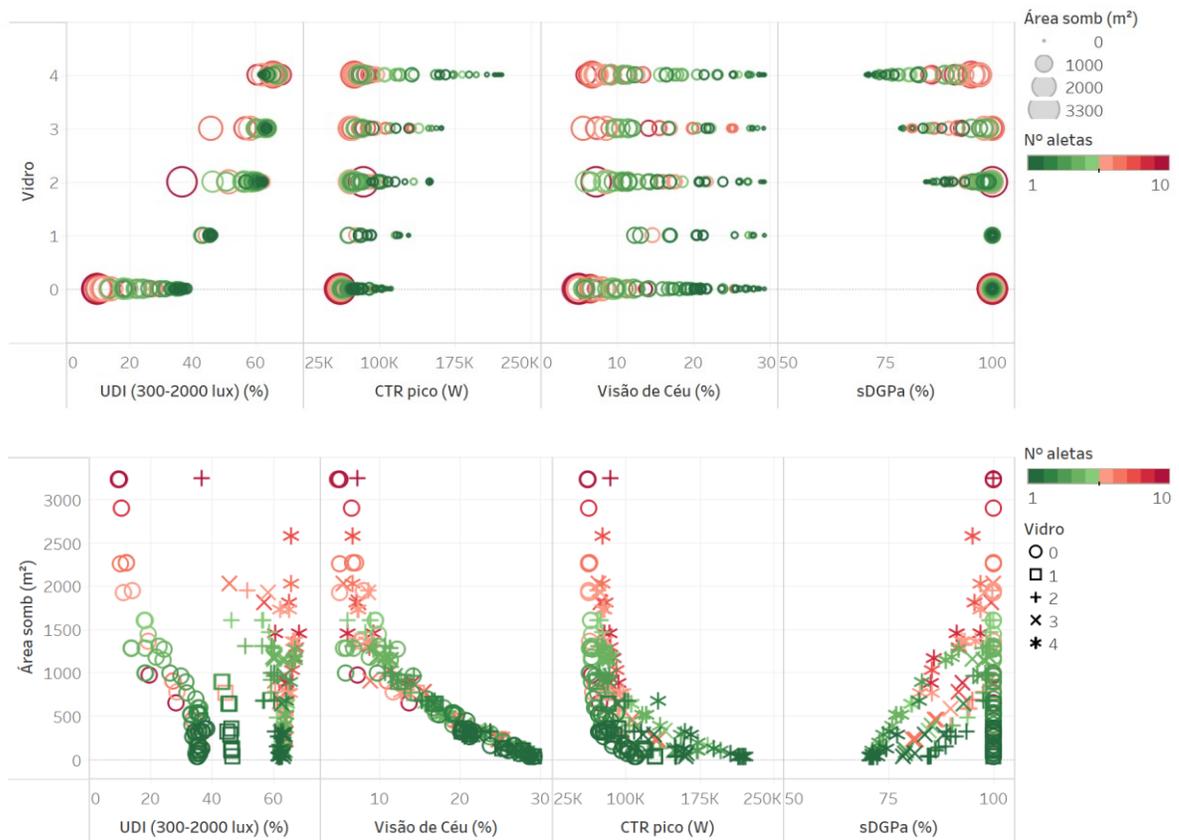


Figura 143. Fachadas das soluções selecionadas para a cidade de Salvador.

Concluindo, a análise de fronteira de Pareto se mostrou uma técnica eficiente na otimização de fachadas, permitindo encontrar soluções ótimas que equilibram os objetivos de desempenho ambiental conflitantes e a estética. A fronteira de Pareto apresentou combinações paramétricas para os cinco objetivos avaliados (UDI, DGP, carga térmica de resfriamento, percentual de visão de céu e área dos elementos de sombreamento) para as três cidades avaliadas (Porto Alegre, São Paulo e Salvador), e permitiu identificar a relevância dos parâmetros, além de revelar correlações entre eles. Foi possível observar que a escolha do vidro e a utilização de elementos de sombreamento devem ser feitas de forma balanceada, considerando não apenas indicadores individuais, mas a caracterização de indicadores conflitantes entre si. Nesse contexto, o uso de elementos de sombreamento foi fundamental para soluções que melhor equilibraram os indicadores, permitindo o uso de vidros também mais transparentes.

## 4.3 Validação do modelo de otimização

A etapa de validação dos experimentos de otimização desta tese é fundamental para garantir a confiabilidade e a qualidade dos resultados obtidos. Para isso, ela está dividida em duas etapas distintas. A primeira delas aborda os procedimentos dos testes de redução do arquivo climático, que consistem na avaliação do uso de arquivos climáticos reduzidos sem afetar a precisão dos resultados testados. A segunda etapa aborda os procedimentos que guiaram a seleção dos métodos de simulação utilizados, que incluem a avaliação da precisão dos modelos de simulação e a escolha de configurações de entrada apropriadas a otimização. Juntas, essas etapas demonstram a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos e são essenciais para o sucesso da pesquisa.

### 4.3.1 Arquivo climático

A redução dos dados climáticos é de grande importância para diminuir o tempo de simulação. Nesse contexto, foram realizadas análises estatísticas dos arquivos climáticos completos para as cinco cidades brasileiras: Fortaleza, Brasília, Salvador, São Paulo, e Porto Alegre. A Tabela 23 apresenta a média quadrática para os dados do arquivo climático completos obtidos para as cinco cidades consideradas.

Tabela 23. Média quadrática para os dados completos dos arquivos climáticos analisados.

	<i>Fortaleza</i>	<i>Brasília</i>	<i>Salvador</i>	<i>São Paulo</i>	<i>Porto Alegre</i>
<i>RDN</i>	545.83	546.31	531.78	463.6	492.63
<i>RDH</i>	144.72	152.54	141.89	161.12	148.68
<i>RTH</i>	561.17	543.27	548.23	476.14	476.86

Para comparação com o arquivo completo, inicialmente foram estabelecidos os erros quadráticos médios que são apresentados na Tabela 24 para RDN, RDH e RTH para as cinco cidades e para quatro amostragens do arquivo climático. É possível observar que os dados de Radiação Direta Normal apresentaram erros baixos em geral, com exceção para cidade de Brasília, onde os erros atingiram um pico de 2,49% para a redução de 1/5. Já os dados de Radiação Difusa Horizontal apresentaram erros maiores em relação aos dados de Radiação Direta Normal para todas as cidades, com destaque para Brasília, onde os erros foram os maiores observados, com pico de

4,92% também na redução de 1/5. Por fim, os dados de Radiação Total Horizontal apresentaram os menores erros em geral, com destaque para a cidade de São Paulo, onde não houve erros significativos nas amostragens para reduções de um quarto e um quinto.

Tabela 24. Erro quadrático para os dados reduzidos dos arquivos climáticos analisados.

<i>cidade</i>	<i>dado</i>	<i>1/2</i>	<i>1/3</i>	<i>1/4</i>	<i>1/5</i>
<i>FOR</i>	RDN	0.63%	0.49%	2.03%	0.17%
<i>FOR</i>	RDH	0.53%	1.05%	3.69%	1.44%
<i>FOR</i>	RTH	0.48%	0.09%	1.46%	0.09%
<i>BSB</i>	RDN	0.31%	0.01%	1.54%	2.49%
<i>BSB</i>	RDH	0.66%	1.98%	3.32%	4.92%
<i>BSB</i>	RTH	0.28%	0.49%	0.44%	1.59%
<i>SAL</i>	RDN	0.53%	1.15%	1.08%	1.74%
<i>SAL</i>	RDH	0.15%	0.46%	0.86%	1.06%
<i>SAL</i>	RTH	0.43%	1.31%	1.08%	1.50%
<i>SP</i>	RDN	0.23%	0.10%	0.70%	0.85%
<i>SP</i>	RDH	0.31%	0.97%	0.29%	1.51%
<i>SP</i>	RTH	0.73%	0.51%	0.00%	0.76%
<i>POA</i>	RDN	1.52%	0.24%	1.43%	1.65%
<i>POA</i>	RDH	3.51%	0.22%	2.89%	0.29%
<i>POA</i>	RTH	0.36%	0.51%	1.86%	2.58%

A Figura 144 mostra o resumo de todos os resultados em *box-plot*. Ao considerar metade dos dados (1/2), os erros ficam abaixo de 1%, sendo que houve dois outliers. Já para a amostragem de um terço do arquivo (1/3) o resultado mostra todos os erros abaixo de 2%. Para um quarto e um quinto os resultados atenderam o critério de 5%. Os erros foram baixos de uma maneira geral e a escolha do fator de redução do arquivo climático deve ser ponderada de acordo com a exigência da simulação.

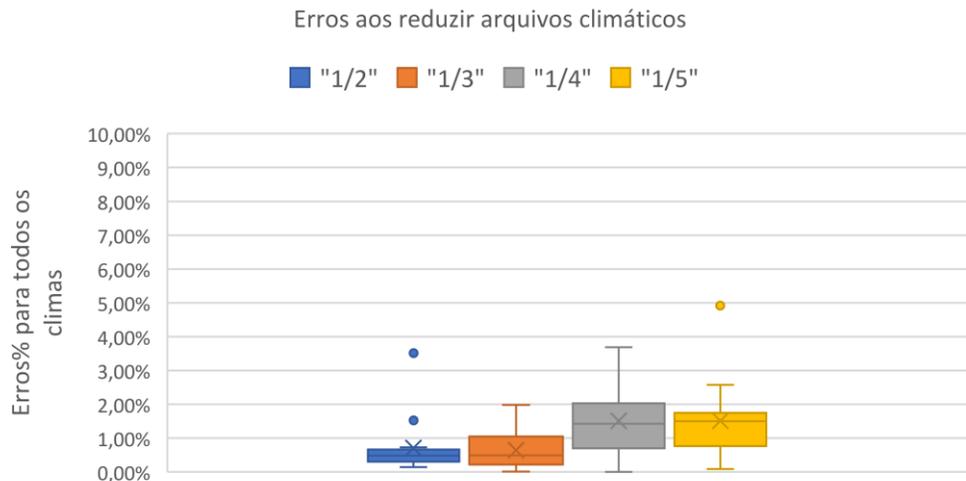


Figura 144. Erros quadráticos ao reduzir o arquivo climático.

#### 4.3.1.1 Análise de simulações com o arquivo climático reduzido

Para comparar os resultados de simulações usando arquivos climáticos reduzidos foi considerado o clima de Porto Alegre. Foram avaliados os indicadores de UDI, sDGPa e  $CTR_{pico}$  (através do método RTS). Para avaliação, foi estabelecido a correlação e a média quadrática dos erros dos resultados obtidos para as reduções, em comparação com os resultados obtidos com o arquivo climático completo. As simulações foram executadas com o software *Radiance*, utilizando o método de duas fases.

Os resultados de UDI demonstram que as reduções do arquivo climático não causaram diferenças significativas nas correlações entre os resultados, uma vez que os valores de  $R^2$  para todas as comparações foram de 0,99. Em relação aos erros, os resultados mostram que a redução de 1/5 apresentou aumentos dos erros em comparação com os arquivos menos reduzidos, no entanto, a média quadrática dos erros foi de 1% para os arquivos de 1/2 a 1/4 e apenas 2% para o arquivo de 1/5. Todos os testes atingiram um pico pouco acima de 5%, exceto para a redução de 1/3, onde o pico máximo foi de 3,95%. A redução de 1/5 obteve uma frequência maior de resultados com erros acima de 2%. Em resumo, no que se refere às simulações, as reduções de até 1/5 apresentaram resultados que não geraram diferenças significativas em relação ao arquivo climático completo (Figura 145, Figura 146).

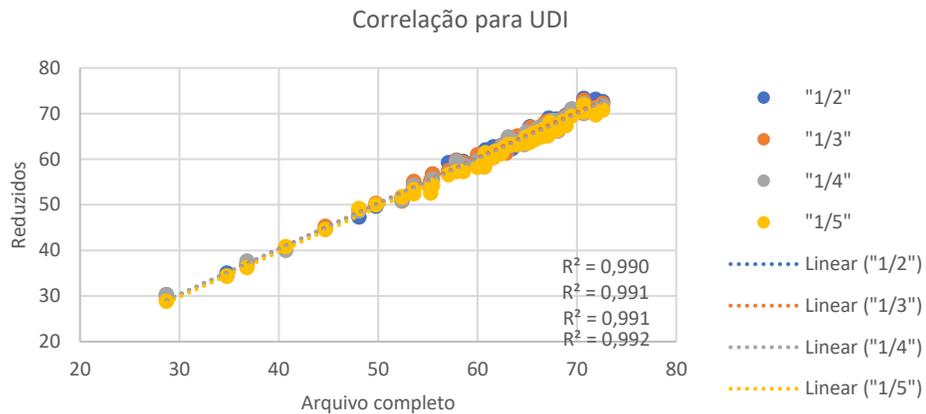


Figura 145. Correlações para UDI das simulações usando arquivo climático reduzido e arquivo climático completo.

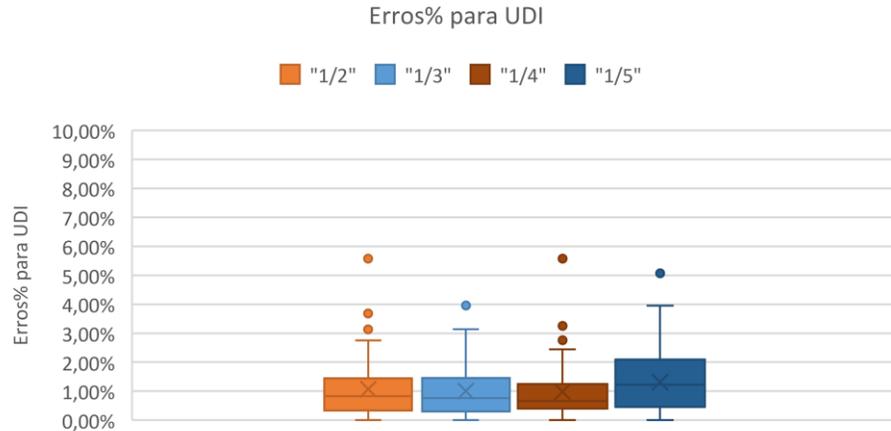


Figura 146. Erros para o indicador de UDI ao reduzir o arquivo climático.

Os resultados para sDGPa demonstram as maiores diferenças testadas nas correlações entre os resultados com as reduções e o arquivo climático completo. No entanto, todas as reduções ainda apresentaram alta correlação entre os resultados, com valores de  $R^2$  próximos de 0,98 para todas as reduções. Da mesma forma que na análise de UDI, as reduções não apresentaram diferenças significativas nas correlações.

Os erros para sDGPa foram os maiores obtidos, atingindo picos de 10% para resultados com redução de 1/5. Isso pode estar relacionado ao fato de a métrica utilizar uma análise de iluminância e outra de brilho, o que pode gerar mais variações associadas à avaliação randômica do raio traçado. Ainda assim, os erros foram considerados baixos. As médias quadráticas dos erros

foram de 2,51% para redução de 1/2, 2,49% para redução de 1/3, 1,95% para redução de 1/4 e 2,65% para redução de 1/5.

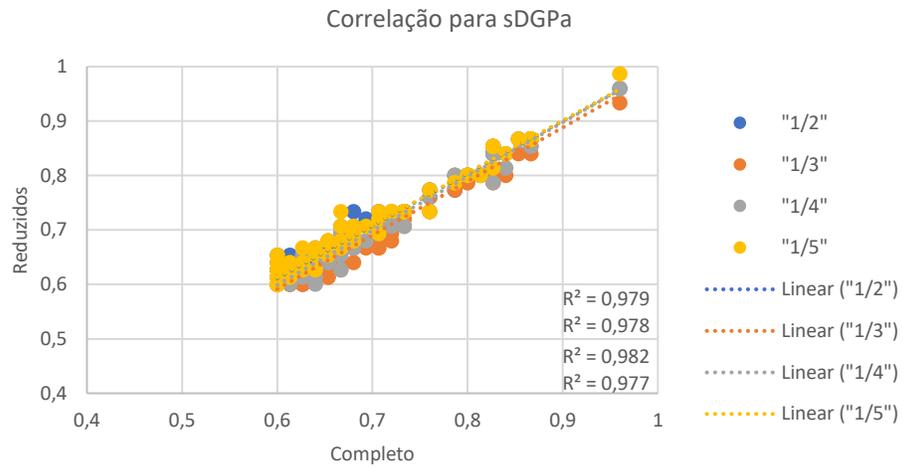


Figura 147. Correlação para sDGPa das simulações usando arquivo climático reduzido e arquivo climático completo.

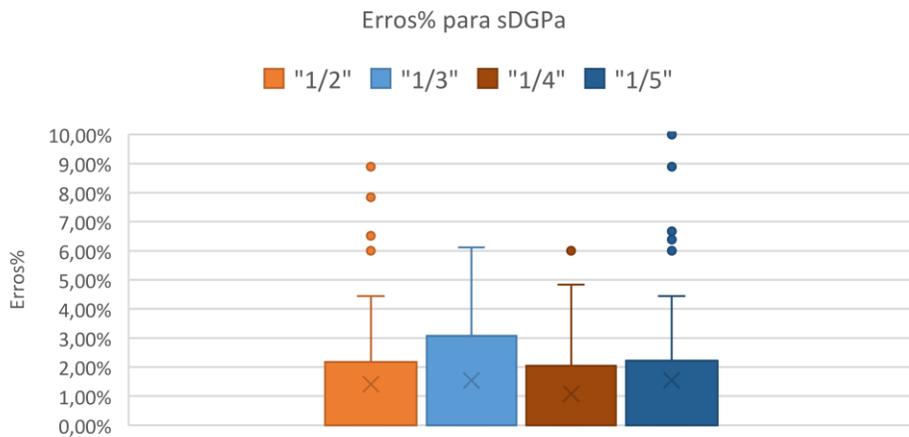


Figura 148. Erros para o indicador de sDGPa ao reduzir o arquivo climático.

Já a Figura 149 e Figura 151 apresentam dados de correlação e erros de simulações usando o *Radiance* e o método RTS (*Radiant Time Series*) para os arquivos climáticos reduzidos em comparação com o arquivo climático completo. Ao analisar os dados, observa-se que as correlações foram as maiores até o momento, variando entre 0,99 e 1 para todos os arquivos climáticos reduzidos. No entanto, os valores de erro variam entre as diferentes configurações de arquivos climáticos reduzidos. Apesar de baixos, atingiram pico máximo de 3,32% na redução de 1/3 para a combinação com brise horizontal, 11 aletas e ângulo de 60° e maior profundidade. Em geral, os

maiores erros foram obtidos nas reduções de 1/3, 1/4 e 1/5, sendo a redução de 1/3 a combinação com maiores erros, enquanto que os menores erros foram obtidos com o arquivo climático reduzido em 1/2.

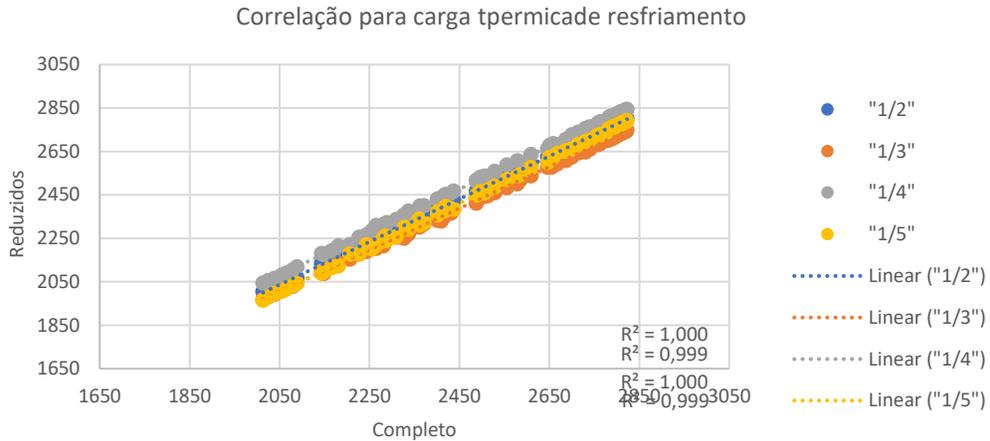


Figura 149. Figura 150. Correlação para  $CTR_{pico}$  das simulações usando arquivo climático reduzido e arquivo climático completo.

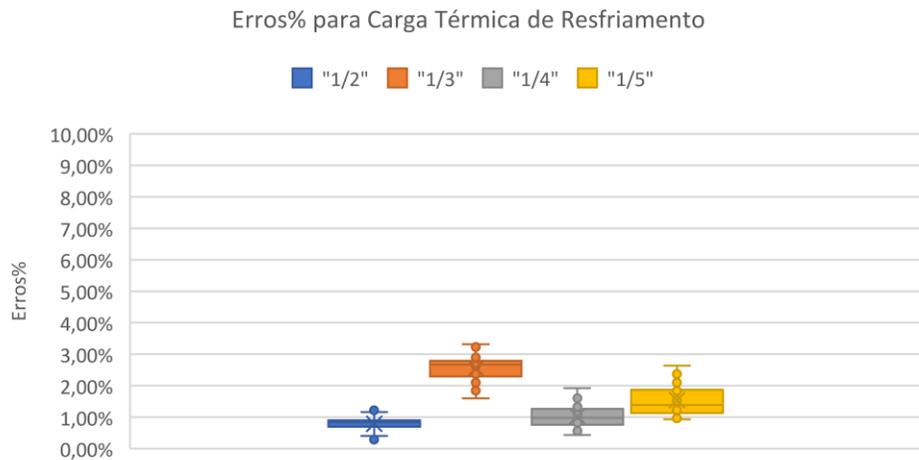


Figura 151. Erros para o indicador de  $CTR_{pico}$  ao reduzir o arquivo climático.

Em conclusão, a análise dos dados mostra que altas correlações foram observadas em todas as configurações de arquivos climáticos reduzidos. As análises de ofuscamento obtiveram maiores erros atingindo pico de 10%. Já UDI e carga térmica os menores erros, sendo todos menores que 4%. Em conclusão, a análise dos dados indica a possibilidade de reduzir os arquivos climáticos, porém a redução pode levar a erros e portanto, é importante considerar critérios conservadores ao considerar esta estratégia e avaliar os possíveis erros associados em relação aos objetivos da

simulação e às limitações de recursos computacionais disponíveis. De toda forma, as correlações altas demonstram que é possível utilizar os fatores de redução do arquivo climático para otimizações, uma vez que a redução não altera a classificação geral das soluções.

### **4.3.2 Seleção dos métodos de simulação**

Este item apresenta os resultados comparativos obtidos para seleção dos métodos de simulação utilizados para avaliar o desempenho térmico e de iluminação natural para processos de projeto de fachadas guiados por desempenho. Esta etapa está dividida em duas partes: a primeira parte apresenta os resultados obtidos para os métodos de desempenho térmico, que foram comparados com os resultados obtidos a partir do software *Energyplus*. A segunda parte apresenta os resultados obtidos para os métodos de desempenho de iluminação natural, que foram comparados com os resultados obtidos a partir do software *Daysim*. Ambas as partes apresentam uma análise dos erros obtidos e apontam as principais conclusões que podem ser tiradas a partir dos dados coletados. Com base nos resultados apresentados, espera-se que os dados contribuam para escolha de técnicas e métodos que possam ser utilizados para processos de projeto de fachada guiadas por desempenho.

#### **4.3.2.1 Desempenho térmico**

A comparação dos resultados de desempenho térmico foi realizada utilizando o método RTS descrito pela ASHRAE, integrado a uma simulação de radiação solar incidente na fachada através do método de duas fases no *Radiance*. Tal qual os casos anteriores, o clima utilizado para as simulações foi o de Porto Alegre. Os resultados horários de carga térmica de resfriamento foram estabelecidos e comparados aos resultados obtidos pelo *EnergyPlus*. Os dados obtidos permitiram comparar os resultados considerando os erros quadráticos dos valores para todo o ano, ou seja, para as 8760 horas anuais, para as quatro orientações (norte, sul, leste e oeste).

A análise dos resultados apresentados permitiu avaliar a eficácia do método RTS na simulação do desempenho térmico em edificações associado ao *Radiance* integrado ao processo de projeto, e apontou as principais diferenças observadas em relação aos dados obtidos pelo *EnergyPlus*. Com base nesses resultados, validou-se o uso do método RTS para aplicação no

processo de projeto guiado por desempenho de modo a obter um modelo interoperável, ágil e sensível a elementos de sombreamento com geometrias complexas.

Os erros quadráticos obtidos para a carga térmica de resfriamento horário comparando a combinação de *Radiance* e RTS e o *EnergyPlus* mostram que é possível considerar o método para simulações no processo de projeto. Para as fachadas norte, sul, leste e oeste, a combinação de *Radiance* e RTS apresentou erros quadráticos médios dos picos de 1.9, 1.5, 1.3 e 1.7 kWh, respectivamente, em relação aos resultados do *EnergyPlus*. A variação dos erros quadráticos foram de 9 até 15% ao comparar os picos encontrados no *EnergyPlus*. Sendo os valores de 9%, 15%, 12% e 12%, para as fachadas norte, sul, leste e oeste respectivamente. O método matemático foi mais conservador em todos os casos.

Esses resultados indicam que o método simplificado pode ser uma opção útil para avaliar a carga térmica de resfriamento horário durante o processo de projeto de arquitetura, principalmente em situações em que se deseja interoperabilidade, e não é desejável utilizar ferramentas de simulação mais complexas como o *EnergyPlus*. No entanto, é importante ressaltar que os resultados obtidos devem ser avaliados cuidadosamente, considerando as limitações e pressupostos do método matemático utilizado. A Figura 152, Figura 153, Figura 154 e Figura 155 apresentam os dados horários encontrados para o método matemático (superior) e *EnergyPlus* (inferior). Demonstrando que os valores possuem padrão, períodos de pico e ordem de grandeza semelhantes.

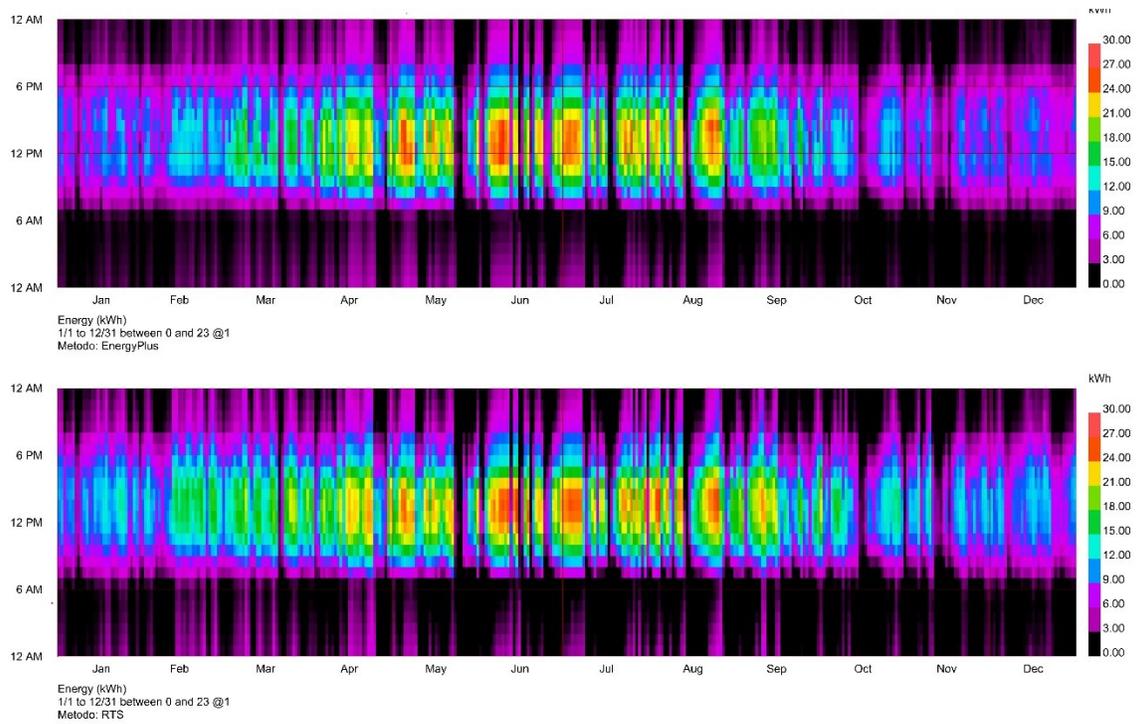


Figura 152. Comparação entre método matemático (inferior) e Energyplus (superior) para fachada norte.

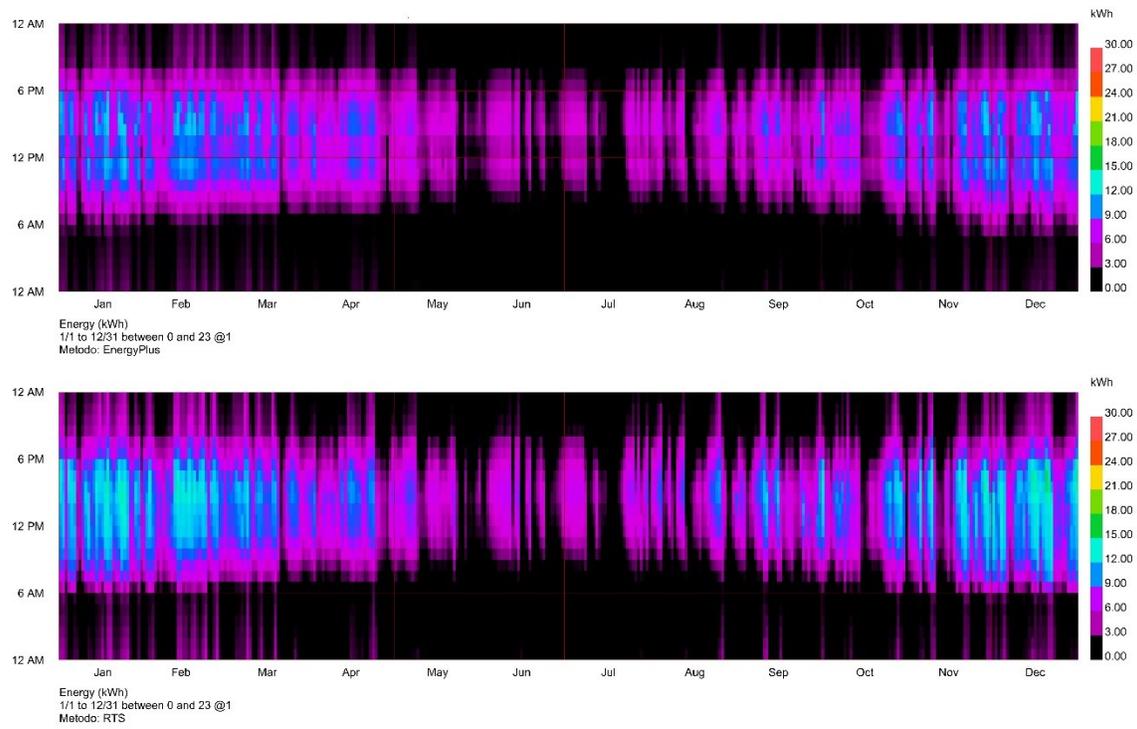


Figura 153. Comparação entre método matemático (inferior) e Energyplus (superior) para fachada sul.

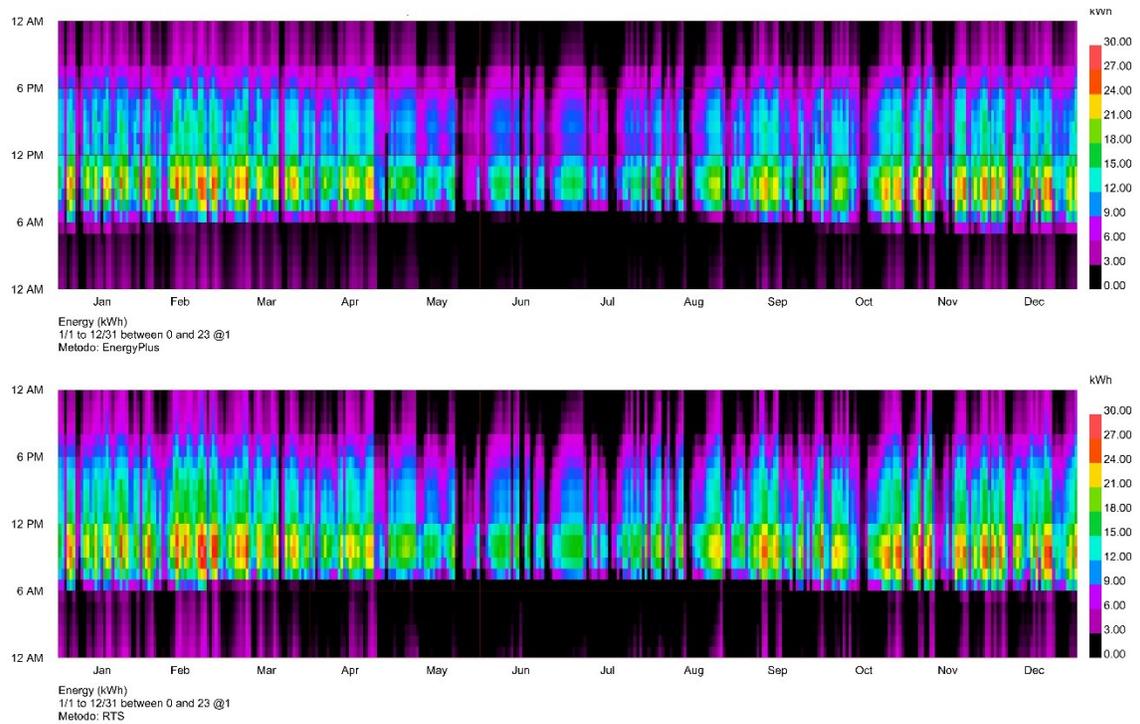


Figura 154. Comparação entre método matemático (inferior) e Energyplus (superior) para fachada leste.

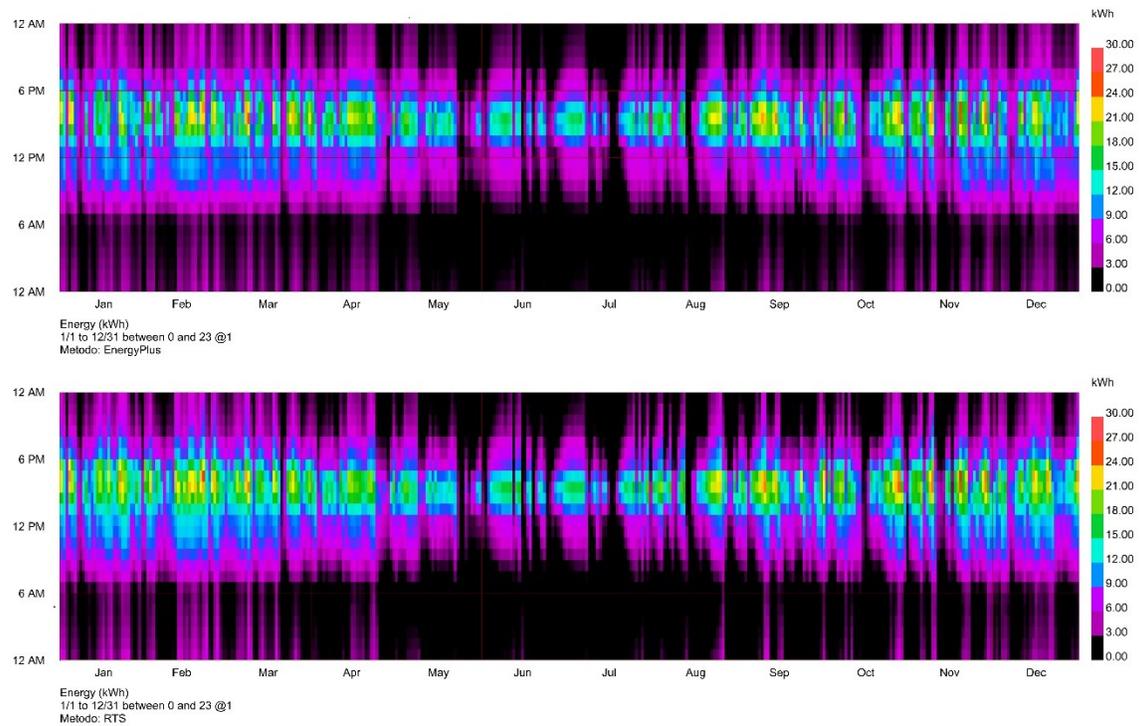


Figura 155. Comparação entre método matemático (inferior) e Energyplus (superior) para fachada oeste.

#### 4.3.2.2 Iluminação Natural

Os resultados iniciam com a apresentação do tempo médio das simulações para cada método, uma vez que essa característica é de significativa importância para processos de otimização em modelos arquitetônicos. Posteriormente, os resultados comparam os erros quadráticos e diferenças encontrados nos resultados obtidos para cada simulação. A Tabela 25 mostra o tempo médio das simulações realizadas para cada método avaliado. Em geral, o método de duas fases com simplificações foi até 10% mais rápido que o segundo método avaliado, *path tracing* com as configurações de simulação utilizadas.

Tabela 25. Tempo de simulações realizadas para cada método.

Método	Tempo médio (min)	Tempo total (min)
DS	26,96	970,87
2F	1,54	46,20
2Phsim	0,87	26,10
PT	2,62	78,66
PTsim	0,98	30,11

Os resultados comparativos das simulações mostram que o método de duas fases apresentou maiores correlações para os resultados de sDA, com  $r^2$  igual a 0,99. Já o método *path-tracing* obteve resultados de correlação menores, com  $r^2$  de 0,94 e 0,95 (figura 4). O *boxplot* foi estabelecido considerando os dados de desvio usando as equações 1 e 2 (figura 5). O método de duas fases foi o único que não ultrapassou a linha de 20% de erros.

No método de duas fases, a média dos resultados para os desvios (D%) foi de 1,50% para a solução sem simplificações e 1,55% para as soluções com simplificações, enquanto a média quadrática de D% foi de 3,38% sem simplificações e 3,35% com simplificações. Já o método *path-tracing* obteve média dos resultados para D% de 6,97% para a solução sem simplificações e 6,57% para as soluções com simplificações, e média quadrática de D% de 12,45% sem simplificações e 11,68% com simplificações (figura 5). Considerando os outliers, o método de duas fases obteve desvios máximos que atingiram 11%, enquanto o método de *path-tracing* atingiu 27%.

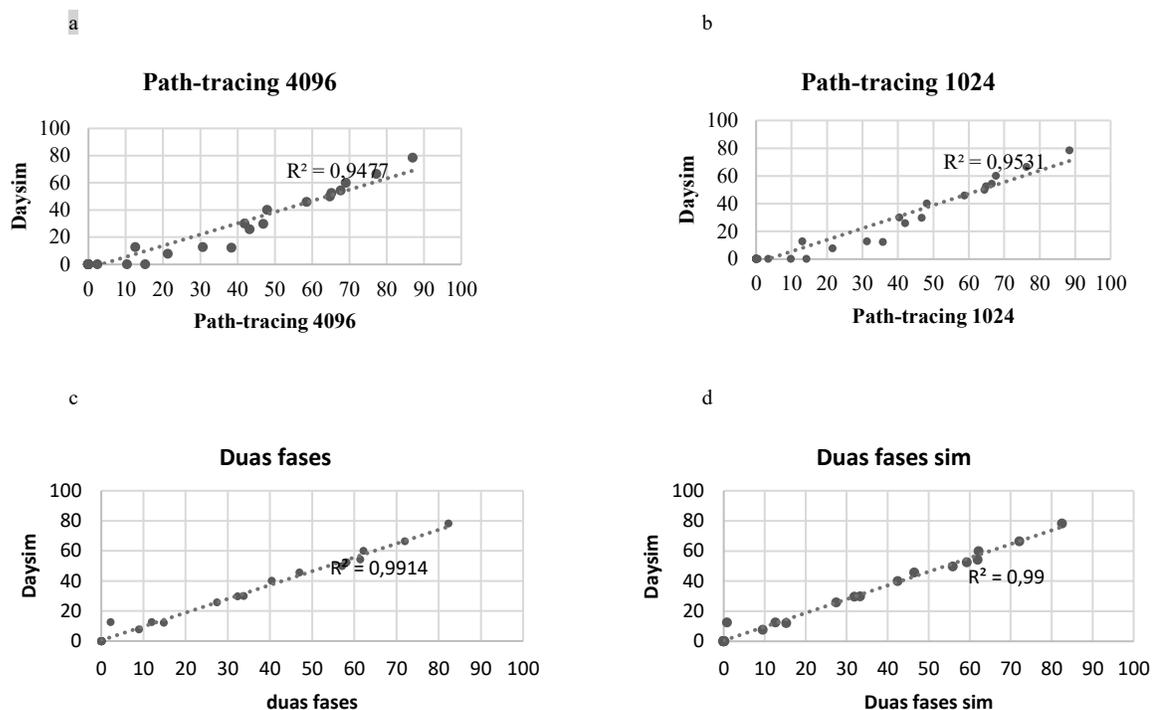


Figura 156. Correlação entre os métodos testados e os resultados do Daysim .

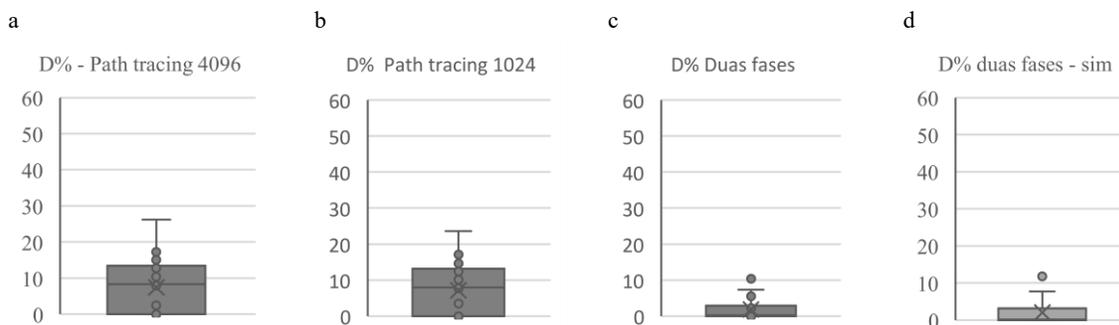


Figura 157. Boxplots para os resultados do desvio sDA para cada nível de iluminância testado.

Dois casos foram selecionados para comparar os resultados de DA (disponibilidade de luz natural) para cada um dos 492 sensores distribuídos na sala. Dois critérios de seleção foram estabelecidos: um caso de outlier, sendo o maior desvio verificado anteriormente e um caso representativo próximo ao valor médio dos desvios calculados, ambos para os métodos com simplificações de configuração. Esta etapa considerou os erros (diferença absoluta entre os dados de referência e os dados testados) para os sensores da sala. Assim, foi selecionado o caso que utilizou vidro com Tvis de 0,173 e SD 2 que obteve um desvio de 7,5% em relação ao Daysim para sDA de 300 lux para o método de duas fases, e 35% para o mesmo nível de iluminância para o

método *path tracing*. Também foi selecionado o caso com combinação de vidro com Tvis 0,697 e WSD que obteve desvio de 4,3% para sDA de 1500 lux para o método de duas fases, e 10,16% para o mesmo nível de iluminância para o método *path tracing*.

Os resultados mostram que no caso com os maiores desvios, o *path tracing* obteve um erro quadrático médio de 21,00% para os valores de DA (300 lux), enquanto o modelo de duas fases obteve um desvio quadrático médio de 5,6%. Ou seja, o *path tracing* apresentou um erro 15,40% maior em relação ao modelo de duas fases com simplificações (figura 6). No caso com desvios médios, o *path tracing* obteve um erro quadrático médio de 9,00% para os valores de DA (1500 lux), enquanto o modelo de duas fases obteve um erro quadrático médio de 8,56%. Ou seja, houve uma diferença de apenas 0,31% entre os dois métodos (figura 7).

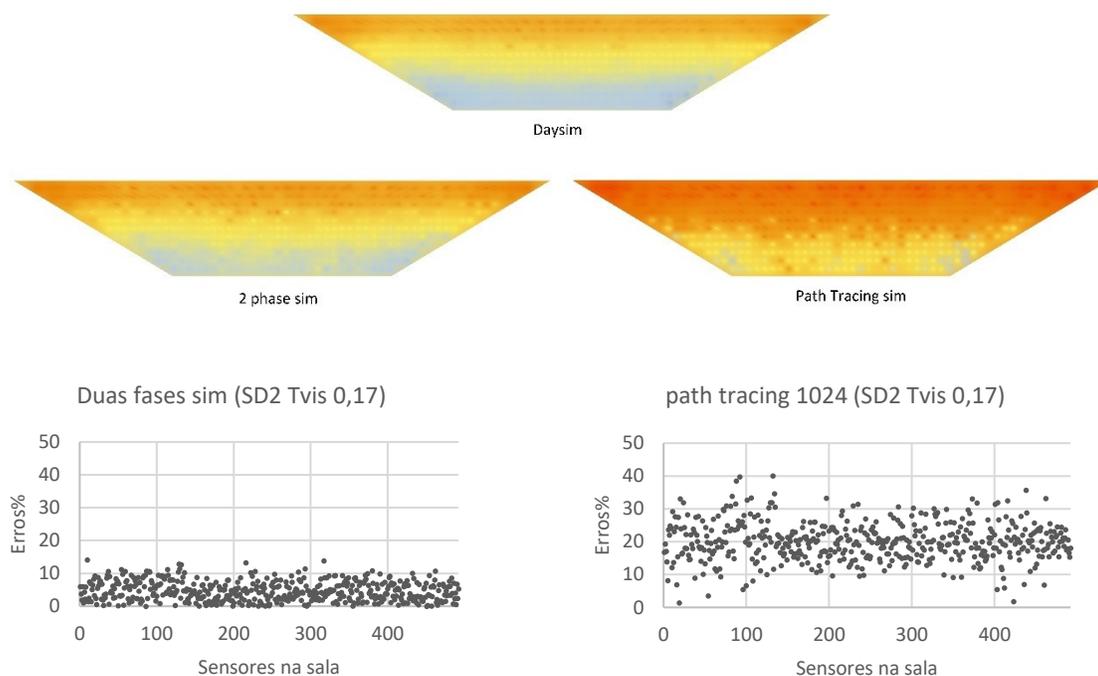


Figura 158. Erro para resultados de DA em cada sensor na sala.

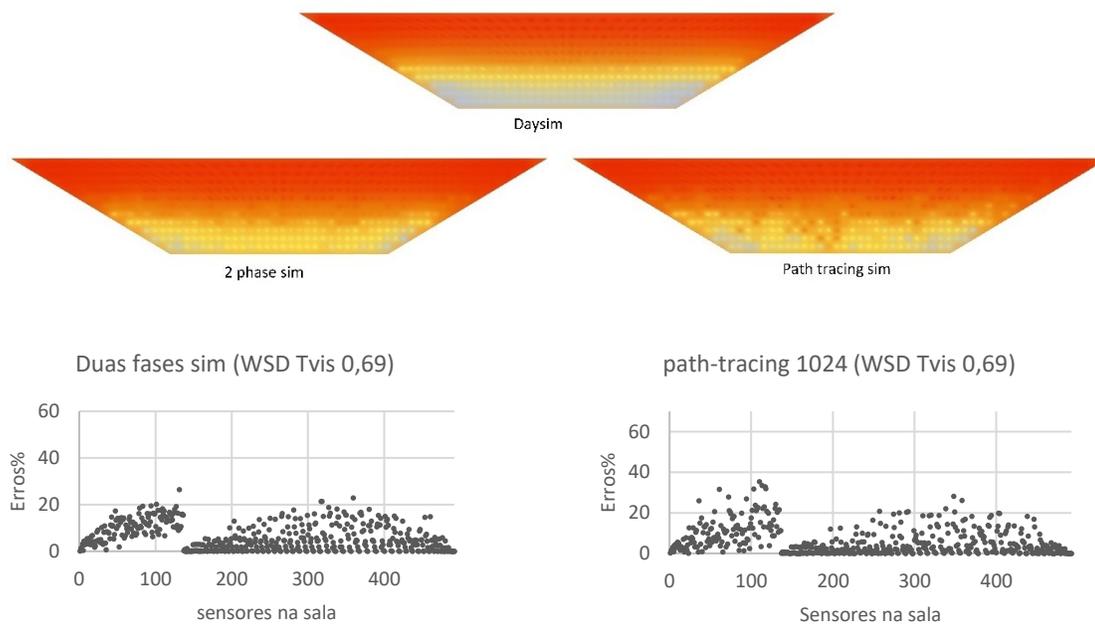


Figura 159. Erro para resultados de DA para cada sensor na sala.

Em conclusão, os resultados indicam que o método de duas fases apresentou resultados melhores em relação à correlação e erro em comparação ao método *path-tracing*, quando avaliados para iluminação natural em vidro estático. Além disso, o método de duas fases não ultrapassou a linha de 20% de erros, o que o torna uma opção mais confiável para processos de otimização em modelos arquitetônicos, ao usar o *Daysim* como critério. Os dados de tempo médio de simulação também mostraram diferenças significativas entre os métodos, destacando a importância de considerar esse fator em projetos de grande escala. Em simulações durante o processo de otimização, precisão e velocidade são fatores importantes.

A interface utilizada para o método de duas fases permite maior customização das simulações, ao mesmo tempo que pode por essa razão serem mais difíceis de usar para não-especialistas. Já a interface usada para o método de *path-tracing* é mais condensada e didática, porém permite menos customização. Essas características tornam o método de duas fases uma escolha mais adequada para simulações de iluminação natural neste contexto, pois fornece resultados mais precisos, além de permitir maior customização dos dados de entrada, o que permitiu uma quantidade de tempo menor para executar as simulações. No entanto, é importante ressaltar

que os resultados obtidos podem variar dependendo da complexidade do modelo simulado e das simplificações aplicadas nos modelos.

#### 4.3.2.3 Comparando o número reflexões

Para definir o número de reflexões (-ab) para as simulações de carga térmica, foi realizado avaliações paramétricas considerando o caso base descrito no item 3.3.1. A Figura 160 apresenta os erros dos modelos simulados comparando com o número de reflexões (parâmetro -ab) que variou de 1 a 8, sendo 8 usado como referência. Os valores de erro apresentados são relativamente baixos. Mesmo o valor mais alto de erro (7,15% para a solução de sombreamento vertical, com 10 aletas, ângulo de 60° e -ab 1) ainda é relativamente pequeno em relação ao valor de referência. Ao analisar os resultados, é possível notar naturalmente que o erro diminui à medida que o número de reflexões aumenta. Sendo que, já nas medições de erro para -ab 2 a -ab 7, há uma diminuição significativa em relação às medições iniciais (-ab 1). A média quadrática dos erros sugere uma convergência com resultados abaixo de 1% já no -ab 2. Porém é a partir do -ab 4 que não há outliers, sendo que os resultados do -ab 3 apresentaram apenas um outlier abaixo de 2% de erro. Isso sugere que, para o cômputo de carga térmica é possível utilizar um baixo número de reflexões.

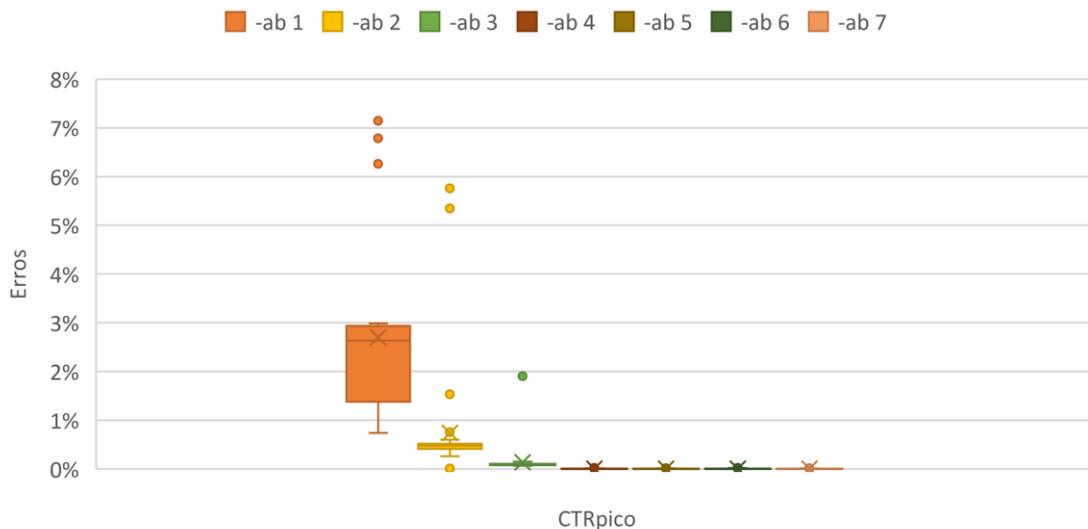


Figura 160. Erros para  $CTR_{pico}$  por número de bounces.

Já o Figura 161 apresenta os resultados das simulações paramétricas para UDI. Os valores de erro indicam a diferença percentual entre o resultado da simulação e o valor da simulação com 8 reflexões (-ab 8). Foi observado que os erros das simulações tendem a aumentar com o aumento

do número de aletas e do ângulo de inclinação dos elementos de sombreamento. Em relação à direção das aletas, os elementos de sombreamento verticais apresentaram os maiores erros de simulação.

Para UDI, os valores de erro são mais altos quando comparados aos anteriores. Ao analisar os resultados, é possível notar que a convergência ocorre após 5 reflexões (-ab 5). A média quadrática dos erros foi de 4,63% para as simulações com 4 reflexões, 1,49% para as com 5 reflexões e 0,67% e 0,54% para 6 e 7 reflexões, respectivamente. Dependendo da exigência das simulações é possível utilizar 4 reflexões para situações menos exigentes (com erros menores que 5%) e a partir de 5 para situações mais exigentes.

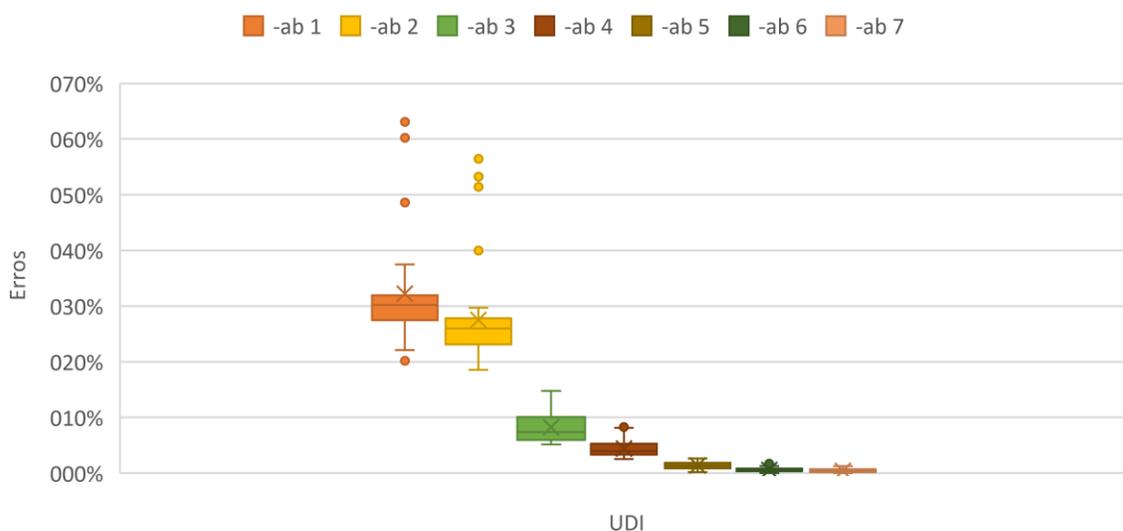


Figura 161. Erros para UDI por número de bounces.

Com base nos resultados anteriores, os parâmetros de reflexões adotados nas simulações foram de ab 3 para a carga térmica de resfriamento, ab 5 para a UDI (iluminância útil) e ab 2 para sDGPa. O valor de reflexões menos exigente para o cálculo de ofuscamento se deu porque a maior fonte de ofuscamento investigada está associada ao projeto da fachada e envolve a visão direta do sol através das aberturas de acordo com conclusões de Jones, 2020. É importante destacar que esses parâmetros podem variar dependendo das especificidades do projeto e das demandas de cada caso.

# Capítulo 5

## Conclusões

No capítulo de conclusões, a tese de doutorado sintetiza os principais resultados e contribuições da pesquisa. Está dividida em seis partes. A seção 5.1 explora a caracterização de parâmetros relevantes, fornecendo uma compreensão das variáveis envolvidas no estudo. Em seguida, a seção 5.2 discute a criação de uma biblioteca de modelos paramétricos, permitindo a geração de soluções de projeto. O desenvolvimento de um modelo analítico integrado e interoperável é abordado na seção 5.3, destacando a importância da integração de diferentes aspectos para uma abordagem holística do problema. A seção 5.4 explora a análise multivariáveis e o modelo de otimização utilizado, fornecendo insights sobre as relações entre os diferentes parâmetros e a busca pela melhor solução. Os indicadores de desempenho utilizados e a análise dos dados são apresentados na seção 5.5, oferecendo um resumo dos resultados obtidos. Por fim, a seção 5.6 reconhece as limitações encontradas durante a pesquisa e aponta possíveis direções para futuras investigações, incentivando o avanço contínuo do conhecimento nessa área.

O método de *Performance-Based Design* (PBD), ou projeto guiado por desempenho, é uma abordagem que se concentra em alcançar um desempenho específico em detrimento da subjetividade. No contexto de fachadas complexas e otimizadas, o PBD pode ajudar a identificar os requisitos de desempenho específicos para soluções customizadas. Ao considerar requisitos definidos, a equipe de projeto pode usar ferramentas de modelagem e simulação para testar e avaliar várias opções de fachada até que a solução final atenda a todos os requisitos de desempenho identificados. Ao usar o PBD, a equipe de projeto pode ter mais possibilidades para explorar soluções complexas que poderiam não ser possíveis com abordagens mais tradicionais de projeto.

Por meio da modelagem paramétrica, também foi possível estabelecer um modelo analítico flexível adequado à análise de múltiplas variáveis, integrando o desempenho térmico, visual e luminoso. Isso auxiliou o bom andamento dos algoritmos de otimização para a obtenção de ciclos rápidos de análise, compatíveis com o problema arquitetônico. Através da modelagem paramétrica, também foi possível integrar a análise dos indicadores de desempenho e a análise dos dados para os casos estudados. Dessa forma, a modelagem paramétrica pode ser utilizada por arquitetos e engenheiros não apenas para estabelecer soluções complexas, mas também para estabelecer métodos analíticos apropriados a projetistas, auxiliando na otimização do desempenho térmico, visual e luminoso de fachadas de edifícios e auxiliando na escolha das soluções mais adequadas em termos de custo, estética e desempenho.

Em resumo, este estudo também demonstra a importância da modelagem paramétrica para a criação de soluções otimizadas. Isso ocorreu através da criação de bibliotecas de modelos flexíveis e do estabelecimento de modelos analíticos adequados à análise de multivariáveis. Esse meio possibilita também customizar processos para auxílio na seleção de soluções customizadas para cada caso, principalmente considerando o desempenho de requisitos conflitantes como geralmente ocorre na problemática do projeto arquitetônico.

A escolha em trabalhar com edifícios não residenciais altamente envidraçados se deu por conclusões de pesquisas anteriores, apontadas no item 2.1, citadas entre as páginas 18 e 22 da tese, que demonstram uma predileção dos usuários por janelas amplas de piso a teto e contato visual com o exterior. Essa abordagem é desafiadora para climas quentes como os das cidades brasileiras, sendo que a tese demonstra a importância do uso de soluções de sombreamento combinadas a

fachadas altamente envidraçadas para o sucesso deste tipo de solução ou redução do impacto da adoção de grandes áreas de envidraçamento.

A presente tese teve como objetivo desenvolver um processo analítico interoperável que integra a modelagem paramétrica e indicadores multicritério de desempenho térmico visual e luminoso de elementos de controle solar em fachadas para processos de geração da forma guiados por desempenho. O objetivo foi atingido, sendo que os processos descritos nesta tese permitem uma abordagem interoperável e simplificação do problema matemático de otimização, o que permite executar um número elevado de gerações e execução de análises de soluções para multi-pavimentos e até para o edifício como um todo. Uma das limitações de pesquisas anteriores é a execução de soluções de otimização para apenas um ambiente, ocultando a informação de que a solução da pele do edifício envolve o edifício com um todo e não apenas uma fração dele. Outro ponto relevante é que o método estabelecido baseado no *Radiance*, inclusive para análise de desempenho térmico, tem potencial de ser sensível a caracterização do funcionamento de elementos de sombreamento com geometrias complexas.

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos objetivos específicos que permitiram a caracterização das funções e parâmetros relevantes para o desempenho térmico, visual e luminoso de elementos de controle solar. Todos os objetivos específicos foram alcançados e as principais contribuições para cada objetivo foram as seguintes:

- O primeiro objetivo específico foi caracterizar a função e os parâmetros relevantes para o desempenho térmico, visual e luminoso de elementos de controle solar para fachadas de edifícios. Esse objetivo foi alcançado por meio da análise de literatura que geraram compilação de informações que foram condensados em diagramas de função e causa e efeito sobre o projeto de janelas e de elementos de controle solar, no que tange vidros e elementos de sombreamento.
- O segundo objetivo específico foi estabelecer uma biblioteca de elementos de controle solar associados aos princípios geradores da forma apropriados ao processo de projeto guiado por desempenho. A biblioteca foi desenvolvida com base nos resultados do objetivo anterior, o que permitiu estabelecer componentes flexíveis de modelagem paramétricas para auxiliar o projeto guiado por desempenho de fachadas para edifícios não residenciais.
- O terceiro objetivo específico foi estabelecer um modelo analítico adequado para a análise de multivariáveis integrando desempenho térmico, visual e luminoso. O modelo foi desenvolvido

com base em análise multivariada, considerando as variáveis de desempenho térmico, visual e luminoso dos elementos de controle solar e os métodos de modelagem associadas aos de simulação. Esta etapa permitiu estabelecer o método e configurações de simulação que priorizam a interoperabilidade e a redução de tempo do ciclo de análise mantendo uma acuracidade aceitável dos resultados considerando pesquisas anteriores.

- O quarto objetivo específico foi definir algoritmos de otimização adequados para a análise de multivariáveis compatíveis com o problema arquitetônico. Foram identificados algoritmos genéticos e algoritmos de busca em grade para a otimização dos elementos de controle solar. Ao final foi escolhido o modelo Hype, baseado na fronteira de pareto para estabelecer os experimentos finais. Essa escolha se deu pela robustez do modelo de otimização, associado a estabilidade da ferramenta utilizada para execução de múltiplas simulações simultaneamente.
- Por fim, o quinto objetivo específico foi estabelecer indicadores de desempenho e análise dos dados dos processos de otimizações estudados para edifícios não residenciais altamente envidraçados. Os indicadores foram estabelecidos com base na revisão de literatura, a análise dos dados através das simulações para validação dos experimentos computacionais e análise estatística da fronteira de pareto.

## 5.1 Caracterização de parâmetros

A caracterização dos parâmetros de projeto relevantes para a ideação de fachadas e estratégias de controle solar foi um passo fundamental para estabelecer a otimização de fachadas paramétricas. Do contrário, a formulação de um sistema paramétrico visando otimização de fachadas seria um passo de modelagem puramente exploratório. Ou seja, a compilação e sistematização do problema de projeto é fundamental para o sucesso do sistema paramétrico integrado ao processo de projeto.

Nesse sentido, a identificação dos fatores que afetam o desempenho da fachada e as estratégias de controle solar associadas a esses fatores são decisivos para se obter uma solução com melhor desempenho térmico, visual e luminoso dos elementos de controle solar no PGD, uma vez que estão associados a caracterização do problema de otimização e ao planejamento da flexibilidade do sistema paramétrico de modelagem. A partir dessa caracterização, foi estabelecido diagramas de função e de causa e efeito, como podem ser vistos nas Figuras 13, 14, 22, 37 e 44 que

possibilitaram auxílio na escolha das estratégias de modelagem e escolha de indicadores de desempenho que permitiram otimizar o desempenho da fachada considerando aspectos térmicos, visuais e de iluminação natural, além de considerar a sua estética e funcionalidade. Também permitiu maior clareza sobre como o problema de otimização se insere dentro do escopo do projeto da janela, auxiliando a compreensão de limitações da abordagem.

Por isso, é importante destacar que existem algumas limitações nesse estudo. Em primeiro lugar, os resultados obtidos foram baseados em revisão de literatura, ou seja, não consideram estudos do autor de condições reais específicas. Por isso, podem ainda apresentar variações que não foram consideradas até agora. Além disso, é importante ressaltar que a caracterização dos parâmetros não leva em conta determinadas particularidades de cada projeto, o que pode impactar na sua aplicação prática individualmente. Portanto, é fundamental que futuros estudos considerem essas limitações e busquem aprimorar as metodologias empregadas para a caracterização de outros parâmetros de desempenho.

## 5.2 Biblioteca de modelos paramétricos

Esta tese apresentou uma biblioteca de modelos paramétricos para soluções de controle solar em fachadas de edifícios, que foi fundamental para o processo de projeto guiado por desempenho descrito. A modelagem paramétrica possibilita a criação de modelos 3D flexíveis, complexos e detalhados, que podem ser facilmente modificados e ajustados em tempo real, de acordo com as necessidades do projeto. Com base nos parâmetros relevantes identificados, foram desenvolvidos componentes paramétricos que geram diversas variações de soluções e cenários, incluindo soluções de controle solar para fachadas de edifícios. Esses componentes estão disponíveis no Anexo 5 e permitem a variação de aspectos geométricos específicos adequados ao processo de projeto relacionado à problemática identificada, tais como a geometria urbana com base em indicadores urbanos, a geometria do edifício e % do core, paginação da janela e elementos de sombreamento. O último é possível variar a densidade, direção, largura, ângulo e impressão de padrões paramétricos. Essa abordagem permite uma ampla variedade de opções para o processo de seleção das soluções mais adequadas.

Os componentes de modelagem foram essenciais para um processo de otimização bem-sucedido, permitindo a geração de soluções personalizadas e flexíveis. Essa variação facilita a

busca de soluções pelo processo de otimização, adaptando-se às necessidades específicas de desempenho e princípios estéticos. Além disso, os componentes que executam padrões simplificam o problema matemático e facilitam operações matemáticas. Eles imprimem variações harmônicas e/ou não harmônicas aos elementos de sombreamento independentemente de suas configurações geométricas, ampliando ainda mais as possibilidades de variação dentro do sistema de otimização.

A modelagem paramétrica é uma técnica que permite a manipulação de diversos parâmetros de design e análise, como características geométricas e óticas da solução. Ao permitir estabelecer modelos altamente flexíveis, possibilita a criação de soluções também altamente otimizadas. No entanto, é importante ressaltar que a utilização de uma biblioteca de modelos paramétricos não substitui o julgamento do projetista e o conhecimento específico sobre o projeto em questão. Na verdade, ela deve ser representação de uma parte do processo de busca do projetista.

Com o uso desses componentes de modelagem, é possível obter uma ampla variação de soluções complexas. Sendo que, através dessa abordagem é possível não apenas estabelecer soluções customizadas e generalistas. Dessa forma, é possível não apenas otimizar soluções, mas também usá-las para investigar características e padrões de combinações para soluções de controle solar, estabelecer análises de sensibilidade dos parâmetros variáveis, investigar estratégias de projeto e estabelecer banco de dados para investigação de métodos computacionais, como modelos de aprendizado de máquina, os quais serão considerados em investigações futuras.

Para outras pesquisas futuras, recomenda-se o desenvolvimento de mais variações de modelos paramétricos que incluam a consideração de fatores econômicos e de construtibilidade e fabricação, bem como a aplicação desses modelos em uma variedade maior de projetos de fachadas de edifícios. Além disso, a avaliação do desempenho real dessas soluções em condições reais de uso seria ideal para a validação desses modelos paramétricos e para a compreensão da eficácia dessas soluções em diferentes contextos climáticos e urbanos.

### **5.3 Modelo analítico integrado e interoperável**

O modelo estabelecido para a análise multivariáveis, integrando desempenho térmico, visual e luminoso, foi considerado eficiente na avaliação do desempenho dos elementos de controle solar em diferentes cenários e para uso no processo de otimização. A utilização do modelo na otimização proporcionou uma abordagem sistemática para a seleção de soluções de interesse.

Sendo que pode ser aplicada para diferentes contextos e escalas, incluindo análises de fachadas para o edifício. A agilidade colabora para exploração de múltiplas alternativas e para execução de um número elevado de gerações na otimização, contribuindo na busca da fronteira de pareto próxima a verdadeira.

O método de duas fases apresentado por Subramaniam (2018) foi selecionado para o modelo integrado de simulação devido à sua precisão e confiabilidade em relação ao método de *path-tracing* estabelecido no *ClimateStudio* (2020). Ao comparar os resultados obtidos pelo método de duas fases com os obtidos pelo software *Daysim*, utilizando o erro quadrático médio como métrica de avaliação, foi observado que o método de duas fases apresentou menos desvios e, portanto, foi escolhido como o método preferido para a simulação integrada de desempenho térmico, visual e luminoso. Esses resultados podem ser acessados no item 4.3.2.2, na página 206. O modelo integrado com simplificações desenvolvido usando o método de duas fases foi considerado preciso, proporcionando simulações rápidas e resultados consistentes na comparação com o *Daysim*.

O método de duas fases combinado ao modelo matemático RTS da ASHRAE para cálculo de carga térmica apresentou resultados satisfatórios e conservadores ao comparar com resultados horários obtidos pelo *EnergyPlus*. Esse método foi analisado usando o erro quadrático médio, e os resultados mostraram que a combinação do modelo de simulação de duas fases com o modelo RTS é adequada para ser utilizada na fase de concepção de soluções de projeto guiadas por desempenho obtendo desvios menores que 20%. Os resultados podem ser consultados no item 4.3.2.1 na página 202. Com essa combinação, é possível realizar análises de desempenho térmico e luminoso de forma integrada, interoperável e eficiente para auxiliar o processo de projeto, permitindo análise de elementos de sombreamento complexos em termos de geometria e propriedades óticas que inviabilizariam a abordagem usando *EnergyPlus* no contexto de PGD (no caso deste trabalho, o elemento de sombreamento considerado no experimento é translúcido). O processo também permite que projetistas e engenheiros possam tomar decisões mais informadas sobre a solução de controle solar a ser adotada em seus projetos usando o modelo de arquitetura como base para extração dos dados de entrada.

O método de simulação de duas fases combinado ao modelo RTS para cálculo de CTR, proporcionou a criação de um modelo analítico interoperável, que permite analisar

simultaneamente o desempenho térmico, visual e luminoso de edifícios utilizando apenas um modelo 3D. Isso representa uma grande oportunidade em termos de eficiência na modelagem e análise de edifícios, pois elimina a necessidade de utilizar diferentes softwares e modelos 3D para analisar diferentes aspectos do desempenho. Assim, é possível realizar uma análise integrada do desempenho do edifício, o que simplifica o processo e contribui para adequação às etapas de projeto.

A redução do arquivo climático foi uma estratégia considerada viável para estabelecer soluções que representam considerações anuais, mas com redução significativa do tempo de simulação. Durante a investigação da redução dos dados climáticos, foram priorizados fatores de redução que apresentaram resultados com erros inferiores a 2% em relação aos resultados obtidos com o arquivo climático completo. Essa abordagem permitiu reduzir em até um terço o tempo de simulação em cada ciclo de análise. Essa técnica foi considerada especialmente vantajosa em projetos de grande escala e complexidade, onde a redução do tempo de simulação é uma necessidade para aumentar a eficiência do processo de projeto. Os resultados comparativos podem ser acessados no item 4.3.1, na página 196.

A pesquisa apresenta um avanço na abordagem de simulação durante o processo de projeto, integrando desempenho térmico, visual e luminoso com diferentes métodos de simulação. No entanto, é importante destacar que existem algumas limitações e possibilidades de aprimoramento em futuras pesquisas. Uma possível limitação é a utilização de modelos simplificados para análise de desempenho térmico dos elementos de controle solar, o que pode afetar a precisão dos resultados. Nesse sentido, pesquisas futuras poderiam explorar métodos validados que permitam a integração com modelos de projeto de arquitetura informados (BIM), obtendo informações numéricas de área e materialidade da geometria extraídas de modelos paramétricos. Isso permitiria a análise de desempenho térmico integrada ao processo de projeto de arquitetura sem a necessidade de estabelecer um modelo 3D separado. Outra possibilidade de aprimoramento é o desenvolvimento de modelos analíticos com mais abordagens como: a influência da ventilação natural ou diferentes rotinas de uso humano interno na performance dos elementos de controle solar.

Além disso, poderiam ser investigados outros métodos de redução de dados climáticos além do apresentado nesta pesquisa, visando identificar outras estratégias que possam contribuir para

uma redução ainda maior do tempo de simulação sem comprometer a precisão dos resultados. Por fim, recomenda-se investigar a aplicabilidade do modelo proposto em diferentes contextos, como em edifícios de diferentes tamanhos e usos, permitindo assim uma avaliação mais ampla de sua eficácia e aplicabilidade.

## 5.4 Análise multivariáveis e modelo de otimização

A análise de multivariáveis foi importante para o sucesso da otimização do desempenho de elementos de controle solar em edifícios. Isso porque, tornou possível identificar as interações entre diferentes variáveis conflitantes e suas influências no desempenho geral do sistema. A utilização de análises de multivariáveis pode levar a uma melhor compreensão do comportamento do sistema e, conseqüentemente, permitir uma tomada de decisão mais precisa e fundamentada na fase de projeto. Ou seja, utilizar como parâmetro ambiental para otimização indicadores isolados, como apenas o desempenho da luz natural ou desempenho térmico pode gerar soluções reducionistas e até prejudicar a solução final de arquitetura. Por exemplo, a otimização da fachada com base no desempenho térmico, pode gerar soluções com ambientes escuros, com excesso de sombreamento e até sem janelas.

É importante que indicadores conflitantes sejam considerados em conjunto. Aqui é entendido como conflitantes, fenômenos que estão relacionados entre si, como exemplo o desempenho térmico, visual e luminoso. Ou seja, análises multivariáveis de fenômenos que não necessariamente se relacionam, podem gerar também erros semelhantes aos da abordagem isolada unicritério. Por isso, planejar a análise de multivariáveis é uma estratégia relevante no contexto do processo de projeto guiado por desempenho associado à problemática de projeto em Arquitetura e Urbanismo.

A otimização de fachadas é uma área relevante de pesquisa, especialmente considerando a crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental dos edifícios, e o avanço de técnicas de modelagem paramétrica e fabricação digital que permitem maior complexidade de soluções. Nesse contexto, uma das principais dificuldades enfrentadas pelos projetistas é encontrar soluções customizadas que equilibrem o desempenho ambiental e estético, já que muitas vezes esses objetivos podem entrar também em conflito. Por isso, a otimização baseada na fronteira de pareto é uma técnica que permite abordar esse desafio, uma vez que apresenta um leque de soluções

otimizadas que podem ser elencadas com base na preferência, ou outros aspectos qualificadores das soluções.

Essa técnica permite a identificação de soluções ótimas que equilibram os objetivos de desempenho ambiental conflitantes e a estética. A fronteira de Pareto é uma representação gráfica de todas as soluções que atendem a todos os critérios de desempenho, onde não é possível melhorar um critério sem prejudicar outro, como o caso do desempenho térmico, visual e de iluminação natural. É uma abordagem que envolve a avaliação de múltiplos parâmetros e permite identificar diferentes cenários, possibilitando a escolha das soluções mais adequadas em cada caso. Essa análise pode ser demorada na otimização de fachadas, se comparada a métodos determinísticos, mas os resultados oferecem mais possibilidades e precisão. Então, embora possa ser relativamente demorada, ela se mostra eficiente no processo de projeto por permitir a identificação de soluções que atendam a múltiplos objetivos, o que ainda permite flexibilidade da equipe de projeto para escolher várias possibilidades baseadas em desempenho através de qualificadores metrificados.

Durante a pesquisa, o algoritmo Hype foi utilizado para otimização de fachadas paramétricas, e os resultados em geral demonstraram sua eficácia no processo de seleção das soluções para o desempenho térmico e de iluminação natural. O Hype é um algoritmo de otimização evolutiva que utiliza um processo de busca aleatória controlada para encontrar soluções ótimas em um espaço de busca complexo. O trabalho demonstra sua capacidade de trabalhar com múltiplos objetivos simultaneamente, juntamente com sua habilidade de explorar o espaço de busca, sendo uma ferramenta viável para a otimização de fachadas paramétricas conforme demonstra as pesquisas citadas nos itens 2.2.6 e 3.2.4 desta tese.

Embora esta tese ofereça *insights* sobre otimização de fachadas paramétricas, há algumas limitações que precisam ser levadas em consideração. Apesar de a técnica de otimização baseada na fronteira de Pareto seja eficiente na identificação de soluções que atendam a múltiplos objetivos, ela pode não permitir a representação de muitos aspectos subjetivos. Portanto, é importante considerar aspectos qualificadores que contribuam para a compreensão da solução, integrados aos indicadores de desempenho. Nesta tese, dois aspectos foram levados em consideração: vista e quantidade de material utilizado. Esses indicadores não abarcam todas as considerações possíveis, por isso, pode ser interessante explorar mais indicadores qualificadores orientados ao usuário na otimização de fachadas paramétricas, tais como, preferências de visuais, combinações estéticas na

aparência dos vidros, variação da materialidade dos elementos de sombreamento e de obstruções limites aceitáveis.

Outra limitação é que o estudo utilizou apenas um algoritmo de otimização, o Hype baseado em considerações de outros autores e na estabilidade das ferramentas disponíveis testadas. Embora tenha se mostrado eficaz, pode ser importante avaliar outros algoritmos e comparar seus resultados. Também seria interessante examinar como diferentes parâmetros e configurações de algoritmos afetam os resultados da otimização. Em resumo, pesquisas futuras poderiam explorar abordagens ainda mais personalizadas e orientadas para o usuário e avaliar outros algoritmos e configurações de parâmetros na otimização de fachadas paramétricas.

## 5.5 Indicadores de desempenho e análise dos dados

Os indicadores de desempenho foram eficientes na avaliação das alternativas dos elementos de controle solar em diferentes cenários, permitindo identificar as melhores soluções para cada caso. A análise dos dados realizadas no item 4.2 indica a importância de cada parâmetro variado na melhoria do desempenho térmico, visual e luminoso dos elementos de controle solar. Os indicadores de desempenho, como o Pico de Carga Térmica de Resfriamento (CTR), o *Useful Daylight Illuminance* (UDI) e o *Spatial Glare Autonomy* utilizando DGP (sDGPa), permitiram a avaliação do desempenho dos elementos de controle solar em diferentes condições e cenários, e junto com os indicadores qualificadores, consideram as necessidades específicas de cada projeto.

Embora não tenha sido considerada uma métrica para o desconforto causado pela assimetria radiante provocado pela fachada, as métricas utilizadas visam redução do calor conduzido e transmitido pela fachada, juntamente com a melhoria da qualidade da iluminação e redução de excessos de luminosidade. Dessa forma, contribuem para uma solução que reduza também o desconforto causado pela assimetria radiante.

A adição de qualificadores metrificados definidos no item 3.2.1, como a qualidade da vista e a quantidade de material, foi crucial para o sucesso do processo de otimização de fachadas. A qualidade da vista é um importante qualificador estético e psicológico, uma vez que considera a visibilidade do ambiente externo e pode estar associado ao nível de privacidade. Já a quantidade de material é um qualificador relacionado ao custo e à sustentabilidade, que avalia a quantidade de material necessário para atingir um determinado desempenho.

A inclusão desses qualificadores tornou o processo de otimização de fachadas mais completo em termos da descrição de fenômenos ambientais associados com o sol, equilibrando o desempenho ambiental, a estética e a sustentabilidade. Assim, é possível encontrar soluções que atendam a múltiplos objetivos, permitindo que os tomadores de decisão façam escolhas informadas que equilibrem a relação custo-benefício com os resultados de desempenho desejados. Os indicadores podem ajudar a identificar *trade-offs* entre desempenho e custo, permitindo que os tomadores de decisão façam escolhas informadas.

Em resumo, os indicadores de desempenho foram eficientes na avaliação do desempenho dos elementos de controle solar e a adição de qualificadores metrificados foi crucial para o sucesso do processo de otimização de fachadas, permitindo encontrar soluções que equilibram o desempenho ambiental e a estética como exemplificado no item 4.2.2 desta tese.

Os resultados da otimização das fachadas para as cidades de Porto Alegre, São Paulo e Salvador foram altamente positivos, como é possível ver nas figuras 132, 133 e 134 e na tabela 22 para os indicadores de desempenho na avaliação dos elementos de controle solar no cenário considerado. A análise dos dados revelou a importância de cada parâmetro na melhoria do desempenho térmico, visual e luminoso dos elementos de controle solar. As economias relacionadas ao caso-base foram significativas, alcançando 23% para o indicador UDI e mais de 80% para os indicadores CTR e sDGPa, dependendo da cidade e do cenário avaliado. As soluções que melhor equilibraram os três indicadores apresentaram um ganho conjunto de até 12%, 64% e 75% para UDI, sDGPa e CTR<sub>pic</sub>, respectivamente, em comparação com a solução sem sombreamento.

As matrizes de dispersão das três cidades estudadas revelam correlações entre os resultados e a área do elemento de sombreamento, como pode ser visto nas Figuras 129, 130 e 131 e na Tabela 21. Os resultados também mostram que o tipo de vidro gera agrupamentos de dados, indicando a relevância desse parâmetro no projeto da fachada. As fronteiras de Pareto e soluções próximas considerando a fachada norte para as três cidades foram apresentadas, indicando soluções ideais que equilibram os objetivos. Os resultados sugerem que a escolha do vidro e dos elementos de sombreamento deve ser equilibrada e que devem ser vistos em conjunto. Ambas as estratégias são fundamentais para otimização de fachadas, sendo incompleto considerar apenas elementos de sombreamento na otimização, ou apenas o vidro.

O estudo mostra que a cidade de Salvador obteve as maiores ocorrências de bons resultados para DGP e UDI e os menores valores de CTR. A análise de correlação das matrizes de dispersão revela correlações lineares fracas entre todos os indicadores de desempenho ao considerar todos os dados em conjunto para as três cidades. No entanto, alguns indicadores mostram correlações moderadas e altas ao isolar combinações específicas de vidro. O modelo de otimização encontrou combinações de geometria que se desviaram de um padrão de dispersão linear para muitos indicadores em decorrência da fronteira de Pareto.

Durante o processo de otimização de fachadas, múltiplos parâmetros de projeto foram variados, como os tipos de vidros, quantidade, inclinação e largura das aletas dos elementos de sombreamento e padrões de aberturas estabelecidos pelos elementos de sombreamento. A análise inicial desses parâmetros permitiu identificar as melhores soluções para cada cenário específico e fornece recomendações para aprimorar o desempenho dos elementos de controle solar em diferentes situações. O experimento demonstra que a variação desses parâmetros tem um impacto significativo no desempenho térmico e luminoso dos edifícios e podem ser melhor entendidas isoladamente em pesquisas futuras.

Em resumo, a aplicação dos indicadores de desempenho escolhidos mostrou-se efetiva na avaliação dos elementos de controle solar em diferentes cenários, permitindo a identificação das melhores soluções para cada caso estudado, como exemplificado nas páginas 184 a 192 no item 4.2.2. Além disso, o processo analítico integrado à modelagem e aos indicadores multicritério de desempenho térmico, visual e luminoso de elementos de controle solar proposto nesta tese mostrou-se adequado para o processo de geração da forma guiado por desempenho. Esses resultados contribuem para a melhoria do desempenho térmico e de iluminação natural de edifícios, tornando-os mais sustentáveis e eficientes do ponto de vista energético. Acredita-se que o método e os resultados obtidos nesta tese possam ser aplicados em projetos futuros para a otimização de fachadas paramétricas.

## 5.6 Outras Limitações e pesquisas futuras

A tese apresenta resultados promissores, mas é importante levar em consideração algumas limitações ao interpretá-los. Os indicadores de desempenho adotados são sensíveis a obstruções externas e contexto climático, e podem ser classificados em áreas como iluminação, desempenho

térmico, conforto visual, bem-estar psicológico e eficiência energética. No entanto, eles não abrangem todos os aspectos relevantes do projeto da fachada, e devem ser utilizados quando o projeto de proteção solar é um fator determinante para o sucesso do projeto geral. Outros aspectos de desempenho devem ser tratados por outros meios, conforme a situação de projeto. Outros aspectos relevantes como, a ventilação, a acústica, técnicas de fabricação e aspectos estruturais podem ser considerados em pesquisas futuras. Portanto, futuros estudos devem diversificar as abordagens, estudando outros aspectos.

É importante destacar a necessidade de agrupar problemas de projeto e equilibrar fenômenos conflitantes durante uma otimização, uma vez que um único indicador de desempenho dificilmente caracterizaria completamente uma problemática de projeto com fenômenos conflitantes, como abordado nesta tese. O controle solar requer a consideração de múltiplos fatores, como iluminação natural, ganho de calor e conforto térmico e visual, e, portanto, é essencial abordar esses aspectos de forma integrada. Focar apenas no desempenho térmico pode resultar em soluções desequilibradas, com excesso de sombreamento e obstrução da vista, enquanto concentrar-se apenas na iluminação natural pode levar a resultados opostos, com alto nível de ofuscamento e entrada de carga térmica. Por essa razão, a tese não abrange outros fenômenos, como escoamento estrutural, ventilação e acústica.

Os experimentos foram realizados em ambientes simulados, o que pode não refletir completamente a realidade, enquanto as condições climáticas e o entorno do edifício foram consideradas fixos e genéricos, o que também pode não ser representativo em muitas situações reais. Além disso, é importante analisar os resultados da tese considerando o tipo de uso não residencial e fachadas altamente envidraçadas. Ou seja, os indicadores de desempenho utilizados são baseados em critérios pré-estabelecidos e podem não ser aplicáveis em todos os contextos arquitetônicos ou para todos os usuários. Futuros estudos podem considerar diferentes perfis de usuários e necessidades específicas, avaliando a eficácia dos indicadores em diferentes situações.

É importante destacar que as soluções apresentadas não esgotam todas as possibilidades de combinação de modelagem e servem como ponto de partida e contribuição na área para futuras investigações. Pretende-se, em etapas futuras, eliminar o uso de plugins e desenvolver um componente integrado para otimização de fachadas com base no controle solar, a fim de aprimorar todo o sistema descrito na tese e torná-lo mais eficiente. Outra abordagem para pesquisas futuras é

o uso do modelo paramétrico executado para construir um banco de dados de análises e assim gerar um modelo de aprendizado de máquina ainda mais ágil.

A modelagem paramétrica é uma área em constante evolução e possibilita a criação de múltiplas combinações. A literatura pesquisada apresenta apenas uma pequena amostra do que pode ser alcançado com essa abordagem, e a intenção desta pesquisa é servir como base sólida para futuras investigações, estimulando a busca por soluções mais inovadoras e eficientes na área de modelagem paramétrica e do projeto guiado por desempenho.

# Anexo 1

## Glossário

**Biofilia:** De Bios (vida) e filia (amor). Tendência humana de interagir ou estar intimamente associada a outras formas de vida na natureza: um desejo ou tendência a se comunicar com a natureza. Biofilia é o termo cunhado pelo naturalista de Harvard Dr. Edward O. Wilson para descrever o que ele via como a "tendência inata da humanidade de se concentrar na vida e processos realistas", e ser atraído para a natureza, sentir uma afinidade por isso, um amor, um desejo. — Natalie Angier. Considerando métodos de projeto, o projeto biofílico é aquele que, de maneira geral, utiliza diversas características da natureza dentro do ambiente interno de forma a evitar espaços estressantes (JONES; ROÖS, 2023).

**BSDF - bidirectional scattering distribution function:** é uma função matemática usada para descrever a forma como a luz se espalha quando atravessa uma superfície ou atinge um anteparo. Os BSDFs são usados para modelar as propriedades de refletância de superfícies, como paredes, pisos e tetos, e as propriedades de transferência complexa de superfícies transparentes e translúcida, como janelas e claraboias. Um BSDF é representado como uma função 4D, que descreve o comportamento da luz à medida que reflete ou transmite através de uma superfície. As quatro dimensões são as direções de entrada e saída da luz, o comprimento de onda da luz, e a função descreve a quantidade de luz que é refletida ou transmitida em cada direção, em cada comprimento de onda.

**Ciclo circadiano:** O sistema circadiano humano envolve três componentes; um oscilador interno (endógeno); um estímulo externo (exógeno), e um hormônio mensageiro, a melatonina, que transporta a informação interna sobre "tempo" para todas as partes do corpo através da corrente sanguínea. A luz é um estimulador exógeno do oscilador interno ativando ou não a melatonina. Ou seja, ciclo claro-escuro entre dia e noite é um dos mais potentes estímulos externos utilizados para o sistema circadiano humano funcionar (BOYCE; HUNTER; HOWLETT, 2003)(BOYCE; HUNTER; HOWLETT, 2003).

**Cobogó:** É um elemento arquitetônico bastante utilizado no Brasil, especialmente na região nordeste do país. Trata-se de uma divisória vazada, geralmente feita de cerâmica, concreto ou metal, que tem a função de permitir a circulação de ar e a entrada de luz natural, ao mesmo tempo em que preserva a privacidade dos espaços. A palavra "cobogó" tem origem na junção dos sobrenomes de três engenheiros brasileiros que desenvolveram esse elemento: Amadeu Oliveira Coimbra, Ernest August Boeckmann e Antônio de Góis. A criação do cobogó ocorreu na década de 1920, em Recife, Pernambuco, como uma solução arquitetônica para enfrentar o clima tropical e o calor intenso.

**Equações paramétricas:** são um tipo de representação matemática que expressa as coordenadas de um objeto ou curva em termos de um ou mais parâmetros. Em outras palavras, é uma forma de descrever uma curva ou objeto usando uma fórmula que depende de variáveis que podem ser ajustadas para gerar diferentes pontos ou formas. Por exemplo, as equações paramétricas para uma curva circular são  $x = r \cos(t)$  e  $y = r \sin(t)$ , onde "r" é o raio da curva e "t" é um parâmetro que varia de 0 a  $2\pi$  (ou qualquer outro intervalo apropriado). Essas equações definem as coordenadas (x,y) de um ponto na curva circular em termos do ângulo "t".

**Especular:** é a reflexão de luz em uma superfície de forma concentrada. A reflexão especular é comumente associada a superfícies polidas ou brilhantes, como vidro ou metal, onde a luz incide e

é refletida de volta de forma concentrada. Isso cria um reflexo brilhante, semelhante a um espelho. A reflexão especular também pode ocorrer em superfícies menos polidas, como água ou neve. A reflexão especular é diferente da reflexão difusa, que é a reflexão da luz em uma superfície não precisa e dispersa.

**Erro quadrático médio (EQM):** é uma medida estatística usada para avaliar a precisão de um modelo de previsão ou regressão em relação aos valores observados. É calculado como a média dos quadrados das diferenças entre os valores previstos pelo modelo e os valores observados.

**Estocástico:** Segundo o dicionário Michaelis, é um termo usado na estatística e matemática, sendo seu significado: “cujos resultados ou conclusões são determinados pelas variáveis aleatórias, segundo as leis da probabilidade; aleatório.” O termo é utilizado na tese para definir elementos de sombreamento complexos resultados de processos matemáticos randômicos.

**Fronteira de Pareto:** estabelece uma relação em que é impossível encontrar resultados além da fronteira, de forma que, todos os recursos sejam compreendidos no seu conjunto. Devido a contradição que pode haver nos fenômenos estudados, nem sempre é possível caminhar ao encontro de uma única solução otimizada. Por isso, as soluções são consideradas ideais se seus componentes não puderem ser melhorados sem deterioração para pelo menos um dos outros componentes. A fronteira de Pareto permite execução desse balanço entre soluções com múltiplas variáveis (ECKART ZITZLER et al., 2001).

**Interoperabilidade:** em arquitetura refere-se à capacidade de diferentes sistemas, softwares ou componentes tecnológicos relacionados à arquitetura e ao design se comunicarem, compartilharem informações e trabalharem juntos de forma eficiente e harmoniosa. Na prática, a interoperabilidade permite que diferentes ferramentas de projeto arquitetônico, como modelagem 3D, simulação energética, análise estrutural, visualização e renderização, troquem informações de maneira integrada e sem problemas. Isso possibilita uma colaboração mais eficaz entre os diversos profissionais envolvidos no processo de projeto, como arquitetos, engenheiros, designers de interiores, entre outros.

**Média quadrática:** também conhecida como raiz quadrada da média dos quadrados ou RMS (*Root Mean Square*, em inglês), é uma medida estatística que é utilizada para calcular o valor médio de um conjunto de valores elevados ao quadrado. A fórmula da média quadrática é:

$$RMS = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)/n}$$

Onde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são os valores que estão sendo avaliados e  $n$  é o número total de valores.

A média quadrática é utilizada porque é uma medida que pondera os valores maiores de forma mais significativa do que os valores menores. Isso pode ser importante em processos de otimização quando se deseja estabelecer indicadores de desempenho que trata o grupo de valores altos de forma valorada em relação aos valores menores.

**Método de Monte Carlo:** na simulação de iluminação natural, os métodos de Monte Carlo envolvem o lançamento de raios de luz aleatórios no ambiente virtual e o rastreamento de sua trajetória à medida que interagem com os objetos. A cada interação, o comportamento da luz (reflexão, refração, absorção, difusão etc.) é modelado com base nas propriedades ópticas dos materiais e nas leis da física.

**Modelagem Algorítmica:** Tecnicamente, um algoritmo é uma instrução simples. É um termo que se refere ao uso de técnicas processuais na resolução de problemas. Modelagem

algorítmica, por sua vez, refere-se a um processo digital de modelagem associada a linguagem de programação textual ou visual. A associação permite que o projetista dê um passo além das limitações das interfaces dos softwares para projetar através da manipulação direta não da forma, mas do código gerador da solução. Modelagem algorítmica explora a capacidade do computador em operar como um motor de busca, e executar tarefas que de outra forma consumiriam tempo excessivo. Presta-se a otimização e outras tarefas complementando limitações das restrições do processo de projeto padrão (LEACH, 2014).

**Modelagem NURBS:** NURBS, *Non-Uniform Rational B-Splines*, são representações matemáticas de geometria 3D. Utilizam a lógica de nós e pontos de controles com diferentes graus de curvatura para representar qualquer geometria. Dessa forma, podem representar com precisão qualquer forma, desde uma simples linha, círculo, arco ou curva 2D até a superfície orgânica 3D de forma livre ou sólida mais complexa. Devido à sua flexibilidade e precisão, modelos NURBS podem ser usados desde em ilustração, animação até em fabricação. Fonte: <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>

**Modelagem Paramétrica:** Design paramétrico atualmente, refere-se genericamente à utilização de software de modelagem paramétrica. Softwares paramétricos permitem ligar parâmetros numéricos e geométricos permitindo assim ajustes incrementais de uma peça que, em seguida, afeta todo modelo em cadeia. A diferença do design paramétrico para o processo tradicional de projeto, é que no design paramétrico as “partes do projeto” são inter-relacionadas e mudam juntas de forma coordenada (Leach, 2014).

**Modelagem Poliédrica:** um modelo poliédrico é um modelo construído a partir de uma série de polígonos. Esses polígonos são geralmente triângulos ou quadriláteros que são usados para definir a forma da superfície do modelo. Os polígonos são conectados uns aos outros para formar uma malha tridimensional que define a geometria. Os modelos poliédricos são comuns em aplicações de jogos e animação, pois facilitam a renderização e possuem boa qualidade visual. Eles também são amplamente utilizados em modelagem 3D para engenharia, arquitetura e design de produtos, pois eles permitem a criação de formas com relativa facilidade.

**Morfogênese:** A morfogênese em modelagem paramétrica em arquitetura refere-se ao processo de geração de formas arquitetônicas através do uso de algoritmos e modelos paramétricos. Através da morfogênese, é possível explorar uma ampla gama de possibilidades de formas arquitetônicas, levando em consideração aspectos como a funcionalidade, a estética, a sustentabilidade, a eficiência energética e outras variáveis importantes. Através da utilização de modelos paramétricos, é possível realizar simulações e análises detalhadas do desempenho das formas geradas em diferentes cenários, permitindo uma tomada de decisão mais informada e fundamentada no processo de projeto. A morfogênese em modelagem paramétrica também pode ser aplicada em diferentes escalas de projeto, desde a escala urbana até a escala dos detalhes construtivos. Em todos os casos, o objetivo é criar formas arquitetônicas que atendam aos requisitos específicos do projeto, levando em consideração as restrições e as oportunidades do contexto em que se inserem.

**Projeto guiado por desempenho:** Do inglês *Performance-based design* termo cunhado pelo pesquisador Kalay (1999), que designa o processo de projeto onde os indicadores de desempenho são o guia-chave da geração da geometria. Os modelos baseados em desempenho se diferenciam do processo tradicional porque a modificação da geometria é diretamente conectada a processos de simulação computacional, sendo guiada por um processo de otimização associado ao problema específico de projeto.

**Radiação Solar Difusa:** É a radiação que vem da porção do céu e entorno. A radiação que atravessa a atmosfera é dispersa e decomposta porque existem partículas suspensas na atmosfera e porque parte é refletida de maneira difusa pelas nuvens para o espaço. Antes de atingir o solo a radiação solar tem intensidade reduzida por impurezas no ar e é parcialmente absorvida pela atmosfera, especialmente o dióxido de carbono, o vapor de água e o ozônio (Olgyay, 1963) .

**Radiação Solar Direta:** É a radiação de onda curta que vem diretamente do sol. É a radiação que produz sombra dura (Olgyay, 1963).

**Temperatura sol-ar:** é uma estimativa da temperatura do ar que está exposto à radiação solar direta e sofre influência de superfícies adjacentes. Essa temperatura pode ser usada para determinar a quantidade de ganho de calor em um edifício, e estimar carga térmica. A temperatura sol-ar é calculada com base em fatores como a intensidade da radiação solar, a temperatura do ar externo e a absorvância das superfícies circundantes. Quanto maior a temperatura sol-ar, maior será a carga de resfriamento e maior será o sistema de resfriamento necessário para manter uma temperatura confortável interna (ASHRAE, 2021).

# Anexo 2

## Fatores de condução e de efeito radiante utilizados

	CTF (PAREDE)	RTF (PAREDE)	CTF (JANELA)	RTF (JANELA)
HORA 1	0.01	0.17	0.72	0.18
HORA 2	0.16	0.12	0.27	0.12
HORA 3	0.23	0.09	0.01	0.09
HORA 4	0.18	0.07	0.00	0.08
HORA 5	0.13	0.05	0.00	0.06
HORA 6	0.09	0.04	0.00	0.05
HORA 7	0.06	0.04	0.00	0.04
HORA 8	0.04	0.04	0.00	0.04
HORA 9	0.03	0.03	0.00	0.03
HORA 10	0.02	0.03	0.00	0.03
HORA 11	0.01	0.03	0.00	0.03
HORA 12	0.01	0.03	0.00	0.03
HORA 13	0.01	0.03	0.00	0.02
HORA 14	0.00	0.03	0.00	0.02
HORA 15	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 16	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 17	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 18	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 19	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 20	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 21	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 22	0.00	0.02	0.00	0.02
HORA 23	0.00	0.02	0.00	0.01
HORA 24	0.00	0.02	0.00	0.01
SOMA TOTAL	1	1	1	1

# Anexo 3

## Equações para o método RTS

Resumo dos Procedimentos de Cálculo de Carga térmica de resfriamento pelo RTS

### Ganho de Calor Externo

#### Temperatura Sol-Ar

$$t_e = t_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o}$$

onde

$t_e$  = temperatura sol-ar, °C

$t_o$  = temperatura do ar externo, °C

$a$  = absorptância da superfície a radiação solar

$E_t$  = radiação solar total incidente na superfície, W/h·m<sup>2</sup>

$h_o$  = coeficiente de transferência de calor por radiação de onda longa e convecção na superfície externa, W/h·m<sup>2</sup>·°C

$\varepsilon$  = emitância hemisférica da superfície

$\Delta R$  = diferença entre a radiação de onda longa incidente na superfície proveniente do céu e arredores e a radiação emitida por um corpo negro à temperatura do ar externo, W/h·m<sup>2</sup>; 0 para superfícies verticais.

#### Transmissão pela Parede e Telhado

$$q_\theta = c_0 q_{i,\theta} + c_1 q_{i,\theta-1} + c_2 q_{i,\theta-2} + \dots + c_{23} q_{i,\theta-23}$$
$$q_{i,\theta-n} = UA(t_{e,\theta-n} - t_{rc})$$

onde

$q_\theta$  = ganho de calor condutivo por hora para a superfície, W/h

$q_{i,\theta}$  = entrada de calor para a hora atual onde

$q_{i,\theta-n}$  = entrada de calor condutivo para a superfície n horas atrás, W/h

$c_0, c_1, \text{etc.}$  = fatores de tempo de condução

U = coeficiente geral de transferência de calor para a superfície,  $W/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$

A = área da superfície,  $m^2$

### **Transmissão pelo Envidraçamento**

$$q_c = UA(T_{out} - T_{in})$$

onde

$q_c$  = ganho de calor por transmissão do envidraçamento, W/h

U = fator U geral  $W/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$

A = área da janela,  $m^2$

$T_{in}$  = temperatura interna,  $^\circ C$

$T_{out}$  = temperatura externa,  $^\circ C$

### **Ganho Solar pelo Envidraçamento\***

\*O cálculo de ganho solar através do envidraçamento passou por uma simplificação considerando que a radiação incidente é calculada pelo Radiance.

$$q = A(E)(SHGC)IAC$$

onde

q = ganho de calor solar total, W/h

A = área da janela,  $m^2$

E = irradiância total calculada pelo Radiance

SHGC = coeficiente de ganho de calor solar do vidro

IAC = coeficiente de atenuação solar interno = 1.0 se não houver dispositivo de sombreamento interno. IAC é uma função do tipo de sombreamento e, dependendo do tipo, também pode considerar o ângulo de incidência solar direta e geometria do sombreamento.

### **Transmissão de Partições, Tetos, Pisos**

$$q = UA(t_b - t_i)$$

onde

q = taxa de transferência de calor, W/h

$U$  = coeficiente de transferência de calor global entre espaços adjacentes e condicionados,  $W/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$

$t_e$  = temperatura sol-ar,  $^\circ C$

$A$  = área da seção de separação em questão,  $m^2$

$t_b$  = temperatura média do ar no espaço adjacente,  $^\circ C$

$t_i$  = temperatura do ar no espaço condicionado,  $^\circ C$

## Ganho de Calor Interno

### Ocupantes

$$q_s = q_{s,per} N$$

$$q_l = q_{l,per} N$$

Onde

$q_s$  = ganho de calor sensível dos ocupantes,  $W/h$

$q_l$  = ganho de calor latente dos ocupantes,  $W/h$

$q_{s,per}$  = ganho de calor sensível por pessoa,  $W/h \cdot pessoa$

$q_{l,per}$  = ganho de calor latente por pessoa,  $W/h \cdot pessoa$

$N$  = número de ocupantes

### Iluminação

$$q_{el} = W F_{ul} F_{sa}$$

onde

$q_{el}$  = ganho de calor,  $W/h$

$W$  = potência total da iluminação,  $W$

$F_{ul}$  = fator de uso da iluminação

$F_{sa}$  = fator de permissão especial da iluminação

### Ventilação e Infiltração

$$q_s = 1.10 Q_s \Delta t$$

$$q_l = 60 \times 0.075 \times 1076 Q_s \Delta W = 4840 Q_s \Delta W$$

Onde

$q_s$  = ganho de calor sensível devido à infiltração, W/h

$q_l$  = ganho de calor latente devido à infiltração, W/h

$Q_s$  = fluxo de ar de infiltração em condições de ar padrão, m<sup>3</sup>/s

$t_o$  = temperatura do ar exterior, °C

$t_i$  = temperatura do ar interior, °C

$W_o$  = razão de umidade do ar exterior

$W_i$  = razão de umidade do ar interior

0.6474 = fator de calor sensível do ar em condições de ar padrão, W/(m<sup>3</sup>/s)

2846.44 = fator de calor latente do ar em condições de ar padrão, W/(m<sup>3</sup>/s)

## **Carga Térmica de Resfriamento Instantânea do Ambiente**

$$Q_s = \sum Q_{i,r} + \sum Q_{i,c}$$

$$Q_l = \sum q_{i,l}$$

onde

$Q_s$  = carga de resfriamento sensível do ambiente, W/h

$Q_{i,r}$  = parte radiante da carga de resfriamento sensível para a hora atual, resultante do elemento de ganho de calor  $i$ , W/h

$Q_{i,c}$  = parte convectiva da carga de resfriamento sensível, resultante do elemento de ganho de calor  $i$ , W/h

$Q_l$  = carga de resfriamento latente do ambiente, W/h

$q_{i,l}$  = ganho de calor latente para o elemento de ganho de calor  $i$ , W/h

## **Parte Radiante da Carga de Resfriamento Sensível**

$$Q_{i,r} = Q_{r,\theta}$$

$$Q_{r,\theta} = r_0 q_{r,\theta} + r_1 q_{r,\theta-1} + r_2 q_{r,\theta-2} + r_3 q_{r,\theta-3} + \dots + r_{23} q_{r,\theta-23}$$

onde

$Q_{r,\theta}$  = carga de resfriamento radiante  $Q_r$  para a hora atual  $\theta$ , W/h

$q_{r,\theta}$  = ganho de calor radiante para a hora atual, W/h

$q_{r,\theta-n}$  = ganho de calor radiante  $n$  horas atrás, W/h

$r_0, r_1, \text{ etc.}$  = fatores de tempo radiante

$$q_{r,\theta} = q_{i,s} F_r$$

onde

$q_{i,s}$  = ganho de calor sensível do elemento de ganho de calor  $i$ , W/h

$F_r$  = fração do ganho de calor que é radiante

### Parte Convectiva da Carga de Resfriamento Sensível

$$Q_{i,c} = q_{i,c}$$

Onde

$q_{i,c}$  é a parte convectiva do ganho de calor do elemento de ganho de calor  $Q_i$ , W/h

$$q_{i,c} = q_{i,s}(1 - F_r)$$

onde

$q_{i,s}$  = ganho de calor sensível do elemento de ganho de calor  $i$ , W/h

$F_r$  = fração do ganho de calor que é radiante

# Anexo 4

## Acesso a códigos e scripts em Ghpython usados nesta tese

Scripts de modelagem



Scripts de simulação



# Anexo 5

## Exemplo de abordagem para cálculo de visual: Modelo experimental para estabelecer visão do pôr do sol.

Este exemplo de análise da visão do pôr do sol foi realizado usando múltiplas isovistas produzidas a partir do vetor do sol na posição poente ao longo do ano (amostragem de 18 posições ao longo do ano) considerando obstruções externas. Foram estabelecidos os cruzamentos das isovistas produzidas sobre uma malha de pontos distribuída na área analisada (no exemplo, uma área urbana com vista livre para o horizonte, mas que poderia ser adaptado também para um ambiente interno de um edifício). Os cruzamentos das isovistas permitem o cálculo do percentual de ocorrências ao longo do ano onde é possível visualizar o pôr do sol sem obstáculos em um determinado espaço, ou posição. Para o cálculo final do indicador de visão do pôr do sol, pode ser considerado a média quadrática dos resultados. No caso do exemplo abordado, o percentual médio quadrático foi de 50,54%

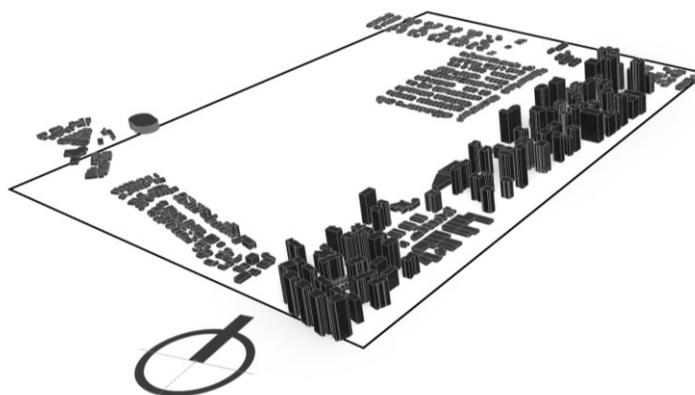


Figura 1. Área a ser analisada com obstáculos.

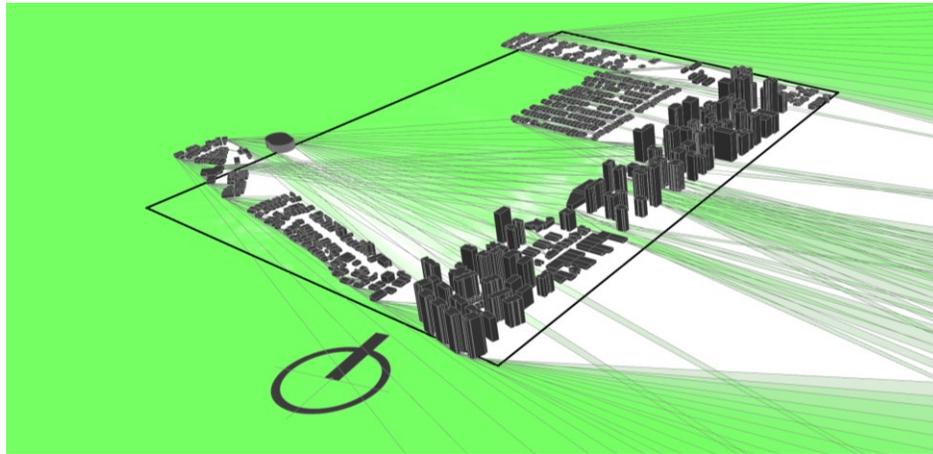


Figura 2. Dezoito isovistas estabelecidas a partir do vetor solar na posição do pôr do sol.

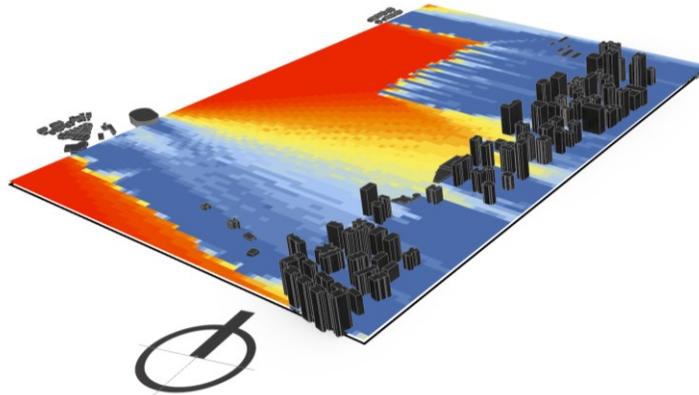


Figura 3. Percentual calculado a partir de uma malha de pontos na área analisada e seu cruzamento com as diferentes isovistas.

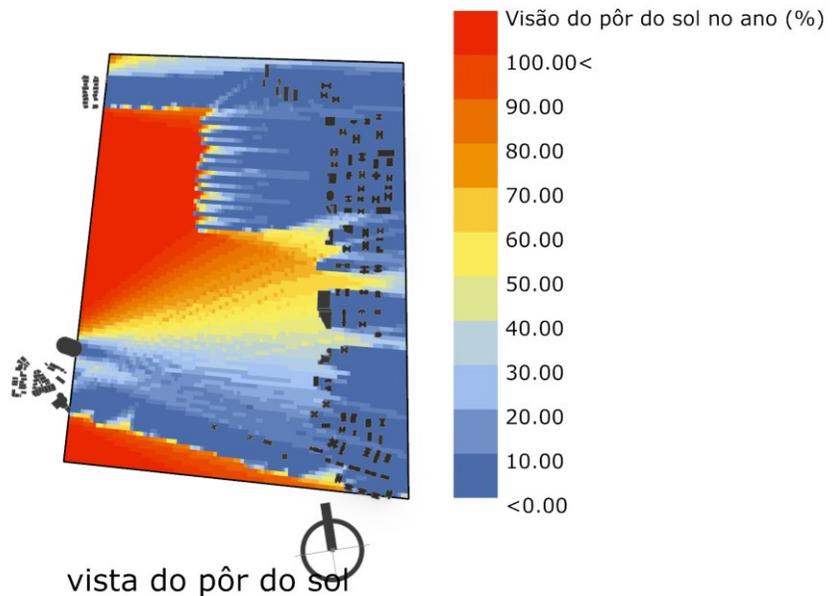


Figura 2. Análise experimental com legenda.

# Referências

ABOULNAGA, M. M. Towards green buildings: Glass as a building element - The use and misuse in the gulf region. **Renewable Energy**, v. 31, n. 5, p. 631–653, 2006.

AISH, R. DesignScript: Origins , Explanation , Illustration. **Computational design modelling**, p. 1–8, 2011.

AKSAMIJA, A. **Sustainable facades: Design methods for high-performance building envelopes**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013.

AL HERR, Y. et al. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. **Building and Environment**, v. 105, p. 369–389, 2016.

ALEXANDER, C. **A pattern language: towns, buildings, construction**. [s.l.] Oxford university press, 1977.

AL-HOMOUD, M. S. Optimum thermal design of office buildings. **International Journal of Energy Research**, v. 21, n. 10, p. 941–957, 1997.

AL-MASRANI, S. M. et al. Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. **Solar Energy**, v. 170, n. April, p. 849–872, 2018.

AL-MASRANI, S. M.; AL-OBAIDI, K. M. Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. **Automation in Construction**, v. 102, p. 195–216, 2019.

ANDERSEN, M. et al. An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach. **Building Research & Information**, v. 36, n. 6, p. 593–607, 2008.

ANTON, I.; TĂNASE, D. Informed Geometries. Parametric Modelling and Energy Analysis in Early Stages of Design. **Energy Procedia**, v. 85, n. November 2015, p. 9–16, 2016.

ARIES, M. B. C.; VEITCH, J. A.; NEWSHAM, G. R. Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. **Journal of Environmental Psychology**, v. 30, n. 4, p. 533–541, 2010.

ASHRAE. **2021 ASHRAE handbook. Fundamentals**. [s.l.] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021.

AYOUB, M. A review on light transport algorithms and simulation tools to model daylighting inside buildings. **Solar Energy**, v. 198, p. 623–642, 2020.

BADER, J.; ZITZLER, E. HypE: An algorithm for fast Hypervolume-Based Many-Objective optimization. **Evolutionary Computation**, v. 19, n. 1, p. 45–76, 2011.

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 761–769, 2011.

BAHRI, S. Y. et al. A literature review on thermal comfort performance of parametric façades. **Energy Reports**, v. 8, p. 120–128, 2022.

BAKER, N. We are really outdoor animals. **Moving thermal comfort standards into the 21st century proceedings. Oxford Brookes University**, p. 102–111, 2001.

BAKER, P. **Improving the thermal performance of traditional windows**. [s.l.] Glasgow Caledonian University, 2008.

BELL JR, A. A. **HVAC: equations, data, and rules of thumb**. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2008.

BEUME, N.; NAUJOKS, B.; EMMERICH, M. SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume. **European Journal of Operational Research**, v. 181, n. 3, p. 1653–1669, 2007.

BIANCO, L. et al. Thermal and optical characterisation of dynamic shading systems with PCMs through laboratory experimental measurements. **Energy and Buildings**, v. 163, p. 92–110, 2018.

BIANCONI, F. et al. Morphological and visual optimization in stadium design: a digital reinterpretation of Luigi Moretti's stadiums. **Architectural Science Review**, v. 63, n. 2, p. 194–209, 3 mar. 2020.

BIER, H.; KNIGHT, T. Data-driven design to production and operation. **Footprint**, p. 1–8, 2014.

BOUBEKRI, M.; BOYER, L. L. Effect of window size and sunlight presence on glare. **Lighting Research & Technology**, p. 69–74, 1992.

BOUCLAGHEM, N. M.; LETHERMAN, K. M. Numerical optimization applied to the thermal design of buildings. **Building and environment**, v. 25, n. 2, p. 117–124, 1990.

BOYCE, P.; HUNTER, C.; HOWLETT, O. The Benefits of Daylight through Windows Sponsored by: Capturing the Daylight Dividend Program The Benefits of Daylight through Windows. p. 1–88, 2003.

BREMBILLA, E. et al. Evaluation of climate-based daylighting techniques for complex fenestration and shading systems. **Energy and Buildings**, v. 203, p. 109454, 2019.

BROWN, N. C.; JUSIEGA, V.; MUELLER, C. T. Implementing data-driven parametric building design with a flexible toolbox. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103252, 2020.

BUENO, B. et al. Fener: A Radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 10–20, 2015.

CAETANO, I. DrAFT: an algorithmic framework for facade design. 2016.

CAETANO, I.; LEITÃO, A. When the Geometry Informs the Algorithm. 2020.

CAETANO, I.; LEITÃO, A. Mathematically Developing Building Facades: An Algorithmic Framework. Em: **Formal Methods in Architecture**. [s.l.] Springer, 2021. p. 3–17.

CAETANO, I.; LEITÃO, A.; BASTOS, F. From Architectural Requirements to Physical Creations: An Algorithmic-based Approach for Façade Design. **Journal of Facade Design and Engineering**, v. 8, n. 2, p. 59–80, 2020.

CALDAS, L. Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE\_ARCH: An evolution-based generative design system. **Advanced Engineering Informatics**, v. 22, n. 1, p. 59–70, 2008.

CALDAS, L. G.; NORFORD, L. K. A design optimization tool based on a genetic algorithm. **Automation in Construction**, v. 11, n. 2, p. 173–184, 2002.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; MAYER, A. Estudo piloto para elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. **Ambiente Construído**, 2018.

CELANI, G.; PUPO, R. T. Prototipagem rápida e fabricação digital par arquitetura e construção: Definições e estado da arte no Brasil. **Cadernos de pos-graduação em arquitetura e Urbanismo**, 2008.

CELANI, M. G.; VAZ, C. E. Scripts em CAD e ambientes de programação visual para modelagem paramétrica: uma comparação do ponto de vista pedagógico. **Proarq**, v. 18, n. 1, p. 177–194, 2011.

CHAN, M. Y.; MAK, C. W. Thermal comfort levels in a room with solar radiation. **Indoor and Built Environment**, v. 17, n. 6, p. 516–524, dez. 2008.

CHEN, K. W.; JANSSEN, P.; SCHLUETER, A. Multi-objective optimisation of building form, envelope and cooling system for improved building energy performance. **Automation in Construction**, v. 94, n. July, p. 449–457, 2018.

CHI, D. A.; MORENO, D.; NAVARRO, J. Correlating daylight availability metric with lighting, heating and cooling energy consumptions. **Building and Environment**, v. 132, n. September 2017, p. 170–180, 2018.

CIBSE. Environmental performance toolkit for glazed facades. **Construction Research and Innovation**, v. 1, n. 2, p. 7–9, 2004.

CICHOCKA, J.; BROWNE, W.; RODRIGUEZ, E. Evolutionary Optimization Processes As Design Tools. **Proceedings of 31th International PLEA Conference ARCHITECTURE IN (R)EVOLUTION, Bologna 9-11 September 2015**, n. August 2016, p. n/a, 2015.

CICHOCKA, J. M. et al. SILVEREYE– the implementation of Particle Swarm Optimization algorithm in a design optimization tool. **CAAD Futures**, v. 724, n. June, p. 151–169, 2017.

COLEY, D. A.; SCHUKAT, S. Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement. **Building and Environment**, v. 37, n. 12, p. 1241–1247, 2002.

COMPAGNON, R. RADIANCE: a simulation tool for daylighting systems. **The Martin Centre for Architectural and Urban Studies University of Cambridge Department of Architecture**, 1997.

CRESWELL, J. Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. Em: **Research design**. [s.l: s.n.].

DEMERS, C. **Assessing light in architecture: A numerical procedure for a qualitative and quantitative analysis**. International Lighting Conference, Venice. **Anais...2006**.

DERU, P. M.; TORCELLINI, P. **Improving Sustainability of Buildings Through a Performance-Based Design Approach: Preprint**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge>>.

DIAKAKI, C.; GRIGOROUDIS, E.; KOLOKOTSA, D. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. **Energy and buildings**, v. 40, n. 9, p. 1747–1754, 2008.

DILI, A. S.; NASEER, M. A.; VARGHESE, T. Z. Passive environment control system of Kerala vernacular residential architecture for a comfortable indoor environment: A qualitative and quantitative analyses. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 917–927, 2010.

DOGRUSOY, I. T.; TUREYEN, M. A field study on determination of preferences for windows in office environments. **Building and Environment**, v. 42, n. 10, p. 3660–3668, 2007.

DORIGO, M. Optimization, learning and natural algorithms. **Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano**, 1992.

DUTRÉ, P.; LAFORTUNE, E. P.; WILLEMS, Y. D. Monte Carlo light tracing with direct computation of pixel intensities. 1993.

EASTMAN, C. et al. **BIM Handbook**. [s.l: s.n.].

EASTMAN, C. et al. Automatic rule-based checking of building designs. **Automation in construction**, v. 18, n. 8, p. 1011–1033, 2009.

ECKART ZITZLER et al. **Evolutionary Multi-Criterion Optimization**. [s.l.] springer, 2001.

EL SHEIKH, M. M. **Intelligent building skins: Parametric-based algorithm for kinetic facades design and daylighting performance integration**. [s.l: s.n.].

ELGHAZI, Y. S. et al. Daylighting driven design: optimizing kaleidocycle facade for hot arid climate. **BauSIM2014 - IBPSA-Germany**, n. September, p. 314–321, 2014.

ELLIS, P. G. **DEVELOPMENT AND VALIDATION OF THE UNVENTED TROMBE WALL MODEL IN ENERGYPLUS**. [s.l: s.n.].

ELMQVIST, N.; DRAGICEVIC, P.; FEKETE, J.-D. Rolling the dice: Multidimensional visual exploration using scatterplot matrix navigation. **IEEE transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 14, n. 6, p. 1148–1539, 2008.

EMMERICH, M. T. M. et al. Evaluating optimization methodologies for future integration in building performance tools . Proceedings of the 8th Int . Conf . on Adaptive Computing in Design and Manufacture ( ACDM ), EVALUATING OPTIMIZATION METHODOLOGIES FOR FUTURE INTEGRATION IN BUIL. **Proceedings of the 8th international conference on Adaptive Computing in Design and Manufacture (ACDM)**, v. 1, n. June 2014, p. 1–7, 2008.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation Engineering Reference**. [s.l: s.n.].

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, 2015.

EVE LIN, S.-H.; JASON GERBER, D. Designing-in performance: A framework for evolutionary energy performance feedback in early stage design. **Automation in Construction**, v. 38, p. 59–73, 2014.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230–245, 2013.

FATHY, F. et al. **Cellular automata for efficient daylighting performance: optimized façade treatment**. Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association. **Anais...IBPSA-International Building Performance Simulation Association**, 2015.

FENG, F. et al. A critical review of fenestration/window system design methods for high performance buildings. **Energy and Buildings**, v. 248, p. 111184, 2021.

FLAGER, F. et al. Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, v. 14, n. 38, p. 595–612, 2009.

FORREST, S. Genetic algorithms. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, v. 28, n. 1, p. 77–80, 1996.

FRAZER, J. Parametric computation: History and future. **Architectural Design**, v. 86, n. 2, p. 18–23, 2016.

FRIGHI, V. What Is a Smart Architecture? Em: **Smart Architecture—A Sustainable Approach for Transparent Building Components Design**. [s.l.] Springer, 2022. p. 41–162.

FUSARO, G.; KANG, J. Participatory approach to draw ergonomic criteria for window design. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 82, p. 103098, 2021.

GALLO, G.; PELLITTERI, G. Luigi Moretti, From History To Parametric Architecture. **Caadria 2018**, v. c, 2018.

GARG, N. K. **Guidelines for use of glass in Buildings**. New Delhi: [s.n.].

GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. **simulation**, v. 76, n. 2, p. 60–68, 2001.

GERBER, D. J.; EL SHEIKH, M. Building Skin Intelligence: a parametric and algorithmic tool for daylighting performance design integration. **Proceedings of the annual conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture ACADIA**, p. 170–177, 2011.

GERBER, D. J.; LIN, S. H. E. Designing in complexity: Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture. **Simulation**, v. 90, n. 8, p. 936–959, 2014.

GIANTINI, G. et al. Environmental Ceramics-Merging the digital and the physical in the design of a performance-based facade system. 2019.

GIOVANNINI, L. et al. A Simplified Approach for the Annual and Spatial Evaluation of the Comfort Classes of Daylight Glare Using Vertical Illuminances. **Buildings**, v. 8, n. 12, p. 171, 2018.

GIOVANNINI, L. et al. GLANCE (GLare ANnual Classes Evaluation): An approach for a simplified spatial glare evaluation. **Building and Environment**, v. 186, p. 107375, 2020.

GLASSMAN, E. J. Multi-Objective Parametric Studies of Exterior Shading During Early Design Phases. **Building Simulation Conference**, n. McNeel, p. 74–81, 2015.

GLASSMAN, E. J.; REINHART, C. **Facade optimization using parametric design and future climate scenarios**. Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France. **Anais...**2013.

GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras. p. 1–345, 1998.

GROAT, L.; WANG, D. **Architectural Research Methods**. [s.l.] Wiley, 2013.

GROBMAN, Y. J.; NEUMAN, E. **PERFORMALISM: Form and performance in digital architecture**. Tel Aviv Museum of Art, 2008.

GROTH, C. C.; LOKMANHEKIM, M. **SHADOW-A new technique for the calculation of shadow shapes and areas by digital computer**. Second Hawaii international conference on system sciences. **Anais...**1969.

HEIDARI, A.; SAHEBZADEH, S. Parametric Architecture In Its Second Phase of Evolution. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 9, n. April, p. 1–20, 2018.

HENSEN, J. L. M. Towards more effective use of building energy performance simulation in design Center for Buildings and Systems. **Developments in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning**, n. Kusuda 2001, p. 291–306, 2004.

HERKEL, S. Dynamic link of light and thermal simulation: on the way to integrated planning tools. 1997.

HERNANDEZ, C. R. B. Thinking parametric design: Introducing parametric Gaudi. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 309–324, 2006.

HOFER, J. et al. Parametric analysis and systems design of dynamic photovoltaic shading modules. **Energy Science & Engineering**, v. 4, n. 2, p. 134–152, 2016.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. [s.l.] MIT press, 1992.

HONG, T. et al. Occupant responses on satisfaction with window size in physical and virtual built environments. **Building and Environment**, v. 166, n. September, p. 106409, 2019.

HOPKINSON, R. G. Glare from daylighting in buildings. **Applied ergonomics**, v. 3, n. 4, p. 206–215, 1972.

HUANG, L.; FAN, C.; ZHAI, Z. J. A graphical multi-objective performance evaluation method with architect-friendly mode. **Frontiers of Architectural Research**, v. 10, n. 2, p. 420–431, 2021.

HUANG, Y.; NIU, J.; CHUNG, T. Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. **Applied Energy**, v. 134, p. 215–228, 2014.

HVIID, C. A.; NIELSEN, T. R.; SVENDSEN, S. Simple tool to evaluate the impact of daylight on building energy consumption. **Solar Energy**, v. 82, n. 9, p. 787–798, 2008.

HWANG, R.-L.; CHEN, W.-A. Identifying relative importance of solar design determinants on office building façade for cooling loads and thermal comfort in hot-humid climates. **Building and Environment**, v. 226, p. 109684, 2022.

IEA. Technology Roadmap. Energy efficient building envelopes. **Oecd**, p. 68, 2013a.

IEA. **Transition to Sustainable Buildings**. [s.l: s.n.].

INOUE, T. Solar shading and daylighting by means of autonomous responsive dimming glass: Practical application. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 5, p. 463–471, 2003.

IWAMOTO, L. **Digital fabrications :architectural and material techniques**. [s.l: s.n.].

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. **DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D, Daysim and EnergyPlus**. Proceedings of building simulation. **Anais...**2011.

JALALI, Z.; NOORZAI, E.; HEIDARI, S. Design and optimization of form and facade of an office building using the genetic algorithm. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 26, n. 2, p. 128–140, 2020.

JAMES, P. A. B.; BAHAJ, A. S. Smart glazing solutions to glare and solar gain: A “sick building” case study. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 10, p. 1058–1067, 2005.

JELLE, B. P. **Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings - Measurement and calculation**. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2013.

JONES, D. S.; ROÖS, P. B. Re-envisaging cities: biophilic and First Nations strategies from Australia. **Resilient and Sustainable Cities**, p. 519–535, 2023.

JONES, N. L. **Fast climate-based glare analysis and spatial mapping**. Proceedings of building simulation 2019: 16th Conference of IBPSA. **Anais...**2019.

JONES, N. L.; GREENBERG, D. P.; PRATT, K. B. Fast computer graphics techniques for calculating direct solar radiation on complex building surfaces. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 5, n. 5, p. 300–312, 2012.

JONES, N. L.; KENNEDY, S. **Validated Interactive Daylighting Analysis for Architectural Design Signature redacted Signature redacted Signature redacted**. [s.l: s.n.].

JONES, N. L.; REINHART, C. F. Speedup Potential of Climate-Based Daylight Modelling on GPUs Nathaniel L Jones and Christoph F Reinhart Massachusetts Institute of Technology , Cambridge , MA , USA Abstract. p. 1438–1447, 2017.

JONES, N. L.; REINHART, C. F. Effects of real-time simulation feedback on design for visual comfort. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 12, n. 3, p. 343–361, 2019.

JUSSELME, T.; REY, E.; ANDERSEN, M. An integrative approach for embodied energy: Towards an LCA-based data-driven design method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 123–132, 2018.

KAJIYA, J. T. **The rendering equation**. Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. **Anais...**1986.

- KALAY, Y. E. Performance-based design. **Automation in Construction**, p. 1233–1261, 1999.
- KANTERS, J.; HORVAT, M.; DUBOIS, M.-C. Tools and methods used by architects for solar design. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 721–731, 2014.
- KARLSEN, L. et al. Verification of simple illuminance based measures for indication of discomfort glare from windows. **Building and Environment**, v. 92, p. 615–626, 2015.
- KARLSEN, L. et al. Solar shading control strategy for office buildings in cold climate. **Energy and Buildings**, v. 118, n. 0130, p. 316–328, 2016a.
- KARLSEN, L. et al. Solar shading control strategy for office buildings in cold climate. **Energy and Buildings**, v. 118, n. 0130, p. 316–328, 2016b.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. **Anais...IEEE**, 1995.
- KHEIRI, F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, n. May 2017, p. 897–920, 2018.
- KIRIMTAT, A. et al. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23–49, 2016.
- KIRIMTAT, A. et al. Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. **Solar Energy**, v. 185, n. April, p. 100–111, 2019.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT JR, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **science**, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.
- KISCHKOWEIT-LOPIN, M. AN OVERVIEW OF DAYLIGHTING SYSTEMS. **Solar Energy**, v. 73, n. 2, p. 77–82, 2002.
- KLEINDIENST, S.; BODART, M.; ANDERSEN, M. Graphical representation of climate-based daylight performance to support architectural design. **Leukos**, v. 5, n. 1, p. 39–61, 2008.
- KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. [s.l: s.n.].
- KOLAREVIC, B. Computing the performative in architecture. **In Proceedings of the 21th eCAADe Conference: Digital Design. Graz, Austria**, p. 457–464, 2003b.
- KOLAREVIC, B. Back to the Future: Performative Architecture. **International Journal of Architectural Computing**, v. 2, n. 1, p. 43–50, 2004.

KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **Performative Architecture: Beyond Instrumentality**. [s.l: s.n.].

KUSUDA, T. Early History and Future Prospects of Building System Simulation. **IBPSA Conference Proceedings**, p. 13, 1999.

LA GENNUSA, M. et al. The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation—a generalised algorithm. **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 367–375, 2005.

LA GENNUSA, M. et al. A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort. **Solar Energy**, v. 81, n. 5, p. 594–606, 2007.

LAMBERTS, ROBERTO.; DUTRA, LUCIANO.; PEREIRA, FERNANDO. **Eficiencia Energética en la Arquitectura**. , 2014.

LAURIDSEN, P. K. B.; PETERSEN, S. **Integrating indoor climate, daylight and energy simulations in parametric models and performance-based design**. Proceedings of the 3rd International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark. **Anais...**2014.

LEACH, N. The Limits of Urban Simulation: An Interview with Manuel DeLanda. **Architectural Design**, v. 79, n. 4, p. 50–55, 2009.

LEACH, N. Parametrics Explained. Em: **Next Generation Building**. [s.l.] Baltzer Science Publishers, 2014. p. 33–42.

LI, D. H. W. et al. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 722–729, 2009.

LI, S.; LIU, L.; PENG, C. A review of performance-oriented architectural design and optimization in the context of sustainability: Dividends and challenges. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1427, 2020.

LINDELÖF, D.; MOREL, N. Bayesian estimation of visual discomfort. **Building Research & Information**, v. 36, n. 1, p. 83–96, 2008.

LIU, X.; WANG, L.; JI, G. **Optimization-Based Design Exploration of the Mutual Influence Between Building Massing and Façade Design**. Proceedings of the 2022 Annual Modeling and Simulation Conference, ANNSIM 2022. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.

LM, I. Approved method: IES spatial Daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE). **Illuminating Engineering Society**. <https://www.ies.org/product/ies-spatial-daylight-autonomy-sda-and-annual-sunlight-exposure-ase>, 2013.

LUCA, F. DE. **Learning Performance-driven Design. Students Approach Integrating Urban Form Studies and Building Performance Analysis**. BUILDING SIMULATION 2019, Proceedings of the 16th IBPSA Conference. **Anais...**2019.

MACIEL, A. A.; FORD, B.; LAMBERTS, R. Main influences on the design philosophy and knowledge basis to bioclimatic integration into architectural design—The example of best practices. **Building and Environment**, v. 42, n. 10, p. 3762–3773, 2007.

MACLEAMY, P. Collaboration, Integrated Information and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation. n. August, p. 14, 2004.

MAHDAVI, A.; MAHATTANATAWE, P. ENCLOSURE SYSTEMS DESIGN AND CONTROL SUPPORT VIA DYNAMIC SIMULATION-ASSISTED OPTIMIZATION Vienna University of Technology. p. 785–792, 2003.

MANZAN, M.; CLARICH, A. FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and movable shading devices. **Building and Environment**, v. 113, p. 175–184, 2017.

MARDALJEVIC, J. Climate-based daylight modelling and its discontents. 2015.

MARDALJEVIC, J.; ROY, N. **Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability?** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/267556994>>.

MARKUS, T. A. The function of windows— A reappraisal. **Building Science**, v. 2, n. 2, p. 97–121, 1967.

MARTELOTTA, F. et al. **On the use of artificial neural networks to model household energy consumptions**. Energy Procedia. **Anais...**Elsevier Ltd, 1 set. 2017.

MATEUS, N. M.; PINTO, A.; DA GRAÇA, G. C. Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 511–522, 2014.

MCNEIL, A.; BURRELL, G. APPLICABILITY OF DGP AND DGI FOR EVALUATING GLARE IN A BRIGHTLY DAYLIT SPACE Independent Consultant , Oakland , CA Arup , San Francisco , CA. **SimBuild**, p. 57–64, 2016.

MISHRA, A. K.; LOOMANS, M.; HENSEN, J. L. M. Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions—An overview. **Building and Environment**, v. 109, p. 82–100, 2016.

MONEDERO, J. Parametric design: A review and some experiences. **Automation in Construction**, v. 9, n. 4, p. 369–377, 2000.

MORBITZER, C. A. Towards the Integration of Simulation into the Building Design Process. **Regulation**, 2003.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905–913, 2006.

NARANGEREL, A.; LEE, J.; STOUFFS, R. Daylighting Based Parametric Design Exploration of 3D Facade Patterns. **34th eCAADe Conference**, v. 2, p. 379–388, 2016.

NEGENDAHL, K. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. **Automation in Construction**, v. 54, p. 39–53, 2015.

NEGENDAHL, K.; NIELSEN, T. R. Building energy optimization in the early design stages: A simplified method. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 88–99, 2015.

NEMBRINI, J.; LABELLE, G.; NYTSCH-GEUSEN, C. Parametric scripting for early design building simulation. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 786–798, 2013.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

NIELSEN, T. R. Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. **Solar Energy**, v. 78, n. 1, p. 73–83, 2005.

OCHOA, C. E.; ARIES, M. B. C.; HENSEN, J. L. M. State of the art in lighting simulation for building science: a literature review. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 5, n. 4, p. 209–233, 2012.

OECD/IEA. The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning Together Secure Sustainable. p. 92, 2018.

OKTAY, Z.; COSKUN, C.; DINCER, I. A new approach for predicting cooling degree-hours and energy requirements in buildings. **Energy**, v. 36, n. 8, p. 4855–4863, 2011.

OLGYAY, V. **Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. [s.l.] Princeton University Press, 1963.

OLIVEIRA, A. F. DE; BAUER, C. Cobogós, textile-block ou módulo? Experimentações de novas estéticas Resumo. n. 2006, 2011.

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, 2016.

OXMAN, N. **Material-based Design Computation**. [s.l: s.n.].

OXMAN, R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. **Design Studies**, v. 52, p. 4–39, 2017.

OZDEMIR, A. The effect of window views' openness and naturalness on the perception of rooms' spaciousness and brightness: A visual preference study. **Scientific Research and Essays**, v. 5, n. 16, p. 2275–2287, 2010.

PANDA, M. Performance comparison of genetic algorithm, particle swarm optimization and simulated annealing applied to TSP. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 13, n. 9, p. 6808–6816, 2018.

PANTAZIS, E.; GERBER, D. A framework for generating and evaluating façade designs using a multi-agent system approach. **International Journal of Architectural Computing**, v. 16, n. 4, p. 248–270, 2018.

PAPALAMBROS, P. Y.; WILDE, D. J. **Principles of Optimal Design: Modeling and Computation**. [s.l: s.n.].

PAPANEK, V. **Design for the Real World: Human Ecology and Social Change**. [s.l: s.n.].

PARK, CHEOL-SOO; AUGENBROE, GODFRIED; MESSADI, T. **Daylighting optimization in smart facade systems**. Eighth International IBPSA Conference. **Anais...**2003.

PATTERSON, M. **Structural glass facades and enclosures**. [s.l.] wiley, 2011. v. 1

PAYNE, A.; ISSA, R. **Grasshopper primer**. LIFT Architects and Robert McNeel and Associates, , 2009.

PEDERSEN, C. O.; FISHER, D. E.; LIESEN, R. J. **Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads**. ASHRAE Transactions. **Anais...**1997. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031367731&partnerID=40&md5=edd83177d1ad991236cb85f00b0bebd2>>

PEÑA, W. M.; PARSHALL, S. A. Problem Seeking. p. 249, 2001.

PEREIRA, F. O. R. **Luminous and thermal performance of window shading and sunlighting reflecting devices**. Tese de Doutorado.—[s.l.] University of Sheffield, 1992.

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar energy**, v. 44, n. 5, p. 271–289, 1990.

PÉREZ-GRANDE, I.; MESEGUER, J.; ALONSO, G. Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 17–18, p. 3163–3175, 2005.

PETERSEN, S.; SVENDSEN, S. Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 7, p. 1113–1119, 2010.

PICCO, M.; LOLLINI, R.; MARENGO, M. Towards energy performance evaluation in early stage building design: A simplification methodology for commercial building models. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 497–505, 2014.

POEHLS, L. B. Energy Assessment in Early Architectural Design Stages - Framework and Validation Methodology for Architect-friendly Computation Energy Assessment. p. 257, 2017.

QIAN, Z. C. **DESIGN PATTERNS: AUGMENTING DESIGN PRACTICE IN PARAMETRIC CAD SYSTEMS**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://ir.lib.sfu.ca/handle/1892/112>>.

QINGSONG, M.; FUKUDA, H. Parametric Office Building for Daylight and Energy Analysis in the Early Design Stages. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 216, p. 818–828, 2016.

QUEIROZ, N. et al. **Designing a Building envelope using parametric and algorithmic processes**. Blucher Design Proceedings. **Anais...2015**. Disponível em: <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/designing-a-building-envelope-using-parametric-and-algorithmic-processes-22403>>

QUEIROZ, N. et al. Pared cinética: Una fachada humana y ambientalmente responsiva. Un enfoque de educación en arquitectura. **ARQUITECTURAS DEL SUR**, v. 36, n. 54, p. 58–69, 31 dez. 2018.

QUEIROZ, N.; PEREIRA, F. A faster Multi-Criteria Optimization Model to parametric facades For Daylighting And Thermal performance. **Encontro Nacional e Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído**, 2021.

QUEIROZ, N.; WESTPHAL, F. **Propriedades e aparência dos vidros** . Brasil, 2022.

QUEIROZ, N.; WESTPHAL, F. S.; PEREIRA, F. O. R. A performance-based design validation study on EnergyPlus for daylighting analysis. **Building and Environment**, v. 183, p. 107088, 2020.

QUEIROZ, N.; WESTPHAL, F. S.; PEREIRA, F. O. R. A INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO E VIDROS NO CONSUMO DE ENERGIA EM CLIMATIZAÇÃO E ILUMINAÇÃO EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS. [s.d.].

REES, S. J. et al. Qualitative comparison of North American and UK cooling load calculation methods. **HVAC&R Research**, v. 6, n. 1, p. 75–99, 2000.

REES, S. J.; SPITLER, J. D.; HAVES, P. Quantitative comparison of North American and UK cooling load calculation procedures--results. **ASHRAE transactions**, v. 104, p. 47, 1998.

REINHART, C. **Daylighting Handbook II**. SAGE Publications Sage UK: London, England, , 2018.

REINHART, C. Daylight performance predictions. Em: **Building performance simulation for design and operation**. [s.l.] Routledge, 2019. p. 221–269.

REINHART, C.; BRETON, P.-F. Experimental validation of Autodesk® 3ds Max® Design 2009 and DAYSIM 3.0. **Leukos**, v. 6, n. 1, p. 7–35, 2009.

REINHART, C. F. Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices. **Proceedings of the 2002 American Council for an Energy Efficient Economy (ACEEE) Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, v. 3, p. 309–322, 2002.

REINHART, C. F.; LOVERSO, V. R. M. A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight. **Lighting Research & Technology**, v. 42, n. 1, p. 7–31, 2010.

REINHART, C. F.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and buildings**, v. 33, n. 7, p. 683–697, 2001.

RENNER, G. Genetic Algorithms in Computer-Aided Design. **Computer-Aided Design and Applications**, 2004.

REZAEI, S. D.; SHANNIGRAHI, S.; RAMAKRISHNA, S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 159, p. 26–51, 2017.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS-REES, S. **Ecohouse-: A Casa Ambientalente Sustentável**. [s.l.] Bookman Editora, 2014.

ROCHE, L. Summertime performance of an automated lighting and blinds control system. **Lighting Research & Technology**, v. 34, n. 1, p. 11–25, 2002.

ROLLER, D. An approach to computer-aided parametric design. **Computer-Aided Design**, 1991.

ROUDSARI, M. S.; PAK, M.; SMITH, A. **Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design**. Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug. **Anais...**2013.

RUCK, N. et al. **Daylight in Buildings-A source book on daylighting systems and components**. [s.l.] Lawrence Berkeley National Laboratory: Washington, DC, USA, 2000.

RUCK, N., ASCHEHOUG, Ø., AYDINLI, S., CHRISTOFFERSEN, J., COURRET, G., EDMONDS, I., ... & MICHEL, L. **Daylight in Buildings: A source book on daylighting systems and components**. [s.l: s.n.].

RUDER, S. An overview of gradient descent optimization algorithms. **arXiv preprint arXiv:1609.04747**, 2016.

SAMAAN, M. M.; FARAG, O.; KHALIL, M. Using simulation tools for optimizing cooling loads and daylighting levels in Egyptian campus buildings. **HBRC journal**, v. 14, n. 1, p. 79–92, 2018.

SANTOS, I. G. DOS; SOUZA, R. V. G. DE. Proteções solares no regulamento brasileiro de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 227–241, 2012.

SANTOS, L. et al. A Generative System for the Design of High-Performing Shading Devices. 2020.

SCHITTICH, C. et al. **Glass Construction Manual**. [s.l: s.n.].

SCHMITT, L. M. Theory of genetic algorithms. **Theoretical Computer Science**, v. 259, n. 1–2, p. 1–61, 2001.

SCHODEK, D. L. et al. **Digital design and manufacturing: CAD/CAM applications in architecture and design pdf**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2005.

SCHULER, M. **Building simulation in application: developing concepts for low energy buildings through a cooperation between architect and engineer**. Proceedings of the Solar World Congress, the International Solar Energy Society (ISES), Harare, Zimbabwe. **Anais...**1995.

SCHUMACHER, P. Parametricism as Style - Parametricist Manifesto. **Darkside club, 11th Venice Architecture Biennale**, 2008.

SCHUMACHER, P. Design parameters to parametric design. Em: **The Routledge Companion for Architecture Design and Practice**. [s.l.] Routledge, 2015. p. 35–52.

SEGRE, R.; BOAS, N. V.; LEITÃO, T. O Ministério da Educação e Saúde Pública ( 1935-1945 ): As inovações climáticas e tecnológicas Prof . Roberto Segre Prof . Naylor Vilas Boas Prof . Thiago Leitão O Ministério da Educação e Saúde Pública ( 1935-1945 ): As inovações climáticas e tecnológica. n. 021, p. 1–10, [s.d.].

SHAN, R. Optimization for heating, cooling and lighting load in building façade design. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1716–1725, 2014.

SHEA, K.; AISH, R.; GOURTOVAIA, M. Towards integrated performance-driven generative design tools. **Automation in Construction**, v. 14, n. 2 SPEC. ISS., p. 253–264, 2005.

SHEWCHUK, J. R. **An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain**. Carnegie-Mellon University. Department of Computer Science Pittsburgh, , 1994.

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, v. 32, p. 125–135, 2013.

SILVA, T.; VICENTE, R.; RODRIGUES, F. Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 515–535, 2016.

SMITH, P. BIM implementation - Global strategies. **Procedia Engineering**, v. 85, p. 482–492, 2014.

SOLEMMA, L. L. C. ClimateStudio. **Retrieved 16th October**, 2020.

SPITLER, J. D.; FISHER, D. E.; PEDERSEN, C. O. **Radiant time series cooling load calculation procedure**. ASHRAE Transactions. **Anais...**1997. Disponível em:

<<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

0031384375&partnerID=40&md5=0ffd714e84efdd80bf8f47f0febf4a64>

STEEL, J.; DROGEMULLER, R.; TOTH, B. Model interoperability in building information modelling. **Software & Systems Modeling**, v. 11, n. 1, p. 99–109, 2012.

SUBRAMANIAM, S. Daylighting simulations with radiance using matrix-based methods. **Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2017.

SUBRAMANIAM, S. Parametric modeling strategies for efficient annual analysis of daylight in buildings. 2018.

SUBRAMANIAM, S.; MISTRICK, R. **A more accurate approach for calculating illuminance with daylight coefficients**. 2017 Annual IES Conference. Oregon, USA IES. **Anais...**2017.

SUTHERLAND, I. E. Sketchpad : A Man-Machine Graphical Communication System , Unclassified. Em: **Doctor**. [s.l: s.n.].

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, 2018.

TABARES-VELASCO, P. C.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, v. 54, p. 186–196, 2012.

TECTÓNICA monografías de arquitectura, tecnología y construcción. **02 Cerramientos pesados, envolventes II**, 1995a.

TECTÓNICA monografías de arquitectura, tecnología y construcción. **10 vidrio**, 1995b.

TEDESCHI, A. **AAD Algorithms-Aided Design : Parametric Strategies Using Grasshopper**. [s.l: s.n.].

THANACHAREONKIT, A.; LEE, E. S.; MCNEIL, A. **Empirical assessment of a prismatic daylight-redirecting window film in a full-scale office testbed**. [s.l: s.n.].

MCNEIL, A. **The Three-Phase Method for Simulating Complex Fenestration with Radiance**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/documentation/>>.

TONG, S. et al. Impact of façade design on indoor air temperatures and cooling loads in residential buildings in the tropical climate. **Energy and Buildings**, v. 243, p. 110972, 2021.

TOTH, B. et al. Closing the loop of design and analysis: Parametric modelling tools for early decision support. **Circuit Bending, Breaking and Mending - Proceedings of the 16th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA 2011**, n. January, p. 525–534, 2011.

TOUTOU, A.; FIKRY, M.; MOHAMED, W. The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. **Alexandria engineering journal**, v. 57, n. 4, p. 3595–3608, 2018.

TSAY, Y.-S.; WU, M.-S.; LIN, C.-H. An Integrated User Interface of Assessment and Optimization for Architectural Façade Shading Designs in Taiwan. **Buildings**, v. 12, n. 12, p. 2116, 2022.

TURRIN, M.; VON BUELOW, P.; STOUFFS, R. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 4, p. 656–675, 2011.

ULRICH KNAACK et al. **Façades, Principles of Construction**. [s.l: s.n.].

UTKUCU, D.; SÖZER, H. Interoperability and data exchange within BIM platform to evaluate building energy performance and indoor comfort. **Automation in Construction**, v. 116, p. 103225, 2020.

VALLADARES-RENDÓN, L. G.; SCHMID, G.; LO, S. L. Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems. **Energy and Buildings**, v. 140, n. 71, p. 458–479, 2017.

VENÂNCIO, R. Modos projetuais de simulação: Uso de ferramentas de simulação térmica no processo projetual de arquitetura. **Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**, 2012.

VINCKE, J. P.; BRANS, P. A preference ranking organization method. The PROMETHEE method for MCDM. **Management Science**, v. 31, n. 6, p. 647–656, 1985.

VINE, E. et al. Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study. **Energy and Buildings**, v. 28, n. 2, p. 205–218, 1998.

WALTON, G. N. The application of homogeneous coordinates to shadowing calculations. 1979.

WANG, L.; LEE, E. W. M.; YUEN, R. K. K. Novel dynamic forecasting model for building cooling loads combining an artificial neural network and an ensemble approach. **Applied Energy**, v. 228, p. 1740–1753, 2018.

WANG, S. et al. A Parameterized Design Method for Building a Shading System Based on Climate Adaptability. **Atmosphere**, v. 13, n. 8, 1 ago. 2022.

WARD, G. The RADIANCE 3.0 Synthetic Imaging System. **Radiance Reference Manual**, 1997.

WARD, G. et al. Simulating the daylight performance of complex fenestration systems using bidirectional scattering distribution functions within radiance. **Leukos**, v. 7, n. 4, p. 241–261, 2011.

WARD, G.; SHAKESPEARE, R. Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization. 1998.

WCED. **Brutland Report: Our Common Future** Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. [s.l: s.n.].

WESTPHAL, F. S. **Manual Técnico do Vidro Plano para Edificações**. [s.l.] Simplissimo Livros Ltda, 2016.

WETTER, M. A view on future building system modeling and simulation. Em: **Building Performance Simulation for Design and Operation**. [s.l.] Routledge, 2012.

WIENOLD, J. **Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis**. Building Simulation. **Anais...IBPSA Beijing, China**, 2007.

WIENOLD, J. Dynamic daylight glare evaluation. **IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009**, p. 944–951, 2009.

WIENOLD, J.; CHRISTOFFERSEN, J. Towards a new daylight glare rating. **Lux Europa, Berlin**, n. January 2005, p. 157–161, 2005.

WIENOLD, J.; CHRISTOFFERSEN, J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. **Energy and buildings**, v. 38, n. 7, p. 743–757, 2006.

WIENOLD, J.; E, F. I. FOR S. E. S. I. S. **Daylight glare in offices**. [s.l.] Fraunhofer Verlag Alemanha, 2010.

WOODBURY, R. **Elements of parametric design**. [s.l: s.n.].

WORTMANN, T. OPOSSUM: Introducing and Evaluating a Model-based Optimization Tool for Grasshopper. **Proceedings of the CAADRIA 17**, n. April, p. 283 – 292, 2017a.

WORTMANN, T. Surveying design spaces with performance maps: A multivariate visualization method for parametric design and architectural design optimization. **International Journal of Architectural Computing**, v. 15, n. 1, p. 38–53, 2017b.

WORTMANN, T. et al. Are Genetic Algorithms Really the Best Choice in Building Energy Optimization? n. May, 2018.

WORTMANN, T.; NANNICINI, G. Introduction to Architectural Design Optimization. Em: **City Networks - Planning for Health and Sustainability**. [s.l.] Springer International Publishing, 2017. v. 128.

WORTMANN, T.; NATANIAN, J. **Multi-Objective Optimization for Zero-Energy Urban Design in China: A Benchmark**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/341592609>>.

XING, S.; WENJIE, Y. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, v. 32, p. 125–135, 2013.

YI, H. et al. Rapid Simulation of Optimally Responsive Façade during Schematic Design Phases : Use of a New Hybrid Metaheuristic Algorithm. 2019.

ZEMELLA, G. et al. Optimised design of energy efficient building façades via evolutionary neural networks. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3297–3302, 2011.

ZHANG, Y.; BARRETT, P. Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building. **Building and Environment**, v. 50, p. 125–134, 2012.

ZHAO, S.; DE ANGELIS, E. Performance-based Generative Architecture Design: A Review on Design Problem Formulation and Software Utilization. **Journal of Integrated Design and Process Science**, n. Xxxx, p. 1–22, 2019.

ZITZLER, E. **Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization : Methods and Applications**. [s.l: s.n.].

ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. **TIK-Report 103** May, 2001.

ZUO, W. et al. Acceleration of the matrix multiplication of Radiance three phase daylighting simulations with parallel computing on heterogeneous hardware of personal computer. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 7, n. 2, p. 152–163, 2014.