

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS (UAECSA)

JOÃO PEDRO SILVA RIBEIRO

Morfogênese computacional aplicada à arquitetura: ensaios projetuais biomiméticos para um pavilhão na Praça do João Francisco na Cidade de Goiás

Cidade de Goiás – Goiás  
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

### TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): João Pedro Silva Ribeiro

Título do trabalho: Morfogênese computacional aplicada à arquitetura: ensaios projetuais biomiméticos para um pavilhão na Praça do João Francisco na Cidade de Goiás

#### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(a)(s) autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Montenegro Goes, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2025, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Pedro Silva Ribeiro, Discente**, em 15/12/2025, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5824545** e o código CRC **49994882**.

JOÃO PEDRO SILVA RIBEIRO

Morfogênese computacional aplicada à arquitetura: ensaios projetuais biomiméticos para um pavilhão na Praça do João Francisco na Cidade de Goiás.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Arquitetura e Urbanismo, da Unidade Acadêmica Especial de Ciências Sociais Aplicadas (UAECSA), da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de bacharel em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador(a): Thiago Montenegro Goes

Cidade de Goiás – Goiás  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Ribeiro, João Pedro Silva

Morfogênese computacional aplicada à arquitetura: [manuscrito] :  
Ensaio projetuais biomiméticos para uma pavilhão na Praça do João  
Francisco na Cidade de Goiás. / João Pedro Silva Ribeiro. - 2025.  
XCIX, 99 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Montenegro Goes.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Ciências  
Sociais Aplicadas, Arquitetura e Urbanismo, Cidade de Goiás, 2025.  
Bibliografia.

Inclui abreviaturas, símbolos, gráfico, lista de figuras, lista de  
tabelas.

1. Morfogênese computacional. 2. Biomimética. 3. Projeto  
paramétrico. 4. Simulação ambiental. 5. Arquitetura sustentável. I.  
Goes, Thiago Montenegro, orient. II. Título.

CDU 72

18/12/2025, 00:42

SEI/UFMG - 5824542 - Ata de Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos nove dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e cinco iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC II) intitulado “Morfogênese computacional aplicada à arquitetura: ensaios projetuais biomiméticos para um pavilhão na Praça do João Francisco na Cidade de Goiás”, de autoria de João Pedro Silva Ribeiro, do curso de Arquitetura e Urbanismo, da Unidade Acadêmica de Ciências Sociais Aplicadas do Câmpus Goiás da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Dr. Thiago Montenegro Góes – orientador (UAECSA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Fernanda Moreira (UAECSA/UFG) e Adriano Felipe Oliveira Lopes (Arquiteto e Urbanista). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 10,0, tendo sido o TCC II considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Montenegro Goes, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2025, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernanda Moreira, Professora do Magistério Superior-Substituta**, em 15/12/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5824542** e o código CRC **F1028240**.

Referência: Processo nº 23070.061895/2025-97

SEI nº 5824542

## AGRADECIMENTOS

Até o presente momento, agradeço, primeiramente e principalmente, a minha família, em particular minha avó Maria Silva, e minha tia Rosilda Silva. Como também agradeço minha mãe Rosenilde Silva, minha tia Rosângela Silva, Rosinete Silva. Mas também toda a família, sem exceção... Também não esquecendo dele, Ronede Oliveira, o cara.

Sendo por toda a dedicação, cuidado e amor para comigo. Obrigado imensamente por terem me apoiado durante todos esses anos de graduação.

Ao meu prof. thiago Montenegro Goés, pela sua amizade e por sempre me apoiar, e demonstrar que se importava comigo. Como também ser alguém a quem se inspirar.

Ao meu prof. Alisson Cleiton de Araújo, por sempre se importar com o meu estado psicológico, e agradeço imensamente por todo o apoio. Sendo até mesmo alguém a qual eu possa me inspirar.

A minha querida profa. Camila Sant'anna, a qual sempre me apoiou, e me mostrou um caminho para o uso do desenho como estado terapêutico. E esse foi um dos principais pontos para minha permanência no curso, pois um foi um começo com muitas transições, sequelas e traumas.

Também agradeço pelos diversos momentos de alegria e compaixão a esses maravilhosos professores: profa. Ariane Borges, Gabriel T. ramos e Luciana Helena.

Às minhas queridas amigadas que fiz na graduação, em especial à Brenda Sampaio, Jorge Machado, Eliézer Carvalho, Juliano Souza. Como também, Lidiani, Flavio Novaes, Luan, Sirlene lopes, Rafaela, Maria Luisa, Leticia Barbosa, Leticia dias, Marina Carvalho, Bruna Marcelo, Italo Cesar, Arthur Maresca, Allison Oliveira.

Essas pessoas não estavam fisicamente perto de mim, mas espiritualmente estavam seguindo a caminhada, e devo lembrá-los, pois são importantes, Jonathan Viana, Lucas Gomes, Cleber Silva, Daniel Oliveira, Moisés.

Às pessoas com quem convive em projetos de extensão, em especial o Ybipitanga - em especial a profa. Karine, a qual sempre esteve presente e me apoiou... e o ybi fez uma diferença enorme na minha vida... Não esqueço também dá também a EJ Goyaz Arquitetura, e o Labam.

Ao prof. Haroldo Dias Flauzino Neto, por participar da minha banca de TCC I, como também pelos momentos de sabedoria e oportunidades trazidos durante a iniciação tecnológica.

Grato, profa. Fernanda Moreira, e Ms. Adriano Felipe pelo tempo e pela contribuição.

E o ponto mais impactante dos meus agradecimentos chegou, e não podia faltar.... Não posso esquecer de agradecer à todos aqueles que dificultaram a minha vida nesta faculdade, seja

pelo bullying, ou pela inveja. Mesmo que eu estivesse passando mal, com crise, vocês estavam lá pra piorar, e sou grato. Pois jamais neguei ajudar as pessoas à minha volta, então, se tu que estiver lendo isso e achar que foi uma delas, lhe agradeço, pois aprendi bastante com você.

Em síntese, o maior agradecimento que posso fazer é para todos aqueles que fizeram parte do meu processo,

“Se eu não continuar caminhando, o sonho não chega. É no caminho que eu fico mais forte.”

- Luffy (One piece)

“O importante é continuar avançando, mesmo que seja um passo de cada vez. O resultado vem quando você nem percebe.”

- Satoro Gojo (Jujutsu Kaisen)

Enfim, aos bons encontros da vida. Grato!

Termino, com um dos meus poemas:

“Memórias momentâneas e eternas, interligadas a um inconsciente coletivo, a qual a própria conexão neural irá guardar resquícios enquanto a carne não apodrecer.”

- João Pedro Silva Ribeiro (2025)

## RESUMO

Este trabalho explora o potencial da morfogênese computacional aplicada à arquitetura, com ênfase no processo experimental de ensaios projetuais biomiméticos direcionados ao desenvolvimento de um pavilhão para a Praça João Francisco, na Cidade de Goiás. O objetivo central foi investigar como ferramentas digitais contemporâneas podem otimizar a criação de formas adaptativas, integrando parâmetros ambientais, estruturais e contextuais, ultrapassando métodos projetuais tradicionais. A abordagem metodológica é fundamentada na estratégia Performance-Based Design, apoiada na análise morfológica detalhada e na aplicação de algoritmos adaptativos e generativos. A escolha do tema justifica-se por se tratar de um método de concepção ainda pouco explorado na arquitetura e no design, onde a forma não é pré-concebida, mas gerada ou encontrada com auxílio da computação, possibilitando um estudo adaptativo mais próximo ao campo da biologia, especificamente através da biomimética, que integra representação gráfica e critérios de fenômenos externos à edificação, além de sua automatização, configurando a morfogênese como algoritmo de desempenho. Inicialmente,

realizou-se uma extensa fundamentação teórica, abrangendo a evolução histórica do design digital na arquitetura, desde a representação manual até a atual modelagem computacional. A pesquisa abordou criticamente a relação entre arquitetura e natureza, destacando os conceitos de biomimetismo e bioinspiração, que oferecem princípios evolutivos aplicáveis ao desenvolvimento de soluções sustentáveis, regenerativas e resilientes. Em seguida, foram analisados estudos de repertório extraídos do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC), enfatizando processos e metodologias utilizados para alcançar resultados inovadores, responsivos e eficazes em diferentes contextos ambientais e sociais. Estes estudos forneceram um arcabouço crítico e prático essencial para embasar os ensaios projetuais realizados posteriormente. Posteriormente, se inicia os ensaios projetuais, a qual envolveram o uso de técnicas avançadas de modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos, particularmente com o auxílio dos softwares Rhinoceros® e Grasshopper®, integrados ao plug-in Ladybug para simulações ambientais. Foram desenvolvidos protótipos digitais responsivos,

cujas forma e desempenho foram diretamente influenciados por variáveis como insolação, ventilação e condicionantes locais específicas da área estudada. Os resultados obtidos indicaram melhorias significativas no desempenho ambiental e estrutural das propostas geradas, validando a eficácia das ferramentas e métodos aplicados. Contudo, a pesquisa identificou desafios e contradições no uso de ferramentas digitais, destacando a subutilização de seu potencial quando desvinculadas de critérios científicos rigorosos e de uma consciência projetual crítica. Apontou-se também a necessidade de maior responsabilidade social na adoção dessas tecnologias, evitando-se abordagens puramente formais ou descontextualizadas. Por fim, o trabalho concluiu que a morfogênese computacional oferece oportunidades significativas para a prática arquitetônica, desde que integrada a uma metodologia consciente e socialmente comprometida. Destaca-se a relevância de se aprofundar o diálogo interdisciplinar entre arquitetura, biologia e computação, garantindo soluções projetuais mais eficientes, sustentáveis e acessíveis socialmente.

**Palavras-chave:** Morfogênese Computacional; Biomimética; Projeto Paramétrico; Simulação Ambiental; Arquitetura Sustentável.

**ABSTRACT**

This work explores the potential of computational morphogenesis applied to architecture, with an emphasis on biomimetic design tests aimed at the development of a pavilion for João Francisco Square, in the city of Goiás. The main objective was to investigate how contemporary digital tools can improve the creation of adaptive forms, integrating environmental, structural and contextual parameters, going beyond traditional design methods. The methodological approach is based on the Performance-Based Design strategy, enhanced by detailed morphological analysis and the application of adaptive and generative algorithms. The choice of the theme is justified by the fact that it is a design method still little explored in architecture and design, where the form is not pre-conceived, but generated or found with the help of computation, enabling an adaptive study closer to the field of biology, specifically through biomimetics, which integrates graphic representation and criteria of occurrences external to the building, in addition to its automation, configuring morphogenesis as a performance algorithm. Initially, an extensive theoretical

foundation was carried out, covering the historical evolution of digital design in architecture, from manual representation to current computational modeling. The research critically addressed the relationship between architecture and nature, highlighting the concepts of biomimicry and bioinspiration, which offer evolutionary principles applicable to the development of sustainable, regenerative and resilient solutions. Then, repertoire studies extracted from the Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) were analyzed, emphasizing processes and methodologies used to achieve innovative, responsive and effective results in different environmental and social contexts. These studies provided an essential critical and practical framework to support the subsequent designed tests. Subsequently, design tests began, which involved the use of advanced parametric modeling techniques and evolutionary algorithms, particularly with the help of Rhinoceros® and Grasshopper® software, integrated with the Ladybug plug-in for environmental simulations. Responsive digital prototypes were

developed, whose shape and performance were directly influenced by variables such as sunlight, ventilation and local constraints specific to the ecological area. The results obtained indicated significant improvements in the environmental and structural performance of the generated proposals, validating the effectiveness of the tools and methods applied. However, the research includes challenges and contradictions in the use of digital tools, highlighting the underutilization of their potential when disconnected from specific scientific criteria and critical design awareness. It also pointed out the need for greater social responsibility in the adoption of these technologies, avoiding purely formal or decontextualized approaches. Finally, the work concluded that computational morphogenesis offers extraordinary opportunities for architectural practice, as long as it is integrated with a conscious and socially committed methodology. The relevance of deepening the interdisciplinary dialogue between architecture, biology and computing is highlighted, ensuring more efficient, sustainable and socially accessible design solutions.

**Palavras-chave:** Computational Morphogenesis; Biomimetics; Parametric Design; Environmental Simulation; Sustainable Architecture.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Tripé da revisão utilizada .....	19	Figura 15 – Arranjo estrutural interno presente na Sagrada Família, de Gaudí.....	27	Figura 22 – Exemplos da proporção áurea no Homem, detalhe para o Homem de Vitruvius de DaVinci.....	31
Figura 2 - Sketchpad de Ivan Sutherland .....	20	Figura 16 – À direita, croqui de desenvolvimento de projeto relacionando a edificação ao movimento do tronco humano. À esquerda, fotografia do Turning Torso construído.....	28	Figura 23 – Exemplos de esferas na natureza.....	32
Figura 3 - Programação visual no Grasshopper .....	20	Figura 17–(A) Fotografia de radiolário, (B) Umas das pranchas de desenho de radiolários por Ernst Haeckel, preparados em negativo pelo diretor e artista David Lebrun; (C) Edifício de entrada da Exposição Mundial de 1900, em Paris, por René Binet.....	29	Figura 24 – Exemplos de fractais na natureza: a. Raio caindo, b. Esponja de Mengel, c. Conjunto de Mandelbrot, d. Gerado em software.....	32
Figura 4 - Perspectiva do projeto times eureka pavilion ..	20	Figura 18 – Ilustração em Plants As inventores (1923), de Raoul Francé, sobre as existências de modelos naturais de turbinas a vapor presentes em algas microscópicas.....	29	Figura 25 – Estudos das relações entre o pentágono, o pentagrama e a proporção áurea e a natureza. Em frutos, nos segmentos humanos, nos segmentos de animais.....	32
Figura 5 - Cadeira Bolívar.....	21	Figura 19 – Aluminium Foam, do LAPA EPFL, cuja variação das células de alumínio foi controlada de formaparamétrica.....	30	Figura 26 – Estrutura prática de projeto morfogenético computacional formulada por Achim Menges.....	35
Figura 6 - Diagrama Pavilhão Yure.....	21	Figura 20 - Exemplos de modulação da natureza.....	31	Figura 27 – Climate Canopy - Perspectiva renderizada.....	38
Figura 7 - Estrutura de madeira no museu GC Prostho.....	22	Figura 21 - Exemplos de identificação dos números de Fibonacci.....	31	Figura 28 – Climate Canopy - Diagrama das diretrizes.....	38
Figura 8 – Real Virtuality na instalação arquitetônica na Royal Academy of Arts.....	22			Figura 29 – Climate Canopy - Construção de malha.....	38
Figura 9 – WikiHouse.....	22				
Figura 10 – Representação do processo do design digital.	23				
Figura 11 – Papel do desing.....	23				
Figura 12 – Modelo genético.....	24				
Figura: 13 – Treliça de Warren.....	26				
Figura 14 – Exemplo de integração com a natureza.....	26				

Figura 30 – Climate Canopy - Sistema fluido com o Kangaroo.....39

Figura 31 - Climate Canopy - Diagrama explodido das camadas da cobertura.....39

Figura 32 – Climate Canopy - Conexão entre os parâmetros.....39

Figura 33 – Climate Canopy - Construção de painéis.....40

Figura 34 - Blue Saddle Roof - Conjunto do comportamento Formulado.....40.

Figura 35 - Blue Saddle Roof - Estudo de Forma.....40.

Figura 36 -Blue Saddle Roof- Vistas da forma.....40

Figura 37 - Blue Saddle Roof- Estrutura da forma.....41

Figura 38 - Blue Saddle Roof- Perspectiva Renderizada..41.

Figura 39 -Triangulated Tectonics- diagramação da forma.....41

Figura 40 - Triangulated Tectonics - traçamento da malha.....42

Figura 41 - Triangulated Tectonics - estrutura tensionada...42

Figura 42 - Triangulated Tectonics - modulação da forma...42

Figura 43 - HexaWave - malha hexagonal.....43.

Figura 44 - HexaWave - exploração da forma.....43

Figura 45 - HexaWave - modulação da face.....43

Figura 46 - HexaWave - perspectiva renderizada.....44

Figura 47 - Shadow Dome Configurator - Estrutura Módulo 1 .....44

Figura 48 - Shadow Dome Configurator - Estrutura Módulo II .....44

Figura 49 - Escala em relação ao município do local de escolha.....48

Figura 50 -Escala em relação ao setor do local de escolha.....49

Figura 51 - Localização do terreno no mapa de delimitação de zoneamento urbanístico de Goiás.....50

Figura 52 -Mapa topográfico da região, com a quadra do terreno em amarelo.....50

Figura 53 - Cartas solar e estudo de insolação.....51

Figura 54 - Contexto do local existente.....52

Figura 55 - Linhas de movimento de local.....52

Figura 56 - Programa de uso.....53

Figura 57 - Pontos de apoio à estrutura ( círculos vermelhos).....53

Figura 58 - Cobertura conectada.....53

Figura 59 - Pontos notáveis de apoio I .....56

Figura 60 - Pontos notáveis de apoio II .....56

Figura 61 - Construção da malha .....57

Figura 62 - Ancoragem dos pontos de apoio.....57

Figura 63 - Construção dos sistemas de ancoragem da malha e simulação.....58

Figura 64 - Simulação de malha.....58	Figura 77 - Incidência de solar no pavilhão.....65	Figura 88 - Superfície com patch.....73
Figura 65 - Malha definida.....59	Figura 78 - Construção das pirâmides facetadas alteradas perante a incidência solar.....65	Figura 89 - Ajuste da modelagem de vegetação.....73
Figura 66 - maminha-de-porca.....59	Figura 79 - Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha.....66	Figura 90 - Estrutura dos componentes do annual daylight.....74
Figura 67 - Analogia simbólica da maminha-de-porca.....59	Figura 80 - Ensaio responsivo: detalhe em relação às aberturas.....66	Figura 91 - Esquematização dos resultados de UDI.....74
Figura 68 - Reconstrução da malha.....60	Figura 81 - Terreno com pavilhão e incidência solar.....67	Figura 92 - Esquema Waffle.....75
Figura 69 - Extração dos pontos.....61	Figura 82 - Terreno com o pavilhão oculto e incidência solar.....67	Figura 93 - Estrutura de contorno da malha waffle.....75
Figura 70 - Malha com pirâmides facetadas.....61	Figura 83 - Ensaio responsivo: perspectiva do índice de incidência.....68	Figura 94 - Estrutura Waffle.....75
Figura 71 - Variação da escala de pirâmides.....62	Figura 84 - Ensaio responsivo: Distinção entre alturas.....68	Figura 95 - Ensaio de radiação sob a malha waffle.....75
Figura 72 - Cartas solar e estudo de insolação I.....62	Figura 85 - Perspectiva esquemática do pavilhão.....69	Figura 96 - Ensaio de UDI sob a malha waffle.....76
Figura 73 - Cartas solar e estudo de insolação II.....63	Figura 86 - Síntese dos casos simulados.....70	Figura 97 - Ensaio de exposição de abertura sob a malha waffle.....76
Figura 74 - Cartas solar e estudo de insolação III.....63	Figura 87 - Ajuste dos pontos de apoio.....73	Figura 98 - Resultado do protótipo Waffle.....76
Figura 75 - Comparação dos cenários de insolação com e sem o pavilhão I.....64		Figura 99 - Esquema voronoi.....77
Figura 76 - Comparação dos cenários de insolação com e sem o pavilhão		

Figura 100 – Contexto população de pontos e aplicação do voronoi sobre a superfície.....77

Figura 101 – Malha estruturada - voronoi.....77

Figura 102 – Ensaio de radiação sob a malha voronoi.....77

Figura 103– Ensaio de UDI sob a malha voronoi.....77

Figura 104 – Ensaio de exposição de abertura sob a malha voronoi.....78

Figura 105 – Resultado do protótipo Voronoi.....78

Figura 106 – Esquema escama circular.....78

Figura 107 – Modulação da unidade da escama.....79

Figura 108 – Aplicação da surface box sobre a malha.....79

Figura 109 – Aplicação do módulo no surface box.....79

Figura 110 – Ensaio de radiação sob a malha escama circular.....79

Figura 111 – Ensaio de UDI sob a malha escama circular.....80

Figura 112 – Ensaio de exposição de abertura sob a malha escama circular.....80

Figura 113 – Resultado do protótipo escama circular.....80

Figura 114 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha.....81

Figura 115 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha.....81

Figura 116 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha.....81

Figura 117 –Ensaio de radiação sob a malha escama de polilinha.....82

Figura 118 - Resultado do protótipo escama de polilinha.....82

Figura 119 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha.....82

Figura 120 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha.....83

Figura 121 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha encaixe.....83

Figura 122 – Ensaio de UDI sob a malha encaixe.....83

Figura 123 – Ensaio de exposição de abertura sob a malha encaixe.....83

Figura 124 – Resultado do protótipo encaixe.....84

Figura 125 – Ensaio de exposição de abertura sob o ensaio tradicional.....85

Figura 126 - Ensaio de exposição de abertura sob o ensaio piramidal.....85

Figura 127– Radar de síntese dos resultados.....86

Figura 128– Radar de síntese do estudo secundário.....88

*Trabalho de Conclusão de Curso*  
**Morfogênese computacional aplicada à arquitetura:  
ensaios projetuais biomiméticos para um pavilhão na  
Praça do João Francisco na Cidade de Goiás.**

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Estrutura de TCC utilizado .....	16
---	----

## LISTA DE SIGLAS

3D – Três Dimensões	CSV – Comma-Separated Values	LED – Light Emitting Diode
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	EPFL – École Polytechnique Fédérale de Lausanne	MIT – Massachusetts Institute of Technology
AI – Inteligência Artificial	FV – Fotovoltaico	PDF – Portable Document Format
BIM – Building Information Modeling	GH – Grasshopper	Rhino – Rhinoceros
CAD – Computer Aided Design	GIS – Geographic Information System	TCC – Trabalho de Conclusão de Curso
CLT – Cross Laminated Timber (Madeira Laminada Colada Cruzada)	IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia	UAECSA – Unidade Acadêmica Especial de Ciências Sociais Aplicadas
CNC – Controle Numérico Computadorizado	ISO – International Organization for Standardization	UFG – Universidade Federal de Goiás
CO <sub>2</sub> – Dióxido de Carbono	KWh – Quilowatt-hora LB – Ladybug	Wh – Watt-hora

**SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>	3.2. FORCES OF NATURE – BLUE SADDLE ROOF	40	5.1.2.4. Fluxo geral adaptado físico	62
1.1. PROBLEMÁTICA	15	3.3. COMPUTATIONAL DESIGN SEMINAR: TRIANGULATED TECTONICS	41	5.1.3. Form finding: variáveis climáticas	62
1.2. OBJETIVO	15	3.4. HEXAWAVE	42	5.1.3.1. Incorporação do contexto urbano e preparação da simulação	62
1.2.1. Objetivo Geral	15	3.4. SHADOW DOME CONFIGURATOR	44	5.1.3.2. Análise da radiação solar acumulada	62
1.2.2. Objetivos Específicos	16	<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	46	5.1.3.3. Trajetória solar aplicada ao modelo	64
1.3. JUSTIFICATIVA	16	4.1. Metodologia	47	5.2. Primeiro ensaio: estrutura responsiva	65
1.4. CONTRIBUIÇÕES DO TCC	16	4.2. Procedimentos	48	5.2.1. Do algoritmo ao comportamento espacial	65
1.5. ESTRUTURAÇÃO DO TCC	16	4.3. Área de intervenção	48	5.3. Análise E Desafios Da Fase Anterior	72
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>	4.3.1. Análise ecológica do local	48	5.3.1. Exploração Da Malha	72
2.1. O PROCESSO DO DESIGN DIGITAL NA ARQUITETURA	20	4.3.1. Localização e descrição física da área:	49	5.3.2. Reajuste Da Malha Pelo Kangaroo	72
2.1.1. Da Representação À Modelagem Computacional	20	4.3.2. Análise ecológica do local	48	5.3.3. Configuração De Objetos Externos	73
2.1.2. Primeira onda de simplificação digital	21	4.3.3. Dados ambientais	51	5.3.4. Configuração do componente Annual Daylight	74
2.1.3. A evolução algorítmica do processos de design digital	22	4.3.4. Levantamento da área	51	5.3.5. Configuração do componente View Percent	74
2.2. MIMETISMO COM A NATUREZA E O PROJETO	24	4.3.4.1. Fluxos de pessoas e de veículos	52	5.4. Ensaio II	75
2.2.1. Desenvolvimento sustentável e a crise do meio-ambiente	25	4.3.4.2. Usos do local e pontos de interesse público	52	5.4.1. Waffle	75
2.2.2. Adaptabilidade na natureza e na arquitetura	26	4.3.4.3. Estrutura de intervenção	53	5.4.2. Voronoi	77
2.2.3. Biomimetismo: integração entre natureza e o design	28	<b>5. ROTEIRO DOS ENSAIOS PROJETUAIS</b>	54	5.4.3. Escama Circular	78
2.2.4. Padrões da natureza	30	5.1. Estrutura da malha base	55	5.4.4. Escama Polilinha	81
2.2.5. Visão Holística	33	5.1.1. Form Finding: Cargas	55	5.4.5. Encaixe	78
2.3. O PROCESSO DE PROJETO COMO MORFOGÊNESE	33	5.1.1.1. Preparação da malha: definição de limites e obstáculos	55	5.4.6. Simulação de UDI x exposição de abertura do ensaio I	84
2.3.1. Morfogênese	33	5.1.1.2. Mapeamento de áreas de contato e pontos de ancoragem	56	5.5. Análise De Trade-Offs	86
2.3.2. A morfogênese na arquitetura: processo computacional	34	5.1.1.3. Definição dos objetivos físicos (Goals) da simulação	57	5.5.1. Síntese e interpretação transversal	88
2.3.3. A interface de programação visual e a fabricação digital à serviço da morfogênese	35	5.1.1.4. Execução da simulação: forma em equilíbrio	58	5.5.2. Estudo Secundário	89
2.4. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	36	5.1.1. Form Finding: Mash	59	<b>6. BALANÇO</b>	90
<b>3. ESTUDO DE REPERTÓRIO</b>	<b>38</b>	5.1.2.1. Conversão da malha e criação de vetores de extrusão	60	<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	92
3.1. CLIMATE CANOPY	38	5.1.2.2. Construção da malha vazada	61	<b>REFERÊNCIAS</b>	95
		5.1.2.3. Potencial de simulação e integração ao sistema físico	61		

# 1. INTRODUÇÃO

## 1. INTRODUÇÃO

É fato que a arquitetura desempenha um papel significativo na integração social, adaptando-se constantemente às transformações culturais e ambientais. A preocupação com o contexto climático não é recente, mas intensificou-se diante dos impactos ambientais crescentes. Medeiros (2002) relaciona grandes catástrofes ambientais à conscientização coletiva sobre a importância da preservação planetária, destacando que setores como a construção civil e o transporte motorizado utilizam recursos não renováveis em grande escala e produzem elevadas emissões de resíduos e CO<sub>2</sub>.

Heskett (2005) lembra que arquitetos e construtores impactam diretamente os problemas ambientais, enquanto Buckminster Fuller (1996), com seu princípio de “fazer mais com menos” e os domos geodésicos, ilustra a busca por eficiência. Brundtland (1987), por sua vez, defende soluções que atendam necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações, estabelecendo assim as bases para o desenvolvimento sustentável.

No âmbito digital, Brotas e Rusovan (2013) apontam que ferramentas computacionais permitem explorar geometrias, prever comportamentos espaciais e gerar propostas inovadoras.

O desempenho ambiental das edificações ganhou destaque nas últimas décadas, surgindo consideráveis pesquisas direcionadas a essa área, segundo Delgarm *et al.* (2016), em resposta à demanda por sustentabilidade. Cartana, Pereira e Mayer (2017) salientam a relevância das envoltórias construtivas para o desempenho térmico e iluminação natural, fatores essenciais para o consumo energético e impacto ambiental das edificações. Fajkus (2013), González e Fiorito (2015) e Silva *et al.*

(2018) reforçam essa tendência ao abordarem a eficiência energética das fachadas.

Nesse contexto, as ferramentas digitais surgem como importantes aliadas para o aprimoramento ambiental das construções, sendo um campo que não apenas facilita a exploração de novas formas e soluções, mas também possibilita análises preditivas detalhadas. Fonseca *et al.* (2016, p. 267) destaca a sua integração associada à paramétrica para o processo de otimização de desempenho no desenvolvimento de projeto.

Mario Carpo (2023) discute o impacto das “viradas digitais” na arquitetura, evidenciando a evolução das representações arquitetônicas dos desenhos bidimensionais para modelos digitais tridimensionais. A qual alterou a forma como o arquiteto vê os desenhos auxiliados por computador, tendo uma visão para desenhos arquitetônicos. Assim, a máquina não está ligada apenas para resolver problemas, mas também para fazer desenhos.

Oxman (2005) complementa afirmando que as tecnologias digitais possibilitaram formas mais dinâmicas e interativas, transformando paradigmas tradicionais de projeto. Eltaweel e Su (2017, p. 1087) definem o design paramétrico como uma metodologia baseada em matemática discreta, onde variáveis interligadas produzem soluções complexas automaticamente, simplificando processos decisórios e de modelagem, sem depender exclusivamente do pensamento analógico. No Brasil, o uso de tais ferramentas para em conjunto com estudos de eficiência energética já se estende por quase duas décadas, e, segundo Santana, Guimarães e Carlo (2015), os recentes avanços computacionais têm intensificado esses progressos. Lawson (2011) destaca o método heurístico, baseado em regras gerais e

experiência prática, ressaltando a importância do conhecimento empírico na utilização dessas tecnologias.

Oxman (2005), incide o contraste com a computação gráfica tradicional, a qual o design generativo demonstra um aspecto relevante — justo que uma vez o outro esteja restrito a parâmetros fixos de um espaço estático — ao empregar algoritmos e regras que geram, avaliam e refinam automaticamente múltiplas propostas, possibilitando explorar conexões entre elementos com a mudança de parâmetros. Essa atitude remete à fascinação pela natureza presente em pioneiros como Leonardo Da Vinci e Antoni Gaudí. A qual consideram a natureza como modelo, mentora e medida, remetendo a um projeto que não precisa ser um peso para o ecossistema, assim sintetizando a biomimética, a qual compreende a genialidade de sobreviver e prosperar da natureza, criando soluções propícias à vida.

No contemporâneo, o diálogo entre arquitetura e biologia se intensifica: Steadman (1979) lembra que Le Corbusier enxergava edifícios como organismos vivos, e Nascimento (2014) aponta que, graças às ferramentas computacionais, conceitos como morfogênese passaram a explicar o surgimento de formas adaptativas e eficientes em termos estruturais e ambientais.

Para além da forma, Gossard, Lartigue e Thellier (2013, p. 253) indicam que o comportamento térmico de uma edificação pode ser ajustado tanto por experimentação empírica quanto por meio de algoritmos de otimização — especialmente genéticos, quando existem objetivos e restrições claros. Nesse contexto, Eltaweel e Su (2017) e Penenti, Masera e Florito (2015) defendem plataformas exploratórias que integrem métodos generativos e simulações, acelerando a interação de soluções e promovendo um refinamento contínuo do projeto.

Dessa forma, tal trabalho tem como ênfase ser uma pesquisa quantitativa e exploratória, baseada em *Performance-Based Design* (Oxman, 2005), usando um pavilhão na Praça do João Francisco como campo de ensaio, a qual se propõe ensaios projetuais da geração de uma forma adaptativa a partir de parâmetros definidos, empregado da simulação como mecanismo de análise de sua otimização.

### 1.1. PROBLEMÁTICA

Apesar do avanço das ferramentas digitais e da automação na arquitetura, persiste uma série de desafios e contradições em sua adoção e impacto. Sanchez (2019, apud Retsin, 2019) aponta o surgimento de uma nova geração de programas parametrizados desde a década de 1980, que ampliaram o potencial do processo projetual. No entanto, mesmo com a automatização e a geração de formas complexas integradas a simulações ambientais e estruturais, seu potencial permanece subutilizado, especialmente quando desvinculado de critérios científicos rigorosos ou de uma consciência projetual crítica (Queiroz, 2015).

Um aspecto inquietante é que tais avanços nem sempre resultam em práticas fundamentadas ou responsáveis. Exemplos como *Digital Grottesque I* (Hansmeyer & Dillenburger, 2013) evidenciam uma exuberância formal guiada por lógicas de big data, muitas vezes distante de preocupações funcionais ou sociais, configurando o que se denomina “estética hostil”. Esse distanciamento é acentuado por abordagens como a de Patrik Schumacher, que defende o parametricismo como um estilo fluido e orgânico, mas frequentemente ignora a possibilidade de reconstrução colaborativa e a distribuição de conhecimento.

Gilles Retsin (2019) reforça a crítica ao argumentar que a adoção dessas ferramentas, ao invés de democratizar o campo,

pode reforçar desigualdades e favorecer grandes escritórios, ao mesmo tempo em que eleva barreiras de entrada. Kolarevic (2003) e Burry (2010) ressaltam as contribuições dos algoritmos genéticos, modelagem NURBS, prototipagem rápida e simulações ambientais, mas apontam a necessidade de novos métodos de representação, execução e validação, uma vez que muitos projetos digitais pioneiros foram ineficientes e ultrapassaram orçamentos. Além disso, o cenário legal e regulatório ainda se adapta às mudanças, redefinindo o papel e a autoria no processo.

No plano social, a automação redefine o papel do arquiteto, que passa de mero desenhista de formas a gestor de sistemas produtivos. Srnicek (2016) destaca o potencial dessas transformações para democratizar o acesso ao design, distribuir recursos e promover uma indústria mais ágil e inclusiva. Entretanto, há tensões entre rupturas aparentes e continuidades históricas, já que muito do que se apresenta como novidade são evoluções de processos anteriores.

A integração entre arquitetura digital e biologia, embora crescente, ainda enfrenta limites na tradução de soluções biológicas para sistemas inanimados, sendo a interdisciplinaridade essencial para gerar resultados inovadores (Löbach, 2001; Rudge & Haseloff, 2005; Roudavski, 2009). O estudo de padrões naturais, crescimento e adaptação inspira o desenvolvimento de fachadas dinâmicas, materiais responsivos e sistemas autorregulados, alinhando eficiência ambiental a demandas contemporâneas.

Ainda assim, é preciso compreender como a consciência social e a interpretação cultural moldam o valor do design digital, e como marcos legais, autorais e regulatórios acompanham essas mudanças. Desde experiências modernas, como as de Prouvé, Fuller e Otto, a arquitetura se reinventa ao adotar blocos

universais, modulares e intercambiáveis, consolidando um novo paradigma baseado na adaptação e na diversidade. Migayrou (2003) e Retsin (2029, apud Sanchez, 2023) apontam que a consolidação do design paramétrico rompe a serialização industrial, promovendo a personalização em massa e a colaboração aberta, mas exigindo novas estruturas para autoria, responsabilidade e regulamentação.

A emblemática central que se coloca é: em um cenário de crise ambiental acelerada e déficit habitacional, de que modo a automação e o design computacional podem viabilizar uma produção arquitetônica eficiente, economicamente acessível e alinhada à organização social das comunidades, integrando parâmetros ambientais e digitais? Kolarevic (2003) e Pasquire, Soar e Gibb (2006) destacam que a produção digital e a fabricação automatizada permitem reduzir custos, aumentar a precisão e viabilizar protótipos mais rapidamente, enquanto Srnicek (2016) defende que plataformas abertas e sistemas distribuídos podem tornar o design mais democrático.

### 1.2. OBJETIVO

#### 1.2.1. Objetivo Geral

Analisar o potencial de diferentes abordagens de concepção de projeto que utilizam ferramentas que empregam morfogênese computacional.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- I. Sistematizar analogias naturais a partir do mimetismo na adaptação ao clima, a fim de gerar formas complexas, como estudos comparativos de modelos digitais;
- II. Explorar a potencialidade das ferramentas de baixa complexidade, a fim de aumentar a escalabilidade de testes de otimização.
- III. Explorar a relação das variáveis de performance e controle, e compreender a sua potencialidade para o processo.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

A escolha do tema justifica-se por ser um método de concepção ainda pouco explorado na arquitetura e no design, ao invés de pré-concebida, é gerada ou encontrada com auxílio da computação.

Visibilizando um estudo de forma adaptativa por se aproximar do campo da biologia, como a biomimética, integrada entre representação gráfica e critérios de fenômenos externos a edificação, como até mesmo sua automatização, formulando assim a presença da morfogênese como algoritmo de desempenho.

### 1.4. CONTRIBUIÇÕES DO TCC

Esta pesquisa apresenta contribuições ao campo de pesquisa em 3 frentes principais: 1. contribuição teórica e conceitual; 2. metodológica e computacional; 3. instrumental em questões de projeto arquitetônico.

No plano teórico e conceitual, o estudo reforça a importância de integrar referências biológicas, como a biomimética, ao design digital. Ao revisar a literatura sobre morfogênese, design generativo e processos adaptativos, o trabalho aprofunda a discussão sobre como estratégias biológicas podem inspirar sistemas projetuais mais eficientes, responsivos e adequados ao contexto ambiental.

Metodologicamente, a pesquisa avança ao explorar diferentes possibilidades do design digital, empregando um conjunto de abordagens que inclui: modelagem paramétrica, simulação ambiental, algoritmos de otimização, análise morfológica e métodos generativos. Não se limita a uma única técnica, mas utiliza desde o form-finding biomimético - entendido aqui como um processo de “encontro da forma”, em que a geometria emerge da interação entre restrições, forças e parâmetros - até o uso de algoritmos evolutivos, métodos discretos e simulações. Essa combinação permite analisar o impacto de parâmetros ambientais e construtivos no processo projetual, destacando o potencial das ferramentas digitais para gerar soluções inovadoras e adaptativas.

No campo instrumental e do projeto arquitetônico, os ensaios realizados demonstram o potencial de articular estratégias digitais de modelagem, análise e otimização de desempenho, tornando os resultados acessíveis mesmo para profissionais não especializados em computação. A pesquisa enfatiza ainda a importância de relacionar as soluções geradas ao contexto local, contribuindo para o conforto ambiental e o bem-estar dos usuários.

### 1.5. ESTRUTURAÇÃO DO TCC I

Este trabalho está organizado em sete capítulos, conforme visto na tabela 1. O capítulo inicial reúne a introdução do tema, delimita o problema, traz os objetivos, justifica a escolha do estudo, contribuições e apresenta de forma sintética o método adotado. O segundo capítulo desenvolve a fundamentação teórica, contextualizando o objeto de estudo e os conceitos que sustentam a investigação. Na sequência, o terceiro capítulo reúne os estudos de repertório, que servem de base para a reflexão crítica e embasam as escolhas projetuais. O quarto capítulo aprofunda nos materiais e métodos, detalhando a lógica do método, os materiais, programas e procedimentos específicos utilizados na pesquisa.

O quinto capítulo é dedicado ao roteiro dos ensaios projetuais, apresentando desde o desenvolvimento do primeiro protótipo até os resultados alcançados em termos de desempenho frente à incidência de radiação. No sexto capítulo, são apresentados os resultados esperados. Por fim, o sétimo capítulo traz as considerações finais, com um balanço geral dos aprendizados, discussões e limitações identificadas ao longo do trabalho.

Tabela 1 – Estrutura de TCC utilizado

Estrutura da atual etapa de TCC	
Capítulo	Conteúdo
Capítulo 1 Introdução	I. Panorama do tema; II. Problema de pesquisa; III. Objetivos; IV. Justificativa; V. Contribuições; VI. Estrutura do TCC I.
Capítulo 2	I. O processo do design

Revisão bibliográfica	digital na arquitetura; II. Mimetismo com a natureza e o projeto; III. O processo de projeto como morfogênese.
Capítulo 3 Estudos de repertório	I. Climate Canopy II.
Capítulo 4 Materias e métodos	I. Metodologia II. Métodos III. Materiais IV. Procedimentos
Capítulo 5 Roteiro dos Ensaios Projetuais	I. Form-Finding II. Simulações ambientais III. Ensaio I e II
Capítulo 6 Balanço	Balanço geral da pesquisa
Capítulo 7 Considerações finais	

Fonte: Autor (2025)

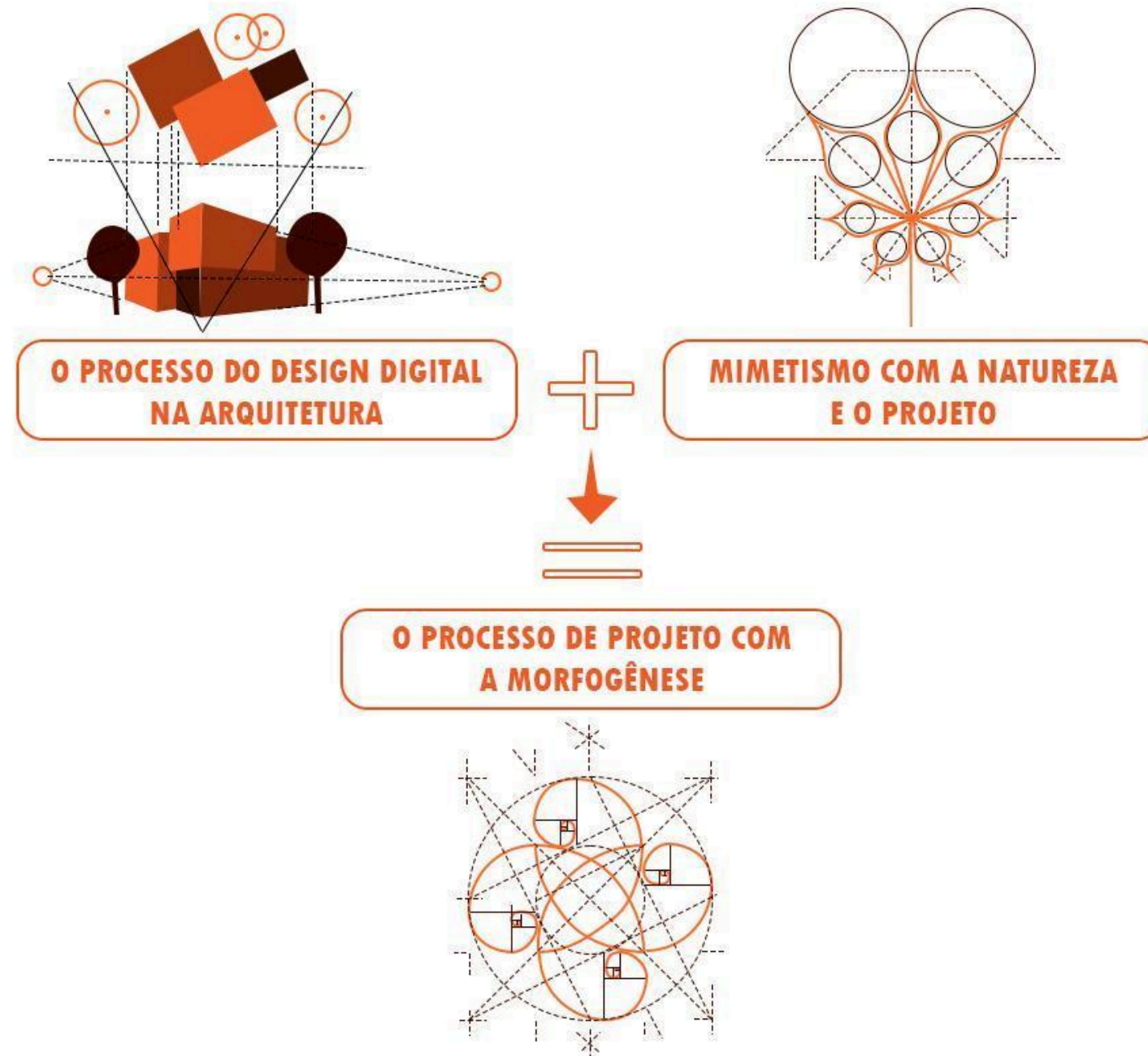


## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente Capítulo desenvolve a revisão bibliográfica sobre a ferramenta digital morfogênese aplicada ao campo da arquitetura, tal fundamento foi marcado por 3 eixos, como demonstrado na figura 1:

- I. Sendo uma ligação entre o caráter histórico do processo do design computacional em conjunto de sua integração na arquitetura;
- II. A relação do meio externo com o ser humano a partir da natureza, entendendo-a como mentora;
- III. Como também o “diálogo” entre esses dois caminhos, voltado a geração da forma a partir de um método digital com algoritmo adaptativo, discutindo conceitos da morfogênese digital e seus processos.

Figura 1 – Tripé da revisão utilizada



Fonte: Autor (2025)

Fonte: (Mitchell, 2008).

Fonte: Autor (2025)

## 2.1. PROCESSO DO DESIGN DIGITAL NA ARQUITETURA

### 2.1.1. DA REPRESENTAÇÃO À MODELAGEM COMPUTACIONAL

Durante séculos, a prática projetual em arquitetura esteve ligada à representação gráfica em duas dimensões, com desenhos ortogonais, perspectivas e maquetes físicas. Esse paradigma se manteve mesmo diante das inovações técnicas da Revolução Industrial, sendo o arquiteto ainda um desenhista que traduzia ideias em representações estáticas (Leach, 2001; Evans, 1995). A representação era vista não apenas como ferramenta, mas como estrutura cognitiva do pensamento projetual, condicionando o modo como a forma era concebida e compreendida.

A introdução dos computadores no design, a partir dos anos 1960, representou inicialmente uma continuidade dessa lógica representacional. O Sketchpad de Ivan cdesenvolvido no MIT, é considerado o ponto de partida dos sistemas CAD, permitindo a manipulação gráfica de geometrias vetoriais, podendo ser visto na figura 2 (Mitchell, 2008).

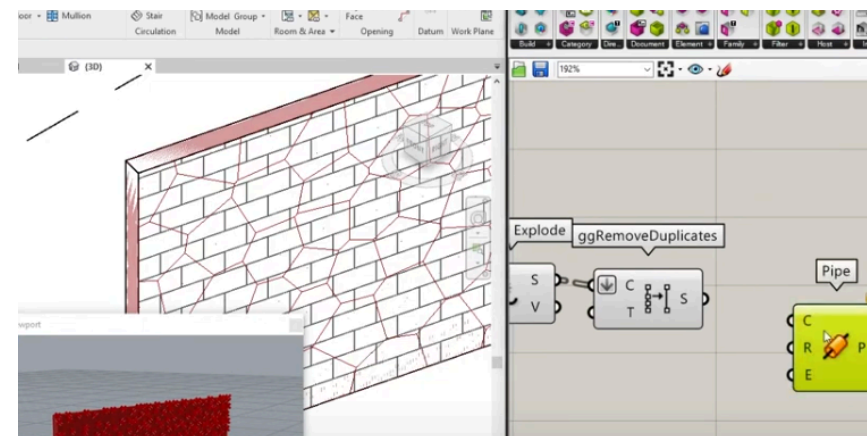
Figura 2 – Sketchpad de Ivan Sutherland



No entanto, por décadas, os programas se limitaram a reproduzir as técnicas do desenho manual, como pranchetas digitais (Kolarevic, 2003). Segundo Oxman (2006), isso ilustra a resistência paradigmática da arquitetura em incorporar verdadeiramente os meios computacionais como agentes criativos.

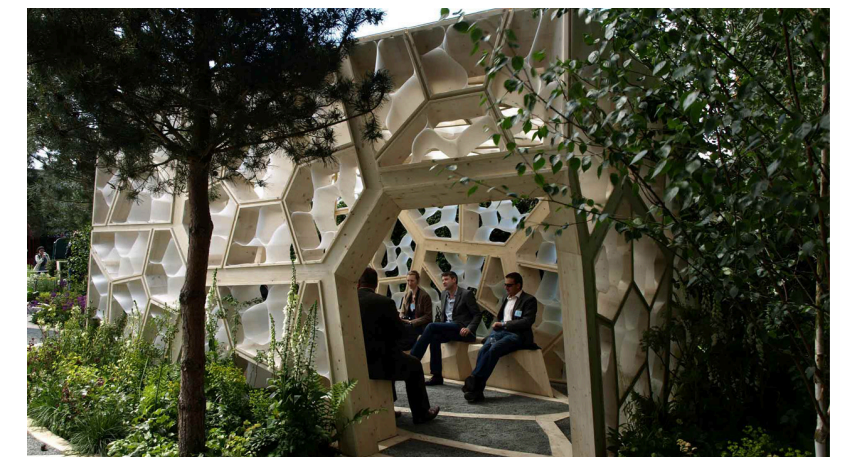
A virada ocorre quando o meio digital deixa de ser apenas representacional e se torna generativo. A modelagem paramétrica, como destaca Kolarevic (2003), inaugura uma nova era: ao invés de formas pré-definidas, o arquiteto passa a projetar sistemas de relações — algoritmos, regras, parâmetros — capazes de gerar múltiplas variações formais, como exemplo na figura 3, utilizando da ferramenta digital. Para Menges (2008), essa lógica performativa desloca o foco do objeto para o processo, aproximando projeto e simulação em tempo real. Esse modelo relacional substitui a noção de forma estática pela de morfogênese computacional.

Figura 3 – Programação visual no grasshopper



Schumacher (2009), defensor do Parametricismo enquanto estilo, argumenta que a arquitetura computacional é parte de uma nova revolução formal e organizacional, análoga ao Modernismo no século XX. Já Frazer (1995) propõe a ideia de "arquitetura como processo evolutivo", sugerindo que os projetos podem se desenvolver como sistemas vivos, adaptativos, mediados por algoritmos. Nesse sentido, a atuação do arquiteto aproxima-se de um “curador de comportamentos emergentes”, um exemplo destacado na figura 4 (Weinstock, 2010).

Figura 4 – Perspectiva do projeto *times eureka pavilion*



Fonte:(Dempsey et al., 2011)

Outro aspecto decisivo é a integração entre simulação, análise e fabricação digital. Ferramentas como Grasshopper e Ladybug a qual permite simular desempenho ambiental, estrutural e energético desde as primeiras etapas do projeto (Tedeschi, 2010). Para Sass e Oxman (2006), isso representa uma convergência entre concepção e construção, dissolvendo fronteiras tradicionais entre projeto e execução — o que pode ser

Curso de Arquitetura Urbanismo

interpretado como um movimento em direção a uma arquitetura com expressão tectônica mais conectada aos processos produtivos atuais no campo digital.

Essa mudança epistemológica redefine o papel do arquiteto. Como observa Carpo (2011), na era digital o desenho não é mais apenas uma representação do real, mas um código que instrui diretamente a produção material. A tectônica digital, portanto, não é apenas estética, mas construtiva e performativa: forma, material e comportamento são concebidos como um sistema integrado.

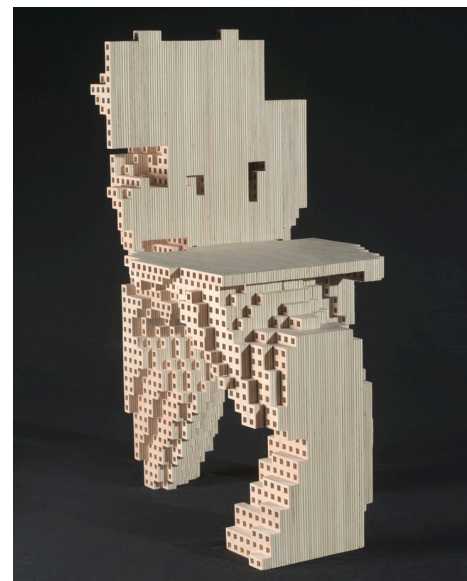
Assim, a passagem da representação manual à modelagem computacional representa uma mutação no pensamento arquitetônico: do controle absoluto da forma à abertura para processos dinâmicos, relacionais, ambientalmente responsivos e formalmente inovadores. É nesse cenário que a arquitetura contemporânea encontra novos meios de integrar complexidade, precisão e sustentabilidade desde a gênese do projeto.

### 2.1.2. Primeira onda de simplificação digital

A partir dos anos 2000, ainda que de modo inicial e tímido, a arquitetura digital começou a experimentar uma inflexão importante: gradualmente, o foco deixou de ser a forma fluida e icônica, voltando-se para processos colaborativos, discretos e tecnicamente mediados. Picon (2003) e Carpo (2017) apontam que a computação deixou de ser ferramenta de estilização para tornar-se um dispositivo crítico, capaz de redefinir o papel do arquiteto e da prática projetual. Esse deslocamento foi impulsionado por fenômenos como a *Web 2.0*, que promoveu o usuário como cocriador (Cache, 2005), e pelo avanço do *BIM*, que, segundo Eastman *et al.* (2011), transformou a colaboração interdisciplinar na construção civil.

Na sequência, o surgimento e popularização de tecnologias como a impressão 3D — um tipo específico de fabricação aditiva — e a fabricação através da robótica, contribuíram para desafiar e superar o paradigma paramétrico dominante, como argumenta Schumacher (2008). Em contrapartida, autores como Retsin (2019) e Kolarevic (2003) advogam por uma “virada discreta”, baseada em métodos agregacionais, modulares e acessíveis, ampliando as possibilidades do design computacional além do fetiche pela complexidade formal. A Cadeira Bolívar (2004), figura 5, de Philippe Morel, ilustra essa transição, ao incorporar discretização como estratégia estética e construtiva, integrando métodos como a Análise de Elementos Finitos (Terzidis, 2006) e a otimização morfogenética (Menges, 2010).

Figura 5 – Cadeira Bolívar I



Fonte: (Morel, 2004).

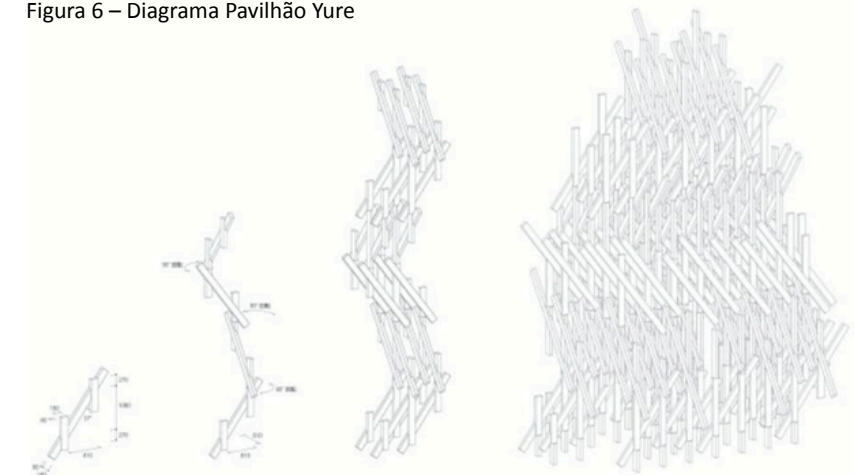
Essa abordagem parte da concepção contemporânea da matéria como heterogênea e descontínua (Bloomer, 1993; Leatherbarrow & Mostafavi, 2002) e se articula à compreensão da

complexidade natural como não-linear e discreta (DeLanda, 2002; Kwinter, 2001; Kauffman, 1995). Nesse contexto, algoritmos evolutivos e simulações deslocam a ênfase da idealização formal para a negociação contingente com o real, sinalizando uma “segunda era digital” pautada pela multiplicidade e variabilidade (Carpo, 2011).

A virada discreta se ancora na decomposição de sistemas arquitetônicos em componentes modulares, desafiando a tradição modernista de padronização e continuidade. Essa crítica ecoa autores como Tafuri (2006) e Colquhoun (2002), que questionam a racionalidade instrumental do século XX. O design computacional emergente, propõe uma reestruturação radical dos processos projetuais, como discutido por Gramazio e Kohler (2008) e Terzidis (2006), com base na fabricação digital e em algoritmos como ferramentas criativas.

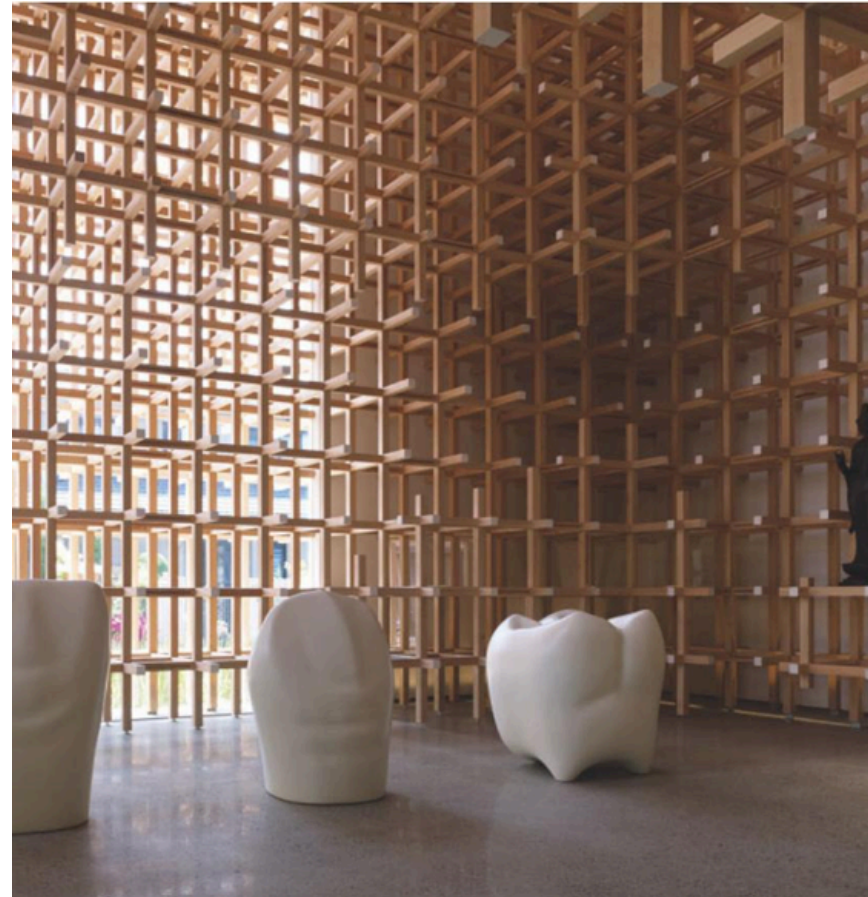
Carpo (2011, 2017) destaca que a digitalização rompe com a lógica serial da produção industrial, viabilizando a personalização em massa via controle algorítmico, princípio fundamental à arquitetura discreta. Estruturas baseadas em combinações de componentes simples, como mostram projetos de Kengo Kuma (2010, 2015), visto na figura 6 e 7.

Figura 6 – Diagrama Pavilhão Yure



Fonte: Kengo Kuma & Associates. (2015).

Figura 7 – Estrutura de madeira no museu GC Prosthio



Fonte: Kengo Kuma & Associates. (2010).

Gilles Retsin (2019), com o projeto *Real Virtuality* - figura 8 - o coletivo *Softkill Design* defendem sistemas de montagem sem moldes contínuos, promovendo uma estética emergente inspirada na *assemblage theory* de Deleuze e Guattari (1980), que valoriza a multiplicidade e a emergência de formas a partir da interação entre partes.

Figura 8 – Real Virtuality na instalação arquitetônica na Royal Academy of Arts



Fonte: (Retsin, 2019).

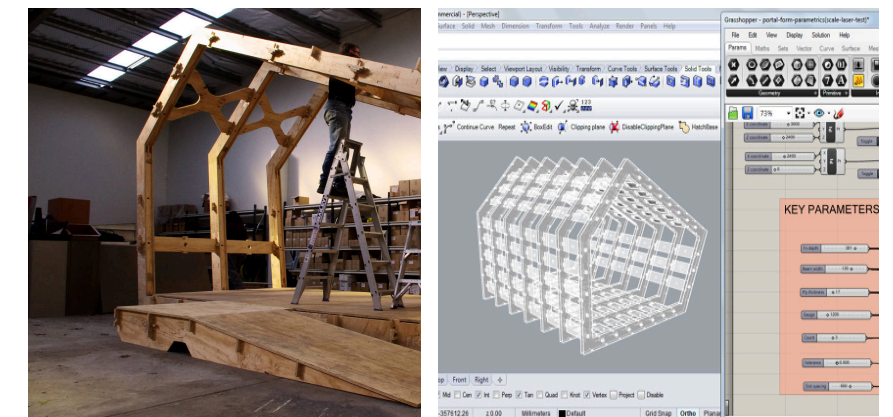
Essa abordagem se articula ainda com estratégias bioinspiradas, como as de Menges e Sabin, que integram simulação computacional, processos biológicos e fabricação digital para criar sistemas adaptativos e sensíveis ao ambiente. Paralelamente, ela critica o parametricismo enquanto estilo fechado (Schumacher, 2010; Till, 2009), propondo uma reconfiguração ética e material da prática arquitetônica.

Nesse horizonte, a parametrização se afirma como linguagem estruturante no *BIM*, permitindo que o arquiteto opere com lógica algorítmica, conectando dados de entrada, regras e saídas (Dino, 2012). A modelagem paramétrica, conforme Mitchell (*apud* Martino & Celani, 2014), distingue propriedades essenciais (constantes) e acidentais (variáveis), viabilizando múltiplas instâncias projetuais. Essa lógica contribui para a resolução eficiente de problemas complexos, especialmente em contextos urbanos, como afirmam Beesley *et al.* (2000), Oxman (2006),

Terzidis (2006), Woodbury (2010), Scheer (2014), Tedeschi (2014) e Verebes (2014).

Por fim, o paradigma discreto se articula com os princípios da sustentabilidade e da circularidade, defendidos por Manzini (1993) e McDonough & Braungart (2002), ao priorizar sistemas desmontáveis e adaptáveis. Assim, o design computacional contemporâneo não se limita a uma estética, mas constitui um campo crítico, ético e colaborativo, atento às condições materiais, tecnológicas e socioambientais do mundo atual, como é possível ver no projeto *WikiHouse* - figura 9.

Figura 9 – WikiHouse



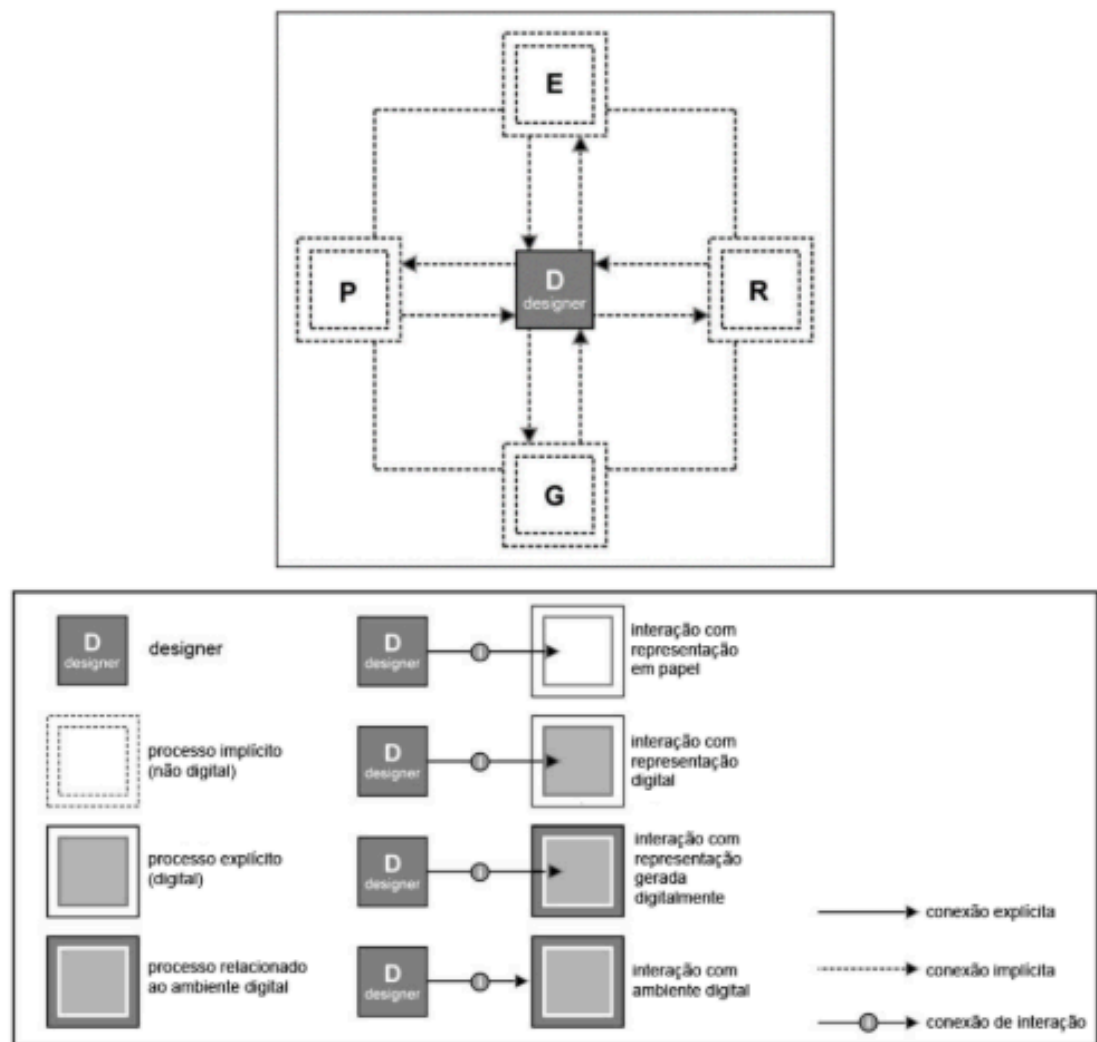
Fonte: (Prest, 2013).

### 2.1.3. A evolução algorítmica do processos de design digital

Na contemporaneidade, questiona-se se o design digital representa uma ruptura metodológica ou apenas reveste práticas convencionais com nova camada gráfica. Mitchell (2005) argumenta que, ao incorporar maior complexidade e sensibilidade contextual — local, programa e intenção expressiva — o design digital se distingue do paradigma uniforme do modernismo

industrial. Oxman (2006) reforça essa transição ao defini-lo como um sistema de tecnologias midiáticas que reformula processos projetuais e reposiciona o designer como agente central, responsável por manipular diferentes graus de interatividade e controle computacional - figura 10.

Figura 10 – Representação do processo do design digital



Fonte: Adaptado de Oxman (2006, p.241).

Seu modelo esquemático apresenta quatro quadrantes principais: R (representação), que se refere aos meios de comunicação visual;

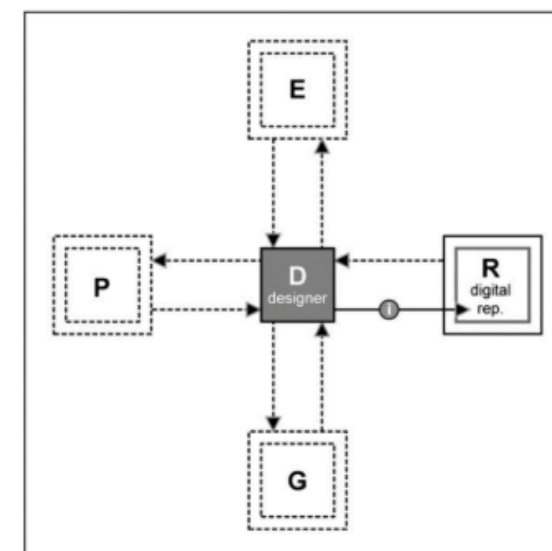
G (geração), relativo a processos generativos de forma; E (avaliação), voltado à análise e julgamento; e P (desempenho), que integra parâmetros programáticos e contextuais. A articulação entre esses quadrantes evidencia como diferentes modos de interação — sejam manuais ou computacionais — impactam o processo projetual. Oxman distingue quatro formas de interação: (1) com a representação física (esboços, modelos manuais); (2)

com representações digitais diretas; (3) com representações digitais geradas por regras; e (4) com os próprios mecanismos computacionais que geram essas representações.

A natureza dessas interações é ilustrada por linhas que indicam o tipo de vínculo: tracejadas para conexões implícitas e

cognitivas; contínuas para ligações computacionais. Modelos tradicionais, ainda que intuitivos e não formalizados, podem conter componentes avaliativos e generativos. Para Oxman, mesmo representações manuais já envolvem integração implícita entre performance, geração e avaliação, revelando um comportamento cognitivo do design - figura 11 - que se torna mais estruturado no ambiente digital.

Figura 11 – Papel do design



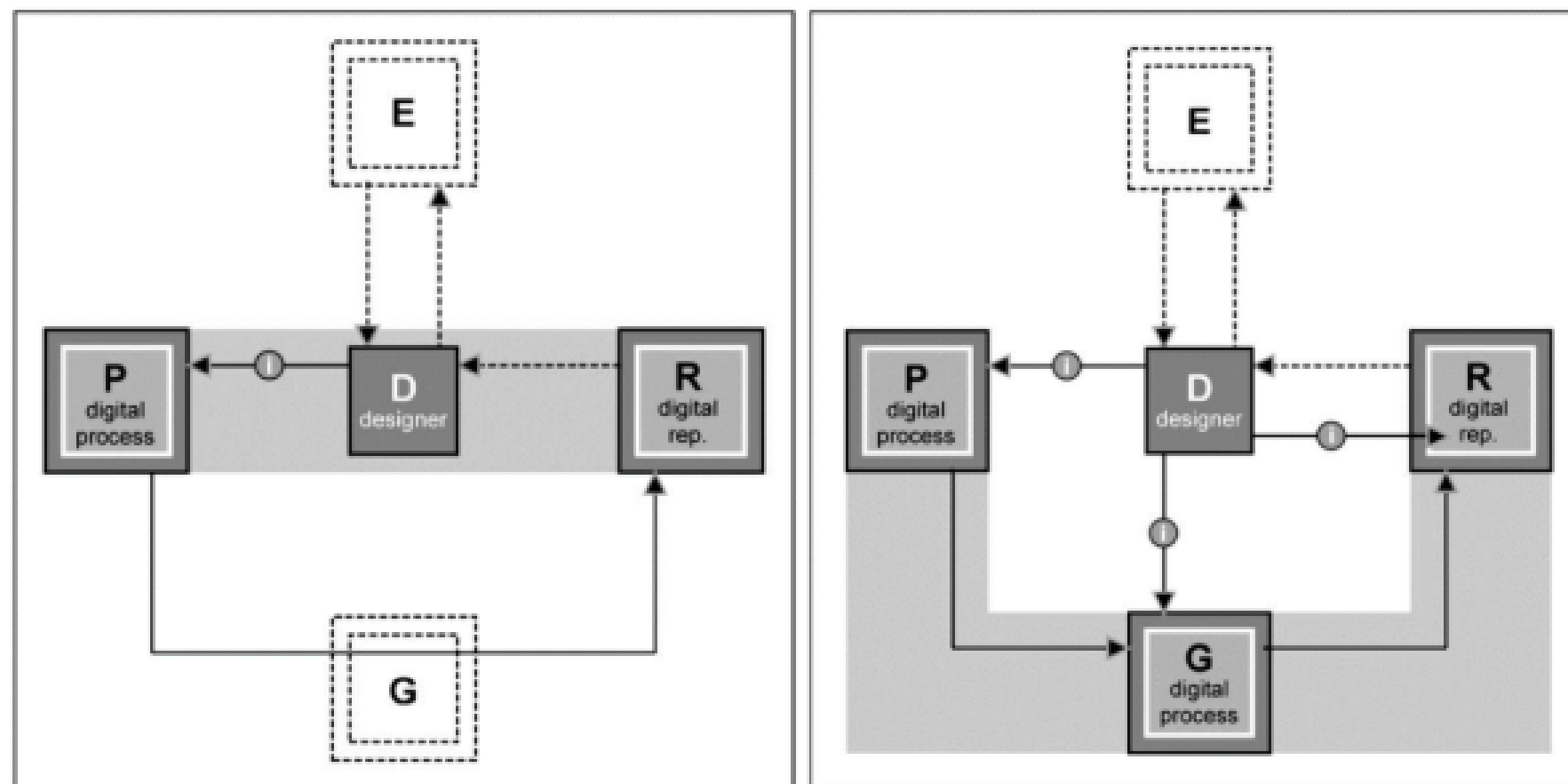
Fonte: Adaptado de Oxman (2006, p.241).

Com base em seu esquema, Oxman (2006) define cinco classes genéricas de modelos no design digital: (1) CAD; (2) modelos de formação; (3) modelos generativos; (4) modelos de desempenho; e (5) modelos compostos. Esses modelos variam conforme o grau de integração entre representação, geração, avaliação e desempenho, permitindo converter informações implícitas em estruturas explícitas por meio da mediação digital.

Dentre eles, destaca-se o modelo de desempenho, no qual a forma arquitetônica é gerada a partir de condicionantes paramétricas que respondem diretamente a critérios contextuais e

funcionais. Nesse contexto, o desempenho — seja ambiental, estrutural, econômico ou social — atua como motor morfogenético, deslocando o foco do design da intuição subjetiva para um sistema adaptativo e cognitivo. e culturais — convertendo o design em um sistema responsivo, dinâmico e cognitivo - figura 12.

Figura 12 – Modelo genético



Fonte: Adaptado de Oxman (2006, p.241)

Oxman (2006, p. 257) aponta que esses modelos baseados em desempenho operam por simulações analíticas que geram expressões paramétricas, capazes de responder simultaneamente a exigências ambientais, financeiras, sociais, espaciais, culturais e

tecnológicas. Ao priorizar critérios objetivos e interdependentes, o design torna-se um processo iterativo de adaptação contínua, alinhado à abordagem morfogenética de Hensel *et al.* (2004) e aos sistemas adaptativos de Holland (1997), nos quais regras e parâmetros alimentam ciclos de retroalimentação.

Kalay (2004) contribui com essa visão ao propor uma epistemologia computacional onde o modelo não apenas representa a realidade, mas também raciocina com base em dados

inflexão paradigmática: transforma o projeto em um ecossistema responsivo, orientado por dados, simulações e comportamento ambiental.

## 2.2. MIMETISMO COM A NATUREZA E O PROJETO

A inspiração à natureza, o interesse em compreender suas formas e funções na busca por harmonia, é algo que remonta à antiguidade clássica, principalmente ao observar os trabalhos de Aristóteles e Vitruvius (Ahmed, 2015). Desde a Grécia Antiga, críticos e filósofos já se inspiraram em organismos naturais, compreendendo-os como analogias perfeitas do equilíbrio entre harmonia visual e proporção entre as partes. Desde 490-430 a.C., período no qual o Partenon foi projetado (Hemenway, 2005), a proporção áurea pode ser entendida como uma das teorias matemáticas mais antigas a compreender as lógicas da ordem, repetições e proporções presentes em iterações consecutivas de crescimento concêntrico das pétalas de flores.

O desenvolvimento da teoria sobre as inspirações em fenômenos naturais tem sua história marcada por diversas transformações conceituais e questionamentos de teóricos de diversas áreas do conhecimento a respeito do desenvolvimento da forma biológica, de onde surgiram ideias conflitantes sobre a origem da organização e formação dos organismos naturais no campo da biologia.

A dimensão do virtual da Arquitetura e na Ciência vem ocorrendo em função da constante troca de imagens e metáforas entre si. Através dos períodos históricos, a ciência fez grande uso de noções importadas da Arquitetura, a exemplo dos cientistas dos séculos XVI e XVII que frequentemente se referiam aos

conceitos de ordem e proporção. Por parte dos arquitetos, desde o Renascimento até o final do século XVII, tais noções se relacionam ao uso de construções geométricas bem como a técnicas de pesquisa, também usadas por cientistas da época (Picon, 2003). A partir do século XVIII, a noção de estrutura surge como outro nível de dimensão virtual da Arquitetura ao expressar o resultado da tensão entre as necessidades sociais e a cultura tecnológica de um período (Viollet-Le-Duc, 1872 Apud Picon, 2003), o que corroborou para o desenvolvimento da pesquisa em história natural setecentista. Esta é marcada pelo surgimento dos métodos classificatórios de espécies animais e vegetais, bem como pela influência da arqueologia, e permitiu o surgimento das primeiras analogias a formas naturais por parte de arquitetos e designers.

### 2.2.1. Desenvolvimento sustentável e a crise do meio-ambiente

A história da relação entre o ser humano e a natureza é marcada por uma progressiva cisão. Em sociedades tradicionais e originárias, como observa Lévi-Strauss (1962), a natureza era percebida como continuação da vida humana, um sistema de signos e significados interligados. O mundo natural possuía um valor simbólico e espiritual, e o ser humano era parte de seus ciclos, e não seu dominador.

Essa visão começa a mudar radicalmente com o advento do pensamento moderno. O paradigma cartesiano (Descartes, 1637) instaurou a separação entre mente e corpo, sujeito e objeto, razão e natureza. Essa dualidade fundou a racionalidade científica moderna, que, conforme expõe Enrique Leff (2001), reduziu o mundo natural a um objeto de manipulação, estabelecendo a base

epistemológica para a lógica da dominação ambiental. A natureza, nesse modelo, deixou de ser parceira para se tornar recurso.

A Revolução Industrial, ao aplicar essa lógica tecnocientífica à produção em massa, consolidou a ideia de que o progresso econômico estava dissociado dos limites ecológicos. A racionalidade instrumental descrita por Adorno e Horkheimer (1947) aprofunda esse distanciamento, ao transformar tudo — inclusive os seres humanos — em objetos funcionais do sistema capitalista.

Essa relação de exploração, ao longo do século XX, gerou impactos cumulativos que se traduzem na atual crise ambiental. Como aponta Edgar Morin (2000), essa é uma crise complexa e multidimensional, que envolve o esgotamento dos recursos naturais, o colapso da biodiversidade, o aquecimento global e a fragmentação dos vínculos simbólicos com o mundo natural. O ser humano passou a viver em uma “bolha artificial”, como descreve David Orr (1992), dissociado dos sistemas que sustentam a vida. Frente a esse cenário, surgem as primeiras críticas ecológicas e os embriões do conceito de desenvolvimento sustentável. A publicação do relatório “Limits to Growth” (Meadows et al., 1972), do Clube de Roma, foi um marco ao evidenciar que o crescimento econômico ilimitado em um planeta finito era insustentável.

No entanto, como alerta Serge Latouche (2009), o termo desenvolvimento sustentável muitas vezes é cooptado por uma retórica de “crescimento verde”, sem ruptura real com os paradigmas produtivistas. Para autores como Wolfgang Sachs (1993) e Leonardo Boff (2011), o desafio vai além de políticas ambientais pontuais: trata-se de uma transformação cultural e civilizatória, capaz de restaurar a conexão ética e simbólica com a Terra.

No século XXI, os sinais do colapso ambiental se tornam incontornáveis. O Relatório de “Ameaças Ecológicas” (IEP, 2020) estima que mais de um bilhão de pessoas poderão ser deslocadas por eventos climáticos extremos até 2050. O documentário “Refugiados Climáticos” (DW, 2019) revela populações inteiras abandonando suas terras devido à desertificação, inundações e elevação do nível do mar — um prenúncio do que se tornará cada vez mais comum.

No Brasil, o INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - alertou que 2023 foi um dos anos mais secos e quentes já registrados, com impactos severos sobre a saúde pública, a agricultura e os sistemas hídricos. (Steadman, 2008) destaca que políticas públicas de adaptação urbana, como o aumento das áreas verdes e o uso de tecnologias sustentáveis, são cruciais — mas que essas medidas só terão eficácia duradoura se acompanhadas de uma revisão nos fundamentos culturais da nossa relação com o mundo natural.

A crise ecológica, portanto, não é apenas uma crise de gestão ambiental: é uma crise ontológica e epistemológica. Como enfatiza Boaventura de Sousa Santos (2006), é preciso superar a monocultura da razão eurocêntrica e reconstruir formas plurais de saber e de convivência com a natureza. O desenvolvimento sustentável, nesse contexto, deixa de ser um modelo técnico e se converte em um projeto ético-político de reconexão. Superar essa crise exige não apenas tecnologias limpas ou metas climáticas, mas uma reconfiguração profunda da relação homem-natureza — onde o planeta deixa de ser palco da ação humana para ser reconhecido como coautor da existência. Como conclui Capra (1996), é hora de pensarmos em redes de vida, e não em cadeias de comando.

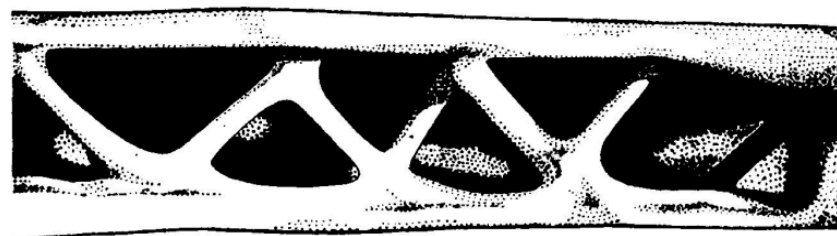
### 2.2.2. Adaptabilidade na natureza e na arquitetura

Após compreendermos a intrínseca relação entre a natureza e o ser humano, é crucial explorar o contínuo processo de transformação que caracteriza o ambiente natural e sua interconexão com a humanidade. Nesse contexto, o ambiente experimenta variações constantes que influenciam a adaptação das espécies. Transformações graduais favorecem a estabilização da diversidade, enquanto mudanças abruptas demandam adaptações ágeis, intensificando a pressão da seleção natural.

Na ergonomia e no design, o princípio é oposto ao natural: objetos e máquinas devem se adaptar ao ser humano. Desde o Paleolítico, esse processo busca conforto e eficiência. Löbach (2001) define o design como a adaptação do ambiente às necessidades humanas, evidenciado, por exemplo, na evolução automotiva, que, embora avançada, ainda requer aprendizado complexo.

O matemático e biólogo escocês ainda relaciona os ossos das asas de abutres à estrutura de uma treliça de *Warren* - figura 13 - e como o fêmur humano pode ser comparado a guindastes (Steadman, 2008). Compreende-se que uma das maiores contribuições teóricas de Thompson foi o estudo da forma biológica a partir da perspectiva da física e da mecânica, também discorrendo sobre o conceito de otimização, frequentemente encontrado na Natureza (Ahmed, 2015) e possível de ser aplicado na produção de artefatos artificiais. A influência de Thompson a respeito do funcionamento e mecanismos de crescimento e formação foi tão relevante que a produção teórica contemporânea sobre o tema se apoia em suas bases conceituais.

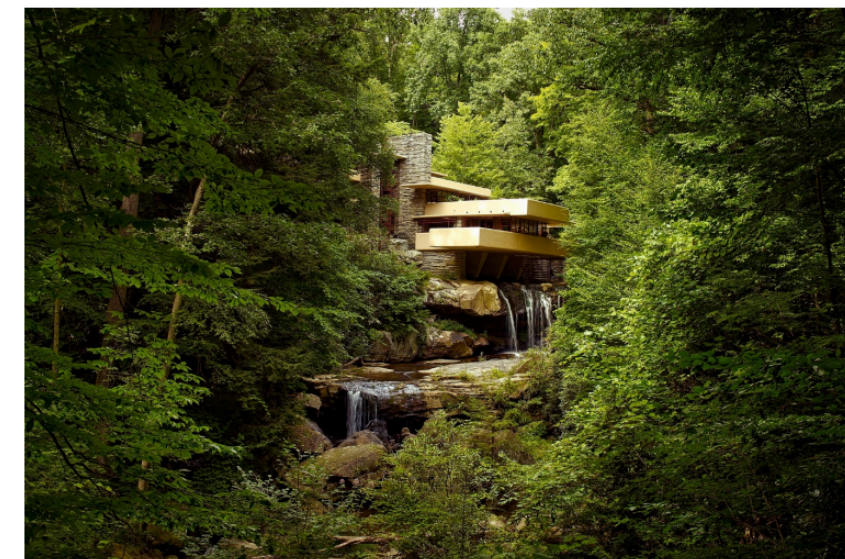
Figura 13 – treliça de Warren



Fonte: Steadman (2008).

Analogamente à natureza, forças selecionadoras — econômicas, ambientais e culturais — moldam a criação humana. Contudo, diferentemente da evolução biológica, o design permite antecipar e ajustar soluções antes da aplicação real. Mesmo assim, a validação final ocorre apenas com o uso prático, exigindo adaptações contínuas. O trabalho teórico de Le Corbusier também abarca o tema da analogia biológica no nível do discurso metafórico ao justificar formas geométricas simples com qualidades estéticas. O arquiteto afirma, por exemplo, que a construção tradicional de paredes de pedra pode ser comparada com os cascos de tartarugas e lagostas, e ainda que o tipo moderno de estrutura colunar corresponderia a um esqueleto interno, no qual as paredes que não têm função estrutural e simplesmente dividem o espaço seriam equivalentes a membrana de pele, sendo um exemplo visto na figura 14.

Figura 14 – Exemplo de integração com a natureza



Fonte: Baker (2004).

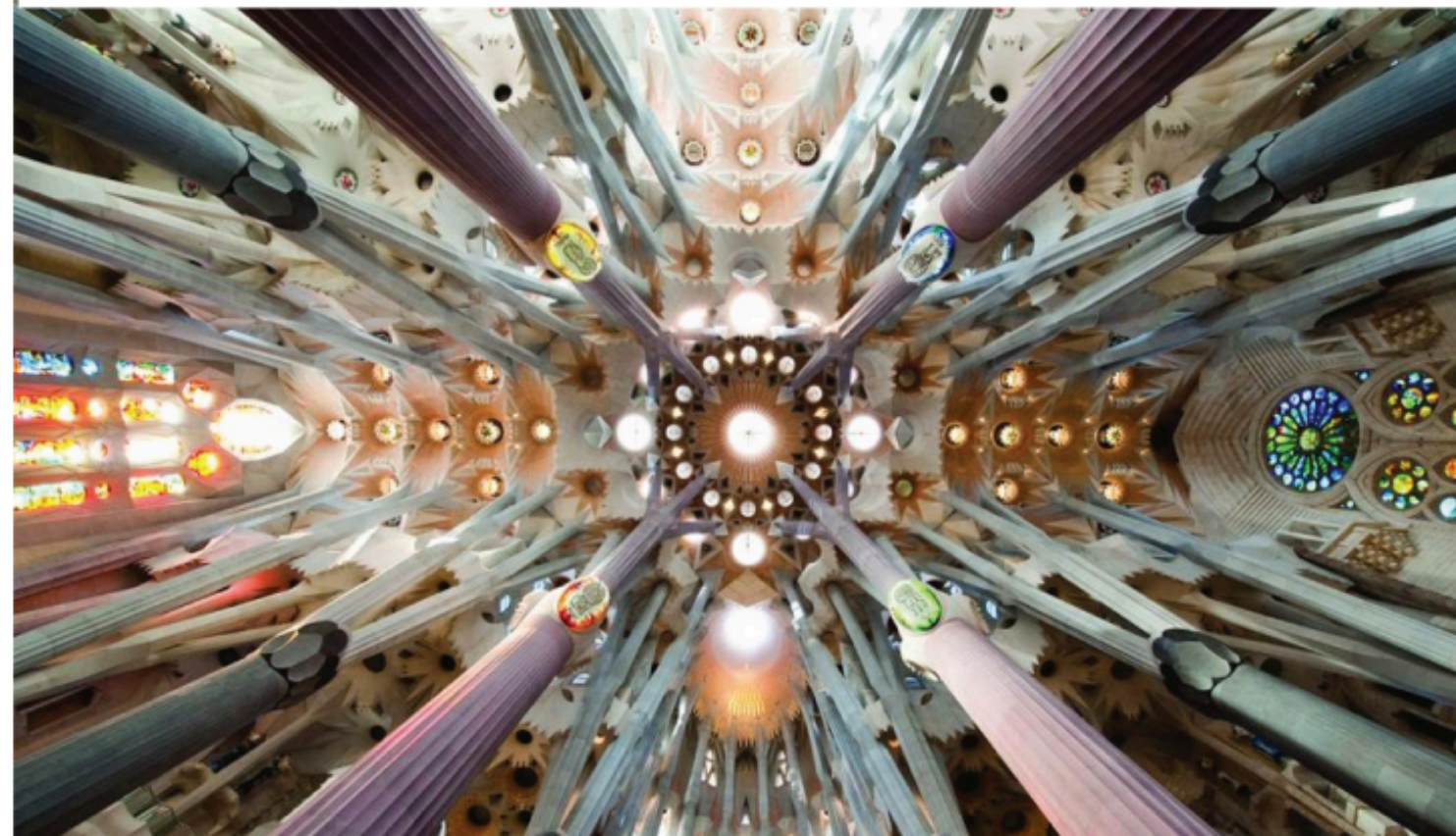
A compreensão da relação entre adaptabilidade e arquitetura parte da análise da interação humana com o ambiente, destacando o conceito de lugar e a essência do habitar. Norberg-Schulz (1976) enfatiza que um lugar não é apenas abstrato, sendo uma atmosfera caracterizada por elementos concretos como materiais, forma e cor. Heidegger (1951) define habitar como a maneira como os humanos existem na Terra, ressaltando que prover moradia é o objetivo dos edifícios, embora nem todos sejam moradias.

De maneira menos retórica, outros arquitetos do século XX buscaram abordar a inspiração na Natureza de forma mais direta. Inspirados pelo movimento expressionista, alguns arquitetos como Eric Mendelsohn, Hans Scharoun e Hugo Haring buscaram maneiras de relacionar diretamente os esboços conceituais de formas livres com desenhos funcionais de projeto (Szalabaj, 2005). Um exemplo de arquitetura expressionista que concretizou o desenho de formas fluidas é a Einstein Tower, projeto de Eric

Mendelsohn na cidade de Potsdam (Figura 14). Este projeto pode ser entendido como um marco estilístico de Meselson quanto ao uso da forma dinâmica dentro dos limites funcionais. Inspirado pela teoria da relatividade de Einstein, Mendelsohn buscou gerar a forma arquitetônica do edifício através da expressão da energia latente dentro da massa, relacionando tal teoria à resistência de esforços físicos à tração do aço e o poder de compressão do concreto armado (James, 1994).

De maneira menos visual, o arquiteto catalão Antoni Gaudí projetou os primeiros e melhores exemplos de suportes estruturais como estruturas ramificadas feitas de concreto e inspiradas na natureza no projeto da Sagrada Família a partir da análise de estruturas animais e vegetais (Yeler, 2015). Gaudí imaginou essa igreja como se fosse a estrutura de uma floresta, com um conjunto de troncos de árvores divididos em diferentes ramos para sustentar uma estrutura de abóbadas hiperbolóides entrelaçadas - figura 15 (Rian; Sassone, 2014).

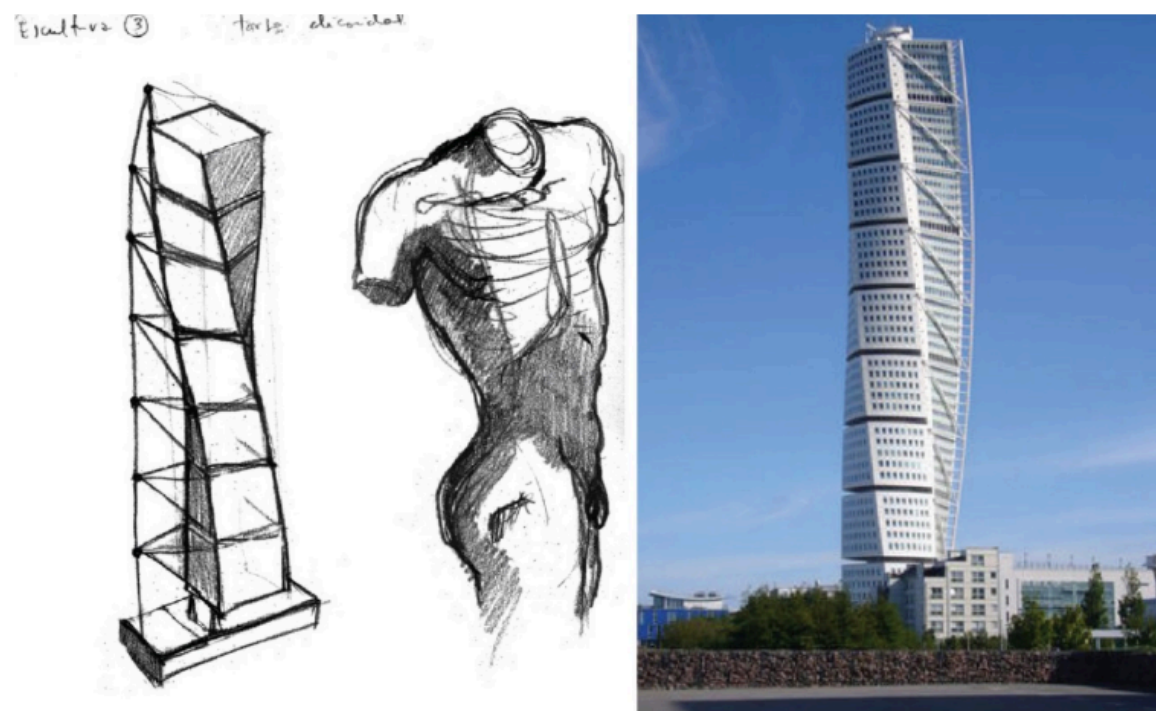
Figura 15 – Arranjo estrutural interno presente na Sagrada Família, de Gaudí



Fonte: (Rian; Sassone, 2014).

De modo semelhante a Gaudí, o trabalho de Santiago Calatrava se inspira nos sistemas de espinha dorsal e costelas, cuja função é fornecer apoio e proteção dos sistemas naturais, para conceber estruturas arquitetônicas e de pontes (Arslan; Sorguc, 2004), como o Turning Torso - figura 16. Dos arquitetos que se utilizaram da analogia a sistemas de esqueleto e colunas dorsais na concepção arquitetônica, Gaudí e Calatrava são os arquitetos mais notáveis (Yeler, 2015).

Figura 16 – À direita, croqui de desenvolvimento de projeto, relacionando a edificação ao movimento do tronco humano. À esquerda, fotografia do Turning Torso construído.



Fonte: (Yeler, 2015)

A crise do habitar, para Heidegger, não reside primariamente na falta de habitações, mas na necessidade constante dos mortais de buscar a essência do habitar e aprender a habitar novamente. Habitar é um traço essencial do ser humano, considerado uma das espécies mais adaptáveis da natureza (Moran, 2008). Nesse contexto, a arquitetura deve permitir a continuidade dessa adaptabilidade de maneira rápida e efetiva. Edifícios adaptáveis reduzem a necessidade de novas construções e facilitam transformações ao longo do tempo. Adaptabilidade implica ajustar-se a novos usos e condições, relacionando-se com mudanças sociais, tecnológicas e ambientais. Schmidt III e Austin (2016) identificam quatro características essenciais para edifícios

adaptáveis: resposta física ou passiva, adequação às demandas dos usuários, equilíbrio entre valor e custo, e capacidade de acompanhar mudanças temporais.

Nesse contexto, torna-se essencial priorizar aspectos como o design adaptável na era da sustentabilidade, enfatizando a importância da flexibilidade e contribuindo para os debates sobre o uso adaptativo de edifícios e espaços urbanos. Destacar as dinâmicas entre o efêmero, o permanente e o adaptável emerge como um elemento crucial para compreender e abordar eficazmente os desafios contemporâneos na arquitetura e no planejamento urbano.

### 2.2.3. Biomimetismo: integração entre natureza e o design

A emulação das funções biológicas é uma prática tão antiga quanto a própria trajetória humana, revelando-se como um impulso constante de aproximação entre natureza e técnica (Bertling, 2014 *apud* Barthlott; Rafiqpoor; Erdelen, 2016). Arquitetos e mestres construtores, desde muito antes da formalização dos conceitos de *Bioinspired Design* e Biomimética (Knippers; Speck, 2012), recorreram à natureza como matriz de soluções, não apenas pela sua estética, mas principalmente por sua funcionalidade intrínseca e eficiência comprovada ao longo de milênios de evolução.

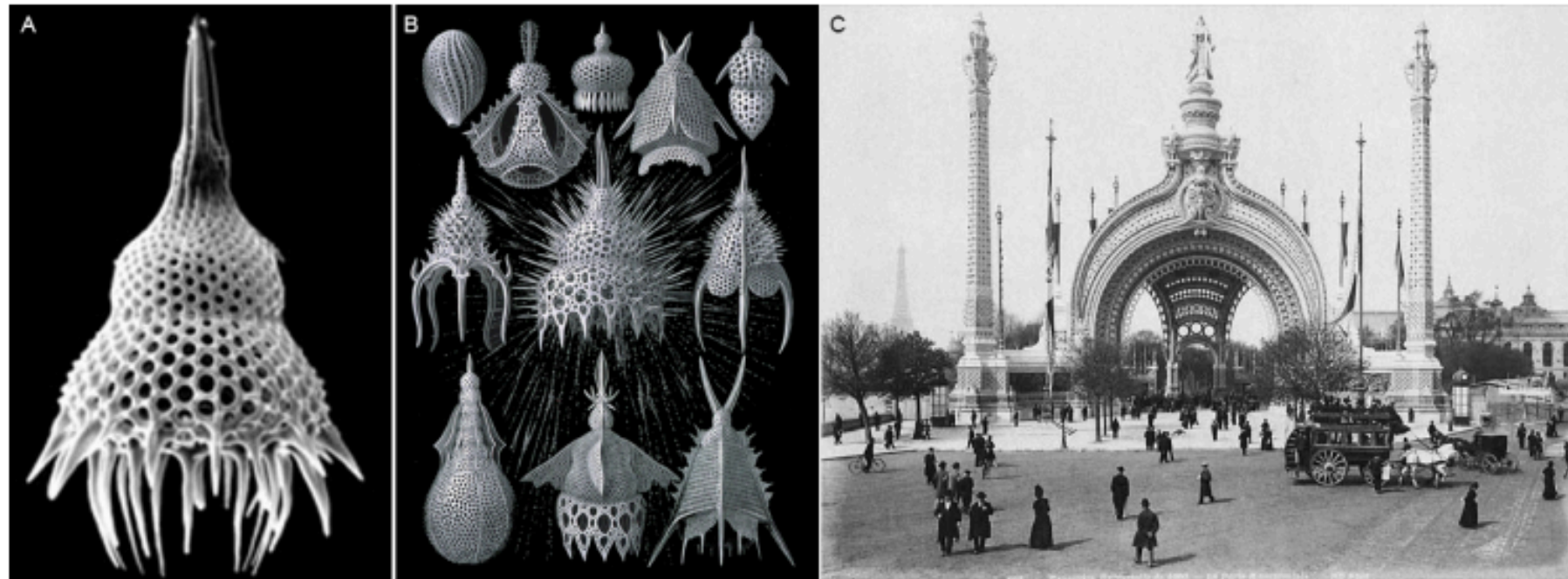
As primeiras tentativas de transposição dessas estratégias naturais para o campo técnico, como as máquinas voadoras de Leonardo da Vinci, evidenciam o fascínio humano por sistemas naturais, embora nem sempre resultam em sucesso imediato (Sisreg, 1969). Contudo, o fracasso não se deveu à ausência de valor na inspiração, mas às limitações tecnológicas de sua época. Hoje, com o suporte de ferramentas computacionais avançadas, essa mesma inspiração é retomada com maior rigor metodológico, permitindo a elaboração de sistemas arquitetônicos integrados e altamente performativos (Sharif, 2010).

Nesse contexto, a biomimética transcende a mera imitação superficial da natureza e se consolida como uma estratégia projetual robusta, que busca compreender e traduzir a inteligência evolutiva dos sistemas biológicos em soluções arquitetônicas. Janine Benyus (1997) destaca que os organismos vivos são mestres em operar com máxima eficiência e mínima energia, um paradigma indispensável frente aos desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade, à escassez de recursos e à crise ambiental. Assim, a biomimética propõe não apenas novas formas, mas sobretudo novos modos de pensar e construir.

Historicamente, o edifício de entrada da Exposição Universal de 1900, em Paris, projetado por René Binet - figura 17, representa um marco inicial na aplicação consciente da natureza ao design arquitetônico, ao se inspirar nas formas dos radiolários desenhadas por Ernst Haeckel - figura 18. Este último, com sua obra *Kunstformen der Natur* (1899-1904), não apenas desvendou a beleza oculta de estruturas microscópicas, como também influenciou profundamente o imaginário arquitetônico e artístico da época. Essa interação evidencia como o campo da arquitetura bioinspirada sempre esteve vinculado ao avanço das ciências

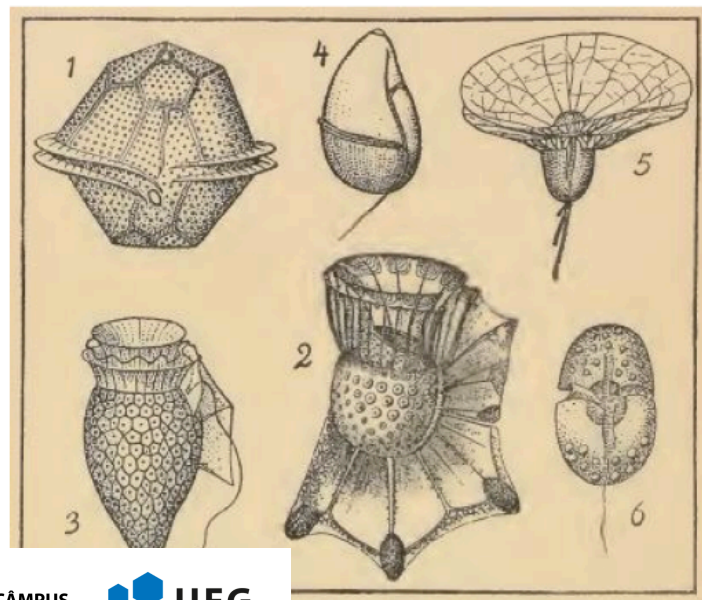
naturais e à compreensão das estruturas leves, eficientes e resilientes observadas na biologia (Grun *et al.*, 2016).

Figura 17 – (A) Fotografia de radiolário; (B) Uma das pranchas de desenho de radiolários por Ernst Haeckel, preparadas em negativo pelo diretor e artista David Lebrun; (C) Edifício de entrada da Exposição Mundial de 1900, em Paris, por René Binet.



Fonte: (A) (Bjørklund; goll, 2018) (b) Night fire films (2018) (c) Bnf (2018)

Figura 18 – Ilustração em *Plants As inventores* (1923), de Raoul Francé, sobre as existências de modelos naturais de turbinas de vapor presentes em algas microscópicas.



Fonte: (Loveridge, 2011)

Portanto, propõe uma ruptura paradigmática: ao invés de impor formas artificiais sobre o ambiente, passa-se a buscar a harmonia entre construção e ecossistema, aprendendo com os princípios naturais de adaptação, cooperação e eficiência. Como defendem Vincent *et al.* (2006), a natureza pode ser decomposta em funções e princípios replicáveis tecnicamente, constituindo uma verdadeira gramática funcional que enriquece o repertório formal tradicional. Autores como Zari (2007) e Pawlyn (2011) reforçam que a força transformadora da biomimética reside justamente em sua capacidade de integrar processos regenerativos e simbioses ecológicas aos sistemas construídos,

promovendo uma arquitetura não apenas sustentável, mas também regenerativa.

Nesse processo de tradução, a analogia emerge como ferramenta metodológica central. A teoria da Syntectics de William Gordon (1965) identifica quatro tipos de analogia — direta, pessoal, simbólica e fantástica — que oferecem ao arquiteto meios diversos de apropriação dos princípios naturais. Mais do que replicar formas, trata-se de interpretar e reinventar funções biológicas, de modo a gerar soluções criativas e inovadoras. Essa abordagem amplia a liberdade criativa e potencializa a busca por respostas mais integradas e eficazes frente às demandas técnicas e ambientais.

Diversos arquitetos e engenheiros exemplificam essa prática em suas obras. Buckminster Fuller, ao desenvolver as estruturas geodésicas, soube captar a eficiência dos padrões naturais de resistência e distribuição de carga; Frei Otto explorou as superfícies mínimas e tensões naturais em estruturas leves e econômicas; Heinz Isler e Pier Luigi Nervi investigaram geometrias inspiradas em conchas e esqueletos, conciliando estética e resistência. Santiago Calatrava, por sua vez, combina expressividade formal e eficiência estrutural, sempre dialogando com referências biomiméticas.

Mais do que uma estética ou uma técnica, a biomimética configura-se como um compromisso ético e filosófico. Como defendem Baumeister (2012) e Braungart & McDonough (2002), projetar como a natureza significa incorporar princípios de circularidade, regeneração e integração aos fluxos de energia e matéria, desafiando modelos tradicionais baseados na exploração linear de recursos. Assim, a biomimética exige repensar não apenas o desenho e a materialidade, mas também os processos

produtivos, os ciclos de vida dos edifícios e a relação entre o ambiente construído e os ecossistemas.

Como salientam Varshabi *et al.* (2022), ao aprendermos com os processos naturais de adaptação, autorregulação e cooperação, arquitetos e engenheiros podem conceber sistemas mais resilientes, eficientes e poéticos — não como simples cópias da natureza, mas como manifestações conscientes de uma profunda sintonia com ela.

#### 2.2.4. Padrões da natureza

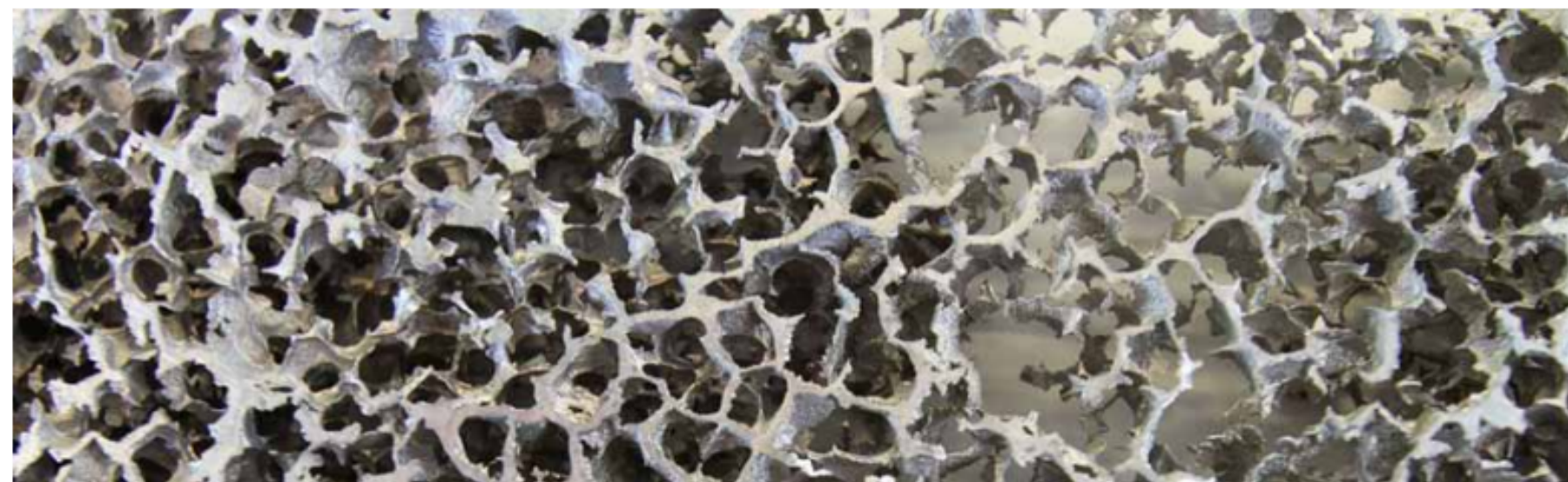
Compreender as analogias com a natureza exige não apenas a identificação de formas biológicas e estruturas funcionais, mas também o reconhecimento dos padrões recorrentes que organizam e estruturam o mundo natural. Esses padrões, que se manifestam tanto em organismos vivos quanto em sistemas inorgânicos, revelam uma geometria subjacente que articula princípios fundamentais como simetria, modulação, escala, proporção e crescimento.

No século XXI, o espaço arquitetônico passou a ser visto também como uma dimensão virtual (Picon, 2003). Após o funcionalismo tecnológico e o Pós-Modernismo, a estética contemporânea voltou-se para o movimento e o fluxo. Assim, muitos arquitetos passaram a projetar espaços fluidos inspirados na natureza (Knippers; Speck, 2012; Mazzoleni, 2013), retomando a morfologia natural como um tema central.

Um exemplo é o projeto *Aluminium Foam* - figura 19, do LAPA da *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, que, em parceria com pesquisadores de materiais, desenvolveu uma espuma de alumínio com porosidade controlada

parametricamente, semelhante às estruturas ósseas descritas por Thompson (Loveridge, 2011). Este experimento aproxima-se da treliça Warren mencionada por Steadman, mostrando como, hoje, o projeto computacional permite uma analogia mais precisa e integrada, incorporando propriedades materiais desde a concepção e potencializando o desempenho estrutural.

Figura 19– *Aluminium Foam*, do LAPA EPFL, cuja variação das células de alumínio foi controlada de formaparamétrica.



Fonte: (Loveridge, 2011)

A base construtiva da natureza viva está ancorada em um sistema modular comum: a célula. - figura 20. Desde organismos unicelulares até seres humanos, todos compartilham essa matriz construtiva elementar. Essa modularidade biológica ecoa princípios que há muito tempo informam o pensamento geométrico humano, como nas formas tradicionais e espaciais — elipses, triângulos, hexágonos, esferas, cones, cilindros, entre outros — muitas das quais foram sistematizadas pela geometria grega, que, não por acaso, tem como etimologia o termo “medir a terra” (geo + metria).

Figura 20 – Exemplos de modulação na natureza



Fonte: Elaborado pelo autor, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN. (2025)

Um dos padrões mais emblemáticos da natureza são as espirais - figura 21, que ilustram o princípio do crescimento orgânico. A espiral logarítmica (ou equiangular), associada à espiral dourada, representa um crescimento exponencial que se mantém proporcional em cada incremento. Essa estrutura aparece desde o formato das galáxias até o desenvolvimento de embriões, conchas, plantas, ciclones e até no DNA humano. Segundo Hemenway (2010), sua recorrência é tão ampla que pode ser considerada uma “lei da natureza”.

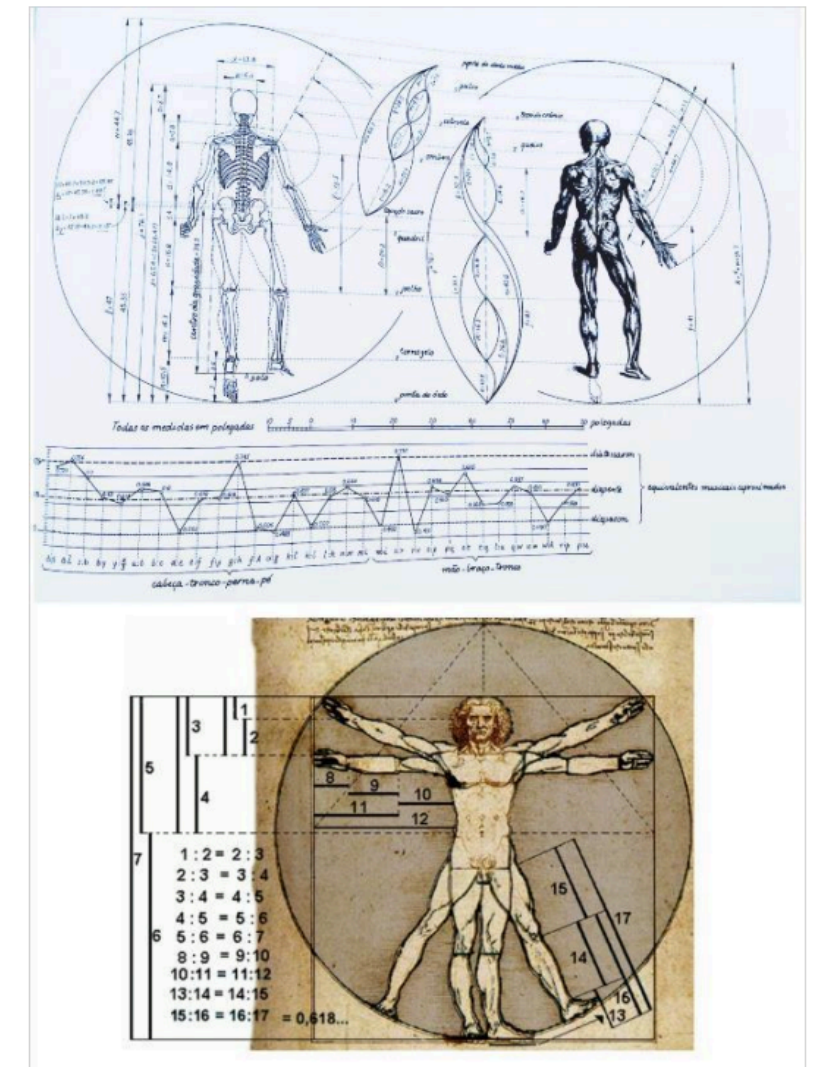
Figura 21 – Exemplos de identificação dos números de Fibonacci



Fonte: Elaborado pelo autor, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN. (2025).

A sequência de Fibonacci - figura 21, introduzida por Leonardo de Pisa, gera uma espiral natural cujo crescimento obedece à razão  $\phi$ . Observada na distribuição de folhas, sementes, pétalas, furacões e braços de galáxias, essa sequência revela a íntima relação entre ordem matemática e formas naturais.

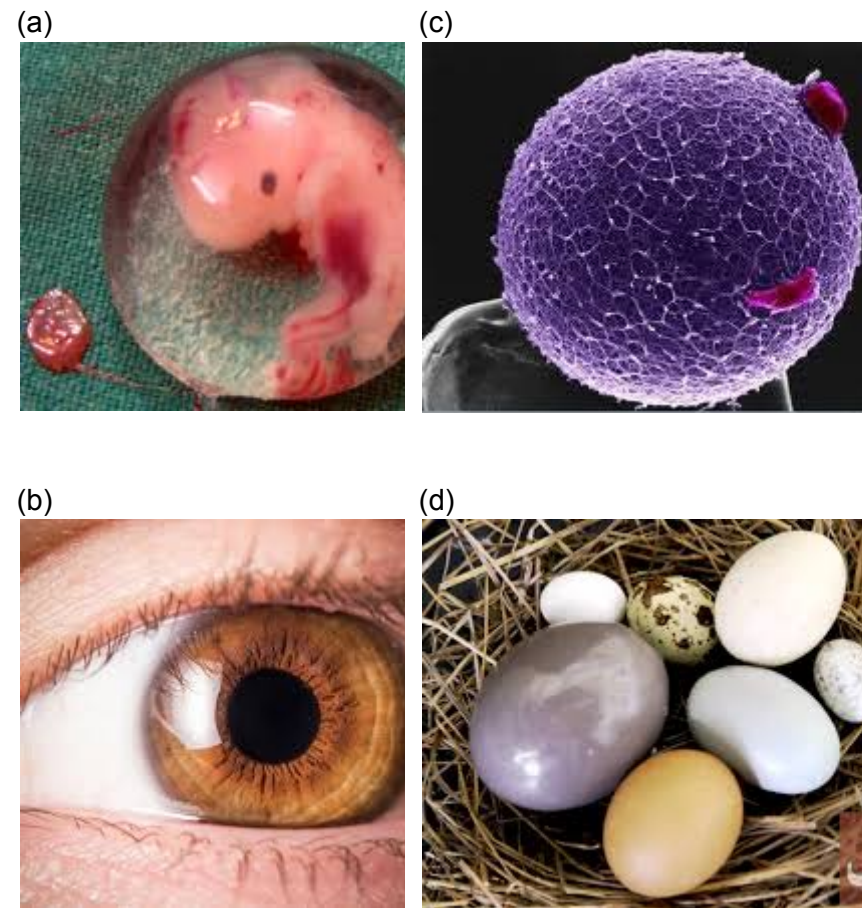
Figura 22 – Exemplos da proporção áurea no Homem, detalhe para o Homem de Vitruvius de DaVinci.



Fonte: Doczi (1990)[

Entre os padrões mais recorrentes, destacam-se as esferas, previstas em diversos tipos de exemplos, como destacado na figura 23.

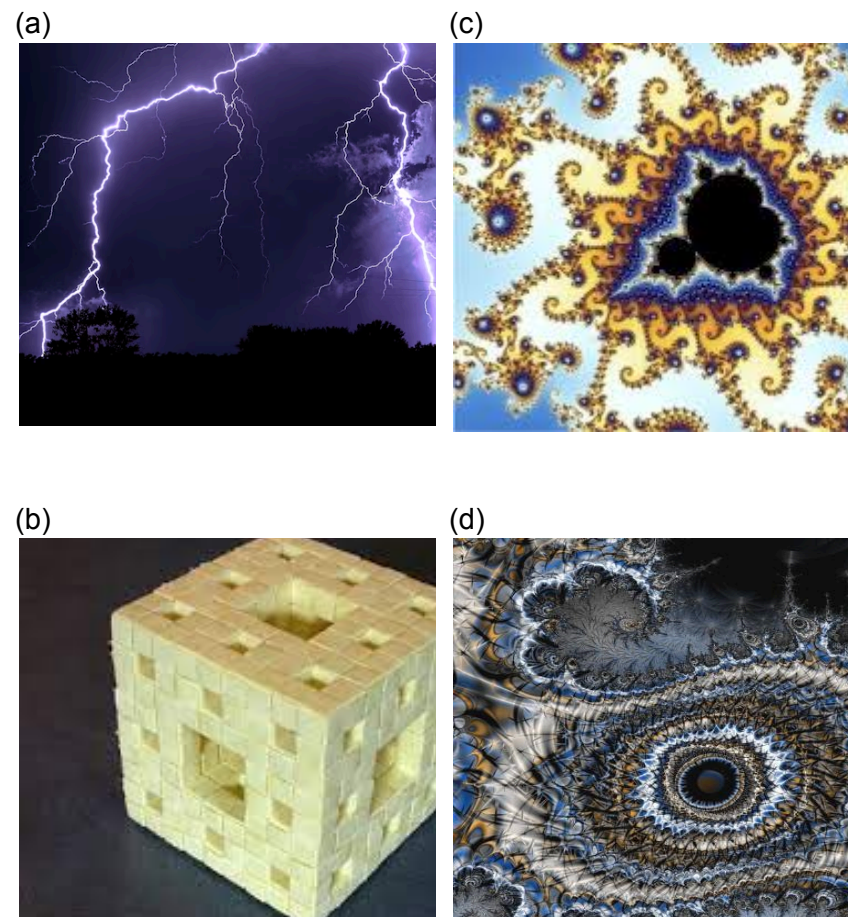
Figura 23 – Exemplos de esferas na natureza



Fonte: Elaborado pelo autor, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN. (2025).

Os fractais, por sua vez, introduzidos por Mandelbrot (1975), representam uma geometria de auto-semelhança e complexidade infinita. Presentes em árvores, sistemas vasculares, montanhas e estruturas cerebrais, rompem com a regularidade euclidiana e expressam padrões que se repetem em múltiplas escalas - figura 24.

Figura 24 – Exemplos de fractais na natureza: a. Raio caindo, b. Esponja de Menger, c. Conjunto de Mandelbrot, d. Gerado em software



Fonte: (A) Freepik (2025); (B) I-Asc (2025); (C) Microservos (2025); (D) Geier (2025).

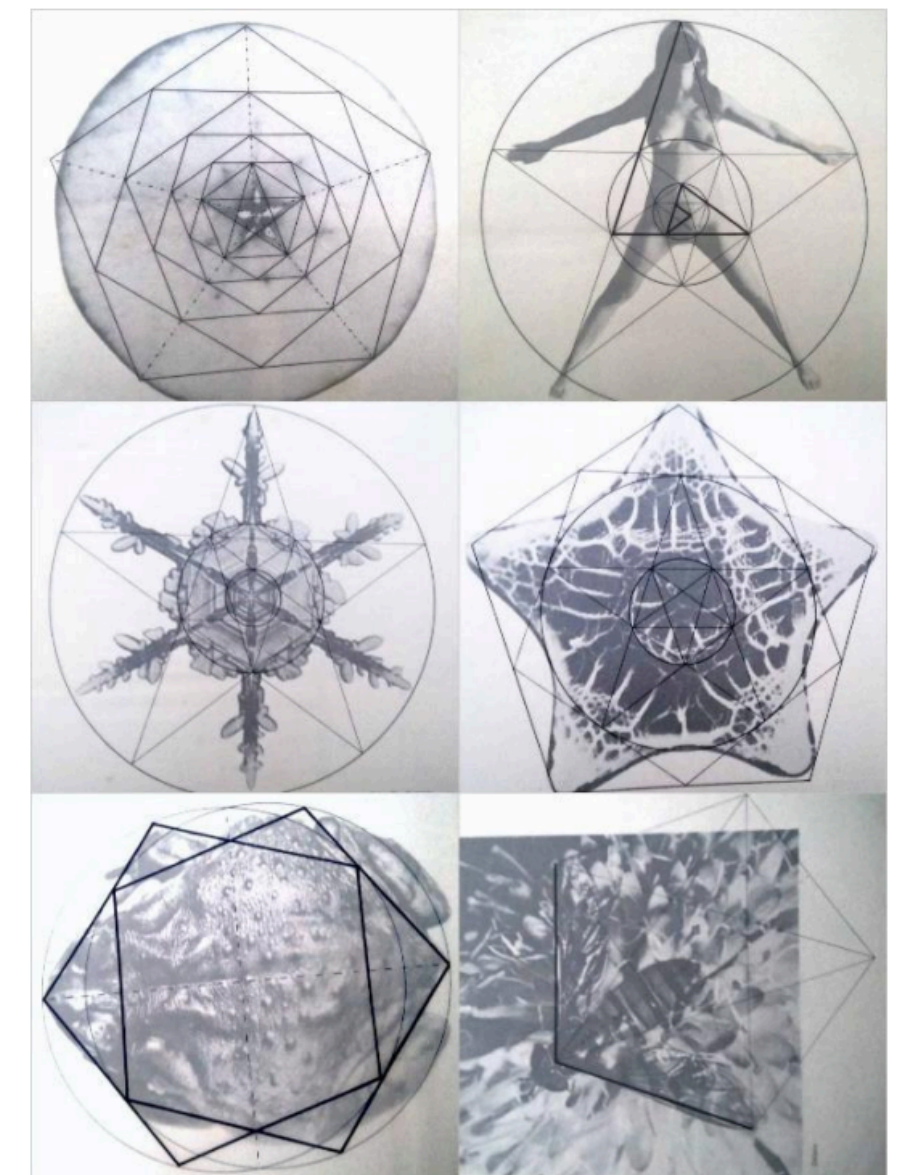
Essa relatividade escalar — onde uma célula pode ser vista como micro ou macro estrutura, dependendo do referencial — reforça a noção de equilíbrio sistêmico. Ghyka (1977) distingue os mundos inorgânico e orgânico pelas geometrias que favorecem: o primeiro tende a simetrias ortogonais (cubos, octaedros), enquanto o segundo privilegia formas pentagonais, vinculadas à Proporção Áurea e à sequência de Fibonacci.

D’Arcy Thompson (1961) propõe que as formas dos organismos são diagramas das forças internas e externas que os moldam. Alterações nessas forças transformam radicalmente suas

morfologias — como o achatamento de corpos sob maior gravidade, ou sua rigidez em ambientes de gravidade reduzida.

A Proporção Áurea ( $\phi \approx 1,618$ ), formalizada por Euclides e aplicada por Fídias e Da Vinci - figura 25, está presente na arte, na natureza e no corpo humano. Suas formas derivadas — retângulos, triângulos, ângulos e espirais áureas — são vistas em flores, conchas, pirâmides e galáxias.

Figura 25 – Estudos das relações entre o pentágono, o pentagrama e a proporção áurea e a natureza. Em frutos, nos segmentos humanos, nos segmentos de animais.



Fonte: Montú (1980)

### 2.2.5. Visão holística

A biomimética, uma abordagem de projeto fundamentada na visão holística, reconhece que ao longo dos 3,85 bilhões de anos de evolução, as formas de vida desenvolveram soluções eficientes para sustentar a vida. Essa perspectiva destaca a interconexão entre os processos humanos e os sistemas naturais, alertando para os desequilíbrios resultantes da tentativa de dissociar-se desses sistemas. Não se limitando apenas a conceitos de melhoria, a biomimética traz consigo uma dimensão filosófica e ética, promovida por organizações como o Biomimicry Institute, fundado em 2006.

Em 2004, o *Biomimicry Institute* estabeleceu políticas visando aprimorar os processos de produção de maneira ecológica e sustentável. Essas políticas, conhecidas como "princípios da vida" e posteriormente atualizadas em 2011, buscam criar uma rede de comunicação e gerenciamento de dados para difundir ideias de preservação e otimização. Dentre esses princípios, destacam-se: evoluir para sobreviver, implementando estratégias de gerenciamento; ser eficiente, reduzindo o uso de energia e criando ciclos de recursos; adaptar-se a mudanças, facilitando a resposta a eventos adversos; integrar conhecimento e crescimento, permitindo a evolução gradativa; ser atento e responsivo às questões locais, promovendo cooperação e mutualismo; e usar química amigável à vida, economizando recursos e preferindo produtos não agressivos ao meio ambiente e indivíduos. Esses princípios refletem uma abordagem ética e ecológica, destacando a importância de uma interação sustentável com o ambiente natural.

### 2.3. O PROCESSO DE PROJETO COMO MORFOGÊNESE

No campo da arquitetura contemporânea, o conceito de morfogênese tem sido adotado como metáfora e método para compreender o projeto como um processo de formação orgânica, análogo aos sistemas naturais. Originalmente utilizado nas ciências biológicas para designar os processos que originam e transformam as formas dos organismos, esse termo passa a ser incorporado à arquitetura por meio de analogias estruturais e funcionais com a natureza. Nesse contexto, o projeto deixa de ser concebido como um ato puramente formal e passa a se configurar como um sistema dinâmico e evolutivo, onde as formas arquitetônicas emergem a partir da interação entre forças materiais, ambientais, performativas e computacionais (Ahmed, 2015 *apud* Myers, 2012).

Segundo Manuel DeLanda (2010), ao adotar a morfogênese como método projetual, a arquitetura passa a operar por meio da emergência de formas em sistemas complexos, nos quais a forma resulta de processos internos auto-organizados. Para o autor, o design deixa de ser um exercício de imposição externa para se tornar uma condição emergente, na qual a forma é produzida por meio de interações locais, variações contínuas e retroalimentações adaptativas.

Essa lógica também é abordada por Stanislav Roudavski (2009, p.351), que compreende a morfogênese como um paradigma projetual no qual a forma arquitetônica é gerada por meios computacionais que simulam o comportamento de sistemas vivos. A arquitetura, assim, se aproxima da lógica do crescimento biológico, entendendo o projeto como um organismo que evolui em relação às condições de seu meio.

Por esse motivo, o processo de projeto como morfogênese exige uma mudança epistemológica, que desloca o papel do

arquiteto de criador formal para condutor de processos. O autor não "desenha a forma", mas programa o ambiente para que a forma emergja, como observa Oxman (2015) ao discutir a transição do design representacional para o design performativo e generativo (Oxman *et al.*, 2015; Roudavski, 2009). Com isso, o pensamento projetual passa a articular-se com disciplinas como a biologia, a matemática, a ecologia e a ciência dos materiais, produzindo uma arquitetura que imita não apenas as formas da natureza, mas seus modos de funcionamento (Helms; Vattam; Goel, 2014).

#### 2.3.1. Morfogênese

O conceito de morfogênese, oriundo da biologia, refere-se ao processo pelo qual os organismos vivos desenvolvem suas formas a partir de interações dinâmicas entre fatores genéticos, ambientais e estruturais. Na arquitetura, essa ideia foi apropriada como um paradigma que privilegia a formação da forma a partir de sistemas vivos e adaptativos, em oposição à imposição de modelos formais prévios. A morfogênese não trata apenas da aparência das formas, mas do modo como elas emergem de forças que as constituem — tal como propõe D'Arcy Thompson (1992), que em *On Growth and Form* demonstrou como padrões e geometrias biológicas são moldados por tensões, pressões e fluxos de energia, revelando uma lógica formal profundamente ligada à física da natureza.

Autores como Frei Otto e Buckminster Fuller anteciparam essas relações entre forma e força na arquitetura, por meio da investigação de estruturas naturais e de sistemas construtivos eficientes e otimizados. Otto (1995), ao estudar superfícies mínimas e estruturas tensionadas inspiradas em membranas

naturais, demonstra que a forma arquitetônica pode emergir como resposta direta às leis físicas que regem a matéria. De modo semelhante, Fuller (1981), com seus domos geodésicos e o conceito de “*tension integrity*” (ou tensegridade), propôs sistemas estruturais onde a forma resulta da distribuição equilibrada de forças internas, desafiando os paradigmas tradicionais de rigidez e massa.

Nesse contexto, a morfogênese se revela como uma abordagem sistêmica e integradora, na qual forma, função, materialidade e ambiente não são elementos separados, mas partes de um mesmo processo dinâmico. Michael Weinstock (2010) reforça essa visão ao afirmar que os edifícios devem ser pensados como organismos, cujas formas derivam de pressões contextuais e necessidades internas, operando em constante interação com o meio. Além disso, o arquiteto Santiago Calatrava apresenta uma leitura poética e estrutural da morfogênese, ao se inspirar em esqueletos, músculos e formas orgânicas para conceber obras como a Estação do TGV em Lyon e o Museu de Artes e Ciências em Valência. Em sua obra, a articulação entre forma, estrutura e movimento se torna um processo contínuo de analogia com a anatomia, revelando que a morfogênese pode ser também uma linguagem expressiva, não apenas funcional.

Nesse mesmo horizonte conceitual, Zari (2007) destaca que a arquitetura pode aprender com os padrões evolutivos da natureza, em especial com os sistemas resilientes, autossuficientes e regenerativos encontrados em ecossistemas maduros. Ele argumenta que a morfogênese, aplicada ao design, permite uma reconfiguração profunda dos processos de projeto, orientando-os por princípios ecológicos como a adaptação, a diversidade funcional e o fechamento de ciclos metabólicos.

A contribuição de Branko Brajovic também é significativa nesse campo, ao desenvolver uma abordagem morfogenética sensível às questões ambientais e sociais da América Latina, propondo uma arquitetura que não apenas simula a natureza, mas coevolui com ela. Brajovic compreende a morfogênese como um processo de translação sensível entre sistemas naturais e artifícios arquitetônicos, articulando analogias que respeitam tanto o contexto local quanto os princípios de eficiência ecológica.

DeLanda (2002) e Hensel *et al.* (2004) aprofundam a ideia de que a morfogênese é um fenômeno emergente, que deve ser compreendido em termos de diferenciação contínua e performatividade, e não como repetição de formas ideais. Para eles, a forma não é uma instância fixa, mas uma fase transitória de um processo em fluxo, sempre condicionado por dados materiais, energéticos e ambientais.

Portanto, pensar através da morfogênese é pensar em processos: em formas que não são projetadas, mas cultivadas; em sistemas que não apenas representam a natureza, mas se comportam como ela. Trata-se de uma ética projetual que desloca o foco do produto para o processo, da forma estática para a forma viva, inserindo a arquitetura em uma perspectiva ecológica, evolutiva e profundamente relacional.

### 2.3.2. A morfogênese na arquitetura: processo computacional

O interesse pela natureza como fonte de analogias projetuais na arquitetura surgiu, ainda que de forma incipiente, no século XIX (Steadman, 2008), ganhando relevância no século XX com arquitetos como Frank Lloyd Wright e Alvar Aalto, que

buscaram integrar espaços internos e externos, utilizar materiais naturais e expressar a estrutura como parte do ambiente construído (Ahmed, 2015 *apud* Myers, 2012). Esse diálogo entre arquitetura e biologia impulsionou o conceito de morfogênese, entendido como o processo de formação estrutural de organismos ou de suas partes, conforme define Marques (2015), sendo regulado por mecanismos complexos como a expressão gênica diferencial e a organização espacial celular.

Inspirada nesses princípios, a morfogênese arquitetônica evoluiu de meras analogias visuais superficiais (Steadman, 2008) para um campo conceitual mais profundo e sistemático. Bonner (1964 *apud* Steadman, 2008) já apontava o potencial das analogias biológicas como fonte fértil para novas ideias, desde que conduzidas com rigor. A aproximação entre arquitetura e biologia revela que ambas compartilham elementos como atuação em contextos específicos e o uso de processos computacionais, ainda que possuam epistemologias distintas (Roudavski, 2009). Tais intersecções, apesar das diferenças, oferecem terreno fértil para a inovação projetual, particularmente em direção a práticas sustentáveis e ecológicas (Helms; Vattam; Goel, 2014; Oxman *et al.*, 2015; Benyus, 1997; Klein, 2009).

A incorporação da computação nesse processo resultou no que Roudavski (2009, p.348) denomina morfogênese computacional, um paradigma no qual ferramentas digitais deixam de ser meros instrumentos de representação e passam a atuar como mediadores ativos na geração de formas arquitetônicas. Para Hensel e Menges, essa abordagem permite desenvolver projetos mais responsivos, adaptáveis e integrados ao ambiente, superando os modelos modernistas padronizados. Roudavski (2009, p.351) destaca que a computação oferece um ambiente de

experimentação segura e uma exploração aberta de resultados, sem necessidade de reduzir a complexidade do projeto.

Este novo paradigma ganha força com o avanço das tecnologias digitais na segunda metade do século XX. As contribuições de Thompson, Turing e outros no campo da biologia foram fundamentais para o desenvolvimento da morfogênese digital na arquitetura — uma abordagem que se utiliza de softwares e hardwares para criar formas arquitetônicas por meio de processos algorítmicos e generativos. Segundo Kolarevic (2003), a mídia digital na arquitetura contemporânea não apenas representa, mas gera formas por meio de processos computacionais dinâmicos.

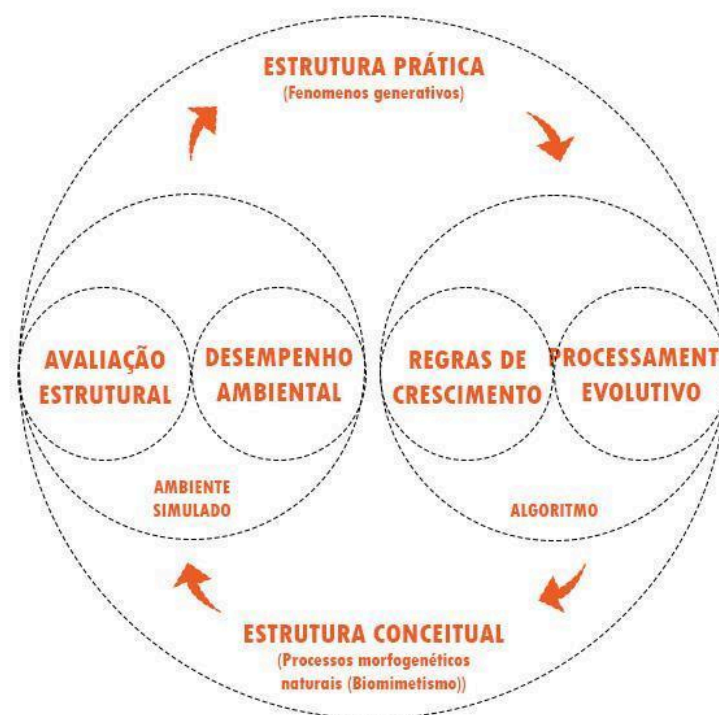
Essa mudança epistemológica transforma a prática arquitetônica ao permitir a integração simultânea entre forma, material e desempenho desde o início do processo projetual. Enquanto os métodos tradicionais seguem uma hierarquia que prioriza a forma em detrimento da materialização (Menges, 2008; Oxman, 2010), a morfogênese digital promove uma simbiose entre formação e fabricação. Segundo Steele (2001), os computadores alteraram profundamente as questões filosóficas da arquitetura, introduzindo novos paradigmas e desafiando a estabilidade formal tradicional.

Nesse contexto, destaca-se a crítica de Roudavski (2009, p.365) à superficialidade do biomimetismo meramente estético — limitado à estética "orgânica" e "fluida" — e a defesa da bioinspiração como método projetual ancorado em simulações de crescimento natural e hierarquias biológicas. Como observa Roudavski (2009, p.361), a organização hierárquica da natureza, composta por membranas, células, tecidos e órgãos, pode ser

transposta ao campo arquitetônico para gerar formas mais complexas e performáticas.

A abordagem morfogenética aplicada à arquitetura tem sido explorada por diversos autores. Rudge e Haseloff (2005), por exemplo, associam a formação espacial à estrutura celular, propondo paradigmas estéticos e conceituais baseados em formas biológicas. Menges (2008), coordenador do *Institute for Computational Design and Construction* (ICD), desenvolve processos integrados de projeto e fabricação que articulam engenharia biomimética, fabricação digital e design generativo, sendo um dos principais expoentes, ao lado de Hensel e Weinstock, no desenvolvimento do que se convencionou chamar de projeto morfogenético - figura 26.

Figura 26 – Estrutura prática de projeto morfogenético computacional formulada por Achim Menges.(2010)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de (Hensel, 2007)

A arquitetura digital, como enfatiza Kolarevic (2003), substitui o estável pelo variável, a singularidade pela multiplicidade, rompendo com as geometrias euclidianas predominantes na história da disciplina. Nessa nova lógica, a arquitetura interativa adota sistemas não lineares, multidimensionais e multifuncionais, dando lugar a novas possibilidades formais, construtivas e sensoriais. Assim, a morfogênese digital representa não apenas uma revolução estética ou tecnológica, mas sobretudo uma transformação ética e epistemológica no modo como concebemos, projetamos e construímos, em ressonância com os princípios da natureza e da sustentabilidade.

### 2.3.3. A interface de programação visual e a fabricação digital à serviço da morfogênese

Rattes (2015) observa que, no ambiente do Grasshopper, as entidades são encapsuladas em componentes — ou módulos — que carregam uma programação orientada a um resultado específico. Esses componentes são apresentados visualmente como cápsulas, cujas configurações são resumidas em entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*). As conexões entre diferentes componentes se estabelecem por meio dessas entidades, que interligam módulos e definem o fluxo dos dados. A presença de inúmeros parâmetros de programação, essenciais para o funcionamento do sistema, assegura que cada componente opere de maneira previsível, conforme o comando executado — como, por exemplo, os comandos *Fillet*, *Explode* ou *Point*.

Na fabricação digital, empregam-se ferramentas controladas numericamente por computador (CNC) para fabricar

ou prototipar objetos, peças e sistemas. Em contextos acadêmicos, quando essas ferramentas são utilizadas na fase de prototipagem, fala-se em prototipagem rápida (*rapid prototyping*); já quando aplicadas à fabricação propriamente dita, o termo mais adequado é manufatura rápida (*rapid manufacturing*) (Queiroz, 2015).

Essa técnica permite cortar e construir peças com níveis de complexidade que dificilmente poderiam ser alcançados por métodos manuais. Com o passar do tempo, as máquinas CNC se diversificaram: hoje, é possível cortar materiais com jato de água, fresas, laser, e também imprimir objetos tridimensionais por meio das chamadas impressoras 3D. A popularização dessas tecnologias tem democratizado o acesso a processos de fabricação sofisticados, inclusive em formatos domésticos, possibilitando o que se convencionou chamar de “fabricação pessoal”. Essa democratização tem favorecido, inclusive, a prototipagem de estudos voltados à criação de artefatos biomiméticos (Queiroz, 2015).

Na pesquisa realizada por Queiroz (2015), o Grasshopper foi utilizado para configurar modelos posteriormente impressos em 3D, servindo como moldes para a fabricação de três blocos modulares denominados *Leaf Brick*. Esses blocos foram distribuídos de forma paramétrica, ajustando-se conforme a necessidade de sombreamento, o que possibilita sua aplicação em diferentes situações — como paredes divisórias, coberturas ou fachadas. Os materiais sugeridos para a aplicação foram fibra de coco e hidrogel, ambos dotados de propriedades naturais de termorregulação por meio da água e que permitem, ainda, o cultivo de vegetação simples, como musgos e trepadeiras.

#### 2.4. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO:

O presente capítulo desenvolveu uma fundamentação teórica abrangente sobre a utilização da morfogênese digital no contexto da arquitetura contemporânea, estruturada em dois eixos principais: a evolução do design computacional na arquitetura, o diálogo entre arquitetura e natureza. A qual soma de tais eixos se chega ao próprio delimitar do que seria a morfogênese, intervindo na implementação dos processos adaptativos e generativos através de algoritmos digitais.

Inicialmente, abordou-se a transição paradigmática da representação gráfica manual para a modelagem computacional. Essa mudança redefiniu a prática projetual do arquiteto, deslocando seu papel de criador formal para gestor de processos dinâmicos e adaptativos, permitindo maior integração entre concepção e desempenho desde as etapas iniciais do projeto.

Outro ponto significativo foi o exame crítico da adoção das ferramentas digitais na arquitetura, destacando tanto suas potencialidades quanto suas limitações. Embora o avanço tecnológico permite automatização, geração de formas complexas e simulações integradas, a literatura evidencia uma subutilização dessas capacidades, especialmente quando desvinculadas de critérios científicos e éticos rigorosos. Exemplos como o *Digital Grottesque I* ilustram uma tendência de “estética hostil”, frequentemente desconectada do contexto social e funcional, enquanto críticos como Gilles Retsin e Patrik Schumacher apresentam perspectivas divergentes sobre as implicações sociais e práticas do parametricismo e da automação.

Em seguida, discutiu-se a profunda conexão entre arquitetura e natureza, destacando como o biomimetismo e a bioinspiração fornecem uma base conceitual e prática para

enfrentar desafios ambientais e sociais. Mais que uma simples referência visual, a natureza oferece princípios testados evolutivamente, que, quando traduzidos para o campo arquitetônico, possibilitam soluções efetivamente sustentáveis, regenerativas e resilientes.

Finalmente, detalharam-se os conceitos e metodologias associados à morfogênese digital, ressaltando o papel fundamental dos algoritmos adaptativos e dos processos generativos. Em síntese trata-se de um campo que integra fenômenos generativos com processos morfogenéticos naturais, envolvendo simulações ambientais e avaliações estruturais detalhadas, além da criação de algoritmos que seguem regras específicas de crescimento e processamento evolutivo, permitindo explorar soluções arquitetônicas que emergem diretamente das condições contextuais e funcionais específicas.

Tal abordagem não só supera métodos tradicionais baseados em representações estáticas, mas também sugere um modelo arquitetônico mais inclusivo, adaptável e alinhado com necessidades sociais e ambientais reais. Dessa forma, toda a lógica trabalhada neste capítulo será fundamental para embasar os ensaios projetuais desenvolvidos nas próximas etapas desta pesquisa.



### 3. ESTUDO DE REPERTÓRIO

Os estudos apresentados neste capítulo foram selecionados do IAAC - *Institute for Advanced Architecture of Catalonia*, instituição reconhecida internacionalmente por promover pesquisas a partir de ferramentas complexas aplicadas à arquitetura, especialmente através de projetos experimentais desenvolvidos por estudantes e pesquisadores do mestrado em Arquitetura Avançada. Esses projetos destacam-se pelo uso intensivo de ferramentas digitais, processos paramétricos e métodos morfogenéticos, frequentemente integrando soluções que abordam simultaneamente questões estruturais, ambientais e sociais.

Dessa forma, a intenção é analisar criticamente essas obras, explorando as abordagens metodológicas, tecnológicas e conceituais empregadas pelos projetos escolhidos, destacando como cada exemplo contribui com insights relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Oferecendo uma base conceitual e prática robusta para fundamentar o processo projetual desenvolvido ao longo deste trabalho.

#### 3.1. CLIMATE CANOPY

O projeto *Climate Canopy*, parte de um diagnóstico espacial e urbano claro: qualificar a área da estação *Green Square*, em Sydney, por meio da criação de um espaço público coberto, com qualidades ambientais, simbólicas e funcionais - figura 27. A leitura do contexto revela uma superfície marcada pelos fluxos de entrada e saída da estação subterrânea. O projeto reconhece desde o início que a proposta não é apenas de um abrigo, mas de uma intervenção urbana performática — ao mesmo tempo um

marco, um conector de fluxos, um gerador de microclima e um catalisador social.

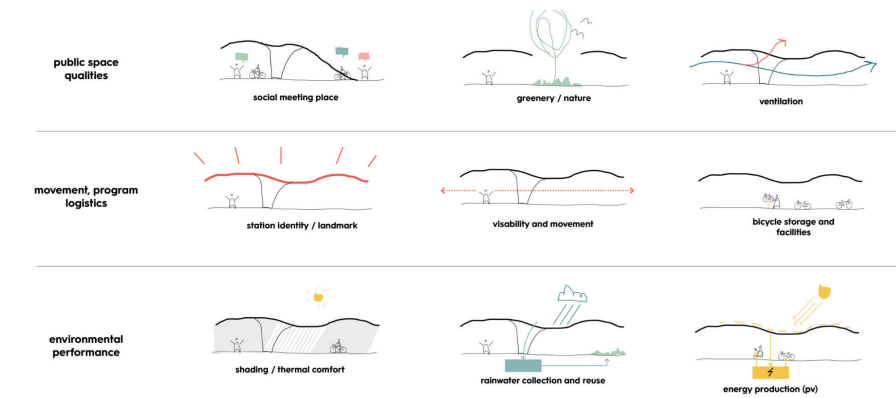
Figura 27 – *Climate Canopy* - Perspectiva renderizada



Fonte: (Institute For Advanced Architecture Of Catalonia, (2023)).

A partir da figura 28, é possível entender quais foram os pontos de partida, fundamentada em uma série de fatores técnicos e contextuais: Clima local sujeita a fortes chuvas e altas temperaturas; Necessidade de promover acessibilidade e conforto térmico; Presença de fluxos intensos de pedestres, com foco na orientação espacial e visibilidade; Integração com metas sustentáveis da cidade de Sydney, como incentivo ao uso de bicicletas e redução de CO<sub>2</sub>.

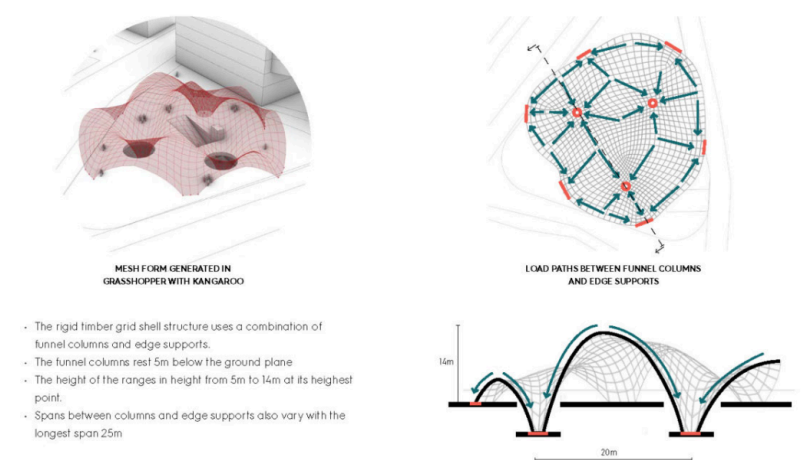
Figura 28 – *Climate Canopy* - Diagrama das diretrizes



Fonte: (Institute For Advanced Architecture Of Catalonia, 2023).

A tradução do diagnóstico em diretrizes projetuais é um dos méritos centrais do projeto. A equipe define com clareza o programa (bicicletário, café, áreas verdes e abrigo) e, a partir dele, delimita zonas prioritárias de circulação e áreas possíveis para inserção de estruturas. A leitura dos fluxos define não apenas a geometria da casca, mas também a localização dos apoios — revelando uma abordagem projetual informada por dados de uso real do espaço, sendo possível entender a partir da figura 29.

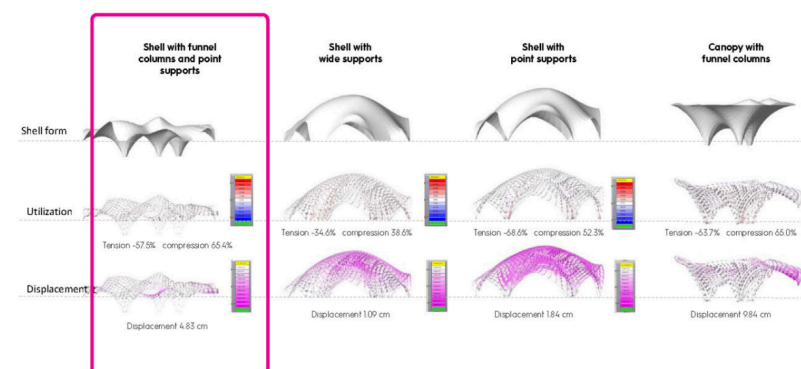
Figura 29 – *Climate Canopy* - Construção da malha



Fonte: (Institute For Advanced Architecture Of Catalonia, 2023).

A fase de concepção formal inicia-se com uma exploração sistemática de tipologias estruturais. Foram modeladas e avaliadas variações geométricas, como: conchas com suportes pontuais, colunas em funil e dorsais. Essa etapa foi fundamentada em simulações interativas no Grasshopper com o motor físico Kangaroo, permitindo testar morfológicas em resposta à gravidade e fluxos dinâmicos - figura 30. A escolha pela tipologia "concha com colunas de funil" não é arbitrária: resulta da sua capacidade de distribuir cargas de forma eficiente enquanto libera o solo para uso urbano.

Figura 30 – *Climate Canopy* - Sistema fluido com o *Kangaroo*.

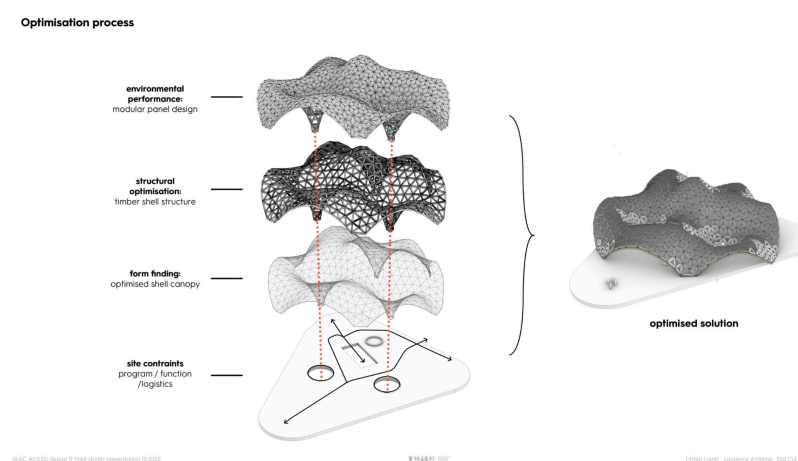


Fonte: *Institute For Advanced Architecture Of Catalonia* (2023).

Após a definição da morfologia-base, inicia-se uma fase robusta de análise estrutural integrada, utilizando o programa *Karamba3D*. Essa etapa envolveu: Testes com múltiplos padrões de malha (quadriculada, triangular, hexagonal); simulações de casos de carga (peso próprio, vento dominante e local); verificação de flambagem local e deslocamentos excessivos; Ajustes iterativos nas seções transversais dos elementos de madeira.

O padrão triangular foi selecionado por sua eficiência distributiva e menor uso de material. A escolha foi confirmada por análises de desempenho sob três cargas combinadas, com especial atenção à deformação, estabilidade e otimização de massa - processo visível na figura 31.

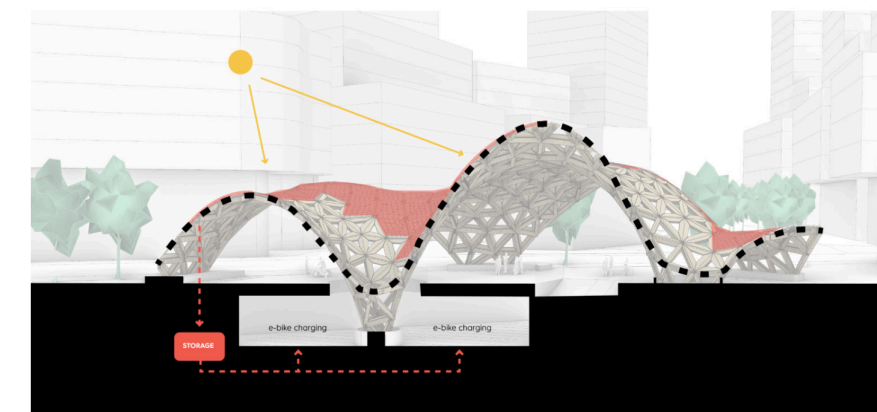
Figura 31 – *Climate Canopy* -Diagrama explodido das camadas da cobertura.



Fonte: (Institute For Advanced Architecture Of Catalonia, 2023).

A cobertura não é apenas uma casca estrutural: ela integra estratégias ambientais ativas e passivas de modo coordenado com sua geometria. O sistema de painéis modulares varia entre painéis fechados, abertos e fotovoltaicos, conforme a análise de irradiação solar da superfície da cobertura. Trata-se de uma resposta refinada ao ambiente local, que equilibra sombreamento, iluminação natural e geração de energia — articulando estética, função e desempenho -- figura 32.

Figura 32 – *Climate Canopy* - Conexão entre os parâmetros



Fonte: (Institute For Advanced Architecture Of Catalonia, 2023).

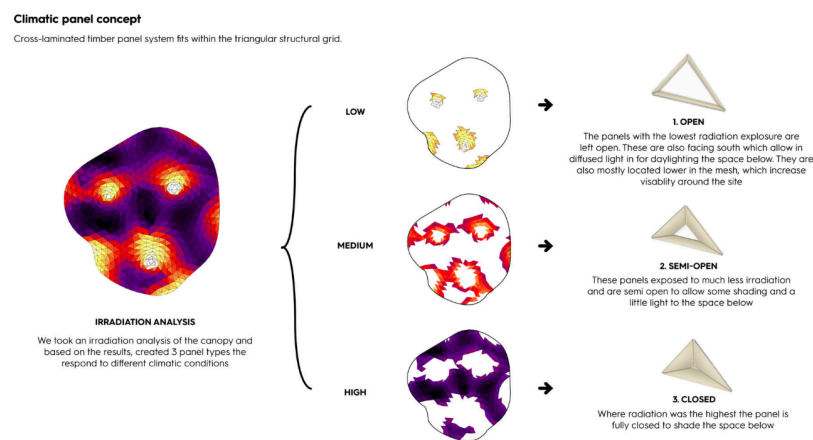
Consolidada a malha estrutural, passou-se à definição das seções estruturais ideais, criando-se um catálogo de componentes modulares em madeira de lei australiana. A racionalização dos elementos responde a critérios de montagem, transporte e desempenho estrutural, garantindo integridade em situações críticas. A subsequente análise das seções transversais das vigas, com controle de utilização máxima de 70%, revela uma busca consciente por eficiência estrutural e otimização de recursos. A escolha pela madeira de lei australiana, com possibilidade de substituição por madeira recuperada, reforça essa intenção de sustentabilidade técnica e ambiental.

Ainda, o projeto realiza testes de flambagem local e grandes deformações — um cuidado raro em projetos acadêmicos, que demonstra domínio avançado da engenharia estrutural. A análise comparativa entre madeiras confirma escolhas fundamentadas por desempenho, não por preferência subjetiva.

Paralelamente à modelagem estrutural, foram conduzidas simulações ambientais para orientar o projeto dos painéis de cobertura. Três tipos de painéis CLT foram criados conforme: Índices de irradiação solar (para orientar a geração FV);

Necessidades de sombreamento e ventilação; Entrada de luz difusa - figura 33.

Figura 33 – *Climate Canopy* - Construção dos painéis



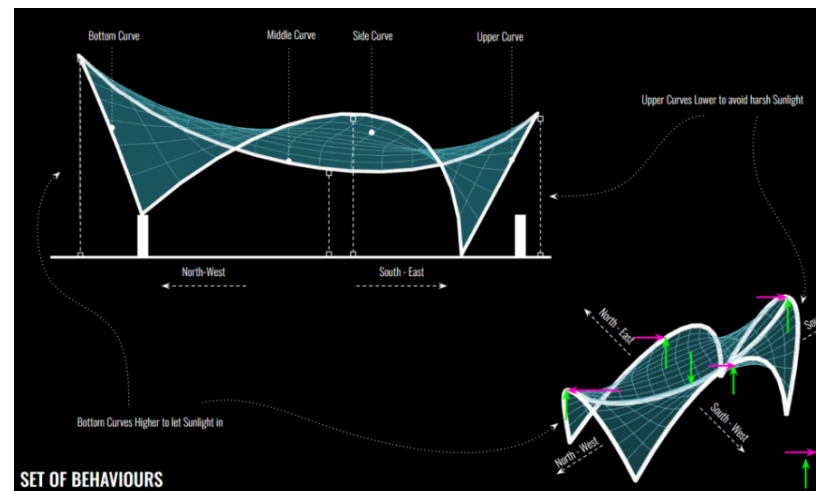
Fonte: (Institute For Advanced Architecture Of Catalonia, 2023).

Essa integração de estratégias passivas e ativas é guiada por uma metodologia baseada em dados, garantindo que cada componente tenha um papel ambiental específico.

### 3.2. FORCES OF NATURE – BLUE SADDLE ROOF

O projeto *Blue Saddle Roof* foi desenvolvido no estúdio *Forces of Nature*, tendo como proposta a criação de uma cobertura em forma de sela que responda a parâmetros físicos reais, considerando a ação de forças naturais para o desenvolvimento formal e estrutural da peça, podendo ver uma síntese a partir da figura 34.

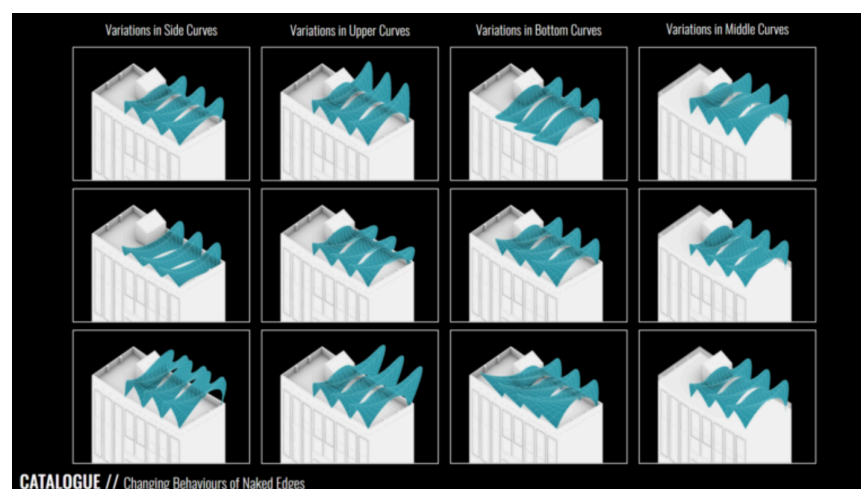
Figura 34 – *Blue Saddle Roof* - Conjunto do comportamento formulado



Fonte: (JASKULSKI, 2023).

O grupo parte do entendimento de que a geometria arquitetônica pode emergir diretamente das forças ambientais atuantes sobre a matéria, evitando uma forma pré-definida e privilegiando uma lógica morfogenética orientada por desempenho. O projeto é baseado em simulações paramétricas utilizando principalmente os plugins Kangaroo, Karamba e Millipede, dentro do ecossistema *Grasshopper/Rhino*. Sendo possível entender processos generalizados a partir da figura 35.

Figura 35 – *Blue Saddle Roof* - Estudos da forma

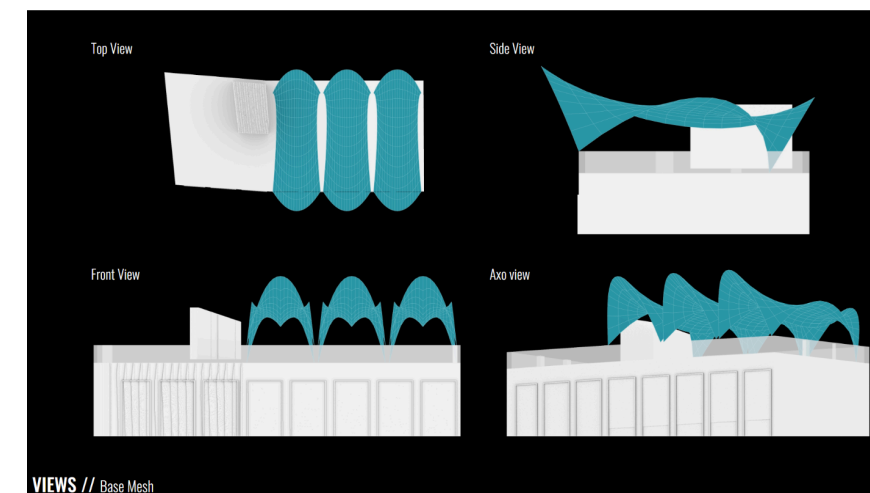


Fonte: (JASKULSKI, 2023).

O processo metodológico parte de um sistema de *form-finding* com o *Kangaroo Physics*, onde superfícies são submetidas a forças gravitacionais, de tração e compressão, definindo uma geometria inicial em forma de sela tensionada.

Uma vez definida essa primeira malha de equilíbrio, o projeto avança para a análise estrutural com o *Karamba3D*, onde são testadas deformações, esforços máximos e tensões nas barras que compõem a malha reticulada. O grupo aplica também o *Millipede* para calcular a eficiência topológica da malha em termos de espessura, distribuição de material e resposta estrutural a diferentes casos de carga - figura 36.

Figura 36 – *Blue Saddle Roof* - Vistas da forma

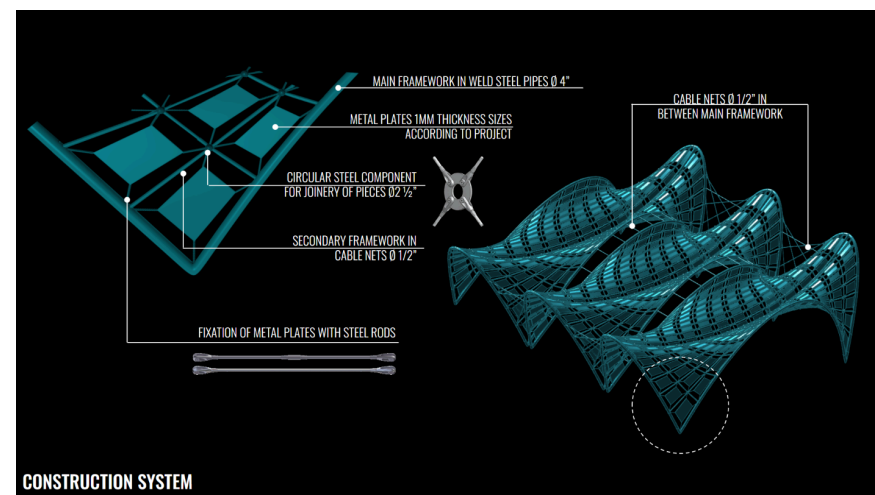


Fonte: (JASKULSKI, 2023).

O sistema estrutural é formado por uma malha triangular em aço ou madeira, projetada para ser modular e otimizada em termos de uso de material e eficiência construtiva - figura 37. A geometria final da cobertura é côncava nos eixos longitudinais e

convexa nos eixos transversais, maximizando a drenagem da água e promovendo sombreamento eficiente. Foram realizados testes iterativos para verificar o impacto da densidade da malha sobre o deslocamento, a carga estrutural e a racionalização da construção.

Figura 37 – Blue Saddle Roof - Estrutura da forma



Fonte: (JASKULSKI, 2023).

O projeto, ainda em fase conceitual, propõe uma lógica de montagem baseada em módulos de interseção fixa, garantindo viabilidade para pré-fabricação e montagem em obra com baixos custos logísticos. Além disso, a forma final responde diretamente às condições climáticas locais, como direção dos ventos e ângulos solares, integrando as noções de forma, função e desempenho ambiental - figura 38.

Essa integração de estratégias passivas e ativas é guiada por uma metodologia baseada em dados, garantindo que cada componente tenha um papel ambiental específico.

Figura 38 – Blue Saddle Roof - Perspectiva renderizada



Fonte: (JASKULSKI, 2023).

Um ponto de interesse é a clareza com que o projeto conecta simulação estrutural e estratégias ambientais, considerando o sombreamento, a drenagem da água e o comportamento do ar. Essas questões são diretamente pertinentes às estratégias climáticas passivas que você também explora em seu pavilhão.

A racionalização da malha e a possibilidade de modularização oferecem insights construtivos relevantes, especialmente para aplicações de prototipagem em escala real ou para fabricação digital com corte CNC.

### 3.3. COMPUTATIONAL DESIGN SEMINAR: TRIANGULATED TECTONICS

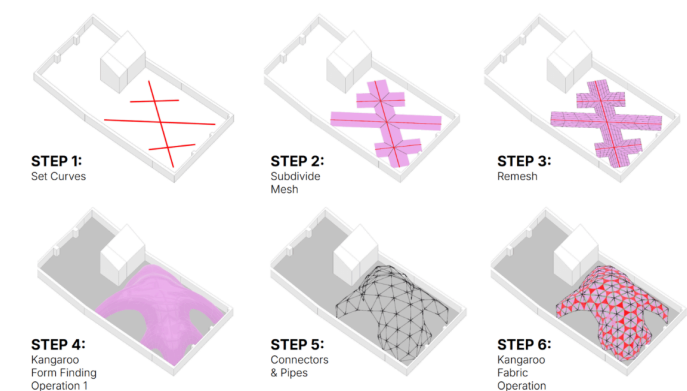
O projeto *Triangulated Tectonics* foi desenvolvido no contexto do *Computational Design Seminar 7* do IAAC, com o propósito de criar um pavilhão temporário para o terraço do instituto, capaz de integrar requisitos ambientais, eficiência construtiva e expressão formal.

O ponto de partida se deu com a análise das condicionantes do local: orientação solar, fluxo de ventos e a necessidade de um espaço abrigado, mas visualmente permeável. Com isso, a equipe optou por um sistema baseado em malhas triangulares, compondo uma rede leve de barras tensionadas conectadas por nodos rígidos. O processo de *form-finding* foi inteiramente realizado no Grasshopper com o *plug-in Kangaroo*.

A configuração da malha se deu a partir de parâmetros ajustáveis de comprimento, inclinação e distribuição dos triângulos, gerando uma cobertura que se deforma conforme a ação das cargas simuladas e dos pontos de apoio definidos estrategicamente. O relaxamento dinâmico proporcionado pelo *Kangaroo* tornou possível não só encontrar a geometria mais estável, mas também otimizar a distribuição de esforços entre as barras, garantindo leveza sem abrir mão da segurança estrutural - podendo ser visto na figura 39 e 40.

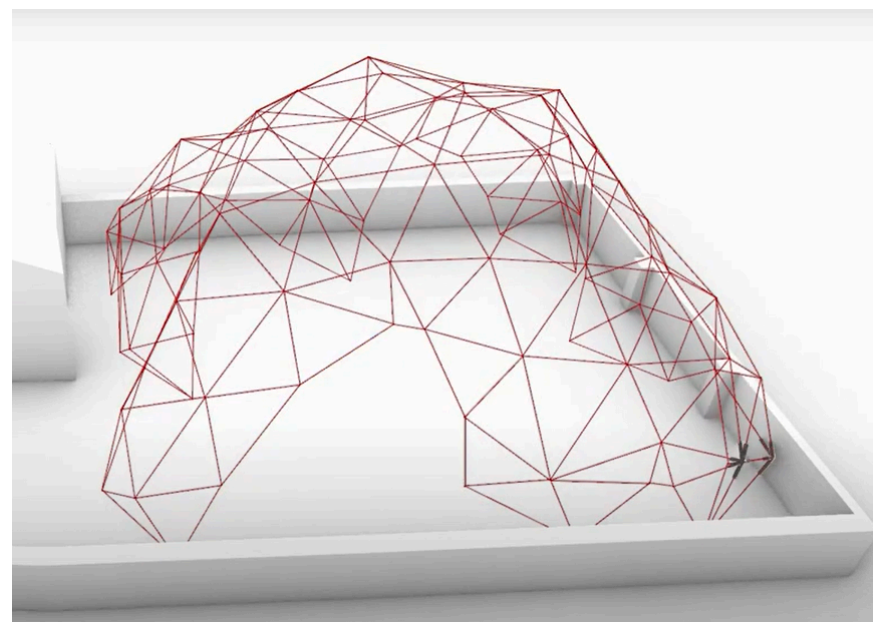
Figura 39 – Triangulated Tectonics - diagramação da forma

Form Development



Fonte: (Nihal, 2025).

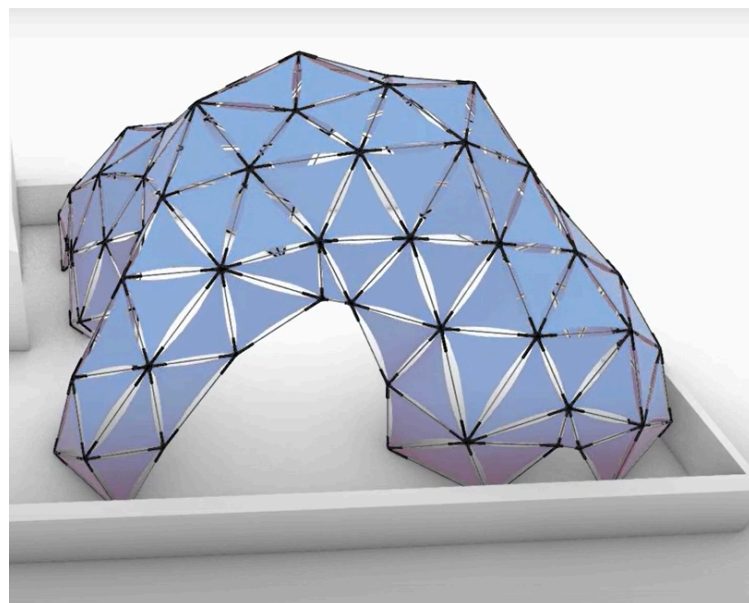
Figura 40– Triangulated Tectonics - traçamento da malha



Fonte: (Nihal, 2025).

Para aprimorar o conforto climático, membranas têxteis foram inseridas entre os triângulos, atuando como elementos de sombreamento e de filtragem da luz - figura 41. A escolha e disposição desses painéis não foi aleatória: simulações solares definiram onde o sombreamento seria mais necessário, e a densidade dos módulos foi ajustada em resposta às condições reais do ambiente do terraço.

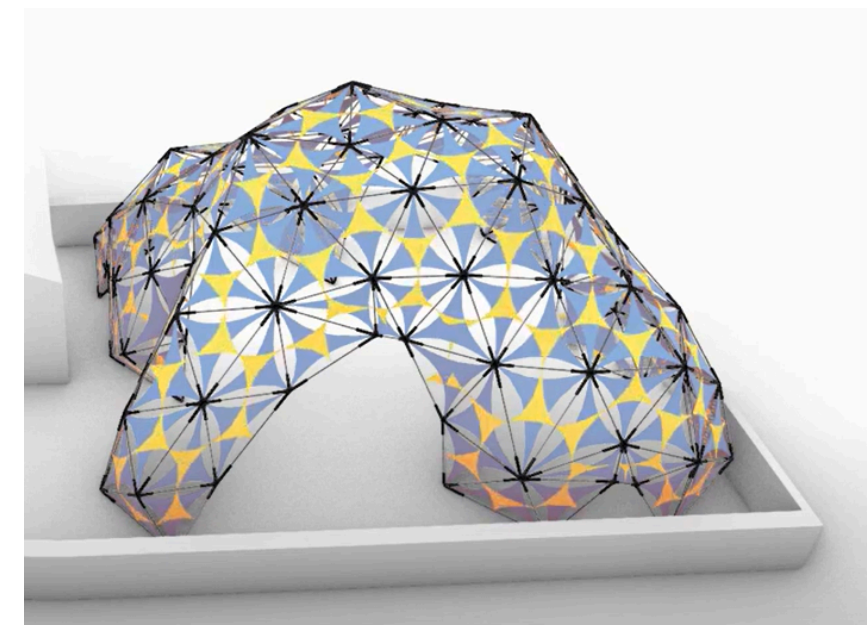
Figura 41– Triangulated Tectonics - estrutura tensionada



Fonte: (Nihal, 2025).

A modularidade foi outro ponto-chave no processo. Cada componente triangular foi pensado para ser facilmente pré-fabricado — cortado a laser ou CNC — e montado no local por conexões simples, dispensando ferramentas complexas ou grandes equipes - figura 42. A lógica repetitiva dos módulos não só facilitou a montagem como permitiu eventuais desmontagens, reforçando o caráter efêmero e sustentável da estrutura.

Figura 42 – Triangulated Tectonics - modulação da forma



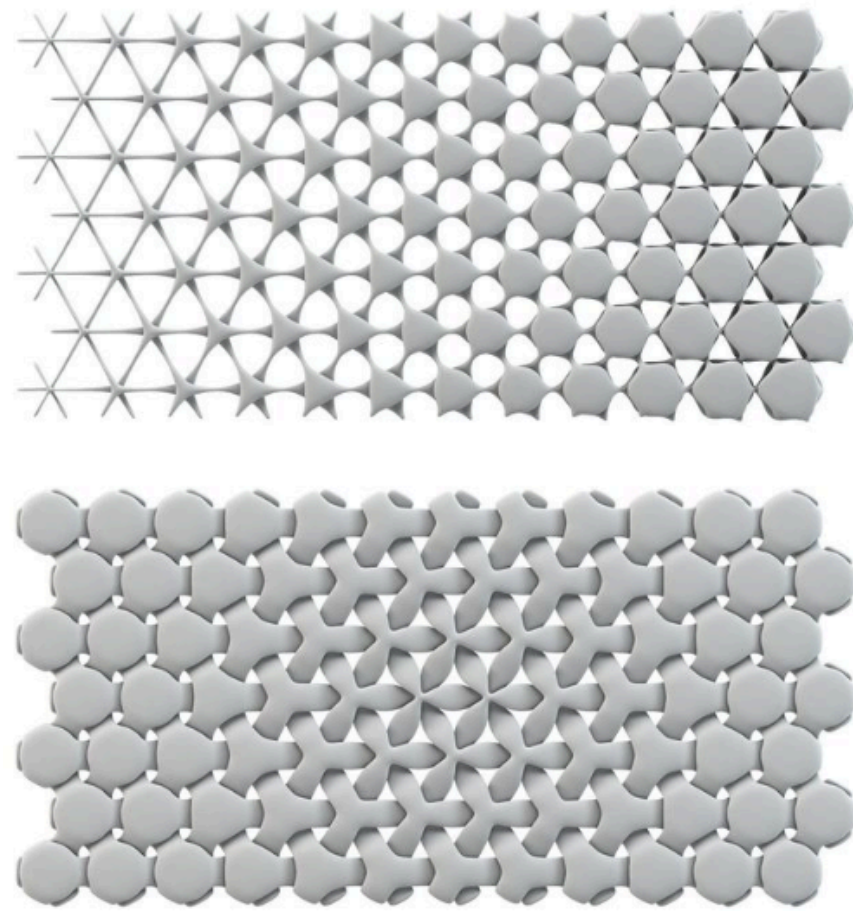
Fonte: (Nihal, 2025).

Demonstrando dessa forma uma fluidez entre simulação e fabricação digital, servindo de referência para se pensar em uma cobertura leve que responda simultaneamente a demandas estruturais e climáticas. Sendo até mesmo explorado o potencial das malhas paramétricas e de módulos repetitivos.

#### 3.4. HEXAWAVE

O projeto *HexaWave* emerge do desejo de explorar padrões simples — no caso, a malha hexagonal — e revelar suas potencialidades formais por meio da manipulação paramétrica. A proposta parte de uma malha regular que é deformada e retorcida para originar uma superfície tridimensional ondulante - figura 43, sobre a qual se erguem colunas que parecem crescer organicamente da própria base.

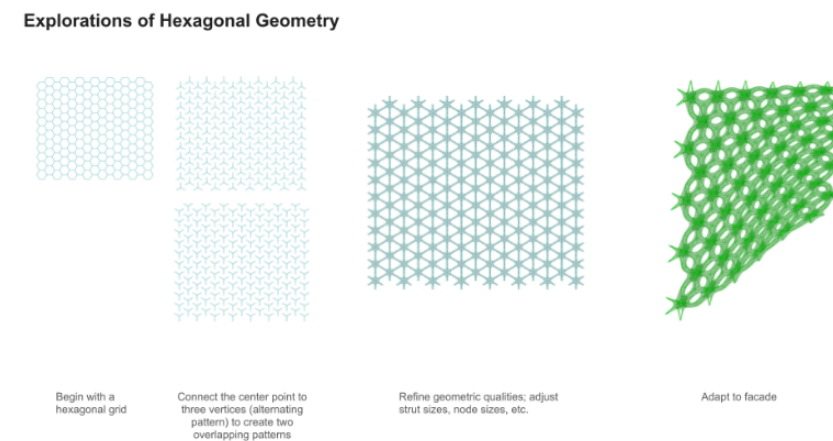
Figura 43 – HexaWave - malha hexagonal



Fonte: (El Ayouty, 2024).

O processo inicial foi marcado pela definição de uma malha hexagonal padrão, que, ao receber variações de altura em pontos selecionados, ganhou volumetria e movimento. Essas protuberâncias criam regiões de sombra, passagem e visibilidade diferenciadas, enriquecendo a experiência espacial de quem percorre a estrutura - figura 44.

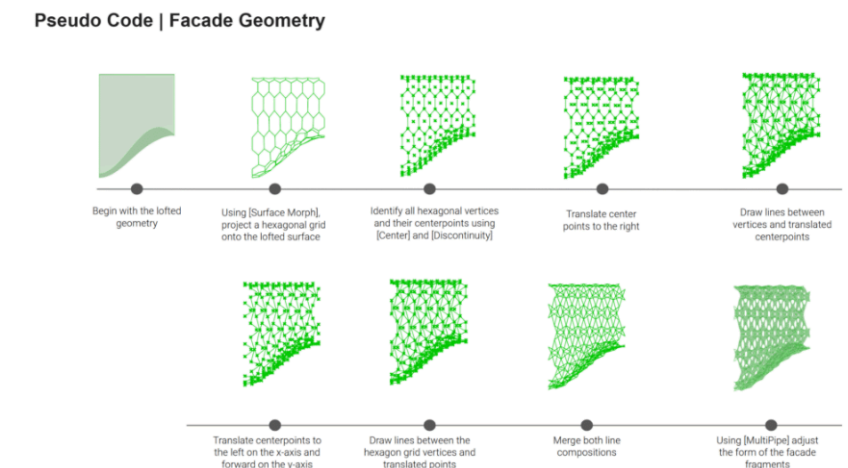
Figura 44 – HexaWave - exploração da forma



Fonte: (El Ayouty, 2024).

O passo seguinte foi o desenvolvimento das colunas torcidas, geradas a partir dos vértices elevados da malha. Com o uso do *Grasshopper*, *scripts* paramétricos foram criados para extrudar, torcer e ajustar o diâmetro das colunas, sempre respondendo a parâmetros como densidade, altura e curvatura desejadas - figura 45. O resultado é uma superfície contínua, ao mesmo tempo regular e surpreendente, que brinca com luz, sombra e percepção de escala.

Figura 45 – HexaWave - Modulação da face



Fonte: (El Ayouty, 2024).

Do ponto de vista construtivo, *HexaWave* foi pensado para montagem modular: cada segmento pode ser produzido separadamente, em madeira ou outro material compatível com fabricação digital, e depois conectado no local com precisão. Isso torna o sistema não apenas expressivo do ponto de vista visual, mas também racional e econômico em termos de produção e montagem - figura 46.

Figura 46 – HexaWave - Perspectiva renderizada



Fonte: (El Ayouty, 2024).

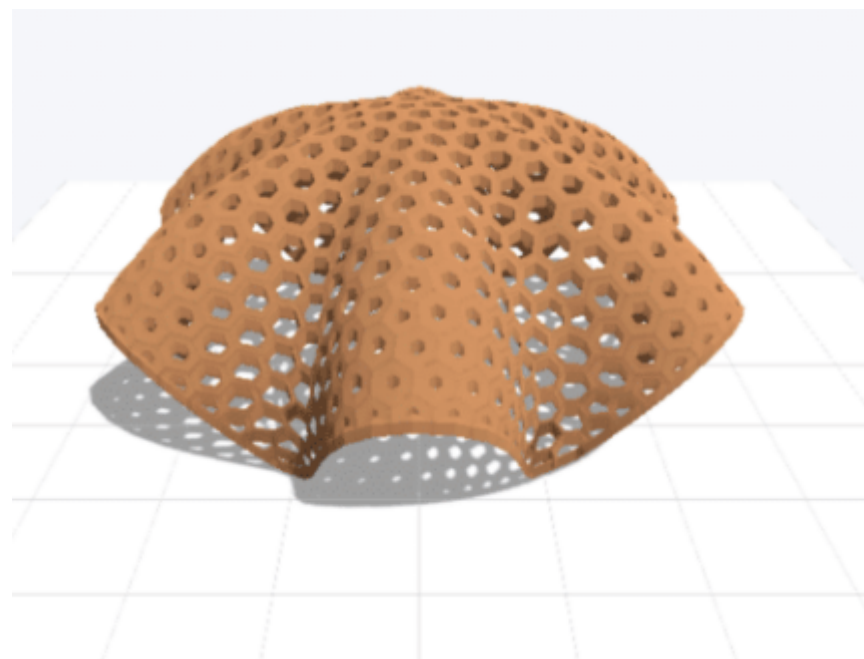
Como repertório metodológico, é demonstrado como o domínio de padrões geométricos e a manipulação controlada de parâmetros podem criar superfícies complexas sem abrir mão da lógica modular. O uso das colunas como elementos tanto estruturais quanto expressivos sugere caminhos para pensar apoios em seu pavilhão que sejam protagonistas, e não meros suportes. Além disso, a abordagem iterativa de simulação, ajuste e fabricação é totalmente replicável em sua pesquisa, valorizando a integração entre computação, expressão formal e viabilidade construtiva.

### 3.5. SHADOW DOME CONFIGURATOR

O *Shadow Dome Configurator* foi concebido como uma ferramenta para gerar, visualizar e avaliar rapidamente variantes de cúpulas segmentadas. Desenvolvido por Anzhelika Ignateva, o projeto é, antes de tudo, uma interface de exploração formal, ambiental e econômica em tempo real.

O processo inicia ajustando parâmetros básicos — raio, altura da cúpula, densidade e padrão das perfurações (triangular ou hexagonal). A partir desses dados, o script gera automaticamente uma geometria segmentada, cujas faces podem ser moduladas em número e posição das aberturas, afetando não só a forma, mas também o desempenho ambiental do espaço interno. Sendo possível ver a primeira estruturação da modulação da malha na figura 47, mas não é explicado com clareza a distinção entre elas.

Figura 47 – Shadow Dome Configurator - Estrutura módulo I



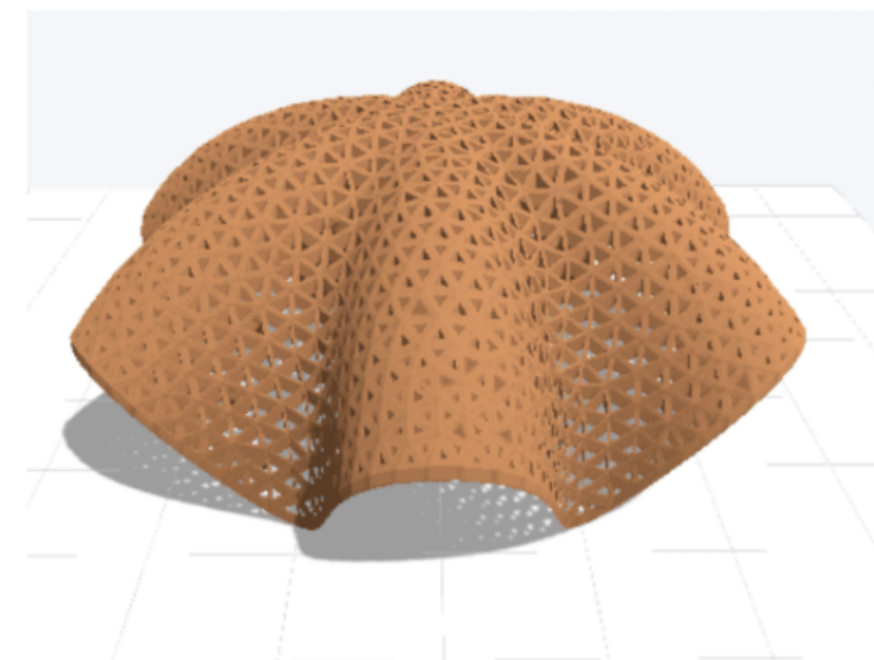
Fonte: (Ignateva, 2025).

O grande diferencial do configurador está na sua capacidade de devolver feedback imediato: ao modificar qualquer

parâmetro, o sistema recalcula a geometria, a área sombreada projetada e uma estimativa de custo dos materiais necessários. Isso permite a exploração de alternativas formais e construtivas sem a necessidade de múltiplos arquivos ou processos externos, facilitando decisões projetuais mais rápidas e fundamentadas.

O processo de avaliação é completado por simulações solares integradas, que demonstram como diferentes configurações impactam a insolação interna ao longo do dia. Isso coloca o usuário no centro do processo projetual, tornando-o capaz de equilibrar estética, conforto ambiental e viabilidade construtiva com poucos cliques. Sendo possível ver como essa interação entre tais parâmetros alteram segmentos da malha, tanto pela figura anterior quanto na figura 48.

Figura 48 – Shadow Dome Configurator - Estrutura módulo II



Fonte: (Ignateva, 2025).

Assim, a metodologia oferece uma poderosa inspiração sobre como integrar simulação paramétrica, feedback visual e avaliação quantitativa em um mesmo fluxo de trabalho. A lógica

de testar variantes formais em tempo real, medindo o impacto direto nos dados ambientais e econômicos, é um diferencial que pode ser adaptado a um protótipo.



#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo de Materiais e Métodos apresenta as atividades e recursos empregados para analisar o potencial dos ensaios obtidos através da utilização da morfogênese, enquadrando o roteiro de diversos experimentos, a fim de possibilitar uma alternativa projetual que melhor se encaixe nos parâmetros definidos. Em tal pesquisa será confeccionado um pavilhão para promover uma maior estabilidade de conforto ambiental em um espaço público. Tendo como objetivo reduzir a concentração de incidência solar ao espaço, como também a iluminação, interferindo dessa forma no microclima do espaço, especificamente no contexto climático de Goiás.

Para este fim, realiza-se uma pesquisa de caráter quantitativa e exploratória, baseada em *Performance-Based Design*, havendo a coleta de dados com emprego de simulação computacional.

Neste contexto, compreende-se simulação computacional em todas as técnicas de design computacional, o que não se restringe às ferramentas de simulação do desempenho ambiental, como EnergyPlus, Radiance, como também os recursos de modelagem paramétrica.

##### 4.1. METODOLOGIA:

Para a confecção do pavilhão será feito primeiro a estruturação da forma inicial, gerada a partir da simulação de carga da estrutural, como também é pensado a reconstrução da malha a partir de padrões analógicos. Posteriormente, é atribuído padrões para cada unidade celular, sendo de caráter responsivo por reconstruir a malha de maneira que responda ao índice de

incidência de radiação, considerado uma variável de desempenho. Como também será feito a simulação de UDI- indicador de Iluminância Útil da Luz do Dia, e outra variável considerada é a de controle, atribuída à porcentagem de abertura do modelo celular. Para esse fim, utiliza-se ferramentas de simulação computacional do desempenho ambiental, especificamente o *EnergyPlus*, para análise termoenergética, *Radiance*, para análise da iluminação natural. Acessam-se estes recursos por meio do *Ladybug Tools*, *plug-in* para *Grasshopper* para realização de análises ambientais e que serve de interface para os referidos programas.

Dessa forma, apresento uma visão geral do método da pesquisa com suas etapas, processo, materiais e procedimentos. O método estrutura-se em seis etapas gerais:

- I. Estudo do contexto local;
- II. Estruturação da forma inicial;
- III. ENSAIO I
  - A. Concepção do padrão a partir das analogias na natureza;
  - B. Simulação de desempenho;
  - C. Ensaio responsivo
  - D. Desdobramentos dos resultados;
- IV. ANÁLISE E DESAFIOS DA FASE ANTERIOR
- V. ENSAIO II
  - A. Estudo a partir novos padrões
  - B. Simulação de desempenho;
  - C. Desdobramentos dos resultados;
- VI. Simulação do caso inicial + tradicional;
- VII. Comparação dos resultados;
- VIII. Análise do trade-offs;

##### IX. Estudo Secundário;

A primeira etapa, tem como enfoque trazer o estudo da malha urbana, contemplando diagramas de fluxo, vegetação, hierarquia viária, topografia, uso do solo, e possíveis pontos de apoio para a estrutura do pavilhão. Com a intenção de compreender pontos norteadores do espaço, como os fluxos e locais de maior vulnerabilidade de incidência solar.

Posteriormente, é realizada a primeira estrutura do algoritmo a qual será trabalhado a realização da modelagem paramétrica na ferramenta *Grasshopper* — *plug-in* de modelagem paramétrica para o *Rhinoceros 3D* —, que permite a automação da geração de formas e integra diversos recursos computacionais, o que possibilita automação da geração de formas.

Sendo assim a base para os ensaios, envolvendo como referência a metodologia dos estudos de repertório. Partindo assim de uma estrutura que tenha uma malha que responda a cargas de apoio da estrutura definidos estrategicamente. Sendo realizado através do *plug-in Kangaroo* - para simulação física e *forma-finding*.

Como também é feito a reconstrução da malha, a partir de analogias da natureza, envolvendo a concepção de padrões. Neste sentido, será delimitado o universo de soluções projetuais possíveis decorrentes dos padrões.

Neste sentido, prossegue para o primeiro ensaio, que tem como primeira etapa apenas a aplicação da analogia, para posteriormente aplicar a ideia de uma malha responsiva que responda ao índice de incidência de radiação, a qual o foco é compreender o seu o processo, e interpretar as dificuldades para implementar nos próximos passos.

Com tais dados é possível ver as potencialidades e problemáticas envolvendo a aplicação das analogias sobre a malha, como também erros na modelagem. Com isso, é feito intervenções para melhorar a performance da malha, e assim prosseguir para a próxima etapa.

O segundo ensaio tem a intenção de buscar mais cenários a partir de analogias diferentes, e a partir deste momento será aplicado a simulação de UDI, e percentagem a abertura, sendo ambas explicadas suas potencialidades ao decorrer do experimento.

Ao decorrer das simulações realiza-se uma agregação dos dados de todos os cenários, com intuito de comparar, e compreender a relação entre as variáveis, e como interferem entre si, possibilitando uma análise do processo. Como também ver qual protótipo visa responder às questões de pesquisa mais qualitativas, referentes a problematização do tema de pesquisa sobre a forma a partir do contexto e o desempenho ambiental de forma mais abrangente e holística.

#### 4.2. PROCEDIMENTOS:

Após o embasamento por parte da área de intervenção, e compressão de pontos norteadores, será descrito em detalhes no capítulo 5 as etapas de criação, teste e avaliação do algoritmo. Cada etapa buscará demonstrar como os materiais e métodos empregados contribuem para a eficiência ambiental e o desempenho do pavilhão simulado, conectando as soluções digitais ao contexto real de aplicação.

#### 4.3. ÁREA DE INTERVENÇÃO:

Neste capítulo, apresentam-se informações sobre a área de intervenção. O objetivo central do trabalho é que a forma surja ou se encontre em função de necessidades contextuais, assim, será

levado em consideração todos os aspectos do local para se tomar decisões projetuais.

A área escolhida para a realização do projeto é um espaço público, situado na cidade de Goiás, Goiás, Brasil. Situa-se a Praça Jornalista Goiás do Couto (popularmente conhecida como a Praça do João Francisco) - figura 49, sendo um dos locais mais movimentados na cidade, hoje o centro comercial da mesma.

Figura 49 – Escala em relação ao município do local de escolha



Fonte: Grifos do autor sobre a imagem do Google Earth (2025)

Dessa forma, sem analisar detalhes mais implícitos do local, a escolha do local se dá pela concentração comercial, como

também a presença de eventos comunitários e culturais acontecem nesse espaço. Está perto de pontos de apoio de saúde, como também de escolas. Sendo uma praça de visibilidade para a cidade, mas que não implementa estratégias que convidam à permanência no local.

#### 4.3.1. Análise ecológica do local

A localização foi caracterizada com base no site One Earth (referência), que classifica a região na ecorregião "Cerrado Savannas (NT13)", pertencente ao bioma Neotropical. De acordo

com o WWF (*World Wildlife Fund*) e a ONU, o Cerrado integra a categoria das Pradarias tropicais e subtropicais, savanas e matagais.

Conforme o *World Wildlife Fund*, essas ecorregiões possuem precipitação anual entre 90 e 150 cm, com grande variabilidade na umidade do solo ao longo do ano. As gramíneas dominam a paisagem, embora árvores dispersas sejam comuns. A biodiversidade inclui grandes mamíferos adaptados à ampla forragem, sendo as savanas africanas particularmente ricas nesse aspecto.

O Cerrado e os Llanos destacam-se pela complexidade de habitats e altos níveis de endemismo e diversidade beta de plantas. Já as savanas tropicais da Austrália e Nova Guiné apresentam comunidades distintas de espécies.

As ecorregiões apresentam: agregações abundantes de grandes mamíferos; vertebrados com distribuições amplas; diversidade alfa de plantas geralmente baixas, mas diversidade beta e gama potencialmente altas.

Esses ecossistemas demandam: Grandes paisagens naturais para permitir migrações sazonais e resistir a secas; Áreas extensas para eventos de incêndios em larga escala e sobrevivência de predadores de grande porte. Fontes de água essenciais à fauna local.

Apesar do alto potencial de restauração, esses ambientes são vulneráveis à: Aração, pastoreio excessivo e queimadas frequentes. Alterações nos padrões hidrológicos, afetando a fauna. Caça, mesmo de baixa intensidade, que impacta várias espécies sensíveis.

#### 4.3.2. Localização e descrição física da área

Está localizado no Bairro João Francisco, na região de entorno da área tombada. Possui formato retangular, sendo rodeado pelas ruas: Rod. Federal, Rua. Damiana da Cunha, Av. Benedito Adomo - figura 50.

Figura 50 – Escala em relação ao setor do local de escolha

Fonte: Grifos do autor sobre a imagem do Google Earth (2025).



Contemplando diversos empreendimentos ao seu arredor, como também, ao oeste, o centro administrativo João Francisco. Englobando até mesmo o contexto cultural, a qual acontece uma feira local, a qual contempla agricultores locais.

Seu endereço oficial, segundo a prefeitura municipal de Goiás, é Praça do João Francisco, João Francisco, Goiás- GO, 76600-000 - figura 53.

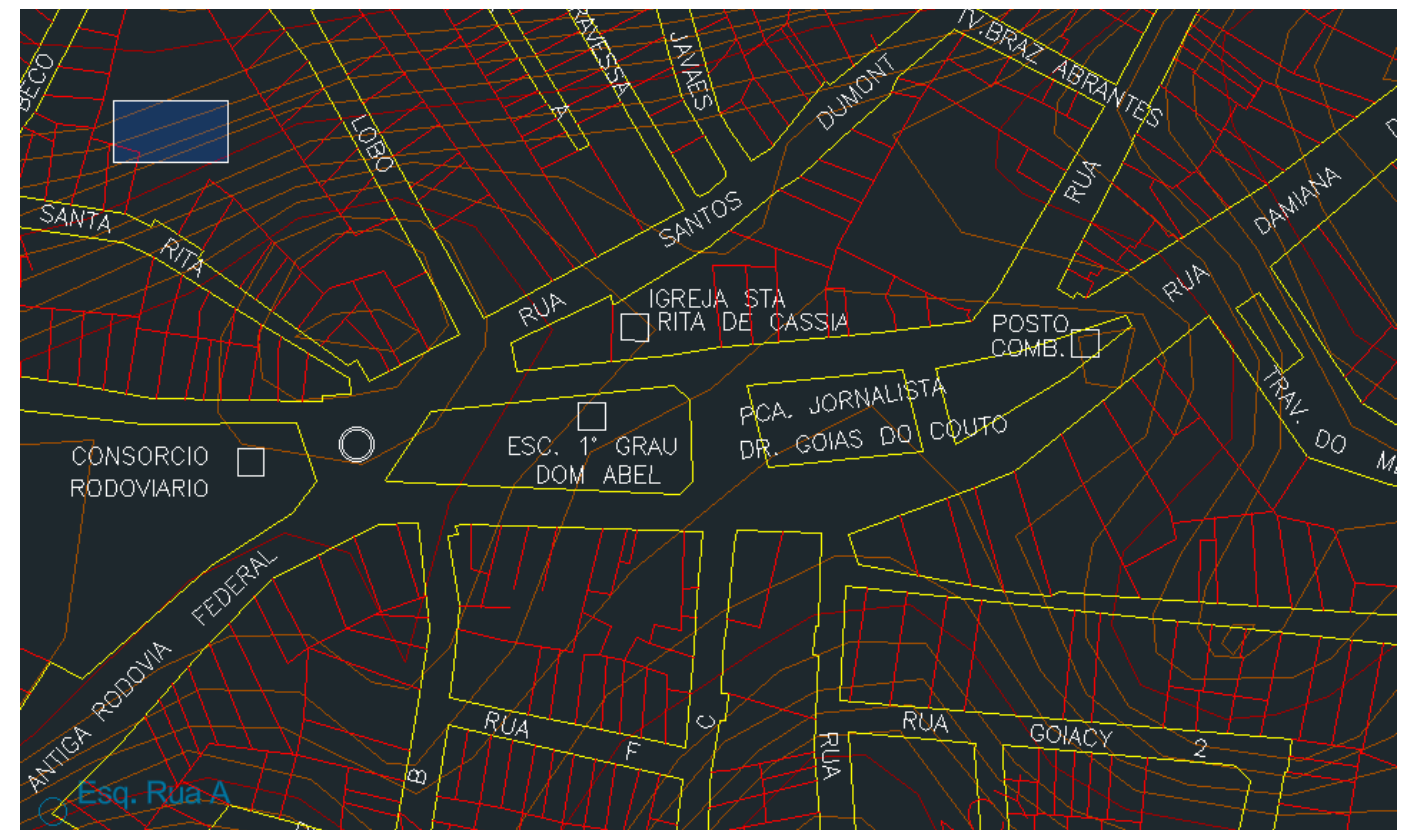
Figura 51 – Localização do terreno no mapa de delimitação de zoneamento urbanístico de Goiás



Fonte: Grifos do autor sobre a imagem do Google Earth (2025).

Foi utilizado a base cartográfica do município de 2019, usada como referência para as dimensões do terreno - figura 52, no entanto não contém os limites ou o traçado paisagístico. Dessa forma, tanto quanto esse item anterior, como também a base topográfica, foi trabalhado o georreferenciamento no Qgis. Demonstrando um terreno plano com uma queda suave para o oeste.

Figura 52 – Mapa topográfico da região, com a quadra do terreno em amarelo



Fonte: A base cartográfica foi elaborada pelo autor no programa Qgis, a partir da base cartográfica do Google Earth (2015). E o traçado urbano foi utilizado do acervo da UFG.

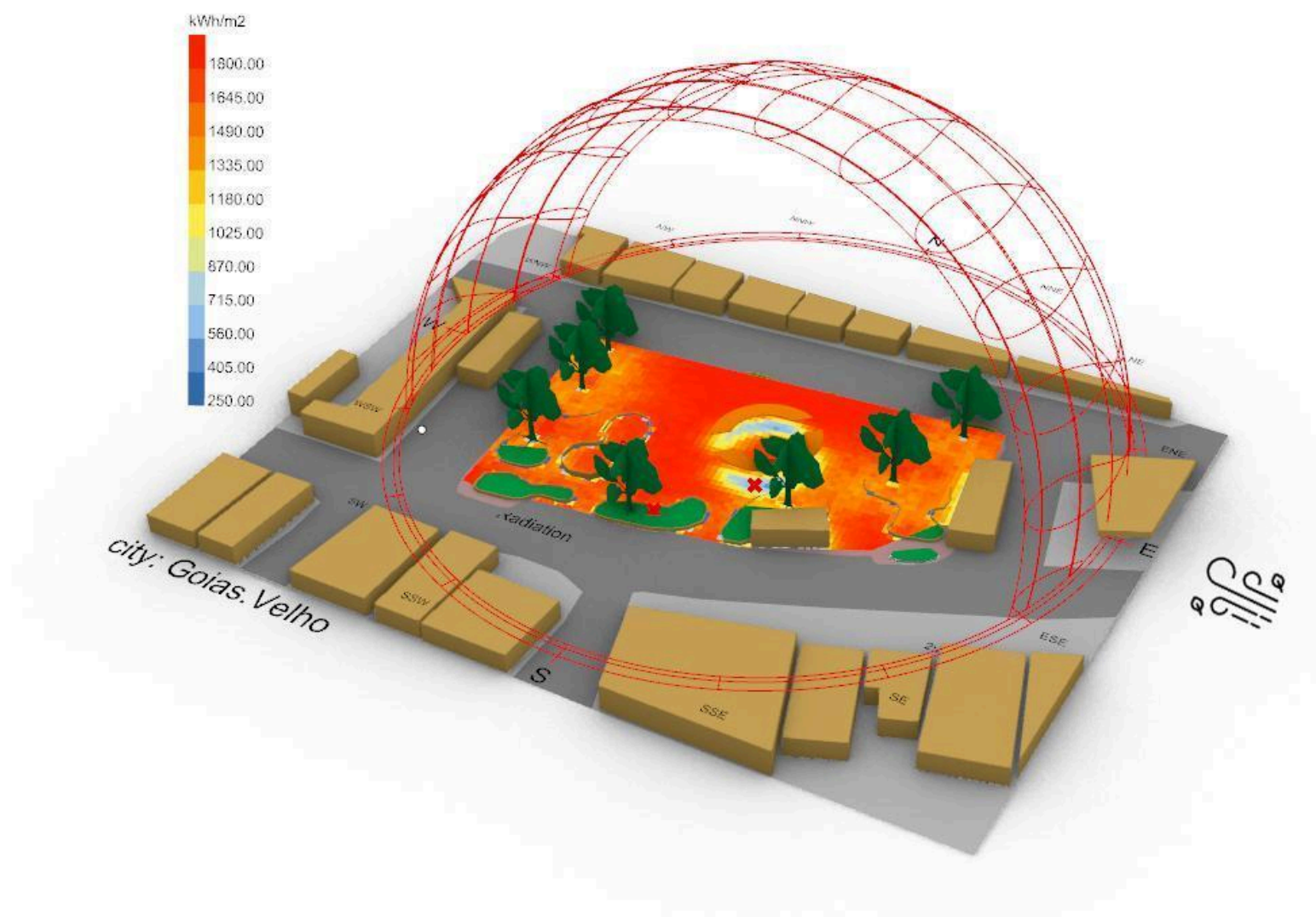
#### 4.3.3. Dados Ambientais

Os dados a seguir são relativos às características de insolação e ventos predominantes da área. As informações foram coletadas através do programa *Rhinoceros*.

A figura 53 consiste em uma perspectiva do terreno, tendo tanto o caminho do sol, quanto a rosa dos ventos, por frequência de ocorrência de cada um na cidade de Goiás. Através dela, percebe-se a predominância do vento Leste na região, que deve ser considerado na elaboração do projeto.

Como também, é incorporado uma simulação de incidência de radiação na malha do existente, com a intenção de ver os locais de sombreamento e pontos de fragilidade. Sendo possível registrar o acúmulo de radiação no espaço no período de um ano, sendo um valor importante para o decorrer do estudo.

Figura 53 – Cartas solar e estudo de insolação



Fonte: Elaborado pelo autor no programa *Rhinoceros* com apoio do *plug-in Ladybug* (2025).

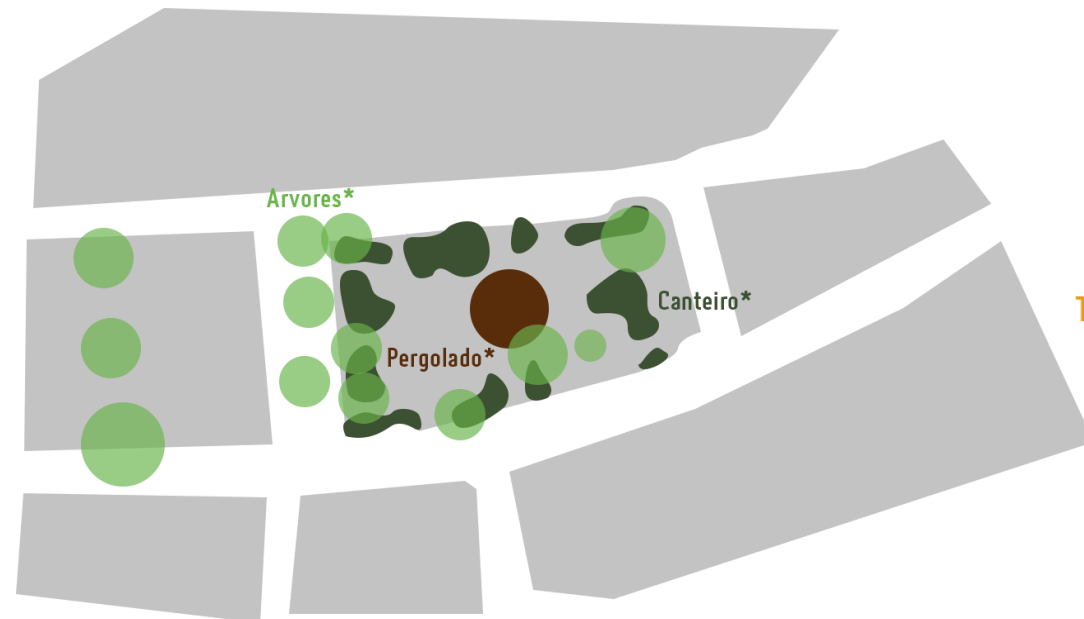
O espaço possui diversos pontos de instabilidade por uma certa escassez de sombreamento. Sendo notório na testada da fachada norte, a qual não tem nenhuma presença de vegetação, ou forma de amenizar o espaço com maior presença de área útil. É possível ver uma maior concentração ao Oeste - Sul, sendo áreas mais estreitas da praça, ficando assim boa parte da praça com uma má utilização por falta de sombreamento.

#### 4.3.4. Levantamento da área

Nesta seção, serão apresentados os dados obtidos e a leitura do espaço após visita ao local. A área foi visitada em distintos dias e turnos para que fosse possível uma melhor apresentação dela.

A figura 54 retrata uma leitura do contexto local. Atualmente, apresenta uma superfície pavimentada de pedras, com canteiros evidentes que circundam toda a praça, a qual também serve de bancos e ao centro tem um pergolado com alguns bancos.

Figura 54 – Contexto do local existente



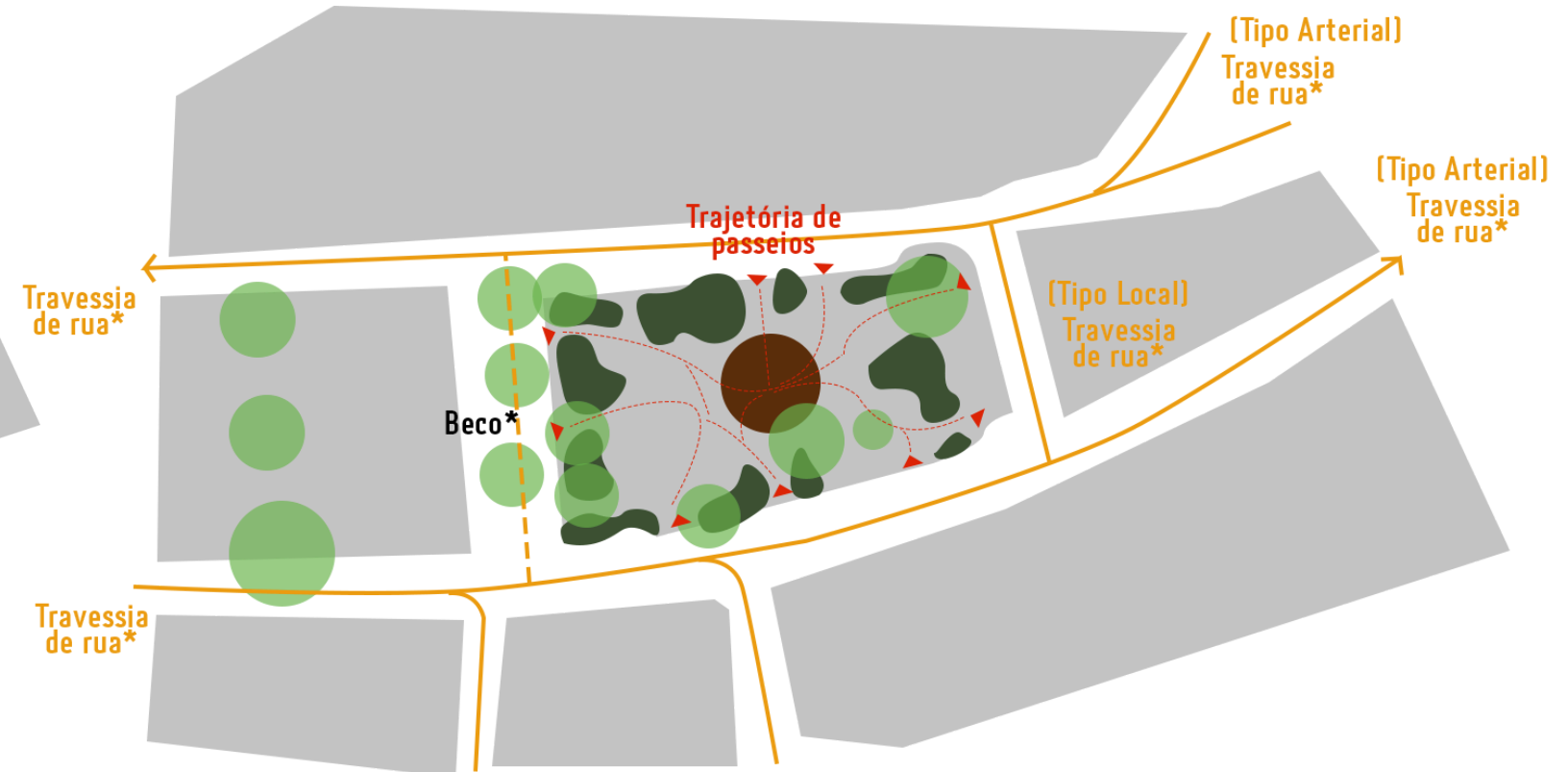
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.4.1. Fluxos de pessoas e de veículos

A figura 55 apresenta um diagrama de fluxos de carros (em laranja) e pessoas (em vermelho) nos arredores da quadra. Pode-se dizer que tais fluxos se dão pelo centro da praça, passando pelo pergolado, pois existe uma certa dificuldade de acesso pela zona norte e sul, causado pela ineficiência da calçada, e também pelos estacionamentos ao seu redor (figura X). Na zona sul acontece o maior tráfego de automóveis, e tem maior presença de estacionamento.

Em dias e horários comerciais, a zona oeste - um beco, considerada o trajeto mais agradável - e leste da praça - via local, sendo estacionamento para moto taxi - caracterizada por forte movimento e concentração de pessoas, devido à localização da feira local, como também a disponibilidade dos principais caminhos e conexões entre as travessias de rua.

Figura 55 – Linhas de movimento no local.



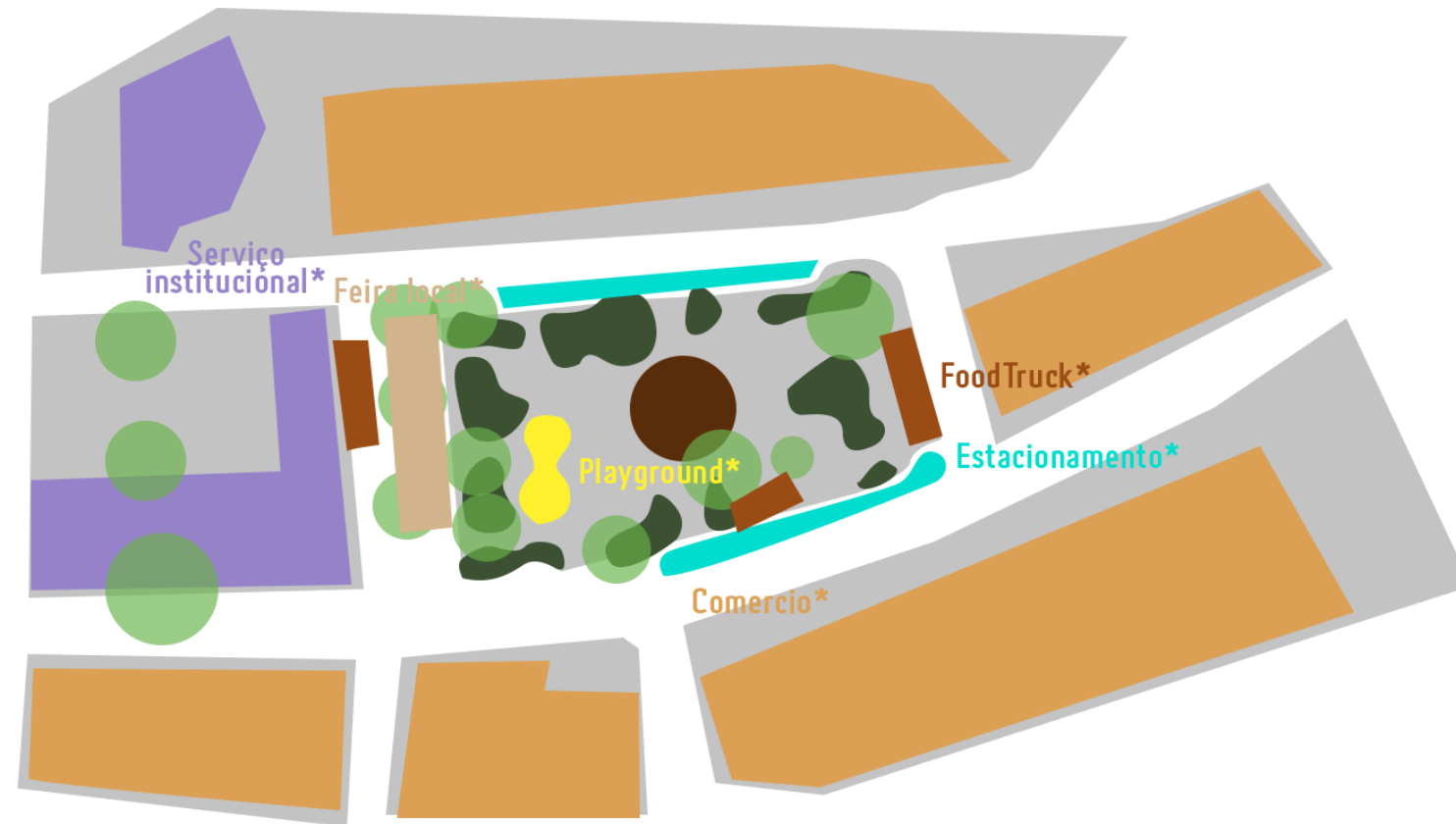
Fonte: Elaborado pelo autor.

O espaço é demarcado pela inexistência de sinalização de trânsito, sendo que tais zonas ditas anteriormente são travessias de tipo arterial. Sendo um ponto favorável para a dificuldade de acesso por esses espaços, já que se torna um perigo para o transeunte.

#### 4.3.4.2. Usos do local e pontos de interesse público

Por estar situado em uma zona comercial, o local apresenta intenso fluxo de pedestres no final da tarde, especialmente em decorrência da feira. Nesse período, observa-se também a presença de crianças no playground, o que não ocorre em outros momentos do dia, evidenciando que essa atividade está diretamente relacionada à realização da feira - figura 56.

Figura 56 – Programa de uso



Fonte: Elaborado pelo autor.

À noite, embora o movimento diminua, ainda há circulação de pessoas, principalmente devido à atuação de *foodtrucks* nas proximidades e à oferta de alguns serviços públicos. Nos demais períodos, a ocupação do espaço está mais associada ao tráfego de veículos. Durante as manhãs, a movimentação é marcada pela atividade de mototáxis e de alguns vendedores ambulantes, compondo um uso mais funcional e transitório do espaço. E no período da tarde o espaço dificilmente tem a presença de pessoas.

#### 4.3.4.3. Estrutura de intervenção

Considerando os fatores problemáticos, e o uso local, foi identificado a localização de possíveis suportes estruturais,

podendo ser colocado sem interferir no movimento e na visibilidade - figura 57.

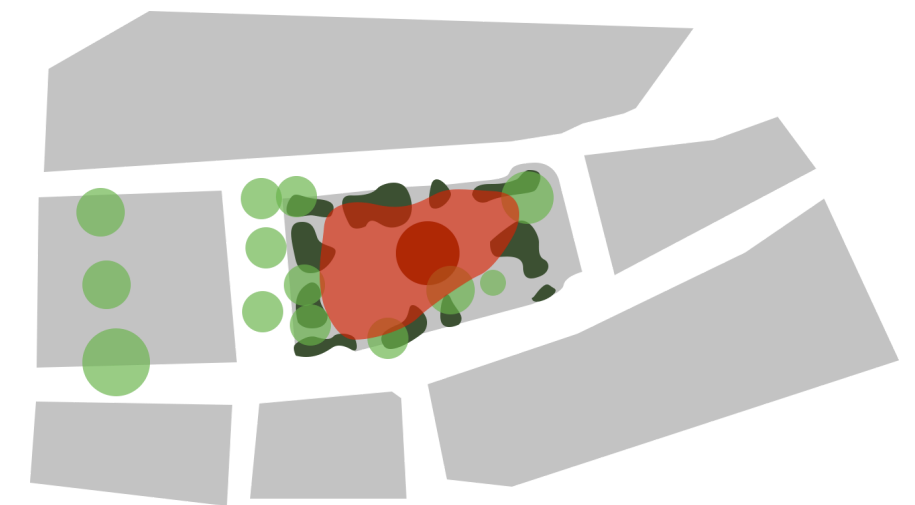
Figura 57 – Pontos de apoio à estrutura (círculos vermelhos).




Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fortalecer a Praça como um ponto de encontro, uma cobertura cobre maior parte do local, proporcionando sombra, proteção contra chuva e proporcionando uma escala humana em relação aos prédios vizinhos - figura 58.

Figura 58 – Cobertura conectada.



Fonte: Elaborado pelo autor.



# 5. ROTEIRO DOS ENSAIOS PROJETUAIS

## 5. ROTEIRO DOS ENSAIOS PROJETUAIS

Neste Capítulo, constarão os roteiros dos ensaios realizados no plugin *Grasshopper*, editor de algoritmo gráfico integrado ao *Rhinoceros*, modelagem geométrica. Cada informação imputada no *Grasshopper*® é representada por um componente visual semelhante a uma pilha, que possui plugs de entrada e/ou saída.

O roteiro segue, principalmente, os modelos descritos no estudo de repertório, como também os modelos descritos por Oxman (2006), como modelos de desempenho. Esses podem se dar por um sistema generativo, no qual o sistema gera uma forma final objetivando-se uma performance desejada; ou por processos formativos, nos quais o designer interage com os parâmetros geradores da forma para se chegar ao resultado final.

Como primeiro ponto de partida será a formulação de uma estrutura base para o primeiro ensaio. Dessa forma, essa fase é subdividida em 3 categorias, contendo níveis de complexidade progressivamente maiores, a saber: distribuição de cargas de apoio da estrutura; modulação da malha, variáveis climáticas. Contendo como primeira diretriz o intuito de fortalecer a área de intervenção como um ponto de encontro, proporcionando sombra, assim sendo o objetivo a resolução de incidência solar.

Posteriormente, Para a atual fase dessa pesquisa foi feito apenas o primeiro ensaio, como descrito anteriormente no método, capítulo 4. Sendo assim a reestruturação da malha para uma atenção responsiva ao índice de incidência de radiação.

### 5.1. ESTRUTURA DA MALHA BASE

Tem como objetivo explorar possíveis estratégias a serem adotadas na definição da volumetria do projeto. Assim, a partir da compreensão dos limites de afastamento do terreno, como

também as zonas de vegetação, fluxos de movimentação e zonas de maior conexão do espaço, modelou-se uma zona em um único plano a qual será utilizado como base para a criação de uma malha.

#### 5.1.1. FORM FINDING: CARGAS

A presente estratégia tem como finalidade explorar, por meio de simulações físicas, alternativas que integrem condicionantes estruturais e espaciais ao processo de definição volumétrica do projeto. Utilizando recursos do plugin *Kangaroo*, buscou-se investigar como forças simuladas de gravidade e pontos de ancoragem podem moldar uma superfície leve e responsiva, que atenda às exigências do sítio de intervenção.

##### 5.1.1.1. PREPARAÇÃO DA MALHA: DEFINIÇÃO DE LIMITES E OBSTÁCULOS

A superfície inicial é definida a partir de um plano que respeita os limites legais de afastamento do terreno, as zonas de preservação vegetal, os fluxos de circulação e as áreas de maior intensidade de conexões espaciais. Essa base, ainda bidimensional, será a fundação sobre a qual a malha será construída e deformada.

Para isso, são inseridos dois conjuntos de curvas representando elementos físicos existentes: um delimitando os pilares de apoio, outro os furos ou vazios, os quais indicam áreas onde a malha não pode se sobrepor. Esses dados são organizados em estruturas de *DataTree* - isto é, uma estrutura hierárquica de dados em ramos, utilizada no ambiente de programação visual para agrupar, indexar e preservar a relação entre conjuntos de geometrias - para garantir sua manipulação ordenada e eficiente no algoritmo - figura 59.

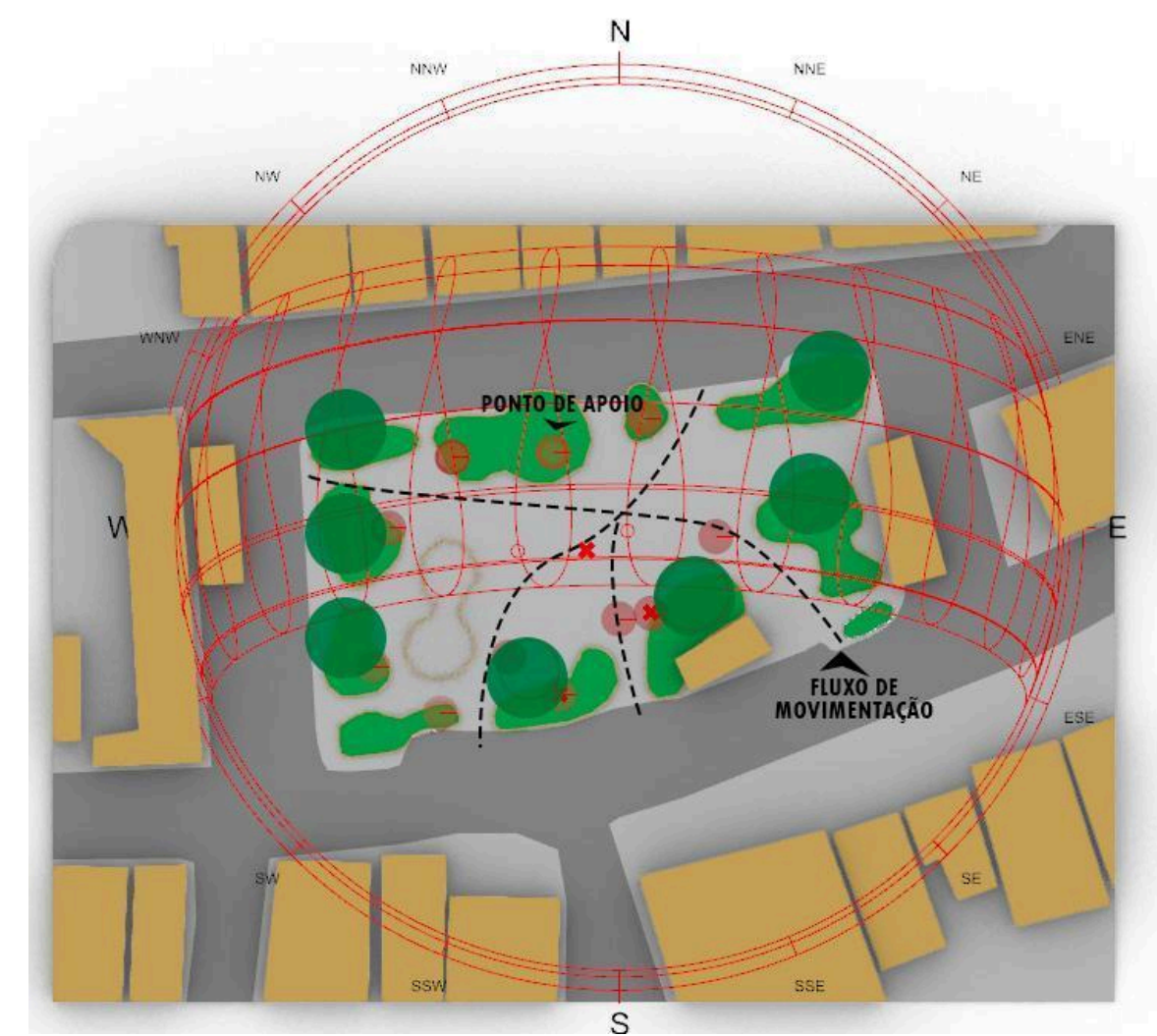
Figura 59 – Pontos notáveis de apoio



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a superfície definida, aplica-se o componente *TriRemesh*, responsável pela geração de uma malha triangular regular. Os valores ajustáveis de tamanho das arestas e número de iterações permitem alcançar um equilíbrio entre detalhamento geométrico e desempenho computacional, resultando em uma malha composta majoritariamente por triângulos equiláteros.

Figura 60 – Pontos notáveis de apoio



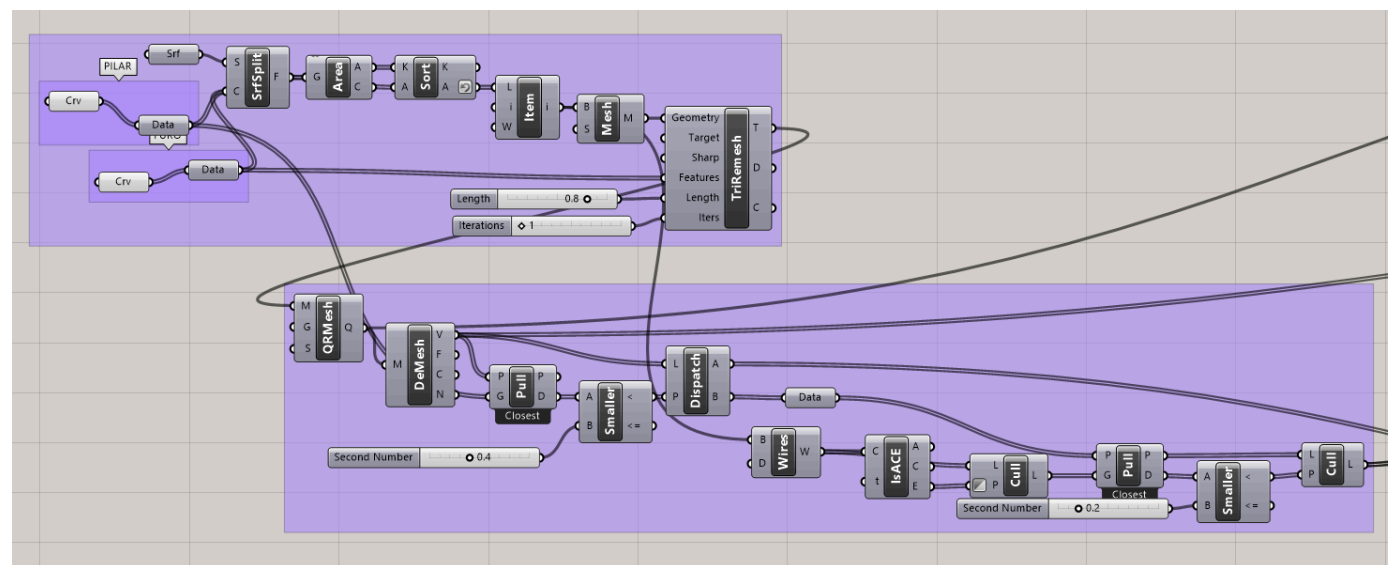
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 5.1.1.2. MAPEAMENTO DE ÁREAS DE CONTATO E PONTOS DE ANCORAGEM

A malha resultante é então avaliada quanto à presença de interferências espaciais. Para isso, cria-se uma série de esferas de influência com raio parametrizado, centradas em pontos relevantes da geometria (geralmente relacionados a pilares ou áreas de exclusão).

O componente *BrepsInc* é utilizado para verificar a inclusão de vértices da malha no interior dessas esferas - figura 61.

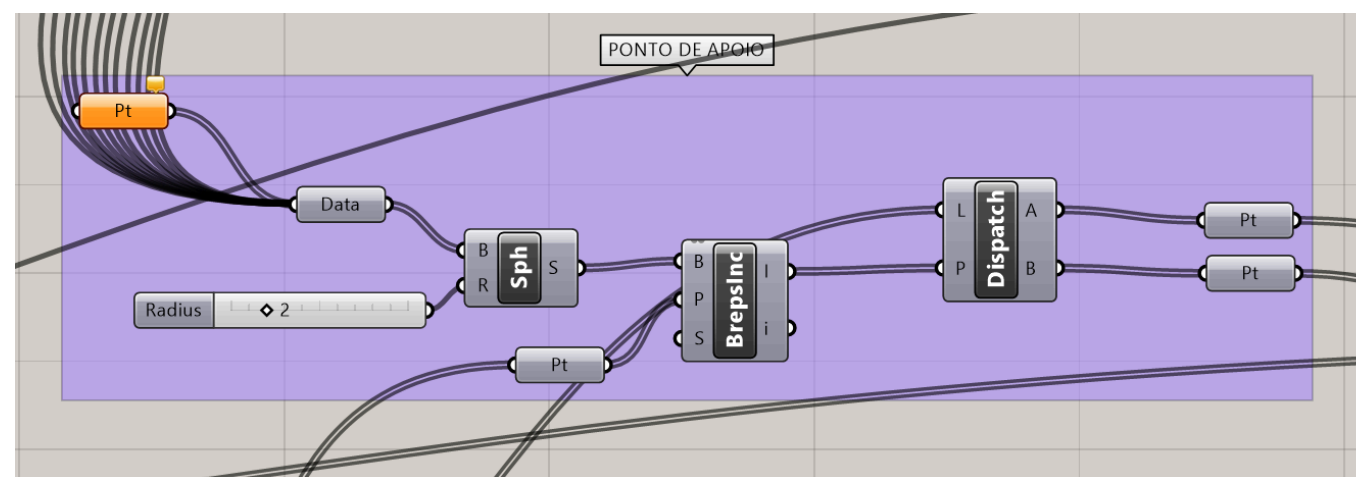
Figura 61 – Construção da malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pontos identificados são classificados via *Dispatch*, sendo divididos entre aqueles que devem permanecer fixos (âncoras) e aqueles que permanecerão livres para deformação. Os pontos restritos são convertidos em elementos do tipo *Anchor* ou *AnchorXYZ*, os quais atuarão como apoios durante a simulação - figura 62.

Figura 62 – Ancoragem dos pontos de apoio



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.1.3. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS FÍSICOS (GOALS) DA SIMULAÇÃO

O algoritmo então estrutura os objetivos físicos que irão guiar o comportamento da malha ao longo da simulação com o Kangaroo:

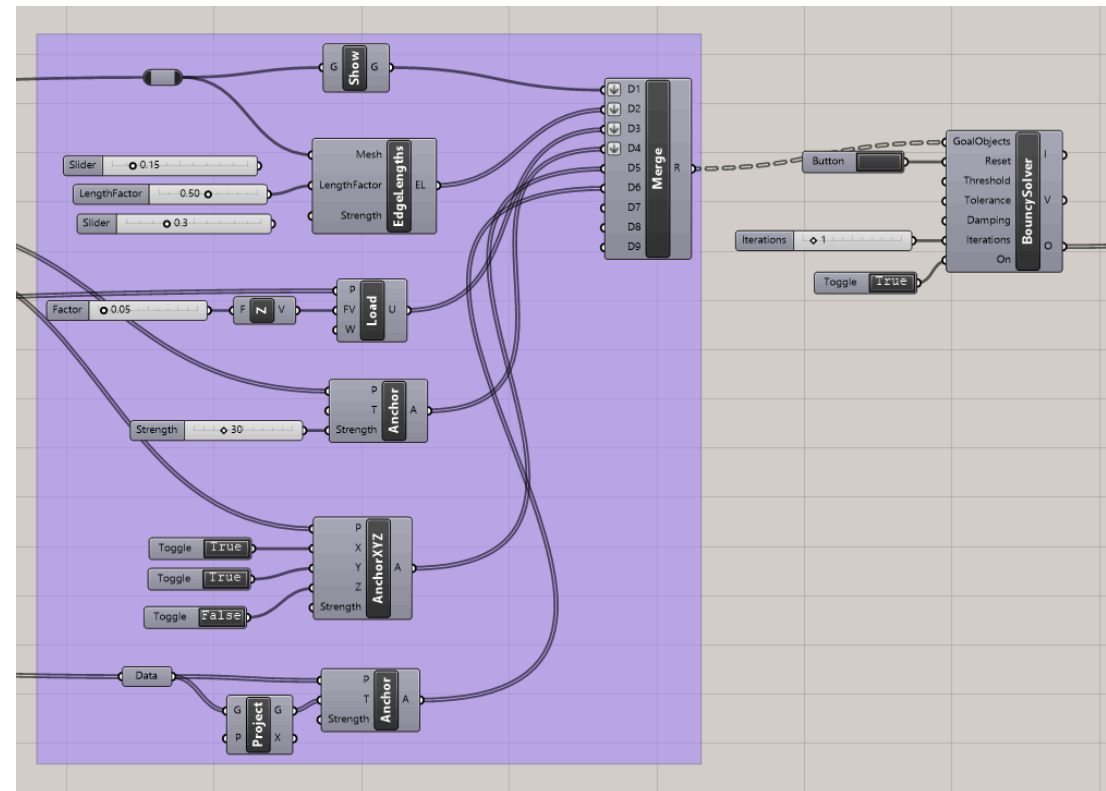
- I. O componente *EdgeLengths* é utilizado para manter a regularidade dos triângulos da malha, evitando distorções abruptas. Isso garante que, mesmo deformada, a geometria mantenha sua integridade estrutural.
- II. *Load* é aplicado com vetores dirigidos no eixo Z negativo, simulando a ação da gravidade sobre a malha. O valor de intensidade pode ser ajustado, permitindo explorar variações de tensão e comportamento formal.
- III. Os pontos fixos identificados anteriormente são inseridos como *Anchor* e *AnchorXYZ*, impedindo que determinadas

partes da malha se movam durante a simulação.

IV. Além disso, o componente *Project* pode ser usado para garantir que certos pontos permaneçam em contato com superfícies de base, mantendo o vínculo com o terreno ou com elementos de suporte.

- V. Todos esses objetivos são reunidos em um único fluxo por meio do componente *Merge*, e, em seguida, enviados ao *BouncySolver*, o núcleo de simulação do Kangaroo.

Figura 63 – Construção dos sistemas de ancoragem da malha e simulação

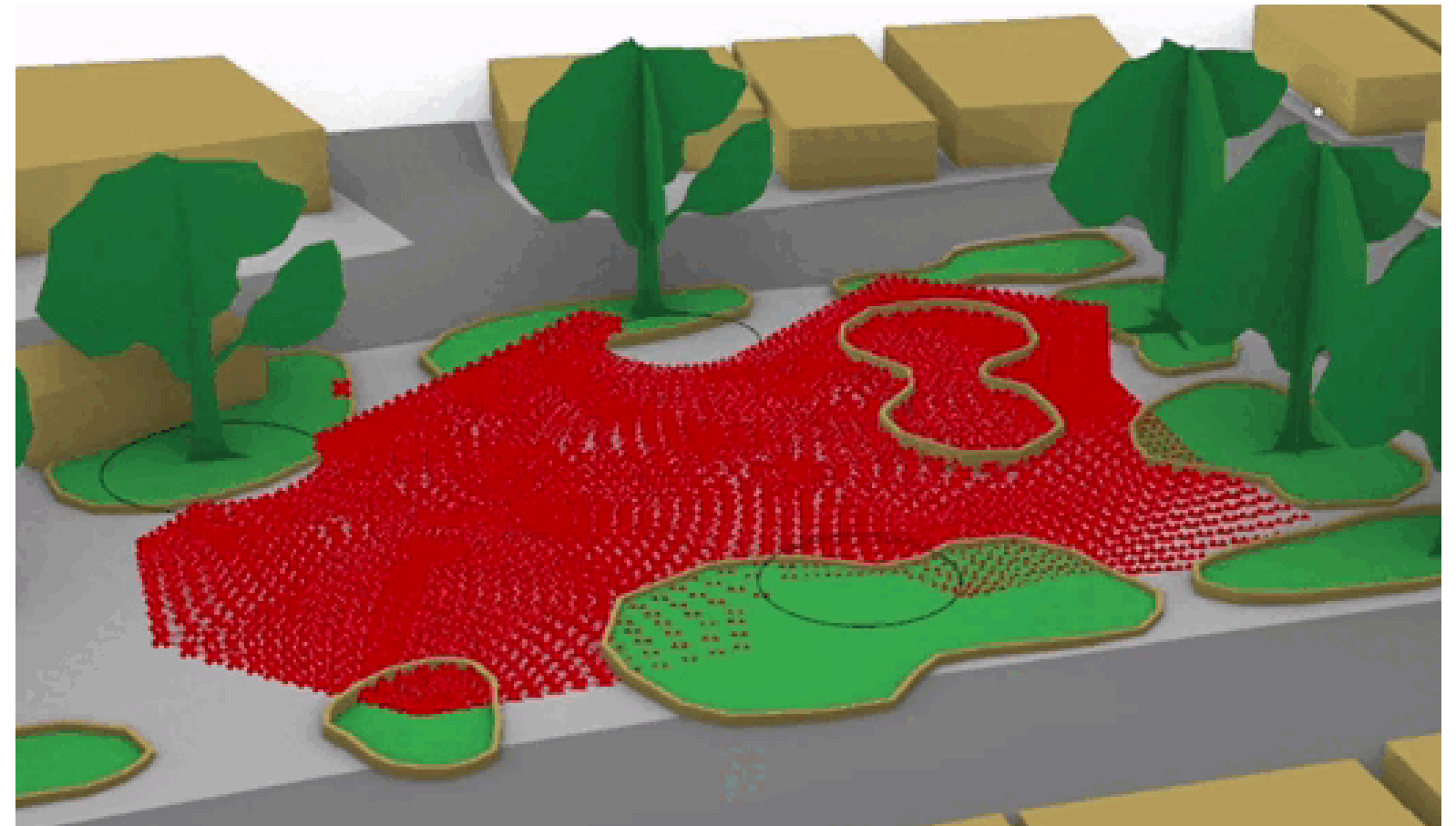


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.1.4. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO: FORMA EM EQUILÍBRIO

Ao ativar o *BouncySolver*, a malha é submetida à ação simultânea das cargas simuladas e das restrições impostas pelos pontos de ancoragem. O sistema busca, então, uma configuração de mínima energia, resultando numa superfície deformada de maneira natural e fluida — frequentemente assumindo uma forma de concha ou membrana tensionada - figura 64.

Figura 64 – Simulação da malha



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa forma não é arbitrária, mas consequência direta das forças que atuam sobre a malha e das condições espaciais impostas. O resultado é uma geometria que conjuga leveza estrutural, aderência ao entorno e viabilidade construtiva, servindo como estudo preliminar para soluções arquitetônicas integradas ao comportamento físico e à lógica material do espaço - figura 65.

Figura 65 – Malha definida.

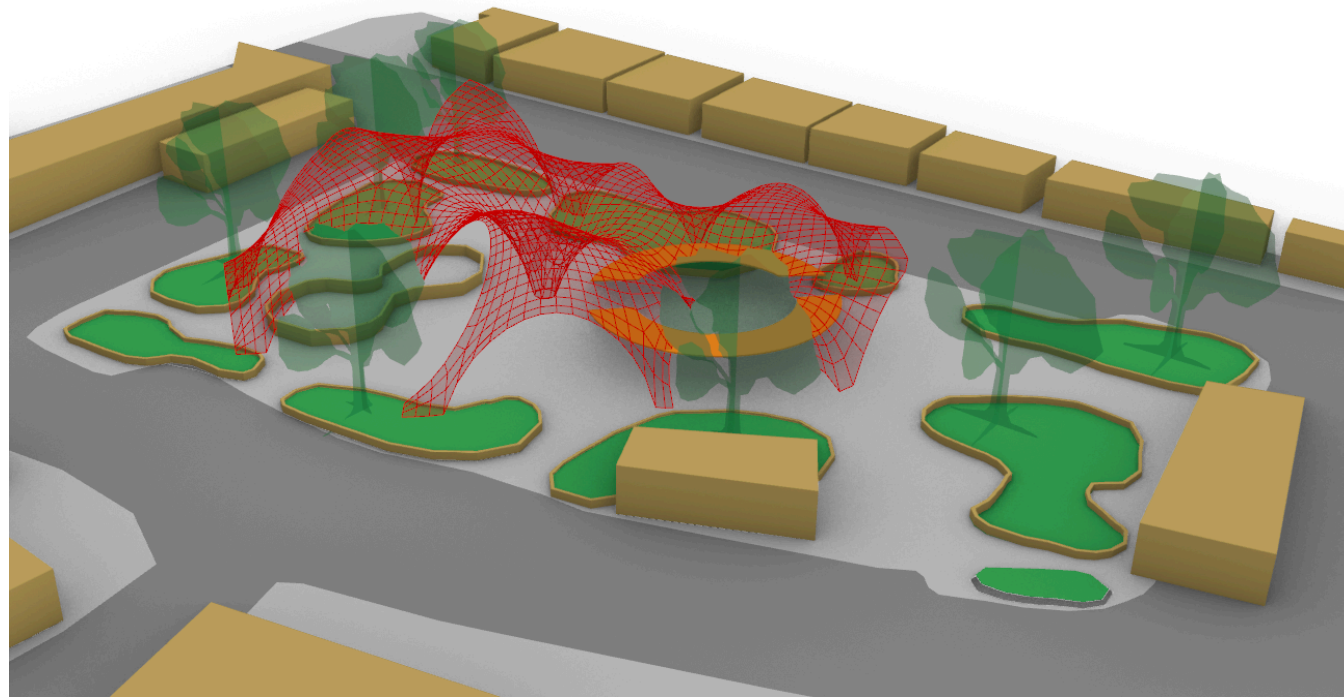


Figura 66 – maminha-de-porca

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.2. FORM FINDING: MALHA (MESH)

Nesta fase, a intenção é explorar a transformação da malha original em uma geometria tridimensional mais expressiva, composta por uma tesselação de pirâmides, sendo a primeira analogia perante a natureza que será trabalhado. Esta abordagem parte da malha triangular gerada anteriormente e propõe sua elevação formal, inspirada na lógica das superfícies dos gomos da “maminha-de-porca” - figura 66.

A qual exibe uma disposição radial de facetas que lembra pequenas pirâmides truncadas. Cada segmento projeta-se em relevo sobre a superfície do fruto/casca, criando micro-sombras que se alternam conforme o ângulo da luz solar.



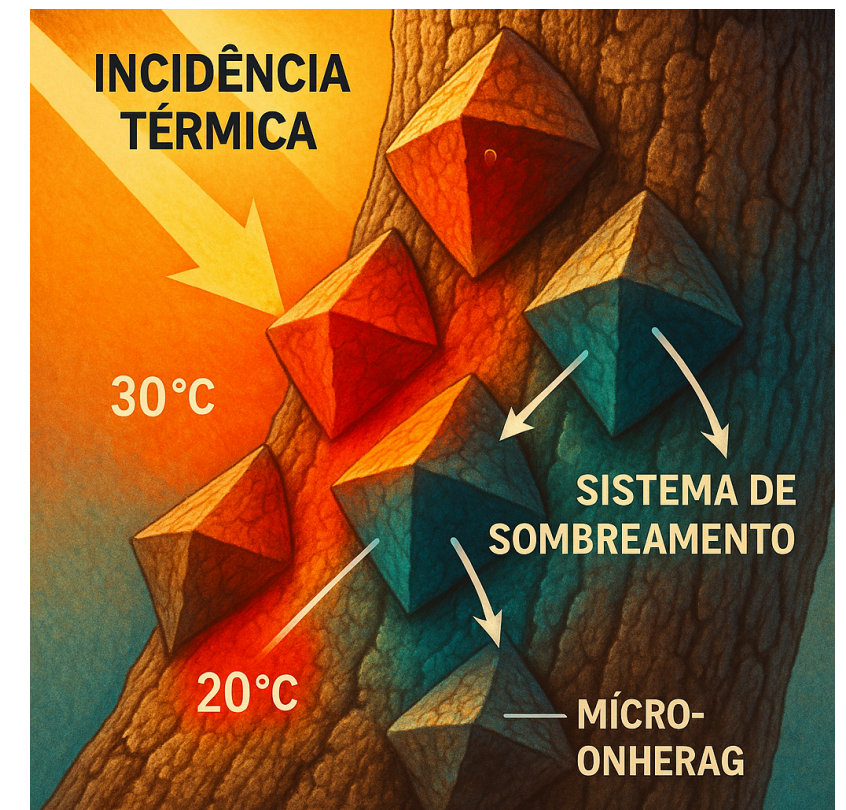
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, trazendo consigo uma alusão a analogia simbólica. Sendo esse arranjo — um verdadeiro mosaico de pirâmides em escala reduzida — cumpre duas funções térmicas:

- 62
- I. Sombreamento local: as faces inclinadas reduzem a exposição direta dos tecidos subjacentes, mantendo a temperatura interna mais baixa do que a média externa, mesmo sob sol intenso.
  - II. Regulação de calor: ao projetar repousos de sombra contínuos, os gomos diminuem a perda de água por evaporação e retardam o aquecimento superficial, contribuindo para a homeostase hidráulica do fruto/casca.

Em termos de biomimética, essa tesselação piramidal pode ser entendida como um sistema natural de “células solares” invertidas: em vez de captar energia, ele modula e dispersa o calor - figura 67.

Figura 67 – Analogia simbólica da maminha-de-porca



Fonte: Elaborado pelo autor.

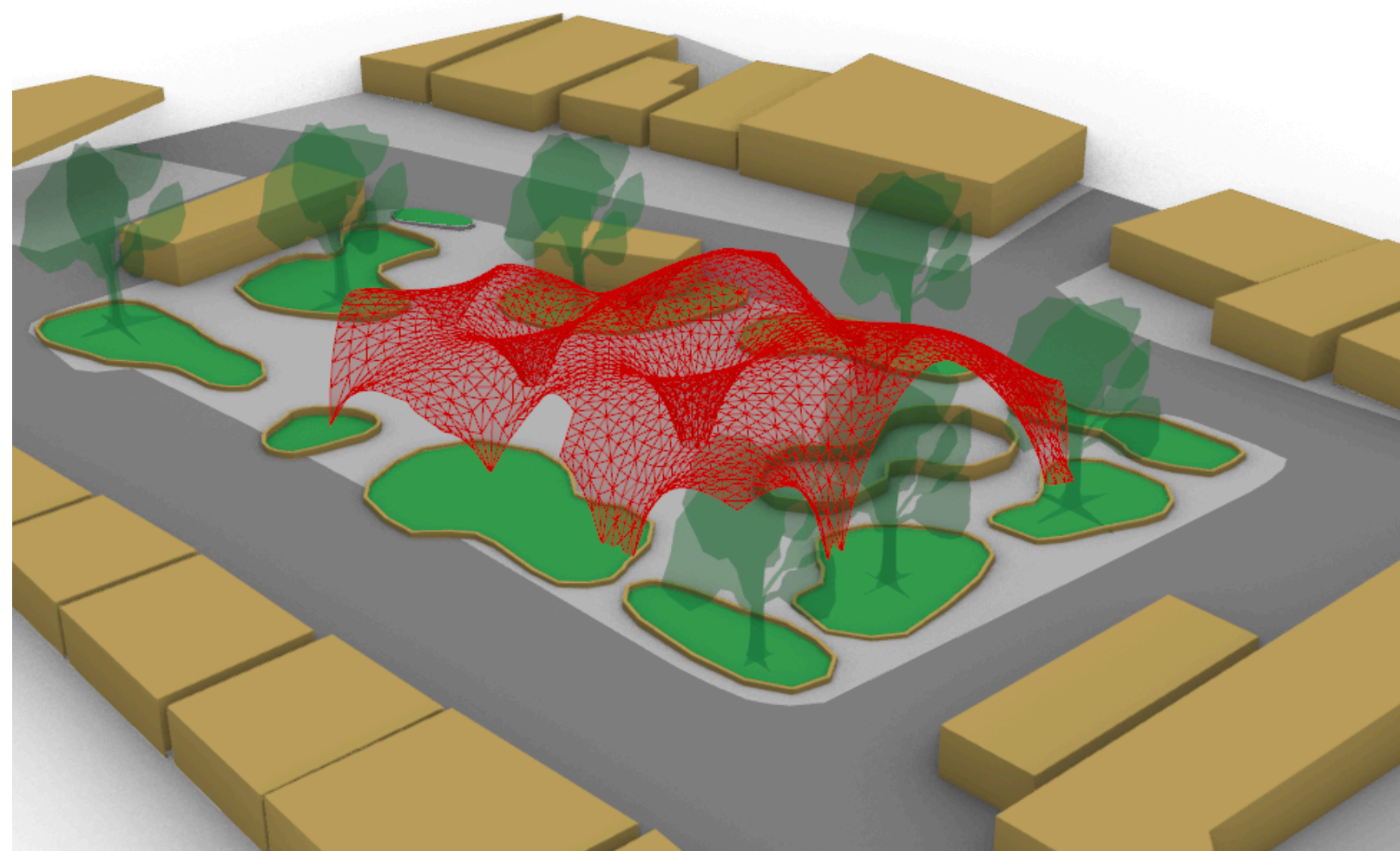
Após esse traçado argumentativo, tal estratégia é traduzida desta forma ao modelo, sendo demonstrado ao decorrer a sua confecção.

#### 5.1.2.1. CONVERSÃO DA MALHA E CRIAÇÃO DE VETORES DE EXTRUSÃO

Essa etapa consiste na conversão da superfície de base em uma malha triangular regular, realizada por meio do componente *TriRemesh*. Essa malha funciona como o suporte estrutural sobre o qual se desenvolverá a volumetria tridimensional.

Uma vez estabelecida essa base, cada face triangular é tratada individualmente: extrai-se seu ponto central — o centróide — e, a partir dele, avalia-se a normal da superfície, isto é, a direção perpendicular à sua face - figura 68.

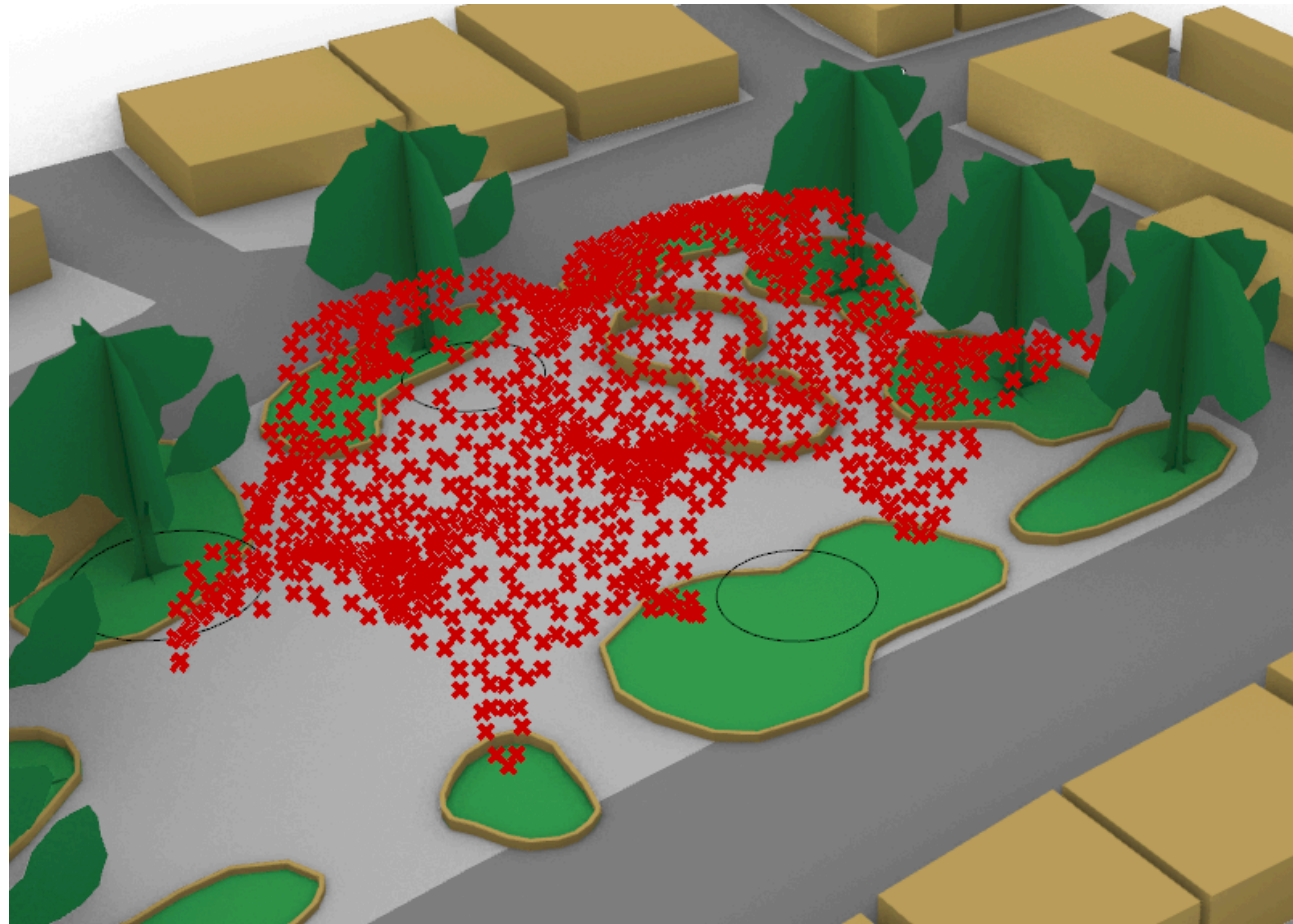
Figura 68 – Reconstrução da malha



Fonte: *Elaborado pelo autor.*

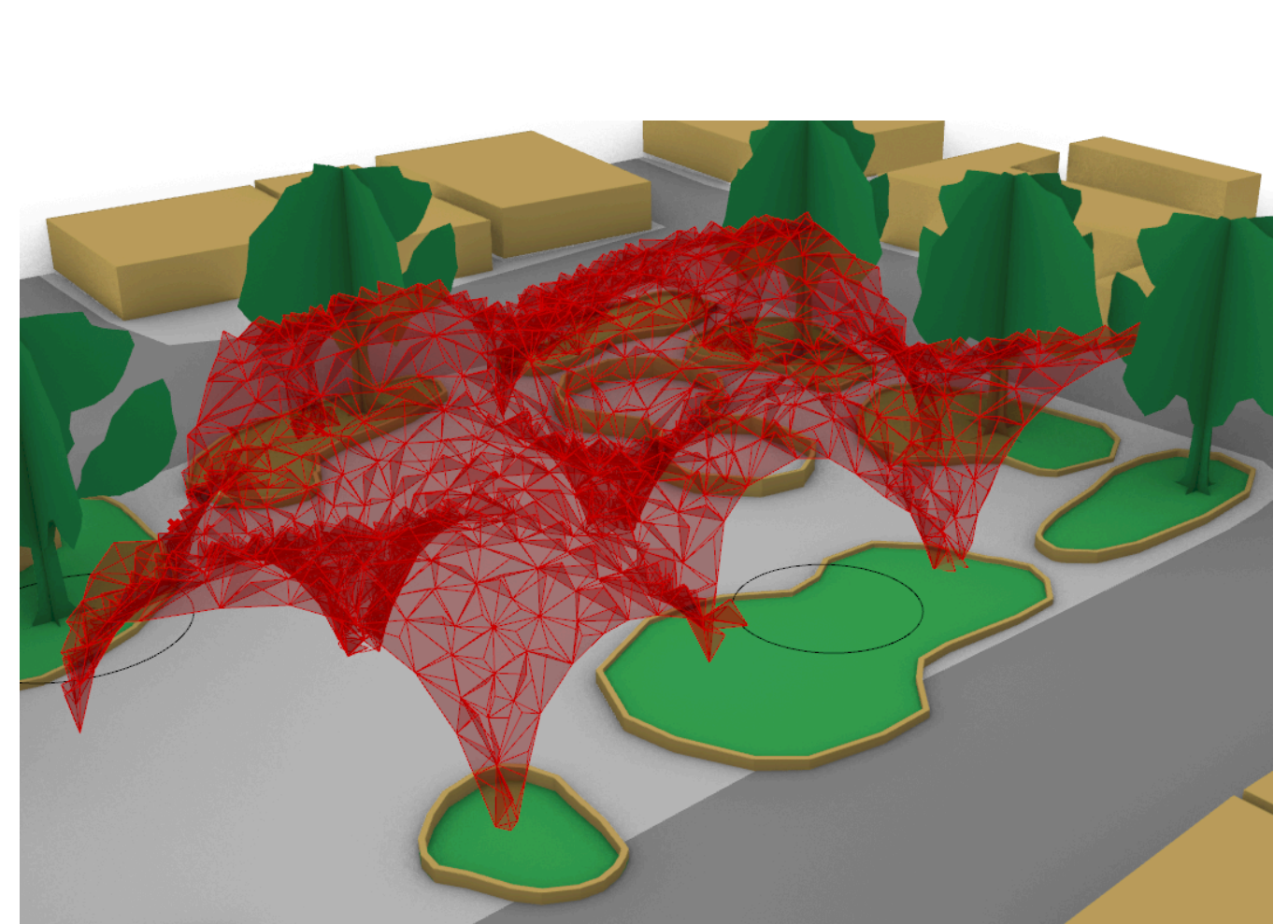
A normal de cada triângulo é então utilizada como vetor-guia para uma extrusão paramétrica. A ideia é deslocar o ponto central ao longo da direção da normal - figura 69, com uma altura definida por um slider, de modo que surja um novo ponto elevado, que funcionará como o ápice de uma pirâmide.

Figura 69 – Extração dos pontos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70 – Malha com pirâmides facetadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.2.2. CONSTRUÇÃO DA MALHA VAZADA

Com os ápices definidos, cada triângulo original passa a ser subdividido em três novas faces, conectando seus vértices originais ao ponto elevado. Essa operação é aplicada sistematicamente à malha, resultando em uma nova configuração geométrica: uma malha piramidal, composta por elementos pontiagudos, repetidos e interligados. A malha final possui, assim, um comportamento visual fluido e ao mesmo tempo fragmentado — uma síntese entre a leveza do tecido e a rigidez da tesselação.

Cada triângulo da malha recebe uma extrusão a partir de seu centro, gerando uma superfície facetada com variações de altura e direção, permitindo uma leitura topográfica e dinâmica da forma - figura 70.

#### 5.1.2.3. POTENCIAL DE SIMULAÇÃO E INTEGRAÇÃO AO SISTEMA FÍSICO

Embora essa malha possa ser utilizada diretamente como proposta formal, ela também pode ser integrada ao sistema de simulação física desenvolvido na primeira estratégia, utilizando o plugin Kangaroo. Os novos vértices (ápices das pirâmides) podem ser considerados como pontos de ancoragem flutuante, submetidos a forças simuladas de gravidade ou tensão. Assim, é

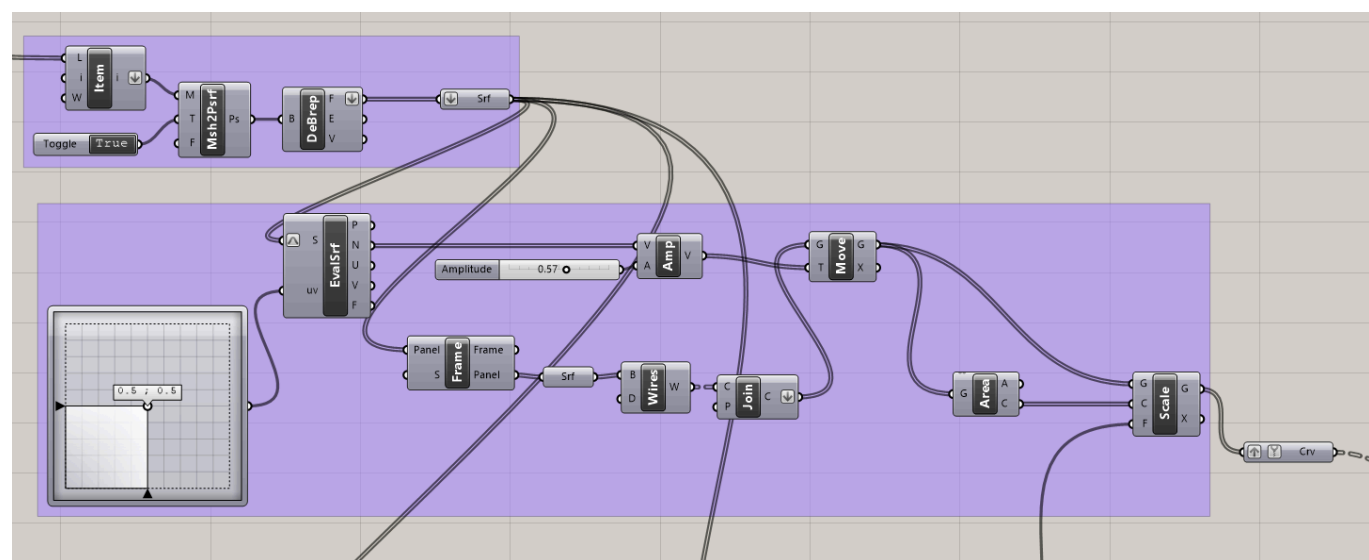
possível explorar como essa malha reage a deformações e cargas físicas, encontrando novos estados de equilíbrio formal.

Componentes como *Load*, *EdgeLengths* e *AnchorXYZ* podem ser novamente aplicados, promovendo um segundo estágio da forma, agora sobre uma geometria mais complexa. O resultado é uma malha viva, capaz de se adaptar às condições impostas, ao mesmo tempo em que preserva seu caráter expressivo e experimental.

#### 5.1.2.4. FLUXO GERAL ADAPTADO

Sua organização em módulos triangulares permite desde aplicações em coberturas leves até o uso como sistemas de fachada ou mobiliário urbano. O uso da extrusão orientada por normais assegura que a forma surja a partir da lógica da própria malha — não como um gesto arbitrário, mas como um desdobramento natural da estrutura subjacente - 71.

Figura 71 – Variação da escala dos pirâmides



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.1.3. FORM FINDING: VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

A terceira estratégia propõe a integração de variáveis climáticas à malha paramétrica desenvolvida. A proposta central é analisar como a geometria simulada interfere nas condições de radiação solar do local, utilizando os recursos do plugin Ladybug, amplamente aplicado em simulações ambientais no ambiente Grasshopper®.

##### 5.1.3.1. INCORPORAÇÃO DO CONTEXTO URBANO E PREPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Para que o algoritmo do Ladybug funcione adequadamente, é necessário que o modelo tridimensional da área contenha não apenas a malha em análise, mas também a volumetria do entorno urbano. Assim, foi extraído um trecho do contexto edificado da Cidade de Goiás (Goiás Velho), e esse recorte foi inserido no Grasshopper® como parte da simulação.

O conjunto de volumes adjacentes foi convertido em geometria compatível com os componentes de radiação solar, servindo como parâmetro para cálculo de sombras e interferências ao longo do ano. A

malha a ser analisada foi inserida no mesmo sistema, permitindo

que a simulação levasse em conta sua influência no ambiente imediato.

##### 5.1.3.2. ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR ACUMULADA

Com os dados organizados, procedeu-se à simulação de radiação solar incidente acumulada ao longo de um ano, um dos *outputs* mais relevantes do *plugin Ladybug*. Essa análise permite visualizar a quantidade de energia solar que incide sobre cada superfície ao longo dos 12 meses, expressa em kWh/m<sup>2</sup>.

Na primeira figura 72 observa-se a incidência solar sobre o terreno sem a presença da malha. Os pontos mais críticos de radiação são destacados em tons avermelhados, indicando áreas com alto potencial de absorção solar, enquanto as áreas mais sombreadas aparecem em azul e roxo.

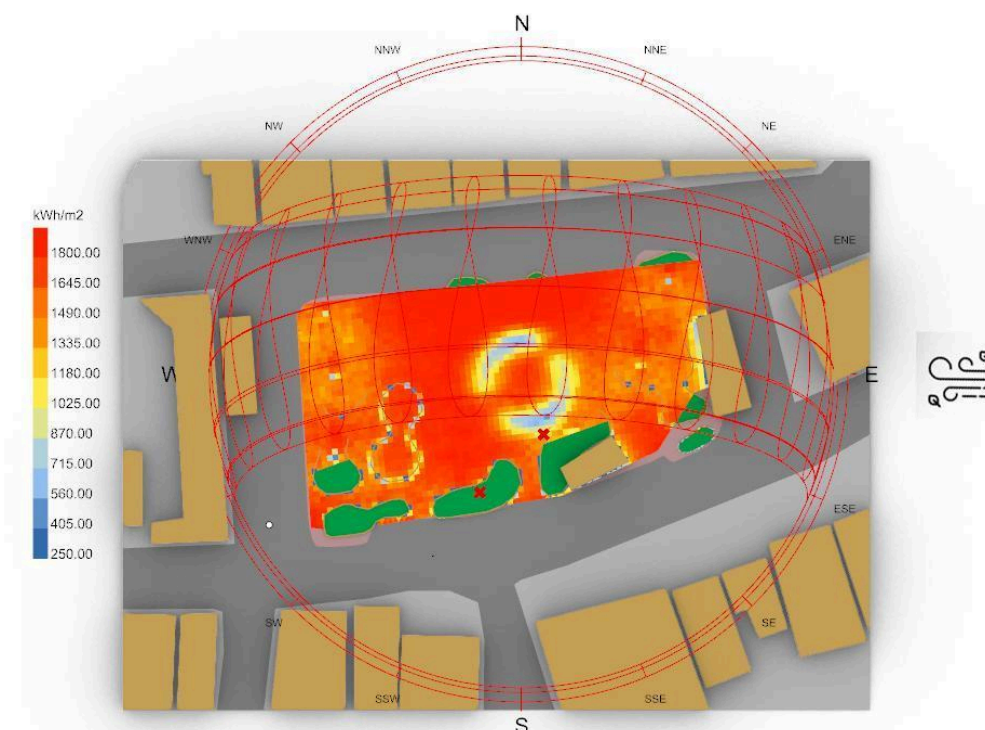
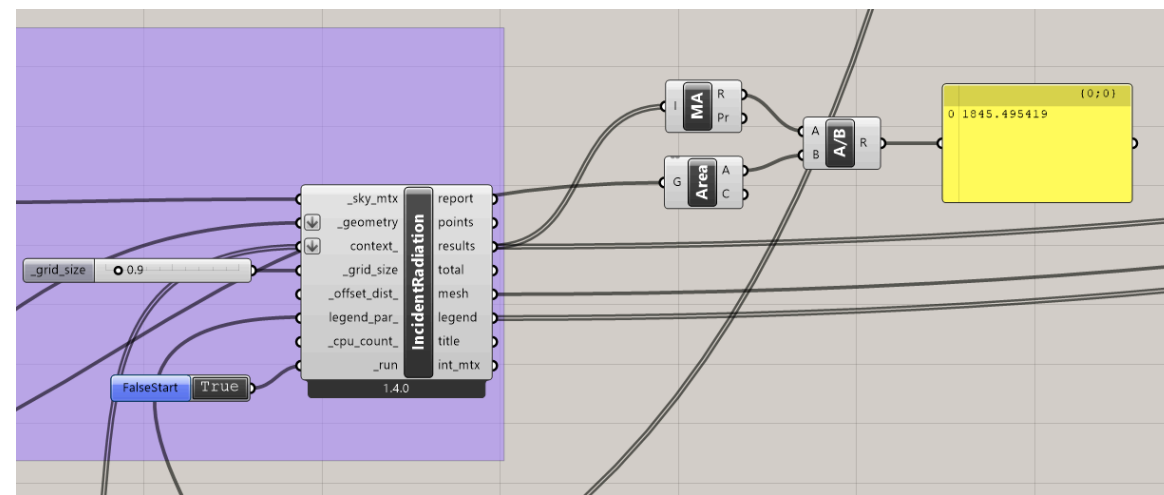


Figura 72 – Cartas solar e estudo de insolação II

Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando do componente *Incident Radiation* - figura 73, o resultado padrão é um mapa de calor na malha, a qual cada face tem um valor de radiação incidente. Mas para análises quantitativas — tipo “quanto de energia solar total chega nessa fachada?” será utilizado do *output results*, em conjunto com outro componente *Mass Addition*, representando assim a soma de todos os valores de radiação solar incidente - unidade de medida kWh - em todas as *faces* do *mesh* da fachada analisada, durante o período anual. Além, para conciliar o resultado com o padrão utilizado, é feita a divisão da radiação total pela área da superfície - 2.233 m<sup>2</sup>

Figura 73 – Cartas solar e estudo de insolação II



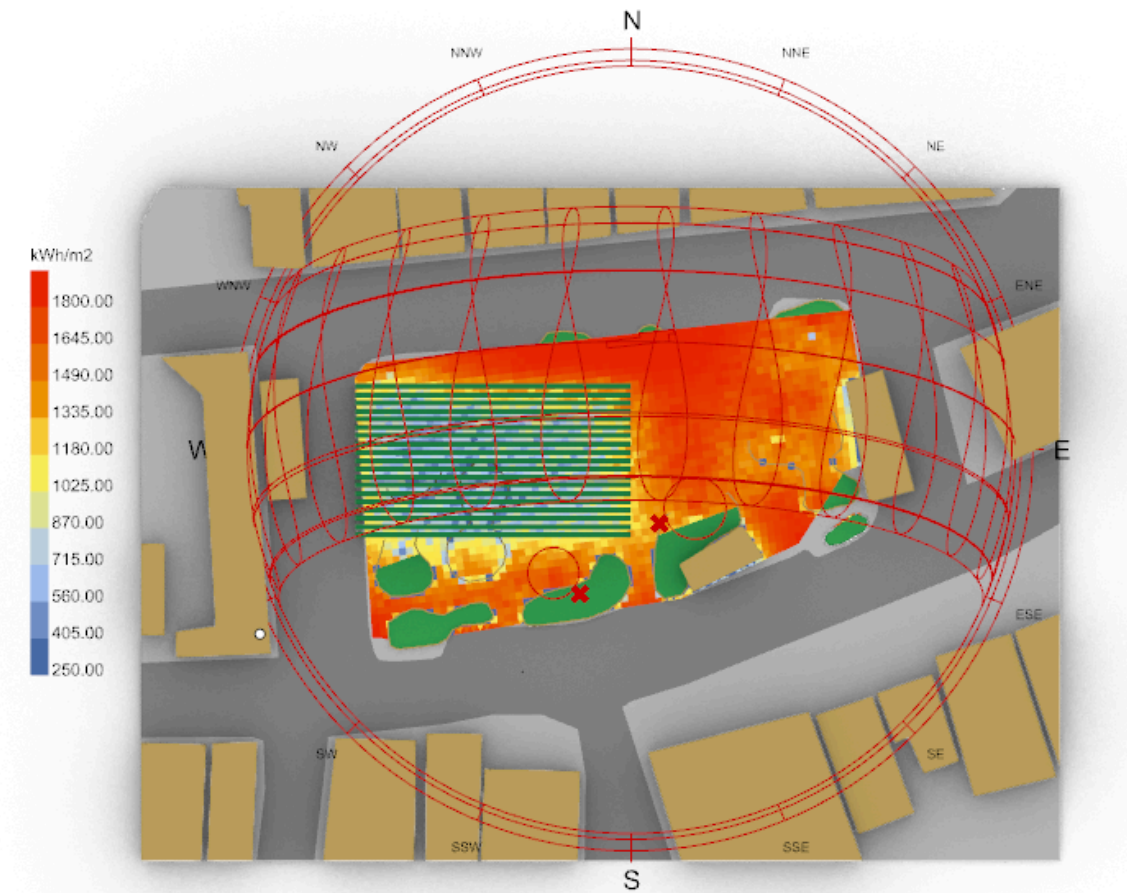
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa maneira, é feita a simulação do existe sem cobertura alguma, tendo concentração de 1.845,49 kWh/m<sup>2</sup>.

Na sequência foi feito uma geometria de pergolado no mesmo campo onde será adotado a estrutura do pavilhão, - figura

74. Assim retomando a ideia de sua em comparação com uma construção sem utilização do algoritmo utilizado.

Figura 74 – Cartas solar e estudo de insolação II

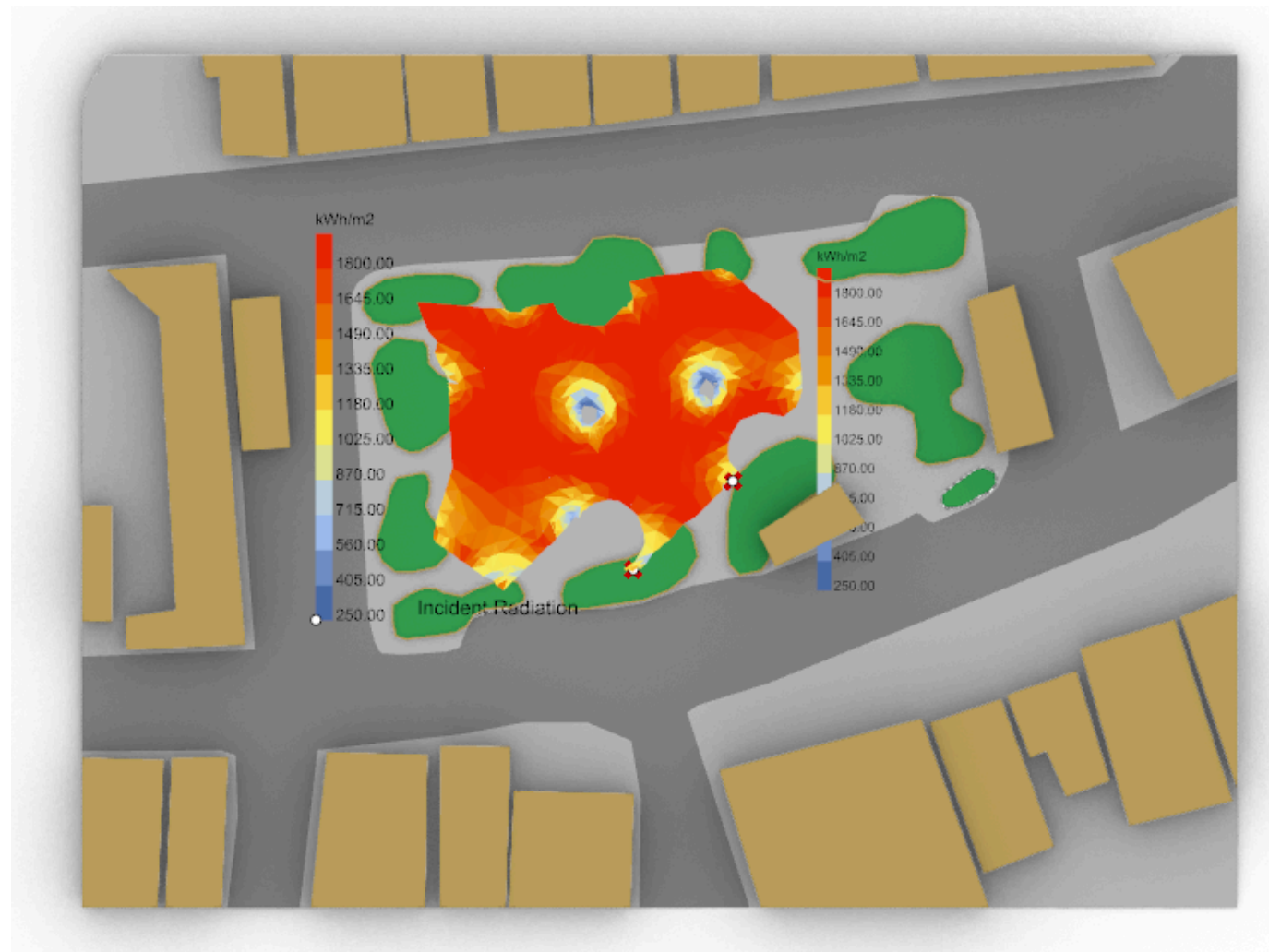


Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal estratégia obteve um resultado de 1.445,14 kWh/m<sup>2</sup>.

Na sequência - figura 75 e 76, insere-se a malha desenvolvida nas estratégias anteriores para avaliar sua interferência no padrão de insolação. O resultado revela modificações significativas nas zonas de maior incidência, com surgimento de áreas sombreadas sob os pontos mais elevados da malha. Isso demonstra que a geometria proposta, mesmo sendo leve e parcialmente perfurada, já exerce papel ativo no sombreamento do espaço, alterando as condições de conforto térmico e de absorção solar.

Figura 75 – Comparação dos cenários de insolação com e sem o pavilhão

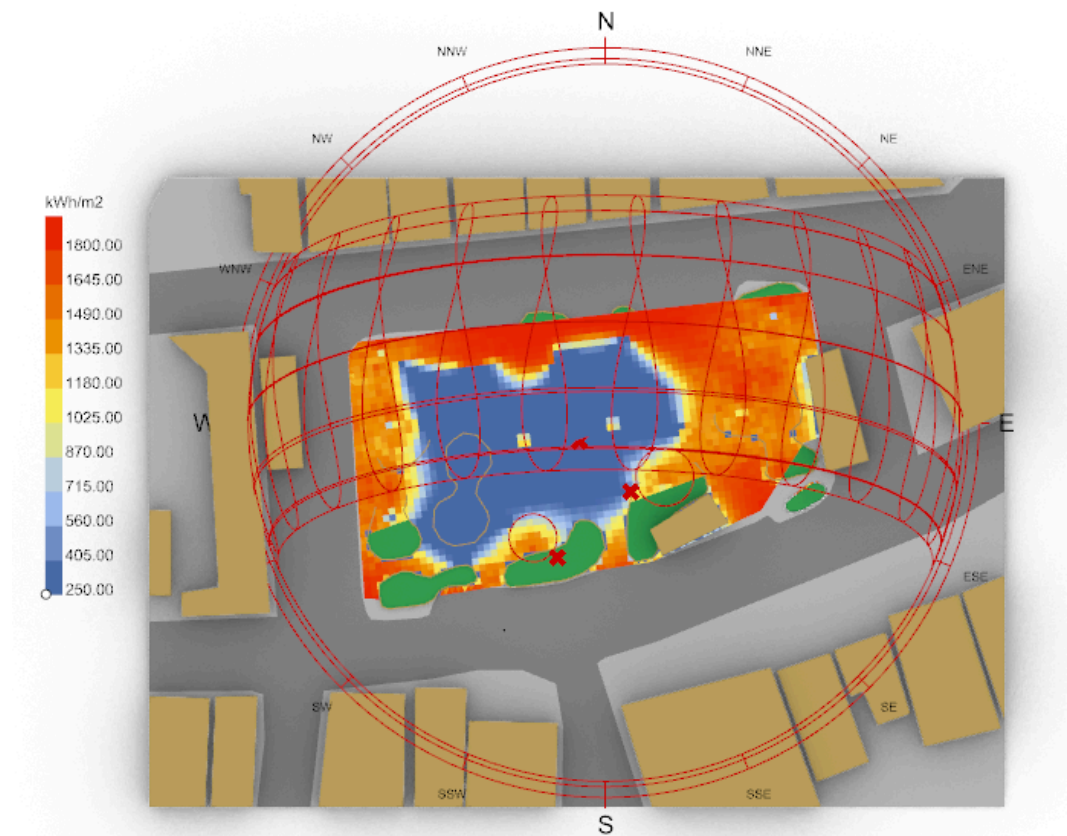


Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa comparação direta entre os dois cenários — com e sem a malha — é fundamental para compreender como a forma impacta o desempenho climático do local. A leitura dos mapas de radiação permite orientar decisões de projeto como a posição ideal de espaços de permanência, inserção de vegetação

complementar, ou implantação de elementos técnicos como brises, placas fotovoltaicas e aberturas. E deu um resultado de 1.084,86 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 76 – Comparação dos cenários de insolação com e sem o pavilhão



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3.3. TRAJETÓRIA SOLAR APLICADA AO MODELO

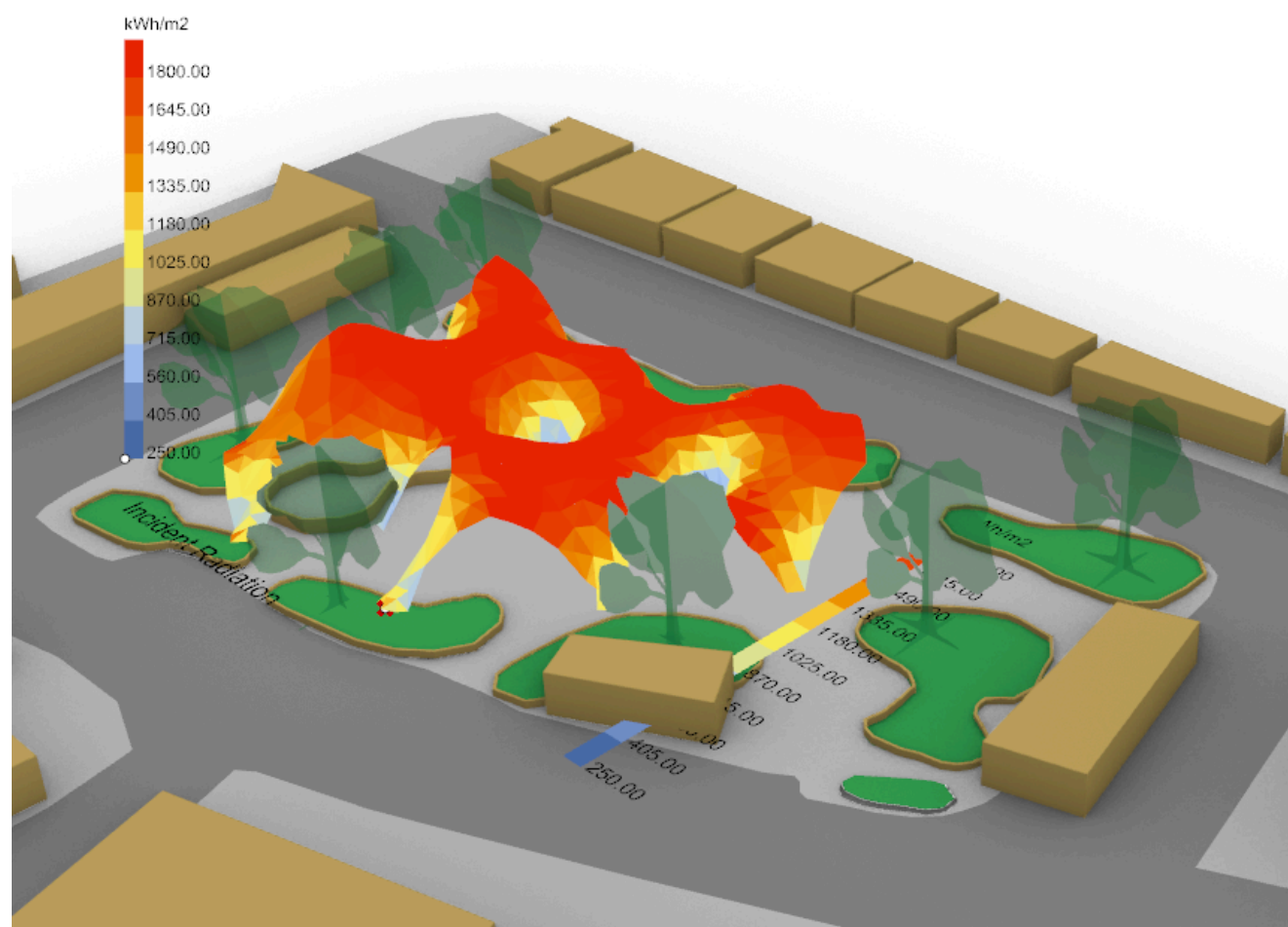
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da radiação acumulada, o estudo foi aprofundado com o uso do componente de trajetória solar (*Sun Path*) do Ladybug. Diferente da carta solar tradicional, a visualização direta da trajetória sobre o modelo permite entender de forma mais intuitiva como o sol percorre o espaço ao longo do dia e das estações do ano.

Essa visualização fornece suporte direto à tomada de decisão, ao permitir, por exemplo, filtrar as posições solares por temperatura ou horários específicos.

É possível, - figura 77 - com isso, identificar em quais momentos do ano determinadas superfícies da malha estarão expostas ou protegidas, antecipando o comportamento térmico do projeto em desenvolvimento.

Figura 77 – Incidência de solar no pavilhão



Fonte: Elaborado pelo autor.

O uso combinado dessas simulações — radiação acumulada e trajetória solar — confere ao processo de *form finding* uma nova camada de complexidade: a resposta climática.

A malha deixa de ser apenas um experimento formal ou estrutural e passa a atuar como mediadora das variáveis ambientais, orientando o projeto com base em dados objetivos do lugar.

## 5.2. PRIMEIRO ENSAIO: ESTRUTURA RESPONSIVA

Nesta atual fase, o objetivo é configurar uma estrutura responsiva, capaz de se adaptar climaticamente às condições do local a partir da modulação de suas aberturas.

A malha desenvolvida na segunda fase do item anterior — composta por uma tesselação triangular — é agora refinada para permitir ajustes locais em seus elementos. Cada triângulo da malha passa a operar como um módulo adaptável, cujas aberturas variam de acordo com os níveis de insolação identificados na análise do Ladybug.

Para isso, são geradas duas curvas para cada triângulo:

- I. A curva externa

corresponde ao triângulo original, proveniente da malha base.

- II. A curva interna é uma versão escalada dessa geometria, cuja escala é controlada por um fator derivado da radiação solar incidente. Ou seja, quanto

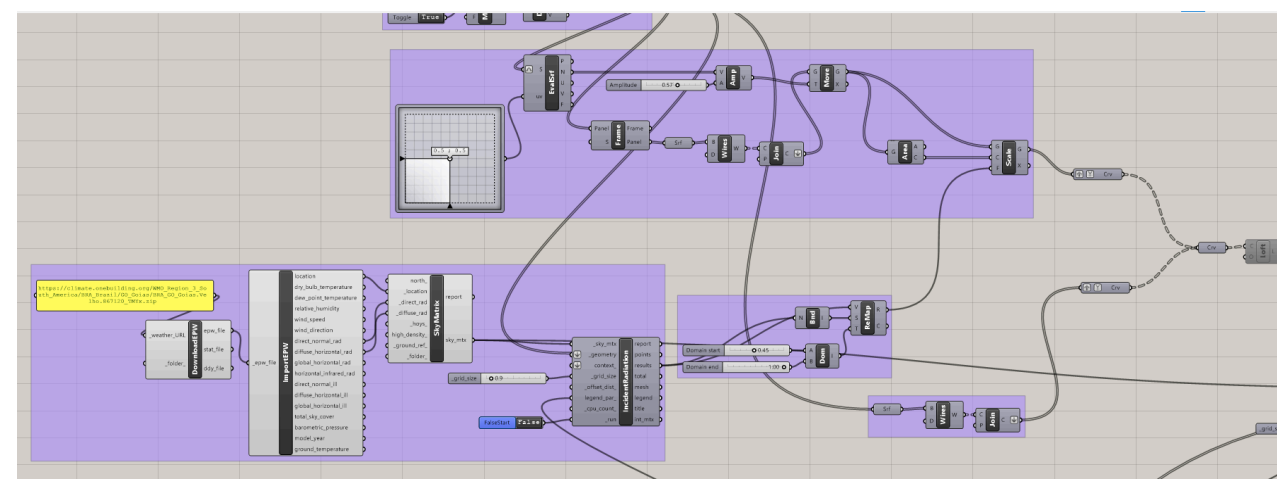
maior a insolação naquela face, menor será a abertura interna — reduzindo a transmissão de radiação direta para o espaço abaixo da cobertura.

Essas duas curvas são conectadas por meio de um Loft, criando uma geometria tridimensional que se comporta como uma aba ou véu ajustável. A modulação se dá de forma gradual e distribuída, acompanhando os dados de insolação acumulada obtidos ao longo do ano.

### 5.2.1. DO ALGORITMO AO COMPORTAMENTO ESPACIAL

O algoritmo apresentado- figura 78- mostra a lógica paramétrica utilizada para gerar os triângulos adaptativos. As curvas são extraídas da malha existente, e o fator de escala da abertura é controlado a partir de uma operação de Remap, que interpreta os dados de radiação solar simulados pelo Ladybug e os transforma em coeficientes de transformação geométrica.

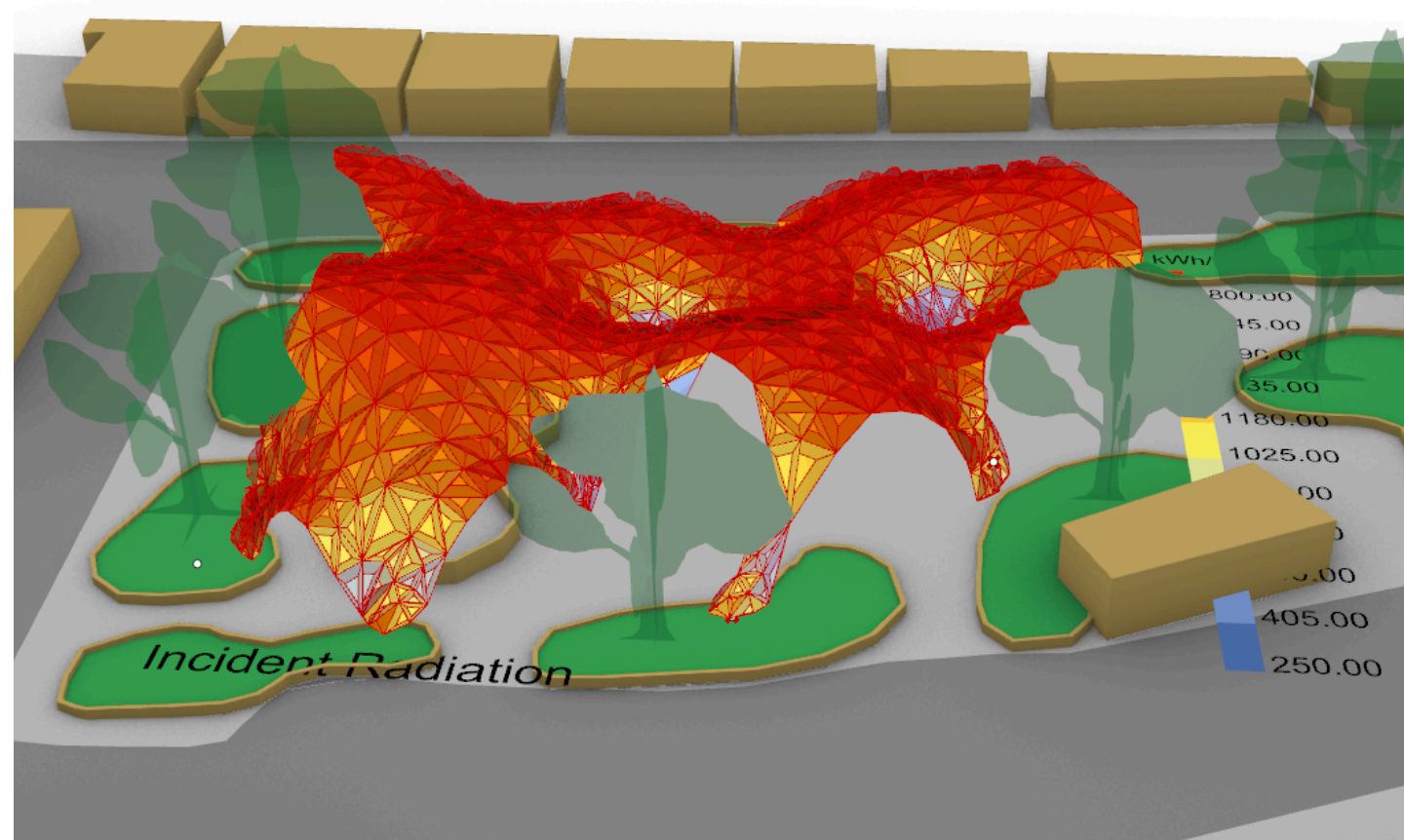
Figura 78 – Construção das pirâmides facetadas alteradas perante a incidência solar



Fonte: Elaborado pelo autor.

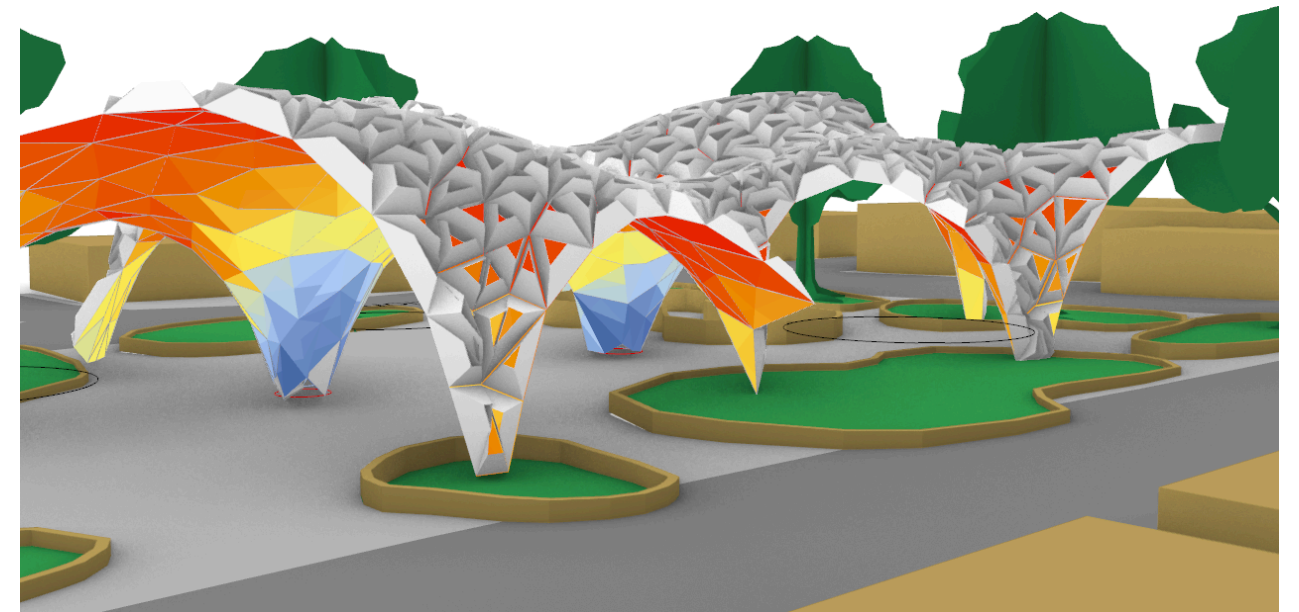
Na figura 79, já se observa o resultado da aplicação da simulação climática sobre a malha: os triângulos apresentam variações perceptíveis em suas aberturas, respondendo diretamente às zonas de maior ou menor carga solar. Essa resposta formal permite a redução da radiação direta nos pontos críticos, ao mesmo tempo em que preserva a ventilação e o caráter leve da cobertura. Sendo possível ver na figura 80 como acontece a distinção entre as diversas aberturas respondendo a radiação.

Figura 79 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha



Fonte: Elaborado pelo autor

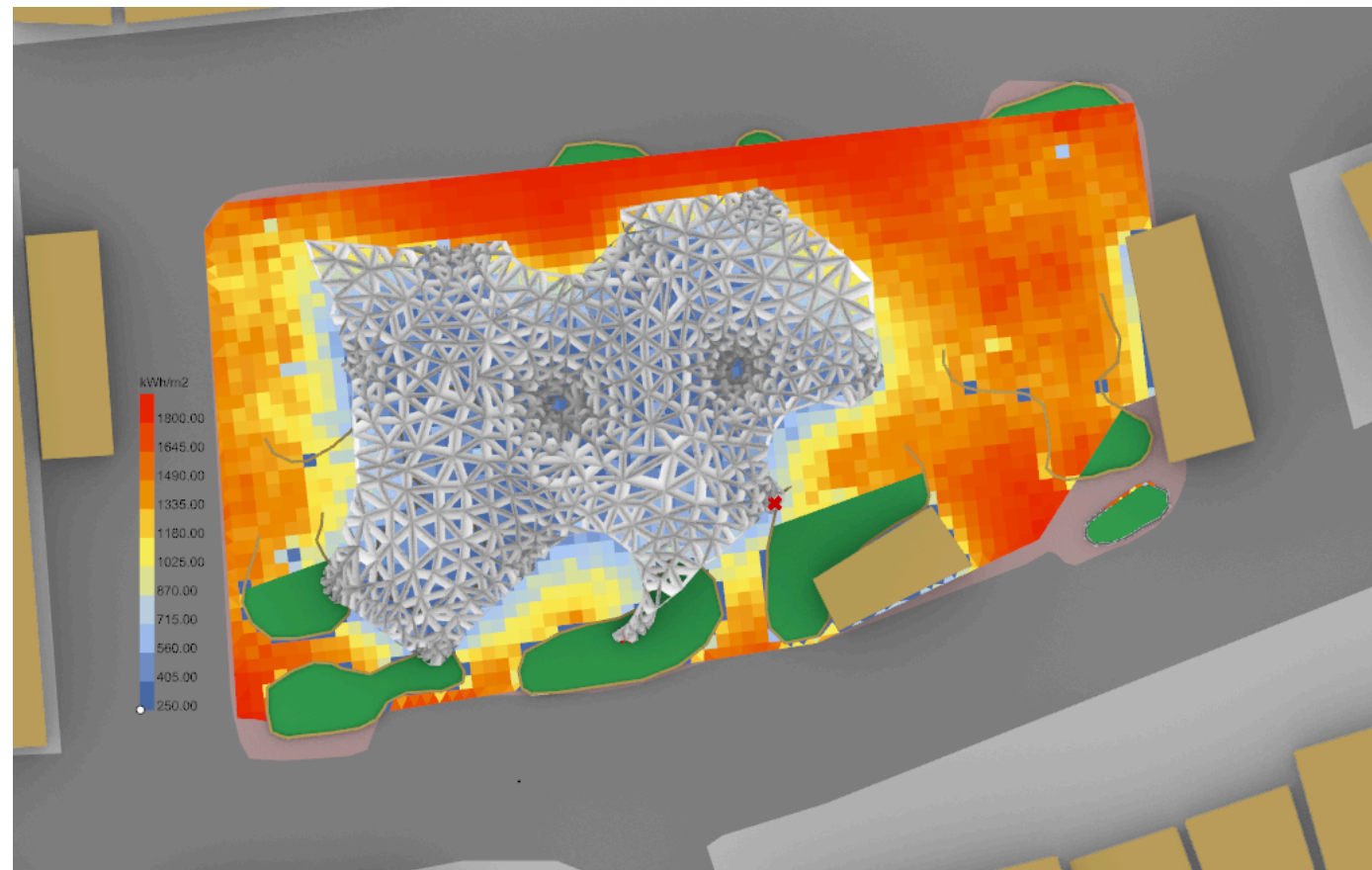
Figura 80 – Ensaio responsivo: detalhe em relação às aberturas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 81 e 82 revela os efeitos concretos da malha responsiva sobre o ambiente do terreno. A análise de radiação acumulada indica zonas com significativa redução da carga térmica.

Figura 81 – Terreno com pavilhão e incidência solar



Fonte: Elaborado pelo autor.

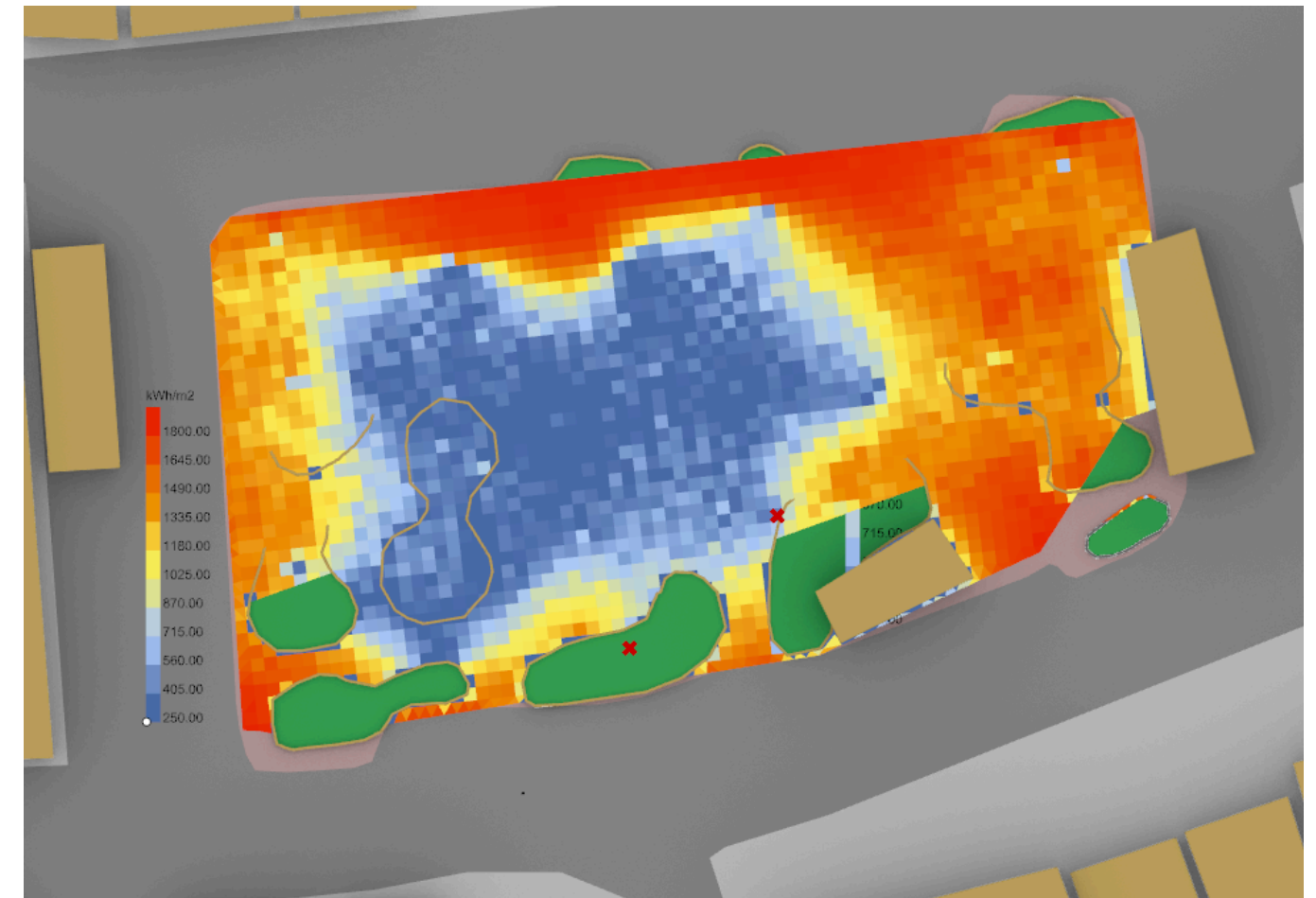


Figura 82 – Terreno com o pavilhão oculto e incidência solar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, o resultado final do ensaio proposto, em relação ao índice trabalhado, é de 1.156,55 kWh/m<sup>2</sup>m comparação ao cenário-base (modelo inicial, sem cobertura), observa-se uma redução do indicador, o que — no escopo desta análise — é interpretado como aumento de eficiência da estratégia, por reduzir a incidência energética sobre o espaço e, portanto, a exposição aos fenômenos de radiação. A figura 83 retrata a perspectiva da mesma simulação, a fim de esclarecer dúvidas em relação à forma. E a figura 84 apresenta um corte esquemático para compreender diferentes alturas do pavilhão.

Figura 83 – Ensaio responsivo: perspectiva do índice de incidência

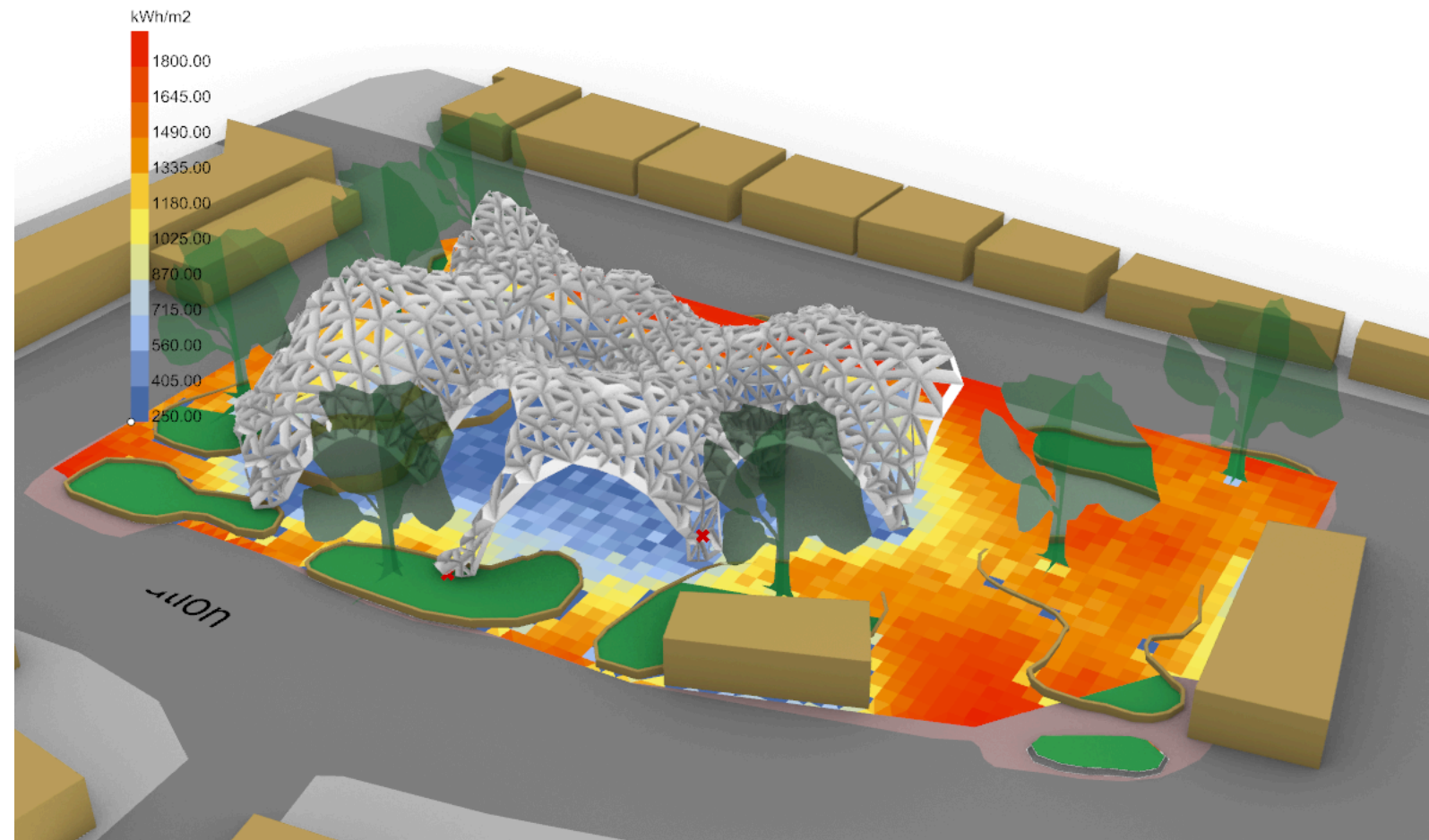
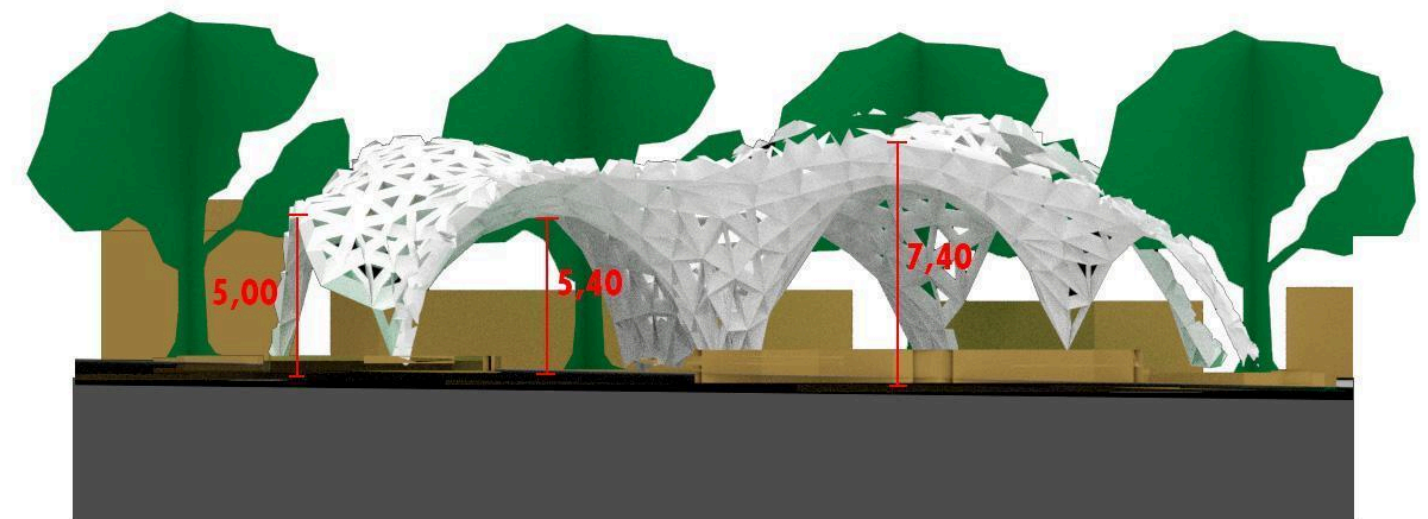


Figura 84 – Ensaio responsivo: Distinção entre alturas

Fonte: Elaborado pelo autor.

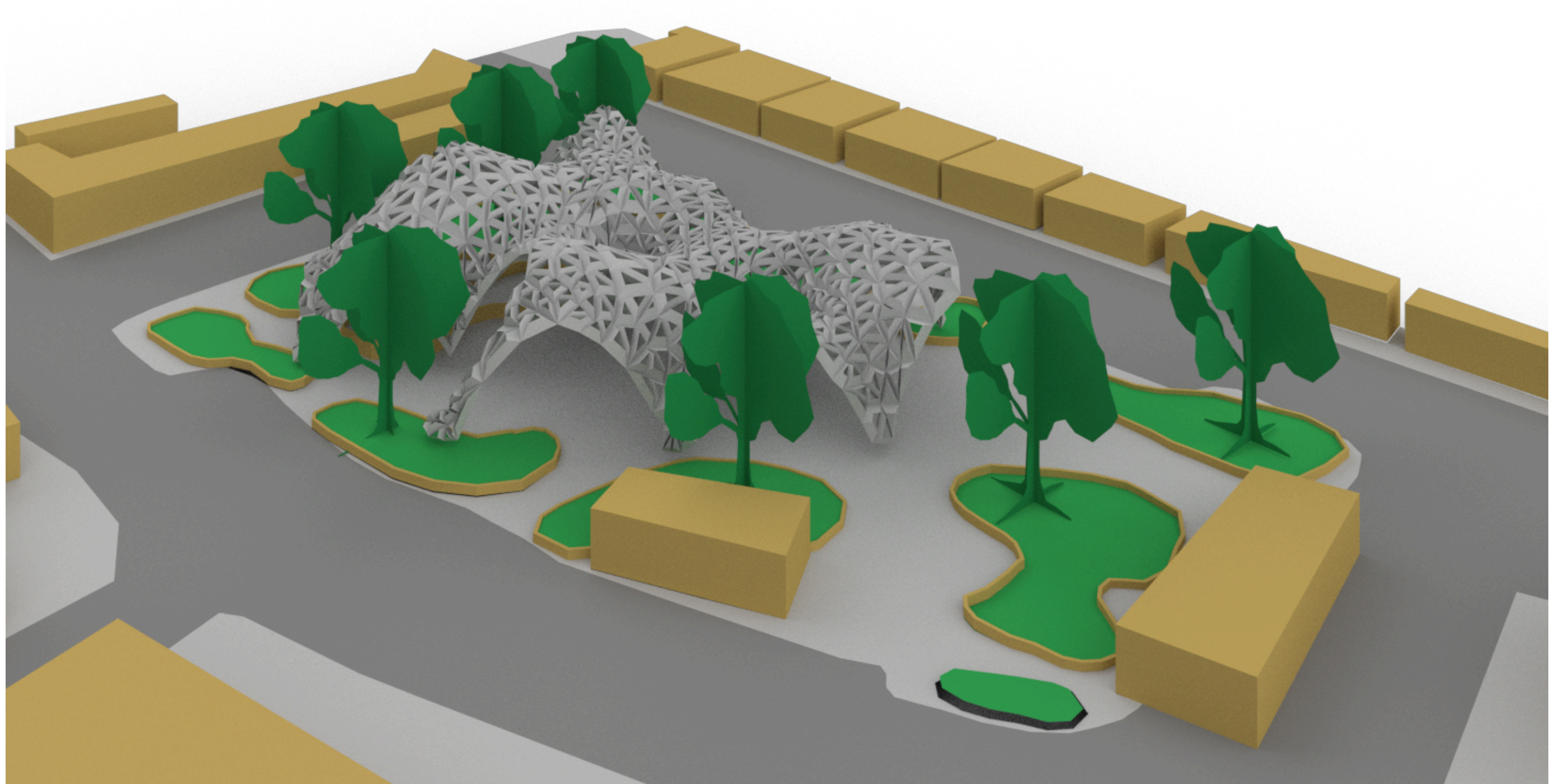


Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 85 retrata uma perspectiva esquemática do modelo final proposto do primeiro ensaio, assim trabalhado nesta atual fase da pesquisa.

Figura 85 – Perspectiva esquemática do pavilhão

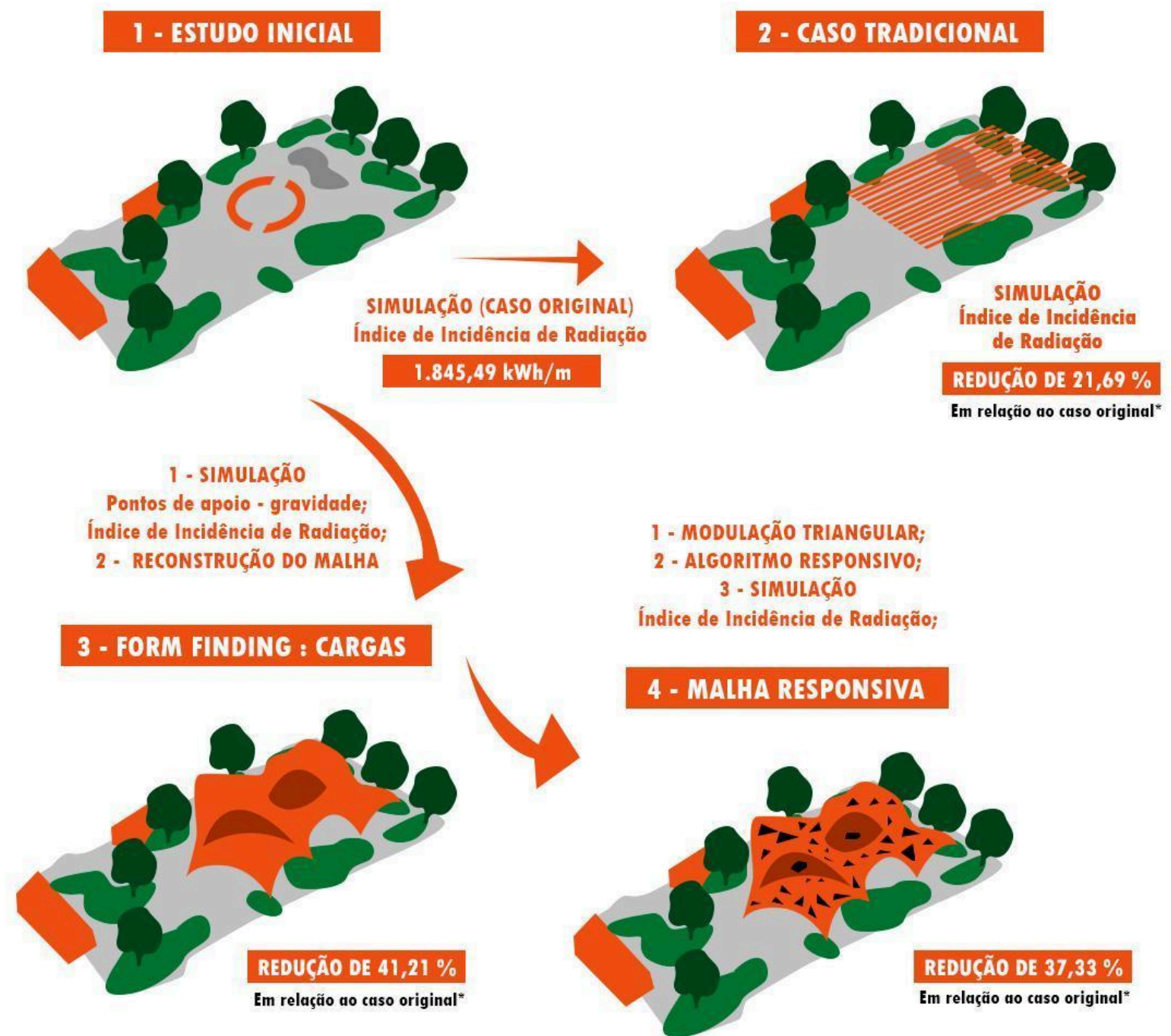
Fonte: Elaborado pelo autor.



Por fim, na ideia de compreender o quão relevante se retratou tal pesquisa, como até mesmo o processo projetual, trago a partir da figura 86, uma síntese dos casos simulados, como também a comparação entre eles.

A qual é possível perceber que o caso com maior redução foi o anterior à malha responsiva, fato ligado a ausência da métrica de Índice de Luz Natural Útil (UDI). Além da própria melhora que a malha responsiva trouxe ao espaço, houve uma redução de 15,64% a mais comparado a um modelo tradicional.

Figura 86 – Síntese dos casos simulados



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3. ANÁLISE E DESAFIOS DA FASE ANTERIOR

A prática do design computacional atingiu um ponto de inflexão que exige uma reflexão crítica, pois a ampla acessibilidade de ferramentas paramétricas, embora promissora, levou a uma proliferação de formas complexas cuja lógica subjacente é, por vezes, estritamente formal.

O primeiro ensaio do pavilhão, desenvolvido anteriormente, pode ser contextualizado de maneira consciente dentro dessa crítica. Não considerado uma etapa falha, pois priorizou a descoberta da forma sob restrições explícitas (apoios, zonas de exclusão, otimização da malha) e, na sequência, testou a tesselação piramidal, selecionada por analogia formal, sob critérios de radiação, a qual revelou pontos de conflito para concepção do design. O valor deste resultado está ligado ao próprio diagnóstico: tornou visível limitações locais da malha e custos geométricos de certas escolhas, justificando o reajuste subsequente e a passagem a uma fase explicitamente performativa e otimizada.

Em termos de otimização computacional, não se pretende um “resultado absoluto”, já que algoritmos como NSGA-II não “entregam o melhor” no sentido absoluto, mas aproximam a um conjunto de soluções não-dominadas (a fronteira de Pareto), entre as quais trade-offs devem ser escolhidos à luz de prioridades do projeto (peso dos objetivos e limites). (Deb et al., 2002).

Ligado a isso, e apenas para especificar, até então foi trabalhado uma variável de performance, a qual seja de incidência solar. Pretende-se então continuar com o estudo de luz natural, UDI. Como também, uma nova implementação para esta etapa de

ajuste metodológico, é abordar a taxa de abertura sobre pavilhão, considerado uma variável de controle, a fim de compreender uma correlação entre as variáveis de performance, uma vez que um busca sombreamento, e outro uma melhor taxa de entrada de luz.

Diante disso, e acompanhando as etapas propostas anteriormente, entende-se como encaminhamento de ajuste metodológico: (i) reverter artefatos e reajustar a malha nas regiões críticas (âncoras adicionais, ampliação de zonas de exclusão, conversão Patch→Surface e split do contorno) — conforme detalhado nas seções “Exploração da malha” e “Reajuste da malha pelo Kangaroo”; (ii) explorar técnicas alternativas de parametrização/regularização para melhorar condicionamento e fabricabilidade; (iii) Simular individualmente as variáveis de performance e controle; (iv) avançar para os Ensaios 2 e 3, respectivamente mono-objetivo (minimização de incidência de radiação) e multiobjetivo (acrescentando a variável de UDI), com leitura da fronteira de Pareto.

#### 5.3.1. EXPLORAÇÃO DA MALHA

Esta etapa tem por finalidade otimizar a malha previamente gerada, ajustando parâmetros críticos e explorando a modelagem de protótipos alternativos, isso antes de selecionar qual seguirá para o segundo ensaio. A intenção é preservar a continuidade do fluxo de *form finding*, enquanto se refinam as condições de contorno e se avaliam alternativas que combinem viabilidade geométrica e estabilidade computacional.

Então, parte-se da malha resultante do ciclo anterior de simulação, associada a um conjunto de pontos de apoio (âncoras) e zonas de exclusão relacionadas a pilares e contato com o solo. Consideram-se aqui dois vetores de intervenção para os próximos passos: (i) reparametrização local em áreas com maior densidade

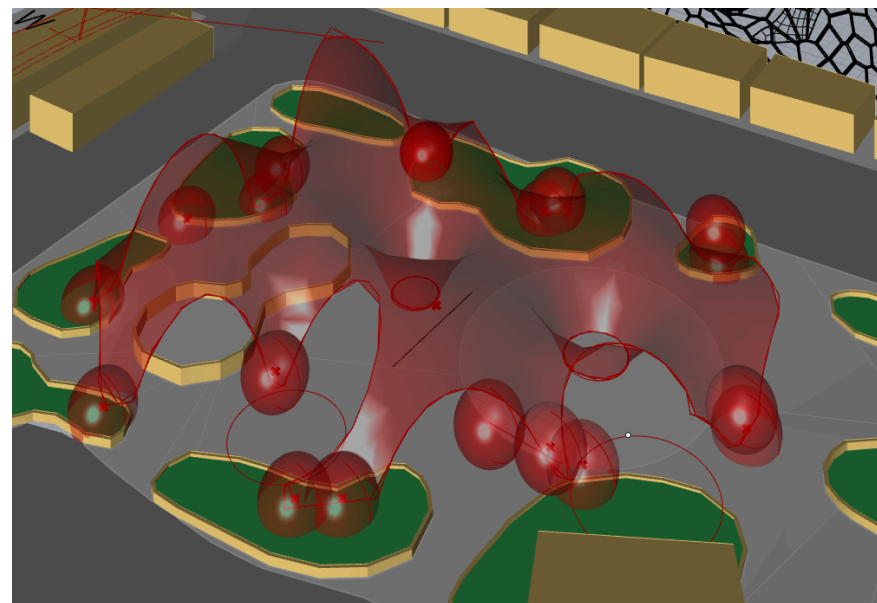
de vértices e (ii) prototipagem de variações formais (alteração de malha para superfície) visando compatibilizar a geometria com as transformações subsequentes.

#### 5.3.2. REAJUSTE DA MALHA PELO KANGAROO

Esta etapa tem por finalidade otimizar a malha previamente gerada, ajustando parâmetros críticos e explorando a modelagem de protótipos a Inicialmente, reavalia-se a distribuição de vértices na vizinhança dos pilares e bordas de contato, pois na análise do ciclo anterior evidenciou uma concentração de intersecções nos encontros da malha com o plano do chão, sobretudo nas proximidades dos pilares. Paralelamente, são testadas estratégias de reconversão da malha para superfície, variação de flexibilidade e redefinição de contornos. Além da saída do *BouncySolver* como malha triangular que, embora adequada ao *form finding*, dificulta o uso de componentes orientados a superfícies/*SubD* (especialmente aqueles que exigem domínios bem definidos e operações de *trim/split* robustas).

Desta forma, como ponto de retomada, Incrementam-se os pontos de âncora (*Anchor/AnchorXYZ*) em regiões críticas e amplia-se o raio das circunferências associadas aos pilares centrais. Essa ampliação define zonas de exclusão mais generosas, diluindo a densidade de vértices e reduzindo a chance de sobreposição no contato com o solo (figura 87).

Figura 87 – Ajuste dos pontos de apoio



Fonte: Elaborado pelo autor.

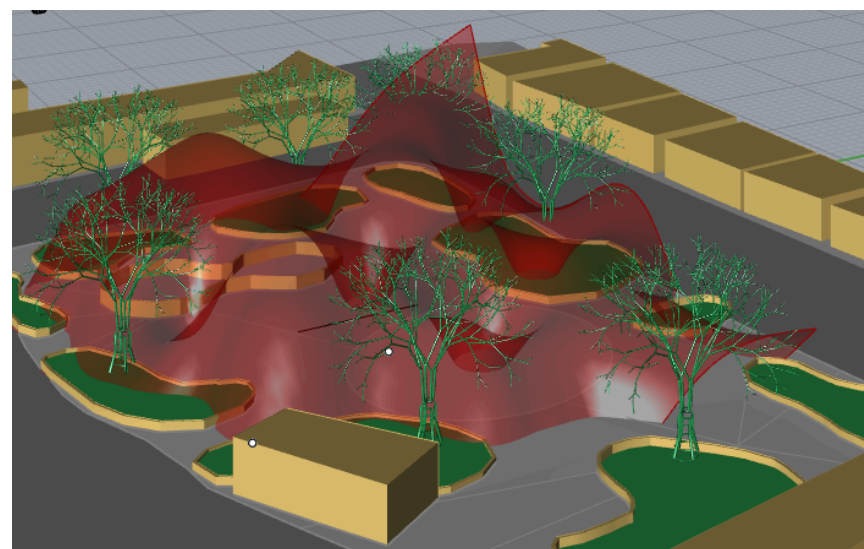
Executa o Kangaroo com objetivos que preservam a regularidade métrica (*EdgeLengths*) e controlam a ação de cargas (Load, eixo Z negativo), mantendo âncoras e projetos de contato quando necessário. O critério de parada adota estabilidade de deslocamentos e/ou número máximo de iterações, evitando overfitting geométrico e mantendo integridade topológica.

Dada a inadequação direta da malha triangular para componentes de domínio em SubD, realiza-se a conversão por Patch. Para isso, extrai-se previamente a nuvem de vértices e o contorno da malha (*Deconstruct Mesh*), fornecendo ao Patch tanto os pontos quanto a borda de referência. O parâmetro de “flexibilidade” do Patch é calibrado para aproximar a superfície resultante do estado simulado, sem introduzir ondulações espúrias.

Assim a configuração de *mesh* para superfície é atribuída pelo componente Patch, a qual pega os vértices pelo *Deconstruct mesh* e o contorno da malha, com atributos à porcentagem de

flexibilidade da malha, com proximidade do modelo simulado. Depois é utilizado o *Surface Split* (figura 88) para cortar as bordas dessa superfície a partir do contorno da malha, uma vez que o Patch não tolera subtração.

Figura 88 – Superfície com patch



Fonte: Elaborado pelo autor.

O reajuste pelo Kangaroo reduz as intersecções locais na base e redistribui a malha em torno dos pilares, enquanto a estratégia Patch→Surface Split produz uma superfície contínua compatível com os componentes de domínio e split baseados em NURBS/SubD.

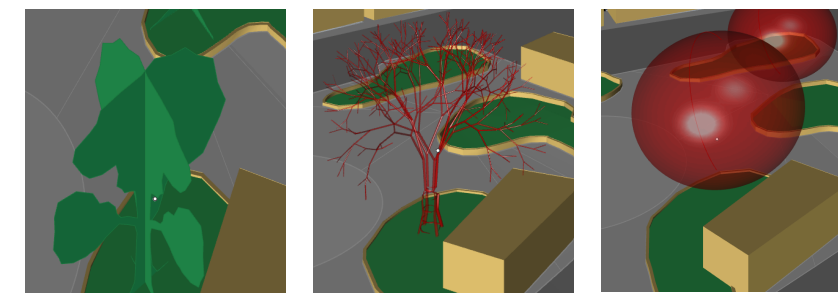
### 5.3.3. CONFIGURAÇÃO DE OBJETOS EXTERNOS

O reajuste pelo Kangaroo reduz as intersecções locais na base e redistribui a malha em torno dos pilares, enquanto a estratégia Patch→Surface Split produz uma superfície contínua compatível com os componentes de domínio e split baseados em NURBS/SubD.

Na fase anterior, a vegetação presente foi trabalhada a partir de duas faces interseccionadas, e para as próximas fases por conta da implementação da simulação de UDI (iluminação diurna) foi feito o ajuste para um mesh mais complexo.

Assim, para o estudo de radiação foi utilizado o plugin *Turtle*, buscando maior aderência morfológica (copas e volumes mais próximos do real) para avaliar sombreamento e obstruções sólidas (figura 89). Para o UDI foi atribuída uma esfera translúcida com modificação de difusão difusa de 0.1 (da folhagem no visível: 0,10 (ponto de partida conservador para folhas), e difusão translúcida de 0.2 (alvo da copa, ex.: **0,20** = 20% de luz atravessando a copa, em média).

Figura 89 – Ajuste da modelagem de vegetação



Fonte: Elaborado pelo autor.

A separação entre geometria detalhada (radiação) e sólidos equivalentes com TransMod (UDI) reduz instabilidades e tempo de simulação, mantendo a fidelidade fotométrica média da copa. A regra da raiz da transmitância evita superatenuação quando a copa é representada por casca única; já os billboards preservam a Td alvo por ocorrer apenas uma interseção.

Com tais ajustes é possível implementar novos protótipos, uma vez que não esteja ligada a malha rígida a um trimesh. Desta

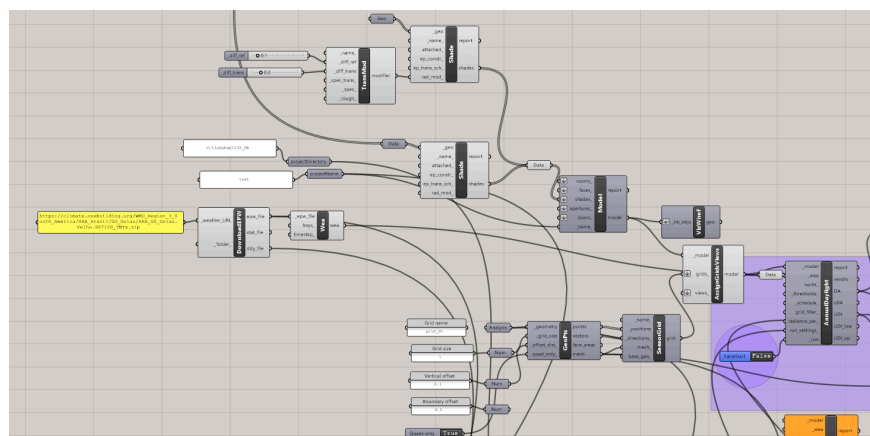
maneira, será passado por cada protótipo, havendo tanto a formulação de sua geometria, quanto a simulação de conforto ambiental.

#### 5.3.4. CONFIGURAÇÃO DO COMPONENTE ANNUAL DAYLIGHT

A intenção é a execução de um estudo anual de luz natural, a qual calcula a iluminância por hora para cada horário por ponto de um grade de sensores de um modelo. E pretende-se como valor a Iluminância Útil de Luz Natural (IUD) - A porcentagem de horas ocupadas em que a iluminância se situa entre os limites mínimo e máximo.

Então parte da criação de um modelo, contemplando shades, com a geometria do protótipo e outros objetos modelados que interferem na simulação. Depois adiciona a grade de sensores de radiância, isso através da geração de sensores sobre uma superfície, que neste caso está sendo elevada a 1,20 m do chão, simbolizando um corte.

Figura 90 – Estrutura dos componentes do *annual daylight*



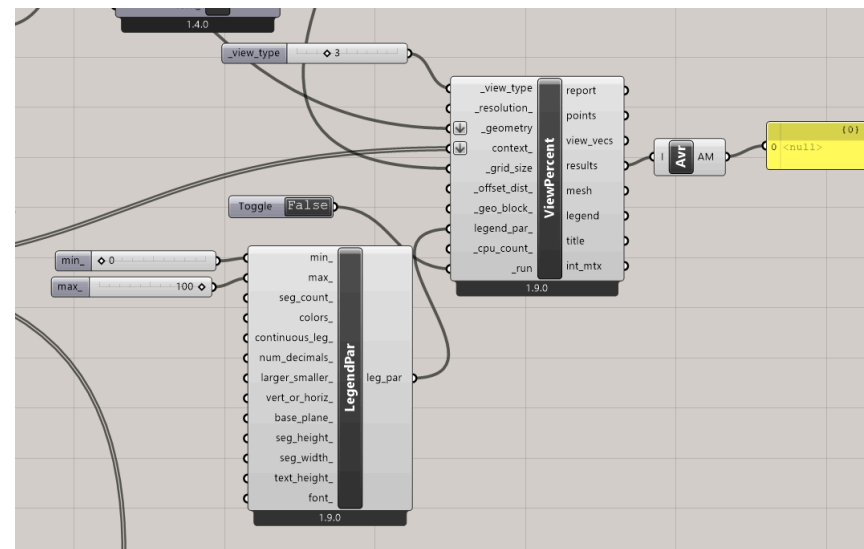
Fonte: Elaborado pelo autor.

Alimentando o componente *Annual Daylight*, e após simulado, existem duas saídas que será o valor abordado, a qual é a média do UDI, e o mapa de calor desta mesma saída.

#### 5.3.5. CONFIGURAÇÃO DO COMPONENTE VIEW PERCENT

Este componente estima a qualidade de uma vista para o exterior a partir de um determinado local em ambientes internos, a qual é utilizada neste estudo para compreender uma taxa de controle entre as duas variáveis de performance.

Figura 91 – Esquematização dos resultados de UDI



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como o de iluminância, a abordagem é entender a média do resultado, juntamente com o mapa de calor.

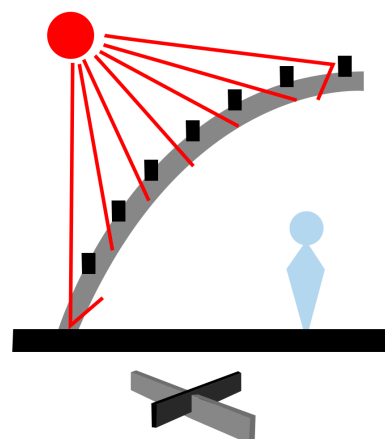
#### 5.4. ENSAIO II

Com tais ajustes é possível implementar novos protótipos, uma vez que não esteja ligada a malha rígida a um trimesh. Desta maneira, o ensaio II se resume a aplicação de novos modelos, assim será passado por cada protótipo, havendo tanto a formulação de sua geometria, quanto a simulação de conforto ambiental. Além disso, será composto no final a simulação das variáveis que faltaram no Ensaio I, como também a simulação do caso inicial, e de um modelo tradicional de sombreamento.

##### 5.4.1. WAFFLE

No contexto de fabricação digital, *waffle* (também chamado *egg-crate* ou *sectioning/contouring*) é um sistema de ripas ortogonais que se intertravam por entalhes nas linhas de interseção, obtidas ao seccionar uma superfície em dois eixos e extrudar essas seções como nervuras. É um método clássico de *sectioning* aplicado à conversão superfície→peças planas para corte CNC e montagem leve e rígida (Iwamoto, 2009; Kolarevic, 2003).

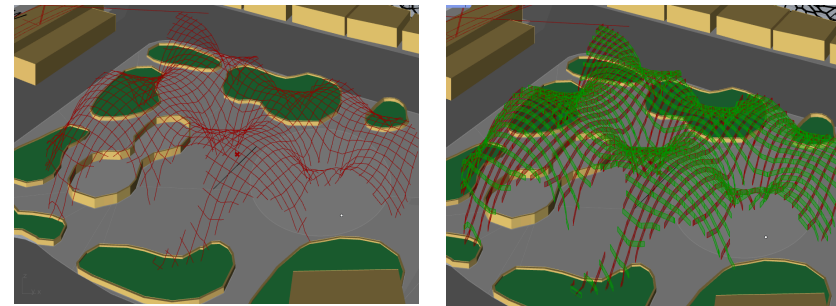
Figura 92 – Esquema Waffle



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da geometria base, é contornando os eixos X e Y sobre a malha, com distância de 1m. Cada conjunto de curvas é extrudado no eixo Z para formar as nervuras (altura parametrizada) e recebe largura nominal de 0,20 m (espessura/“alma” da ripa). O resultado são dois pacotes de ripas ortogonais (X e Y) (figura 93)

Figura 93 – Estrutura de contorno da malha waffle

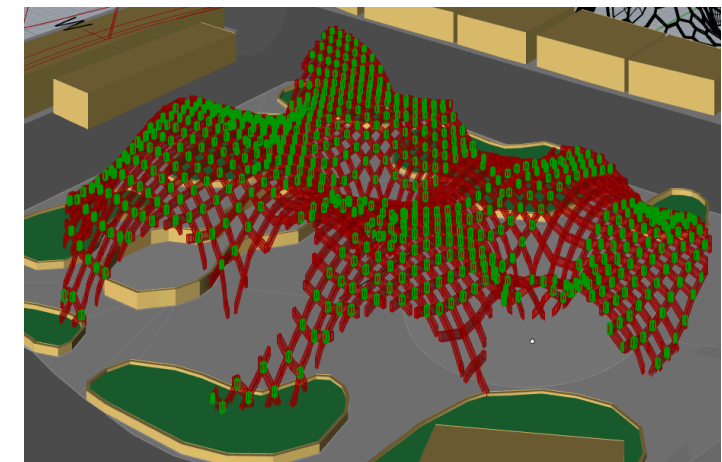


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com *BBX (Brep|Brep Intersection)* identifica-se a malha de cruzamentos entre os dois pacotes. Para viabilizar o encaixe sem cola, geram-se entalhes complementares por cópia e deslocamento das peças (para cima e para baixo) e aplicação de *Solid Difference* nas zonas de cruzamento, produzindo os rasgos de meia-madeira.

Verificam-se normais, coplanares e tolerâncias (folga de corte, O slot típico adota profundidade ≈ metade da altura efetiva da ripa, garantindo travamento e desmontagem controlada.

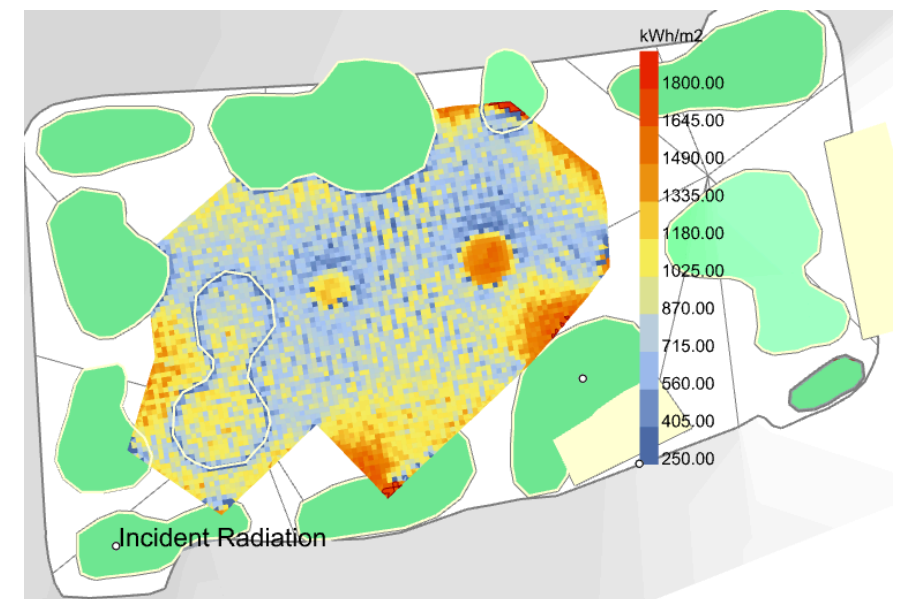
Figura 94 – Estrutura Waffle



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a obtenção da diferença de sólido entre esse movimento do miolo e a ripa em seu eixo, é possível obter tal estrutura. Assim, com a geometria em posse é possível utilizar para o estudo de radiação, a qual neste novo ensaio foi atualizado a área da superfície, submetida apenas a área sobreposta do pavilhão, reduzindo interferências periféricas. Com um resultado em média cumulativa anual de 769,92 kWh/m<sup>2</sup>.

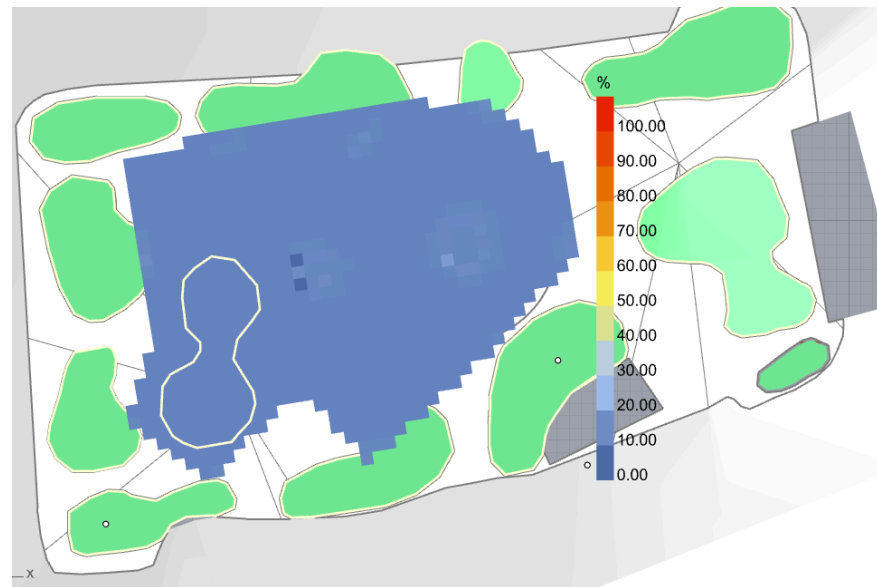
Figura 95 – Ensaio de radiação sob a malha waffle



Fonte: Elaborado pelo autor.

Obteve-se o resultado da simulação de UDI, contemplando a porcentagem média de UDI, com 7,48%, e a figura 96 apresenta o mapa de calor deste mesmo resultado.

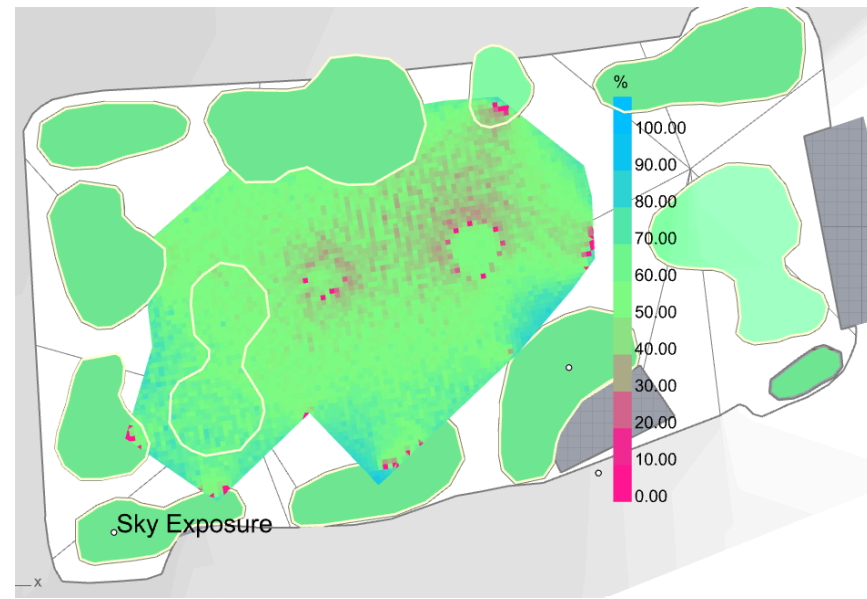
Figura 96 – Ensaio de UDI sob a malha waffle



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como também o resultado da média em porcentagem de exposição de abertura, 52,84%, e na figura 97, o seu mapa de calor.

Figura 97 – Ensaio de exposição de abertura sob a malha waffle

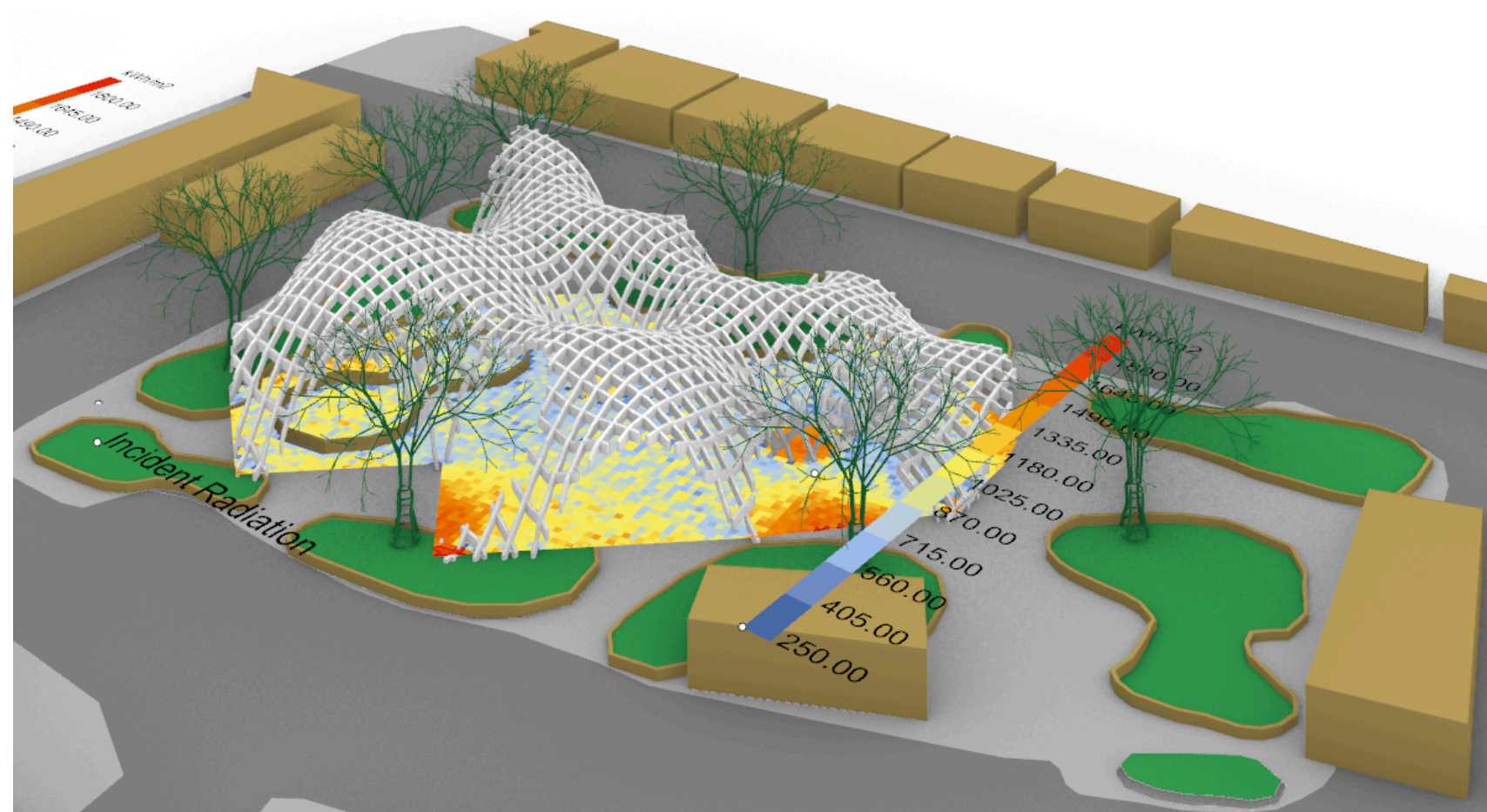


Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 98 representa uma perspectiva do resultado apresentado por tal protótipo.

Figura 98 – Resultado do protótipo Waffle

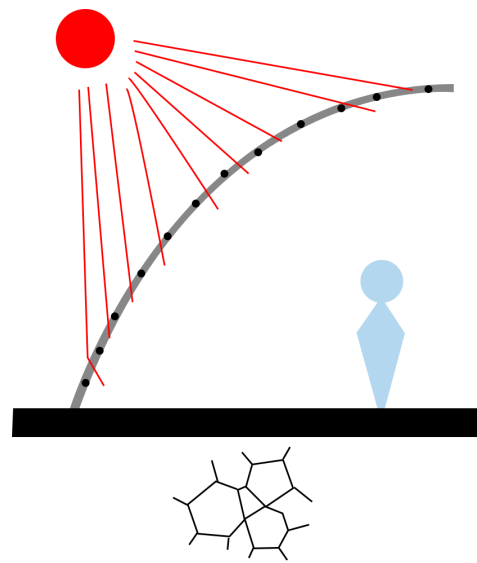
Fonte: Elaborado pelo autor.



#### 5.4.2. VORONOI

O diagrama de Voronoi é uma tesselação gerada a partir de um conjunto de pontos, na qual cada célula reúne os locais mais próximos de um ponto gerador; suas arestas são as mediatrizes entre pares de pontos, formando uma rede adjacente que pode ser mapeada e espessada como malha espacial (Okabe et al., 2000; Pottmann et al., 2007).

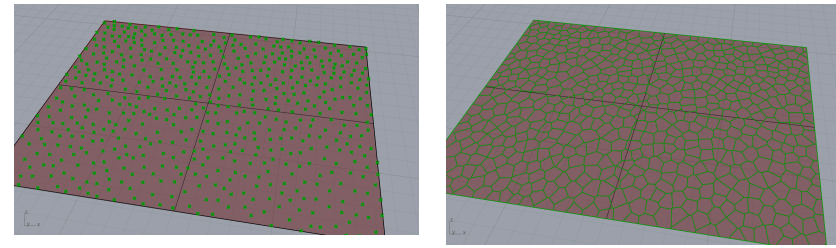
Figura 99 – Esquema voronoi



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo consiste primeiro em contextualizar uma quantidade de pontos de uma superfície plana, assim, Sobre a Srf de referência obtém-se o Boundary e distribuem-se pontos com Pop2D (Count = 800; Seed = 48). Em seguida aplica-se Voronoi, produzindo o diagrama planar recortado pelo contorno.

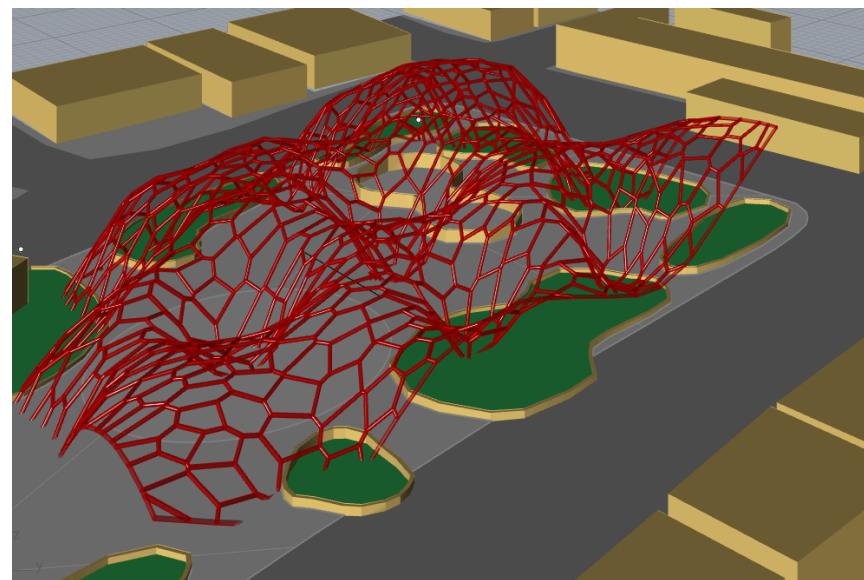
Figura 100 – Contexto população de pontos e aplicação do voronoi sobre a superfície



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, usa-se o Map to Surface para espelhar esse diagrama sobre uma superfície, que nesse caso é malha já trabalhada, preservando a correspondência paramétrica entre domínios. Como também, a explosão das curvas, pelo *explode*, e a criação de tubos (diâmetro .10m) nessas mesmas linhas, assim confeccionado tal modelo (figura 101).

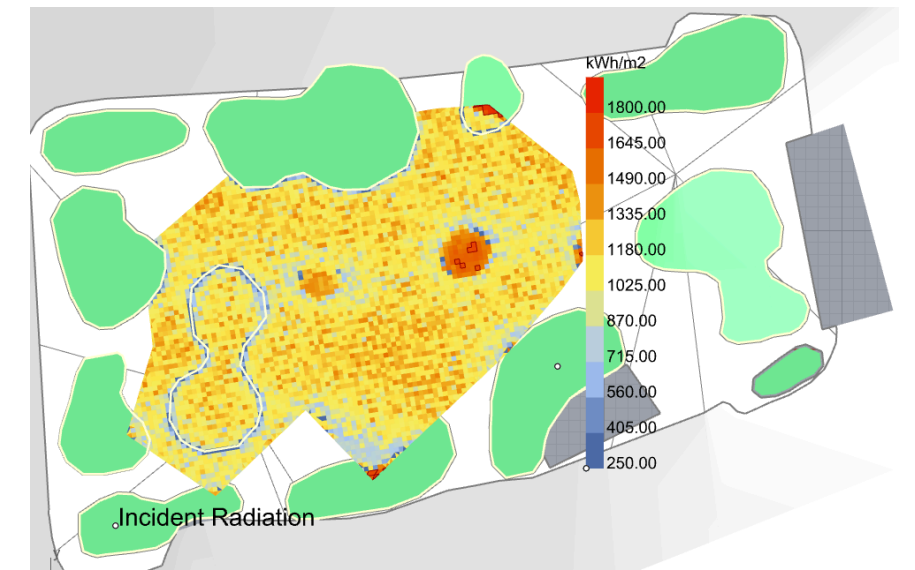
Figura 101 – Malha estruturada - voronoi



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da figura 102, o ensaio de radiação da estrutura Voronoi apresentou média de 940,33 kWh/m<sup>2</sup>.

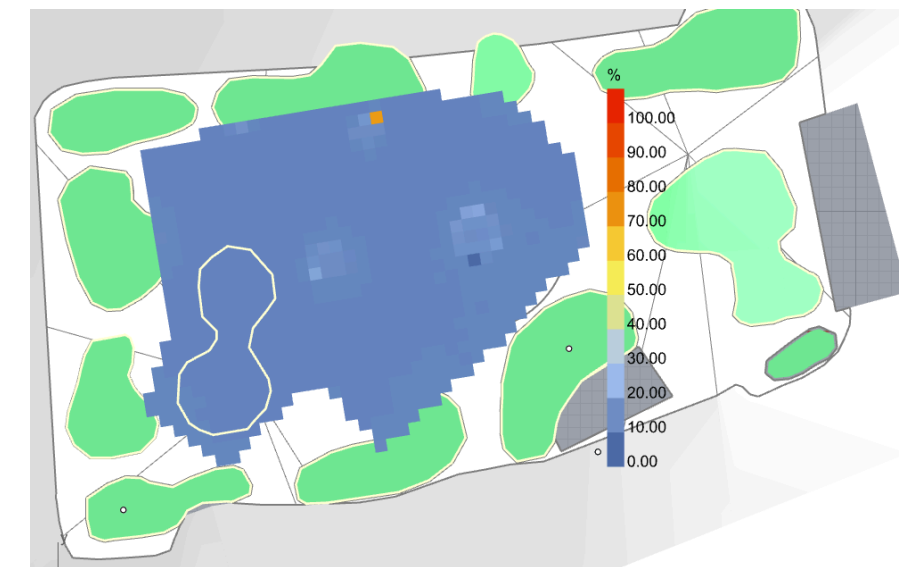
Figura 102 – Ensaio de radiação sob a malha voronoi



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da média de UDI - 7,75%

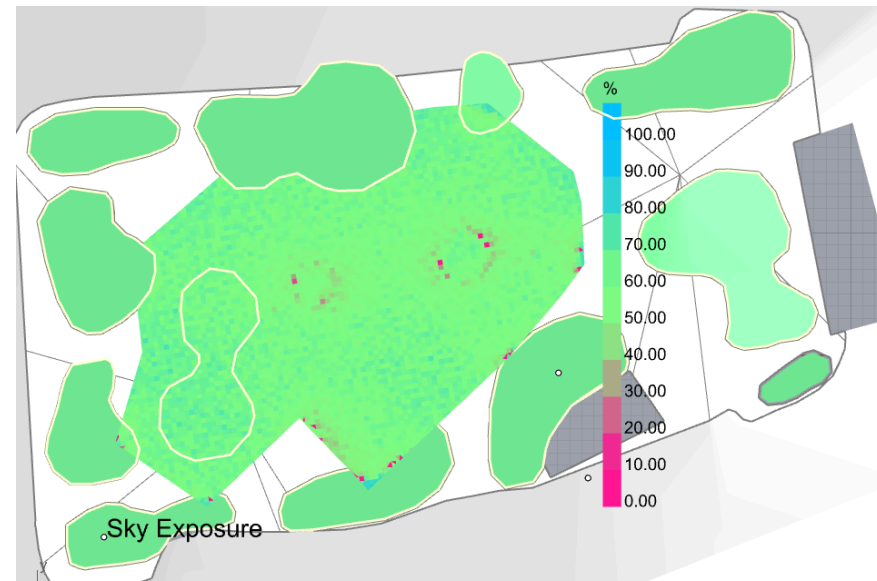
Figura 103– Ensaio de UDI sob a malha voronoi



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio da média de exposição - 55,85%

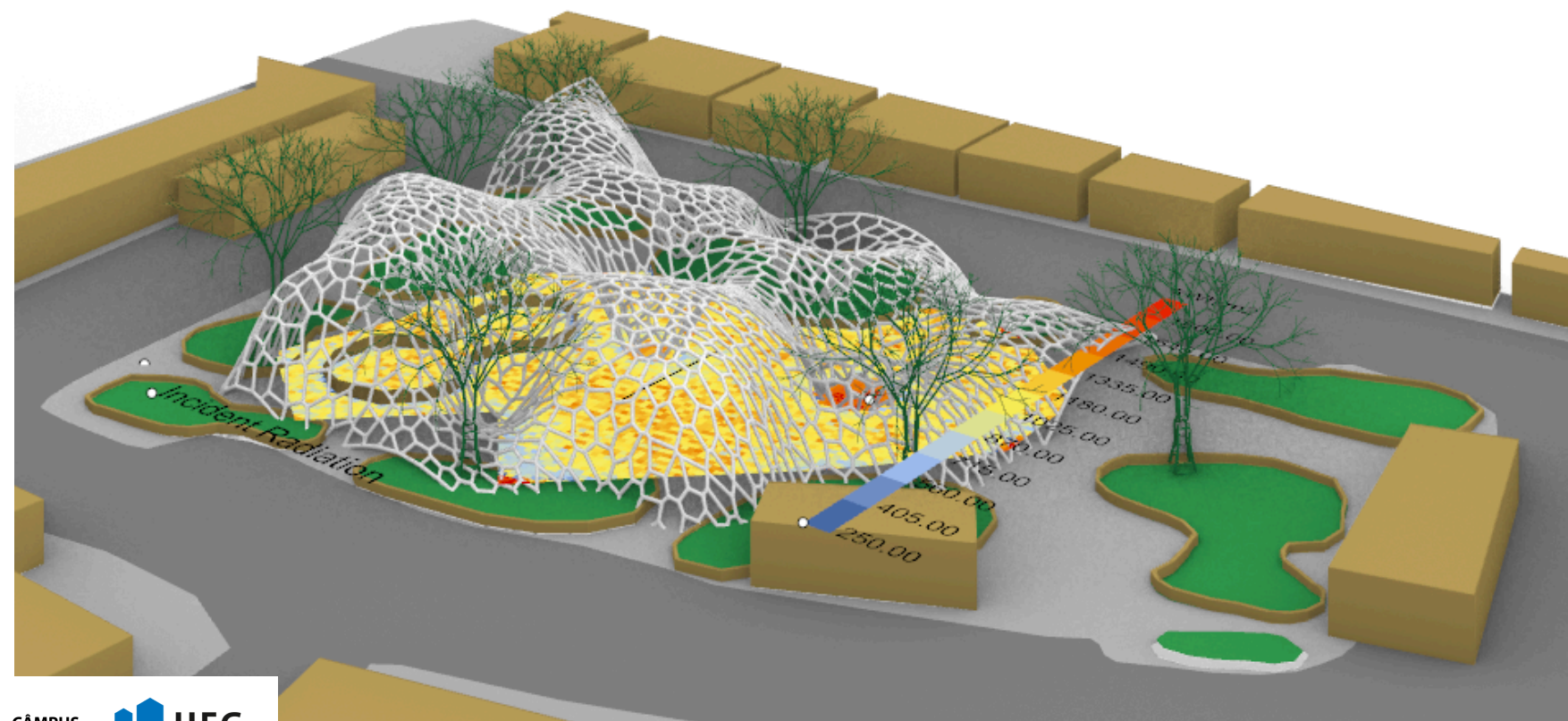
Figura 104 – Ensaio de exposição de abertura sob a malha voronoi



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 105 representa uma perspectiva do resultado apresentado por tal protótipo.

Figura 105 – Resultado do protótipo Voronoi

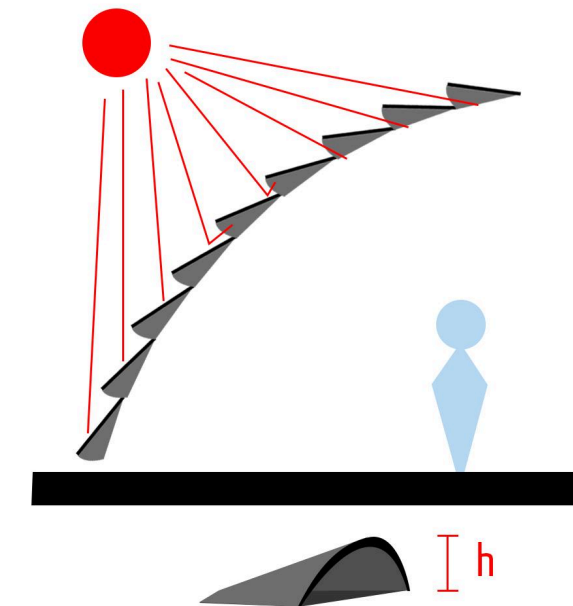


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4.3. ESCAMA CIRCULAR

O módulo de escama circular (figura 106) é um elemento repetitivo tipo “shingle” (escama/lâmina sobreposta) inspirado em padrões biomiméticos de proteção e modulação de troca com o ambiente: cada escama atua como micro-sombreador ajustável em altura/abertura, permitindo variação local de porosidade do envelope (Menges, 2012; Loonen et al., 2015).

Figura 106 – Esquema escama circular

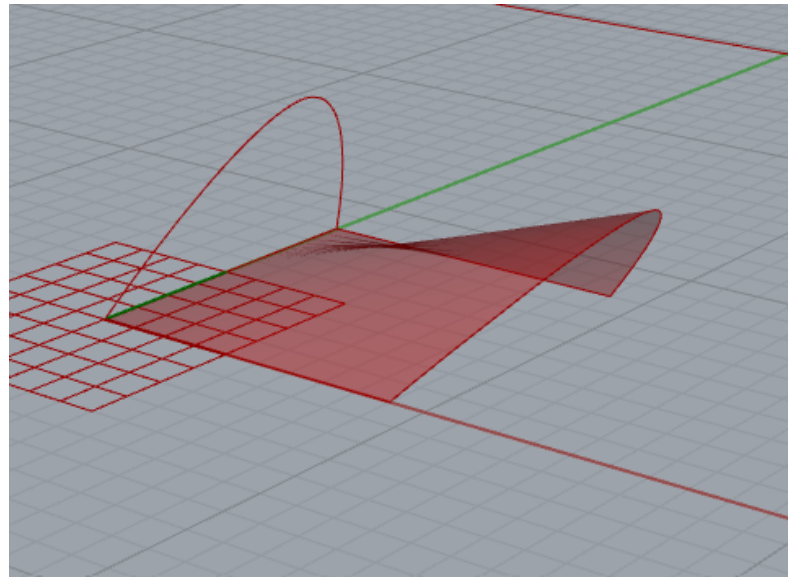


Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse processo parte primeiro da criação de uma unidade da primeira escama, criada a partir do loft de duas curvas, interpolada a partir da construção de pontos, a qual resulta em um casquilho circular suavemente convexo (figura 99).

Depois utiliza o bounding box para colocá-lo dentro de uma caixa, e isso faz sentido a partir do momento que uso outro componente Box Morph, a qual implementa essa caixa e em subdivisões da malha.

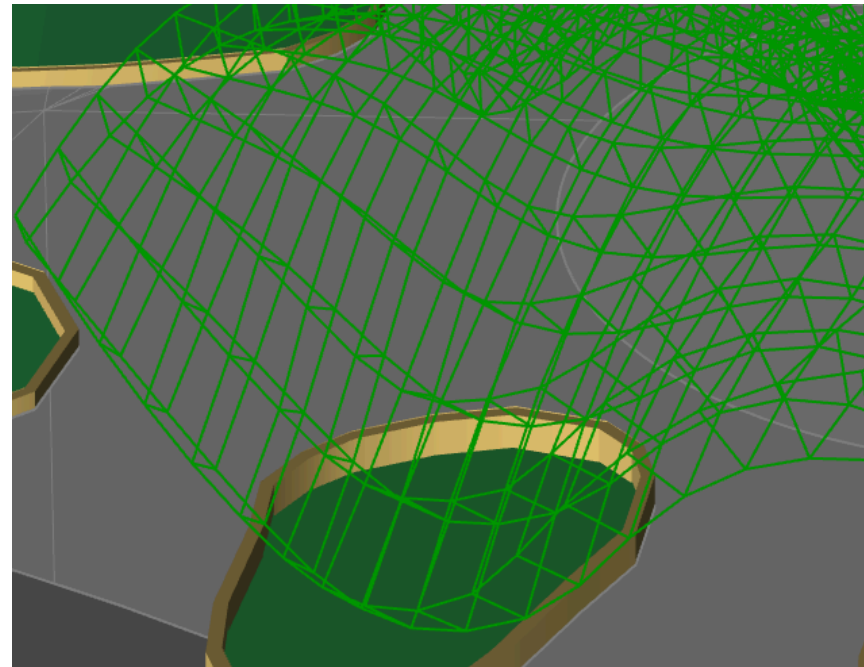
Figura 107 – Modulação da unidade da escama



Fonte: Elaborado pelo autor.

A superfície alvo é subdividida por *Divide Domain*, e cada célula paramétrica gera uma *Surface Box* (caixa alinhada ao campo (u, v) da superfície). Essa grade define onde cada instância da escama será posicionada (figura 108).

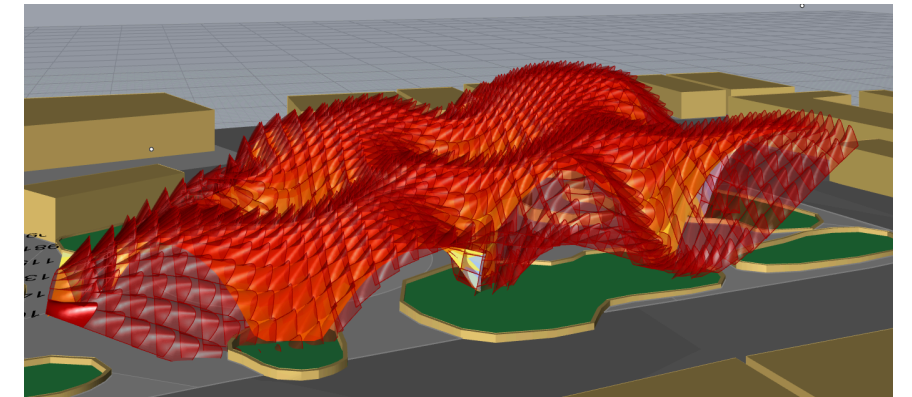
Figura 108 – Aplicação da surface box sobre a malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com *Box Morph*, a escama (dentro do seu *Bounding Box*) é mapeada para cada *Surface Box*, reproduzindo o módulo sobre toda a malha. Em seguida, aplica-se *Remap Numbers* para controlar a altura/abertura da escama (parâmetro de espessamento/elevação do Loft) a partir do *Incident Radiation*: áreas com maior carga de radiação recebem maior fechamento (redução de altura), enquanto zonas menos críticas podem abrir (maior altura), modulando a porosidade local do sistema, na ideia de torná-lo responsivo (figura 109).

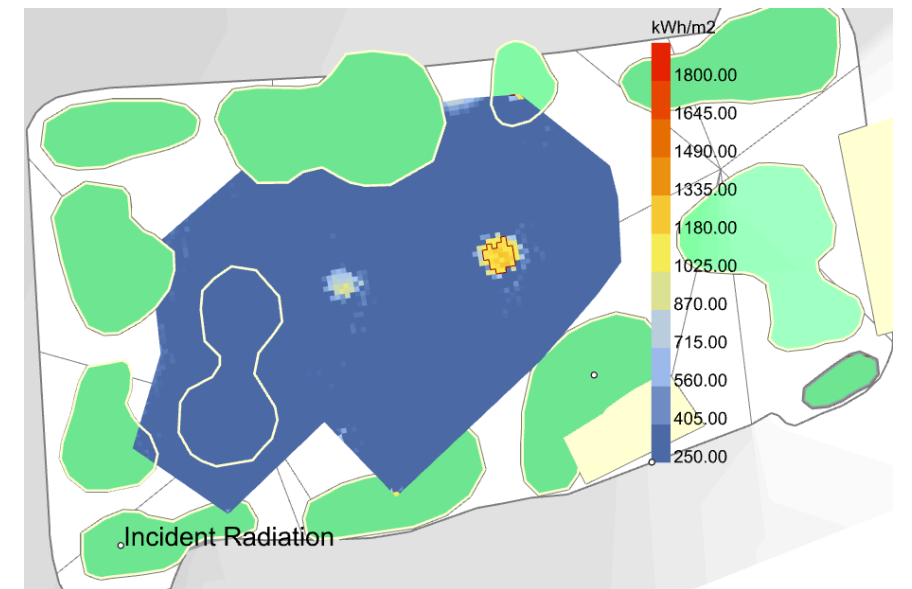
Figura 109 – Aplicação do módulo no surface box



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mantendo o protocolo dos casos anteriores, o sistema de escamas circulares apresentou média de 309,21 kWh/m<sup>2</sup> na superfície avaliada (figura 110).

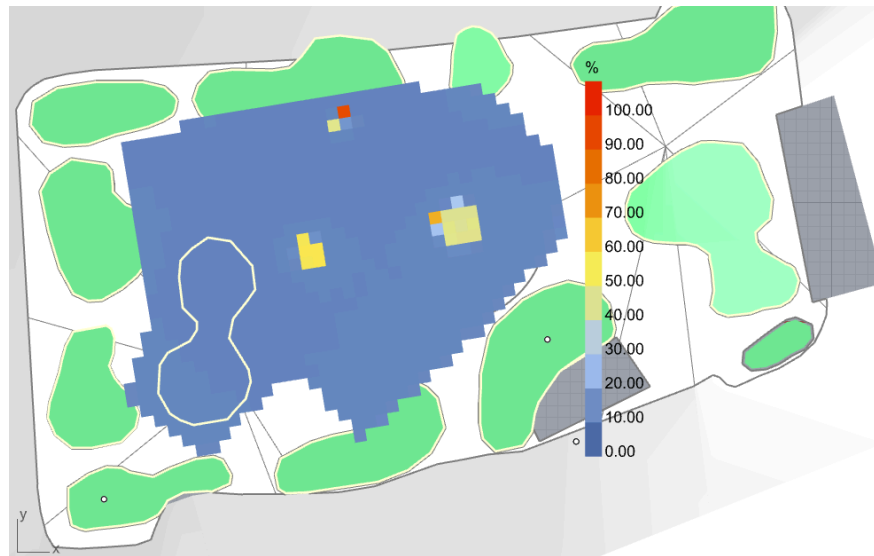
Figura 110 – Ensaio de radiação sob a malha escama circular



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma porcentagem Média de UDI com 8,54%.

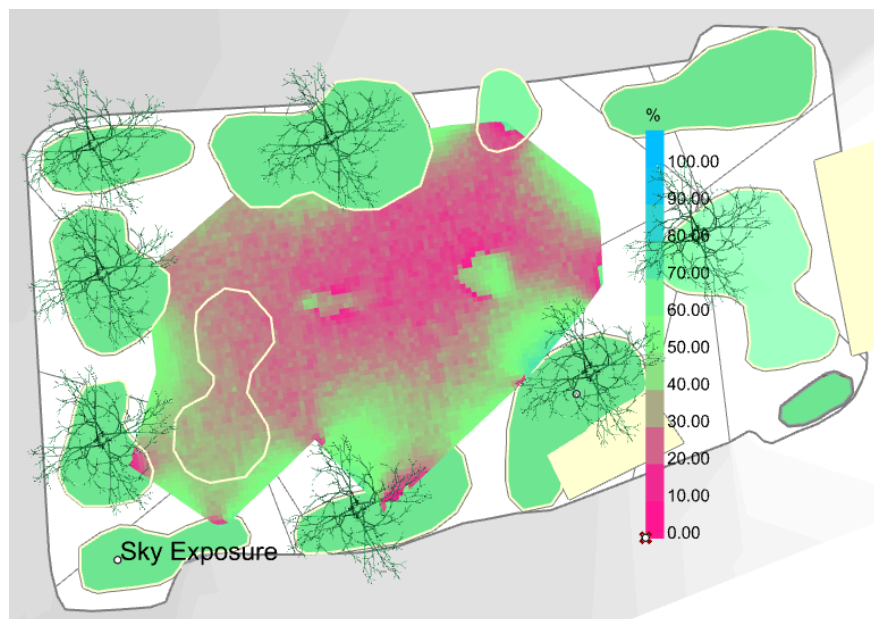
Figura 111 – Ensaio de UDI sob a malha escama circular



Fonte: Elaborado pelo autor.

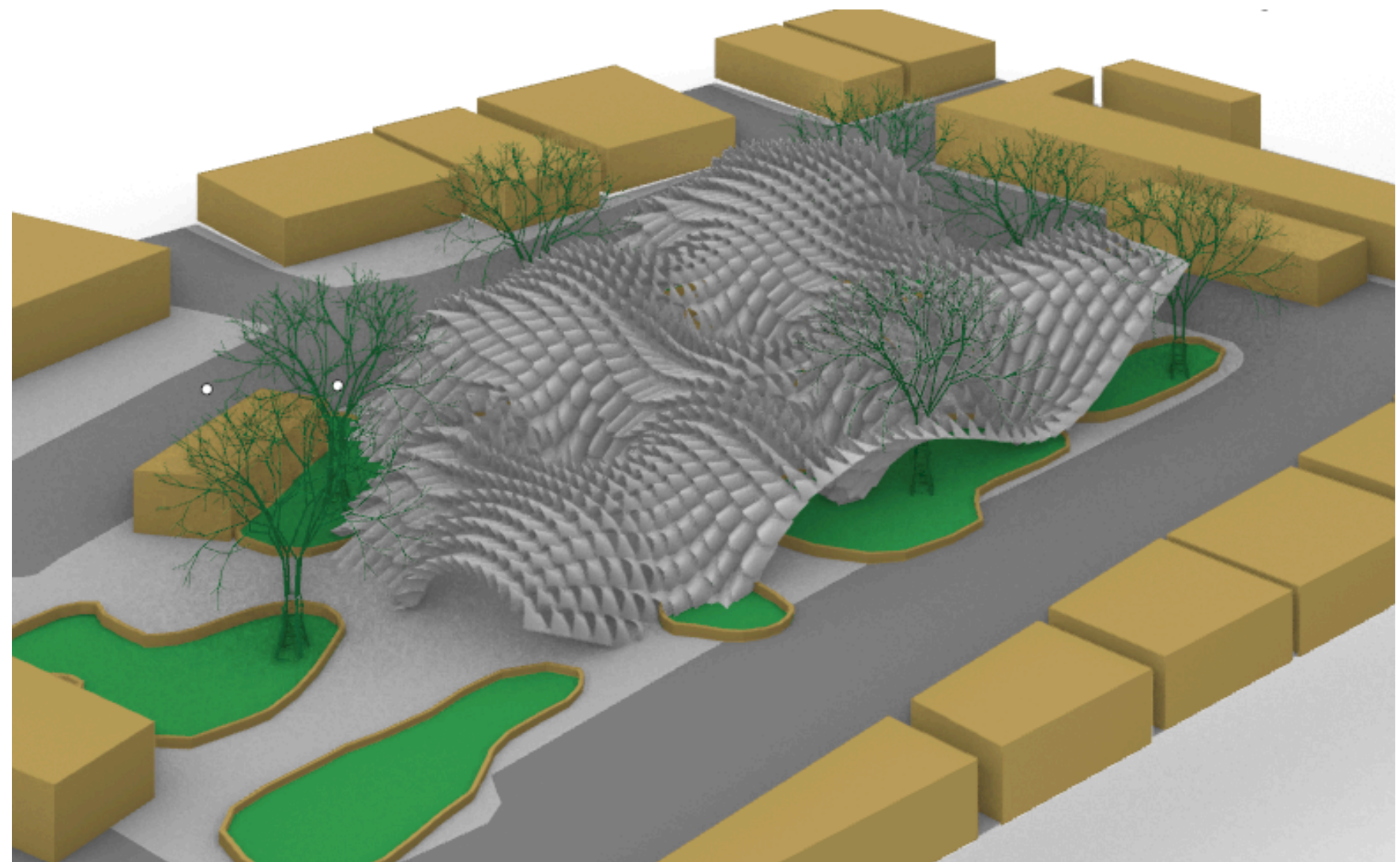
Porcentagem média de exposição de abertura com 31,38%, com a figura 112, que representa tal representação. E existe uma contemplação de 0% em quase em sua totalidade, isso causado pelo tipo de abertura.

Figura 112 – Ensaio de exposição de abertura sob a malha escama circular



A figura 113 representa uma perspectiva do resultado apresentado por tal protótipo.

Figura 113 – Resultado do protótipo escama circular

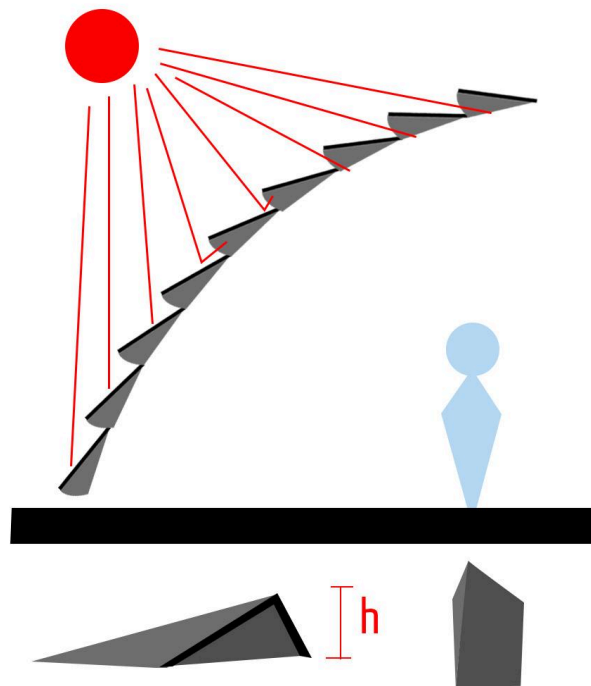


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4.4. ESCAMA - POLILINHA

Similar à proposta anterior, este foi gerado a partir de polilinhas que formam uma abertura triangular, ao invés de meio arco. Concebido para reduzir complexidade geométrica e custo de simulação, já que uma apresenta menos faces, topologia mais limpa), preservando o controle paramétrico de abertura/fechamento por célula (figura 114).

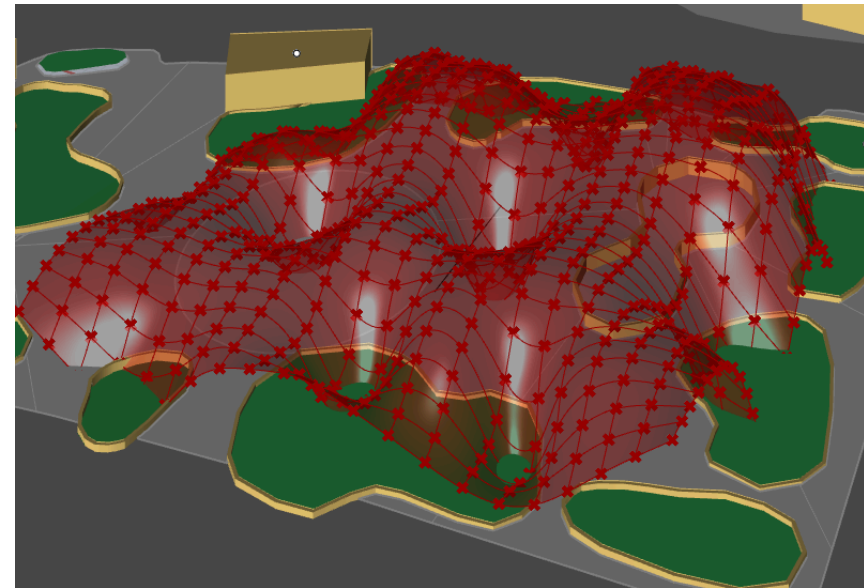
Figura 114 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

A superfície-base é particionada por *Isotrim/SubSrf* (a partir de *Divide Domain* com contagens U/V definidas). Em seguida, aplica-se *Deconstruct Brep* para extrair os quatro vértices de cada célula; a seleção é feita por *List Item* (índices 0–3).

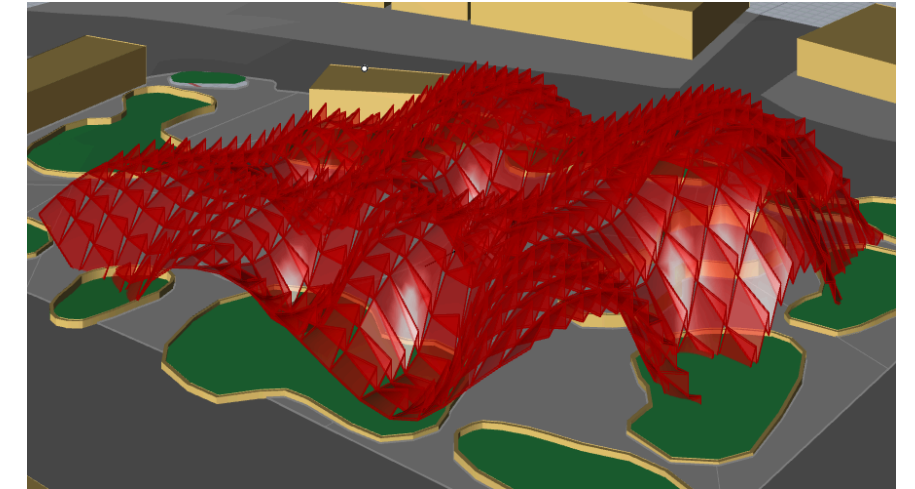
Figura 115 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

A intenção é que faça uma linha na diagonal dos vértices, depois utilize o *Evaluated Length* para escolher a posição de um ponto nessa linha, assim escolhendo o quanto a ponta da escama irá abrir. Depois dá um move nesse ponto no eixo Z para ver o quanto abre e fecha. Posteriormente é usado o componente *4Point Surface* para conectar o quatros pontos da base com esse ponto da ponta das faces dos triângulos que foram criadas. Depois um *brep Join*, e um extrude para não ficar apenas uma face.

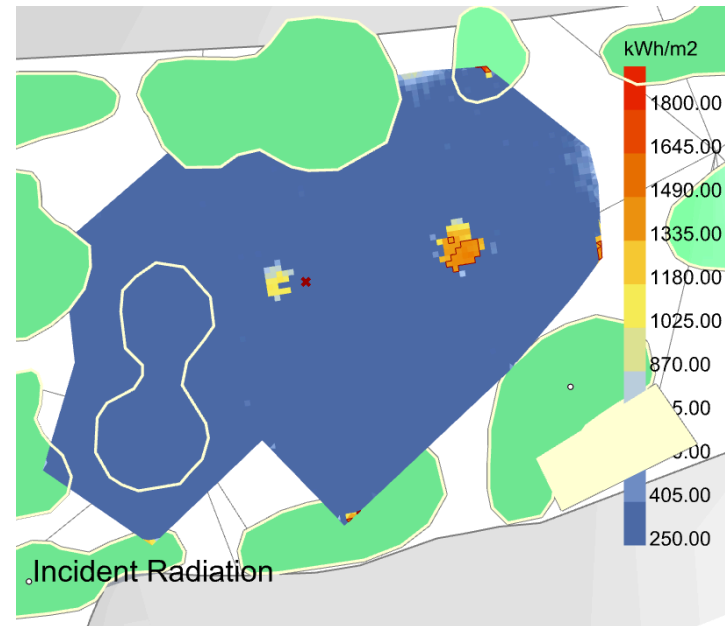
Figura 116 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mantendo o protocolo dos casos anteriores, o sistema de escamas de polilinha apresentou média de 116,15 kWh/m<sup>2</sup> na superfície avaliada (figura 117). E os demais resultados são aproximados ao outro caso de escama, desta forma não apresento novamente através de figura.

Figura 117 –Ensaio de radiação sob a malha escama de polilinha



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 118 representa uma perspectiva do resultado apresentado por tal protótipo.

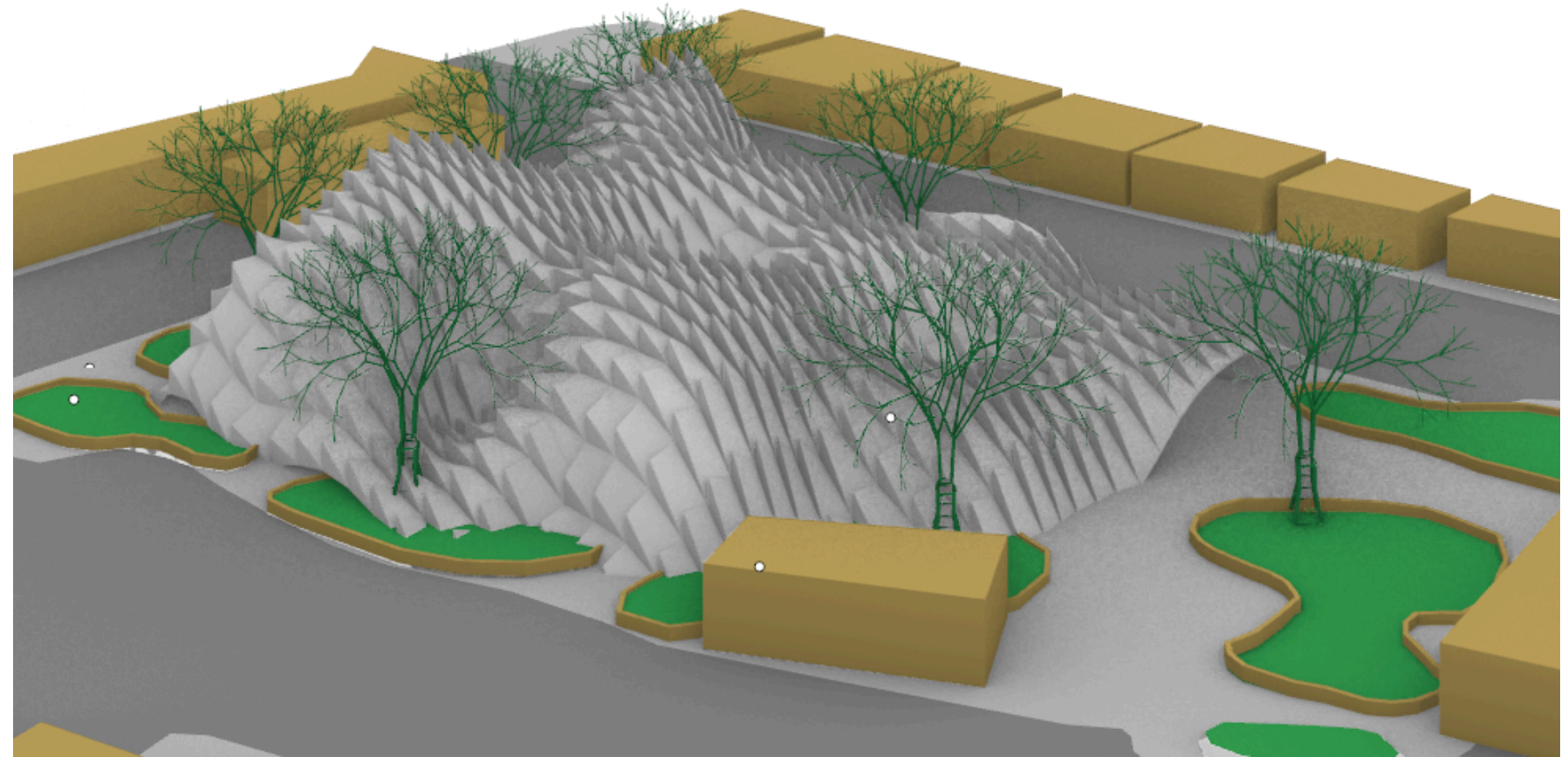


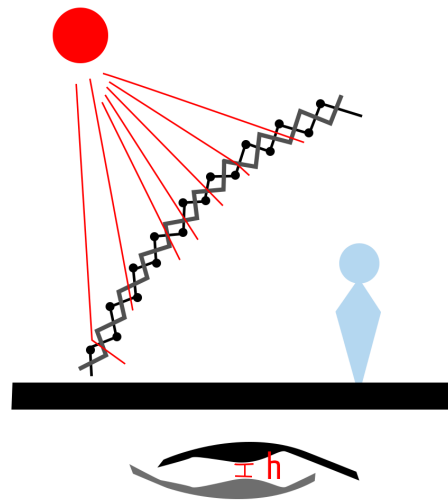
Figura 118 - Resultado do protótipo escama de polilinha

desconectam de forma calibrada para criar gradientes de passagem e sombreamento (figura 119).

#### 5.4.5. ENCAIXE

O protótipo encaixe adota um sistema modular de peças intertravadas — unidades repetitivas que se acoplam por geometrias complementares, produzindo travamento sem fixadores externos e assegurando rigidez com baixo peso e montagem limpa (Iwamoto, 2009; Kolarevic, 2003). Conceitualmente, a configuração assume duas camadas próximas — análogas a “esferas” deformadas que se aproximam sem tocar, gerando uma malha sobreposta onde trechos conectam e

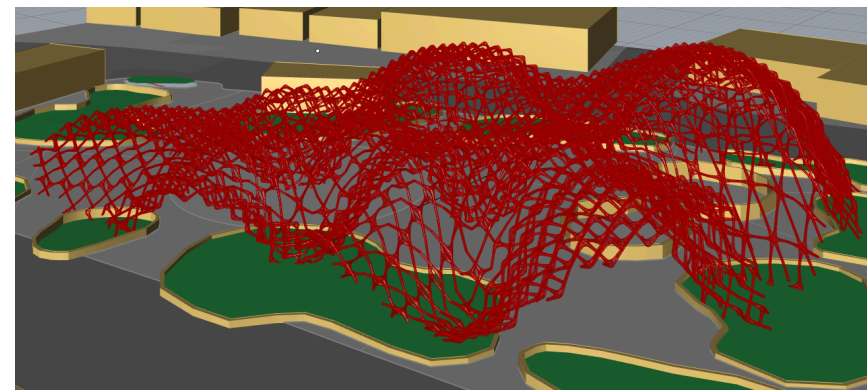
Figura 119 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

O algoritmo parte de uma malha hexagonal gerada em plano (HexGrid) sobre um domínio retangular obtido do contorno do Brep/Box Rectangle; essa grade, por oferecer isotropia e boa continuidade de arestas, é então morfada para a superfície do pavilhão com SrfMorph, preservando a correspondência paramétrica entre o retângulo base e a Srf alvo. Em seguida, as curvas do padrão são Explode para acesso individual das arestas e, com CullPt, removem-se nós duplicados nas interseções, estabilizando o grafo de linhas. Um operador de média/centro dos nós (ponto “hub” de cada conexão) auxilia o desenho dos encaixes; a sequência Dispatch → Mirror Plane cria pares complementares (macho/fêmea) alternados na rede, garantindo que cada peça receba o recorte inverso da vizinha e, portanto, feche o conjunto sem folgas estruturais.

Figura 120 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha

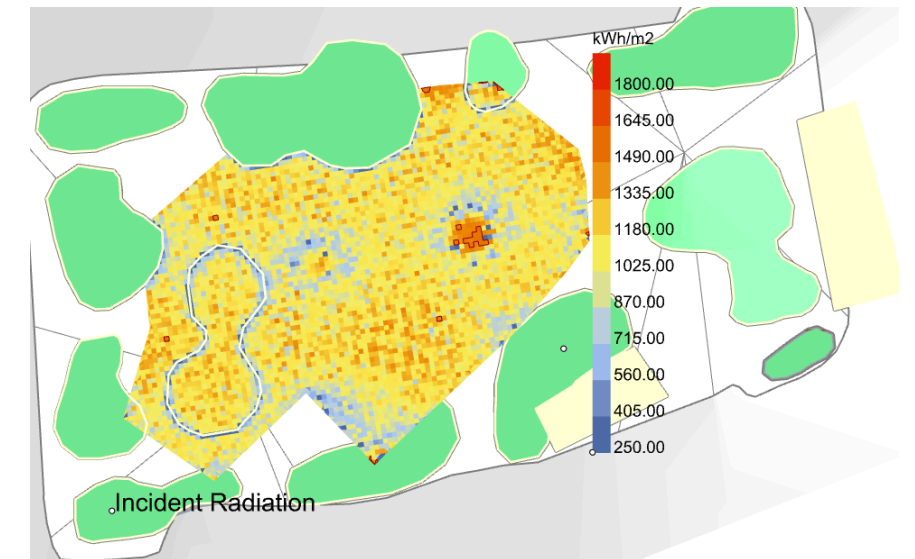


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para conformar o volume e a espessura, os eixos locais são calculados com Surface Closest Point → Evaluate Surface, extraíndo normais por célula; vetores derivados (produto  $A \times B$  e deslocamentos Move) separam duas camadas complementares do padrão — uma ligeiramente para +Z e outra para -Z — sobre as quais se aplicam os entalhes. A conversão final para peça fabricável é feita como estrutura de varetas: as curvas limpas alimentam o gerador de varetas/nós (Weaverbird – Mesh from Lines), onde StrutSize controla a espessura das “ripas” e NodeSize define o diâmetro dos nós.

Mantendo o protocolo dos casos anteriores, o sistema de peças de encaixe apresentou média de 930 kWh/m<sup>2</sup> na superfície avaliada (figura 116).

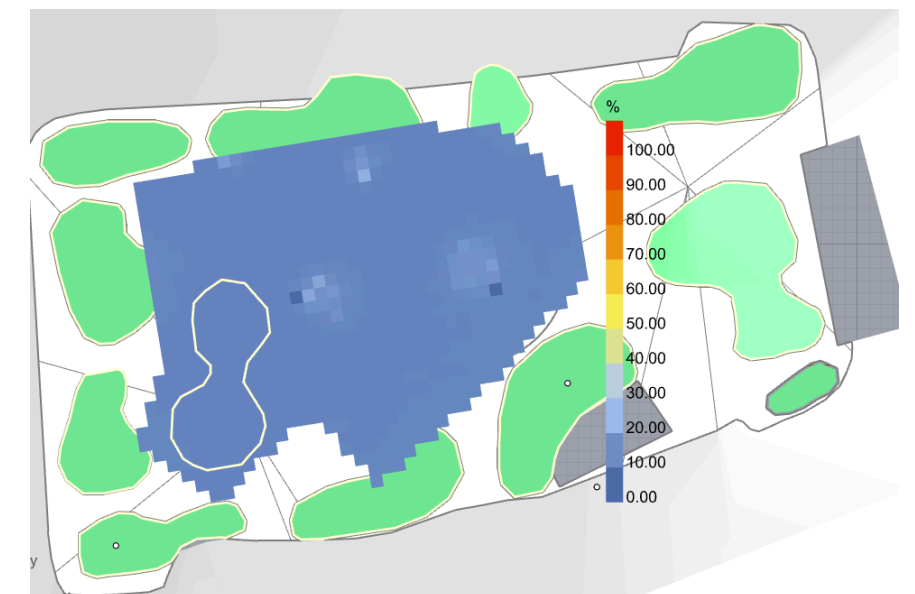
Figura 121 – Ensaio responsivo: resultado aplicado à malha encaixe



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na porcentagem média de UDI, apresentou-se 7,71%, com a figura 117, sua representação.

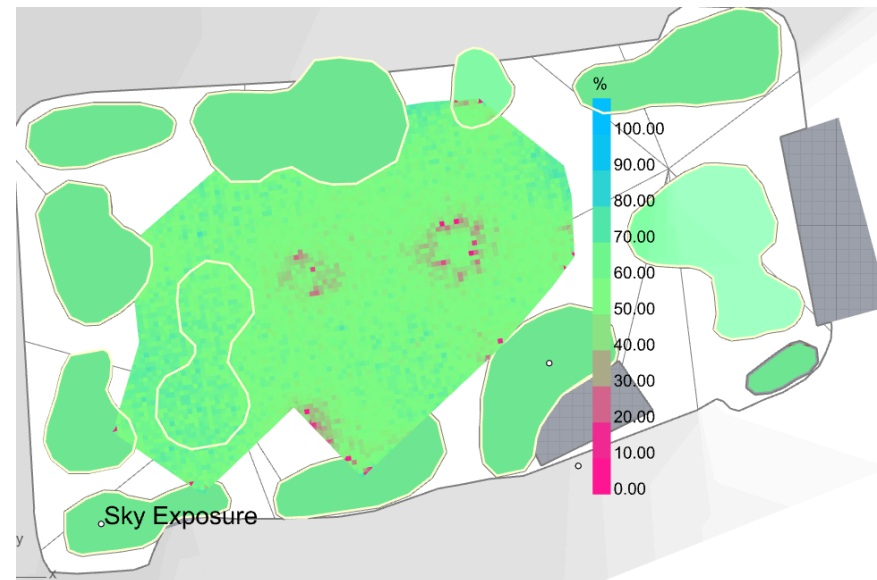
Figura 122 – Ensaio de UDI sob a malha encaixe



Fonte: Elaborado pelo autor.

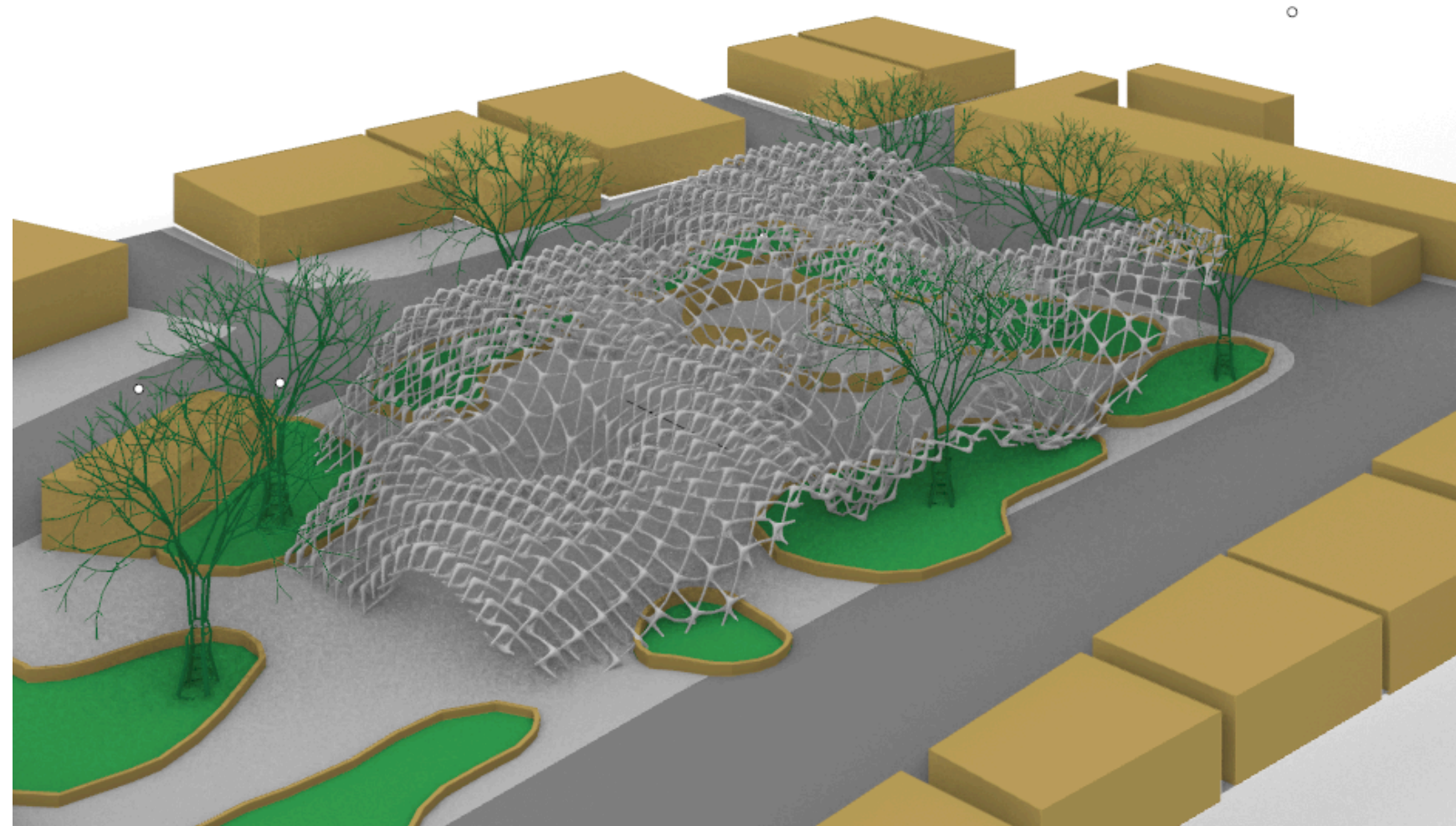
A porcentagem média de Exposição - 53,39%, e a figura 118, sua representação.

Figura 123 – Ensaio de exposição de abertura sob a malha encaixe



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 124 – Resultado do protótipo encaixe



Fonte: Elaborado pelo autor.

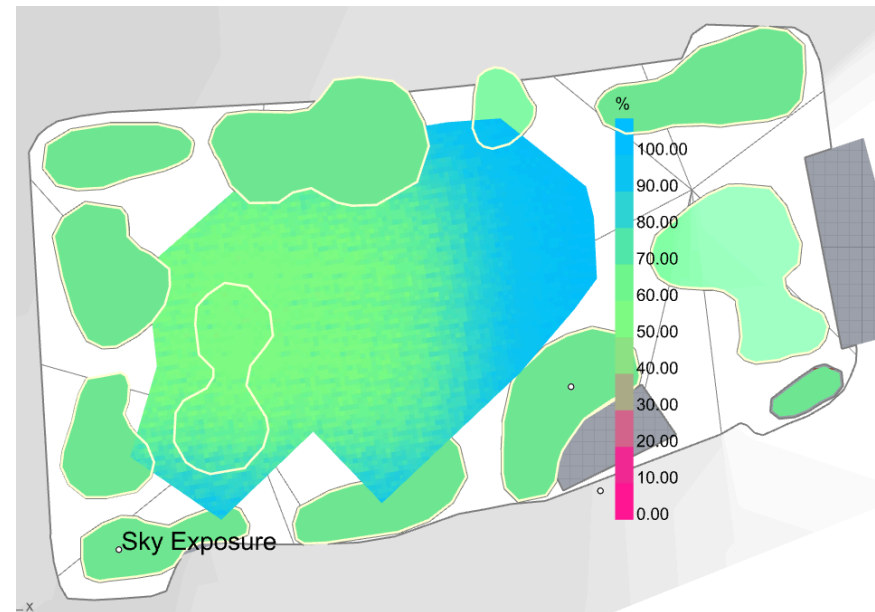
#### 5.4.6. SIMULAÇÃO DE UDI X EXPOSIÇÃO DE ABERTURA DO ENSAIO I

A fim de contemplar o primeiro ensaio, como também como estado de comparação, neste momento apresento o resultado da simulação do UDI, a média da porcentagem, a qual em relação ao caso tradicional - 7,49%, enquanto o caso piramidal apresentou 7,30%.

Neste momento apresento o resultado da Simulação UD(average) - 7,49%

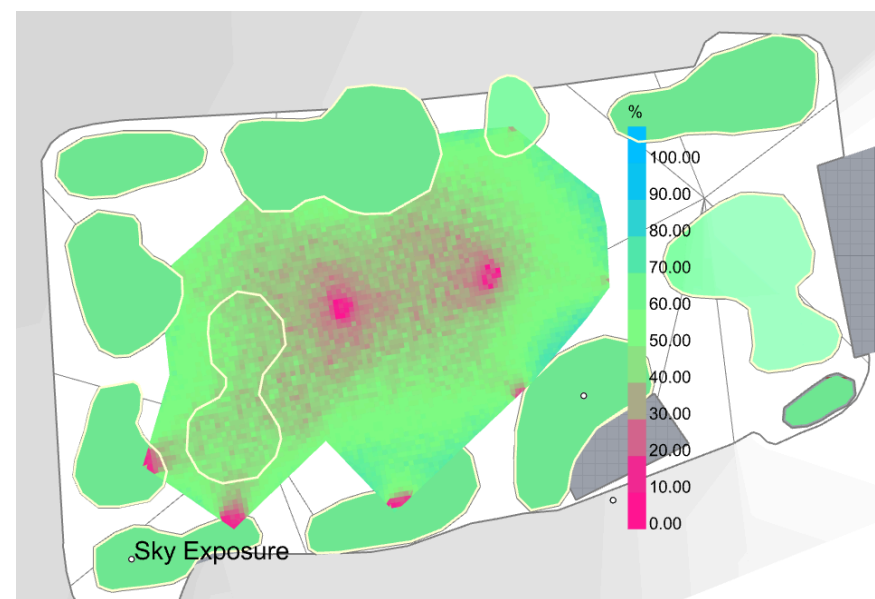
Em relação à exposição de abertura, o caso tradicional apresentou uma média de 69,80%, enquanto o outro em 44,69%. Assim, possível a partir das figuras 125 e 126, visualizar o resultado da exposição perante os dois casos.

Figura 125 – Ensaio de exposição de abertura sob o ensaio tradicional



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 126 - Ensaio de exposição de abertura sob o ensaio piramidal



Fonte: Elaborado pelo autor.

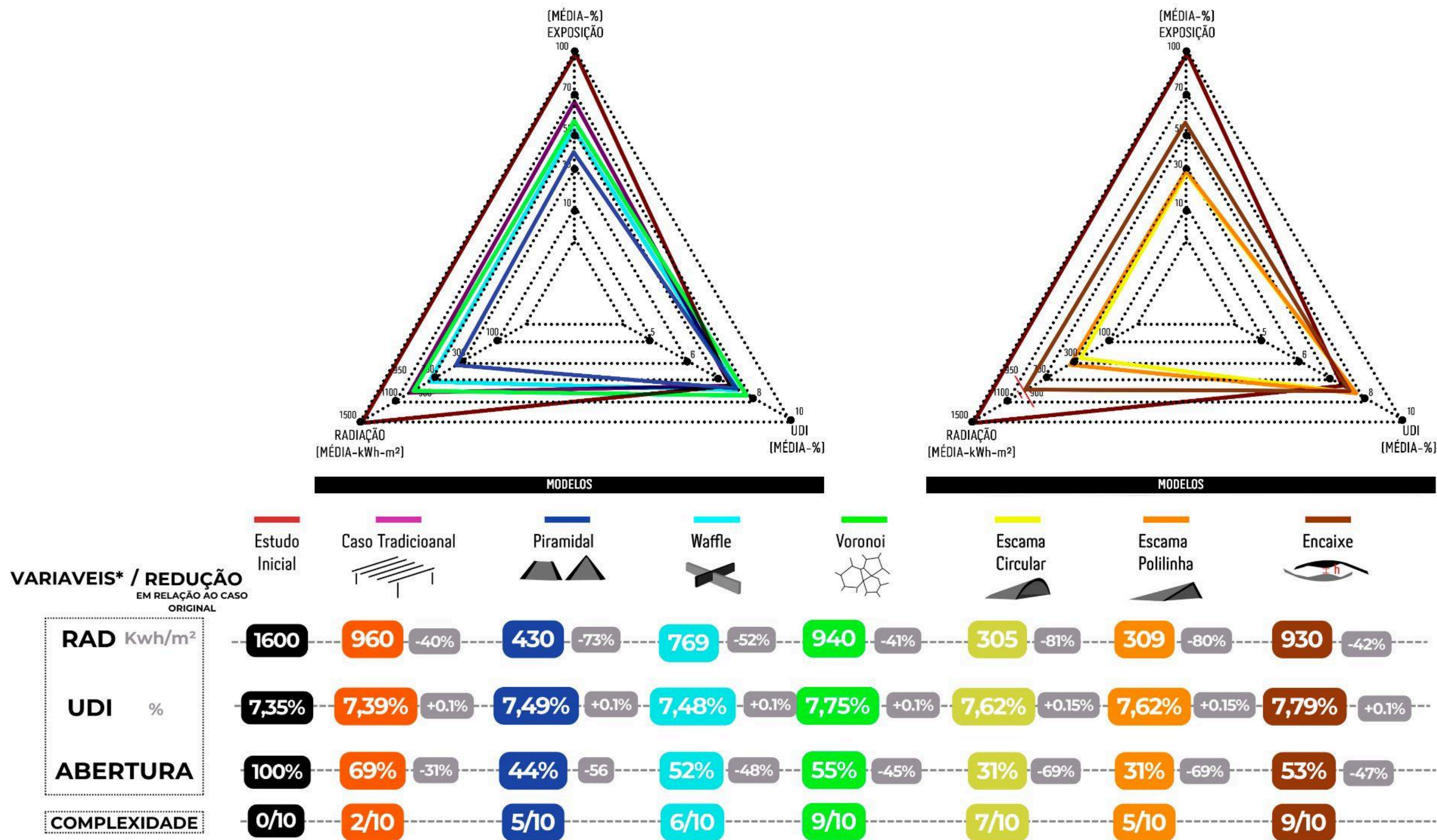
Esta etapa sintetiza e interpreta os resultados (Honeybee–Radiance) - radiação incidente ( $\text{kWh/m}^2$ ), UDI (média, % do ano na faixa útil), como também a exposição de abertura/Sky View (média, %), adotada como variável de controle morfológica.

Parto do mapa-resumo em radar (Figura 127) — que consolida a fase anterior — e avanço em uma leitura “de dentro para fora”: primeiro, a baliza técnico-conceitual que ancora o juízo de valor; em seguida, a análise por protótipo, respondendo às três questões centrais: (i) como a exposição controla o desempenho, (ii) como UDI e radiação se relacionam no conjunto, e (iii) que arranjos se mostram superiores neste estado de parametrização.

## 5.5. ANÁLISE DE TRADE-OFFS

Figura 127– Radar de síntese dos resultados

Fonte: Elaborado pelo autor.



Como premissa, UDI mede o percentual de horas anuais em que a iluminância no plano de trabalho cai em faixas úteis, a qual adoto o intervalo 300–3000 lx (UDI-a) como banda-alvo, conforme a formulação de climate-based daylight modelling (Nabil & Mardaljevic, 2005; Reinhart, Mardaljevic & Rogers, 2006). Assim, metas de referência variam por uso, mas patamares da ordem de 50–80% de UDI-a são discutidos como bons indicadores quando há controle de ofuscamento.

A radiação anual incidente não tem “ótimo” universal, mas, em comparação climática entre regiões, sob o mesmo cenário de céu, valores menores tendem a significar menores ganhos térmicos, desde que não colapsem a luz útil (Loonen et al., 2013). O comportamento é não-linear: sombreamento moderado costuma reduzir excedentes e aumentar UDI-a; sombreamento excessivo derruba iluminâncias — logo, espera-se um ótimo intermediário de porosidade/orientação (Ward, 1994; Roudsari & Pak, 2013; Reinhart et al., 2006).

Por fim, recorro que a UDI usada e seus bins devem ser os nativos do Honeybee-Radiance (UDI\_low/UDI\_a/UDI\_high), conforme a documentação do plugin que processa os grids por hora do ano. Como também, para esse estudo, apenas os modelos de piramidal e escama tem um algoritmo de caráter responsivo, sendo os demais não direcionados ao fator da radiação.

Desta forma, o primeiro caso é o Waffle, a qual apresenta exposição  $\approx 52,8\%$ , radiação  $\approx 770 \text{ kWh/m}^2$  e UDI  $\approx 7,5\%$ , com a produção de uma exposição moderada, frente aos sistemas mais “abertos”, com uma redução significativa de radiação sem perdas de UDI (que na verdade já se encontra baixa em todo o conjunto).

Em termos de mecanismo, a malha ortogonal cria auto-sombreamento relativamente homogêneo, filtrando porções de céu mais energéticas. Contudo, a distribuição não é ainda direcionada por orientação, o que explica UDI baixa: que parte das horas úteis que seguem migrando para faixas de insuficiência em períodos de céu claro, fora da zona de captura. Portanto, equilibra melhor os três eixos no estado atual, e desponta como *baseline* sólida para continuidade (Reinhart et al., 2006).

O caso do Voronoi, com exposição  $\approx 55,9\%$ , a estrutura apresenta radiação alta ( $\approx 940 \text{ kWh/m}^2$ ) e UDI  $\approx 7,8\%$ . Ou seja, em outras palavras, paga caro em carga solar sem contrapartida luminosa. A razão plausível é o padrão viajante a direção de aberturas, que favorece certas direções de céu/sol e deixa “janelas” pouco controladas; o resultado é mais excedente (horas com iluminâncias acima do patamar útil), que não converte em UDI. O comportamento é clássico em literaturas de sombreamento: quando a geometria não “casa” com a trajetória solar dominante e o componente difuso, aumentam ganhos térmicos e ocorrências fora da faixa útil.

O protótipo de encaixe, com exposição  $\approx 53,4\%$ , radiação  $\approx 930 \text{ kWh/m}^2$  e UDI  $\approx 7,7\%$ , acaba por se repetir a lógica do Voronoi: muita energia, pouca UDI. A dupla camada e o desenho dos “nós” parecem gerar vistas francas a trechos de céu de alta energia, sem efeito de gradiente por orientação. Na prática, o Encaixe comporta-se menos eficiente que o Waffle na contenção dos ganhos, sem mostrar ganho luminoso.

A Escama circular, apresenta uma decisão morfológica de alta redução - exposição  $\approx 31\%$ , que derruba a radiação para  $\approx 305 \text{ kWh/m}^2$  — um desempenho de proteção notável — e eleva a UDI modestamente ( $\approx 7,62\%$ , ainda baixa). A causa está no padrão

global de fechamento, pois há extensas áreas com 0% de exposição, o que estrangula a captação difusa e reduz janelas de 300–3000 lx. Em suma, é excelente para carga térmica, mas fraco para luz útil no setup atual. Assim por se seguir a literatura de fachadas adaptativas, sinaliza que morfologias responsivas podem, quando alinhadas a dados climáticos e orientação, deslocar horas de excedente/insuficiência para a banda útil — mas isso requer direcionalidade (abrir onde há céu útil, fechar onde há sol direto crítico), não apenas responder a “radiação acumulada” de modo global. A qual neste caso precisa reformular a forma em quadrantes, e simular novamente a escama para que responda a cada quadrante, e não apenas ao fator geral.

Agora voltando ao primeiro ensaio, em relação ao caso tradicional e piramidal. Para essa família, com UDI média  $\approx 7,5\%$  (tradicional) e  $\approx 7,3\%$  (piramidal); a exposição caiu de  $\approx 69,8\%$  (tradicional) para  $\approx 44,7\%$  (piramidal), com queda quase nula de UDI.

Em termos de trade-off, o piramidal melhora geometricamente a contenção da abertura sem converter isso em luz útil. Assim, se, como sugere o radar, a radiação também caiu, o benefício foi térmico, mas não luminoso. Em comparação ao Waffle (exposição  $\sim 53\%$  com radiação substancialmente menor que os “abertos”), o piramidal não demonstra vantagem integrada no estado atual.

#### 5.5.1. SÍNTESE E INTERPRETAÇÃO TRANSVERSAL

Ao cruzar as três variáveis, o conjunto mostra um padrão estável: (i) uma alta exposição tende a elevar a radiação sem ganhos consistentes de UDI; (ii) uma baixa exposição derruba radiação de forma expressiva, mas recupera pouco UDI; (iii) a UDI

varia pouco no intervalo testado, com melhoras discretas quando a porosidade se organiza de modo mais protetivo e menos “vazado”.

Isso caracteriza um desalinhamento entre porosidade e clima/orientação — o sistema não está convertendo horas de excesso/escassez em horas úteis.

Assim, ao invés de forçar um “vencedor único”, a leitura integrada mostra dois aprendizados complementares. Primeiro, as Escamas, com 31% de exposição, entregam o melhor pareamento entre baixa radiação ( $\approx 305 \text{ kWh/m}^2$ ) e UDI ligeiramente superior ( $\approx 7,62\%$ ), confirmando que a contenção calibrada da abertura favorece ambos os objetivos no pavilhão estudado (Benyus, 1997; Loonen et al., 2013). Segundo, o Waffle se mantém como intermediário eficiente: com porosidade média, reduz carga melhor que Voronoi/Encaixe sem piorar a UDI, servindo de baseline para ajustes direcionais.

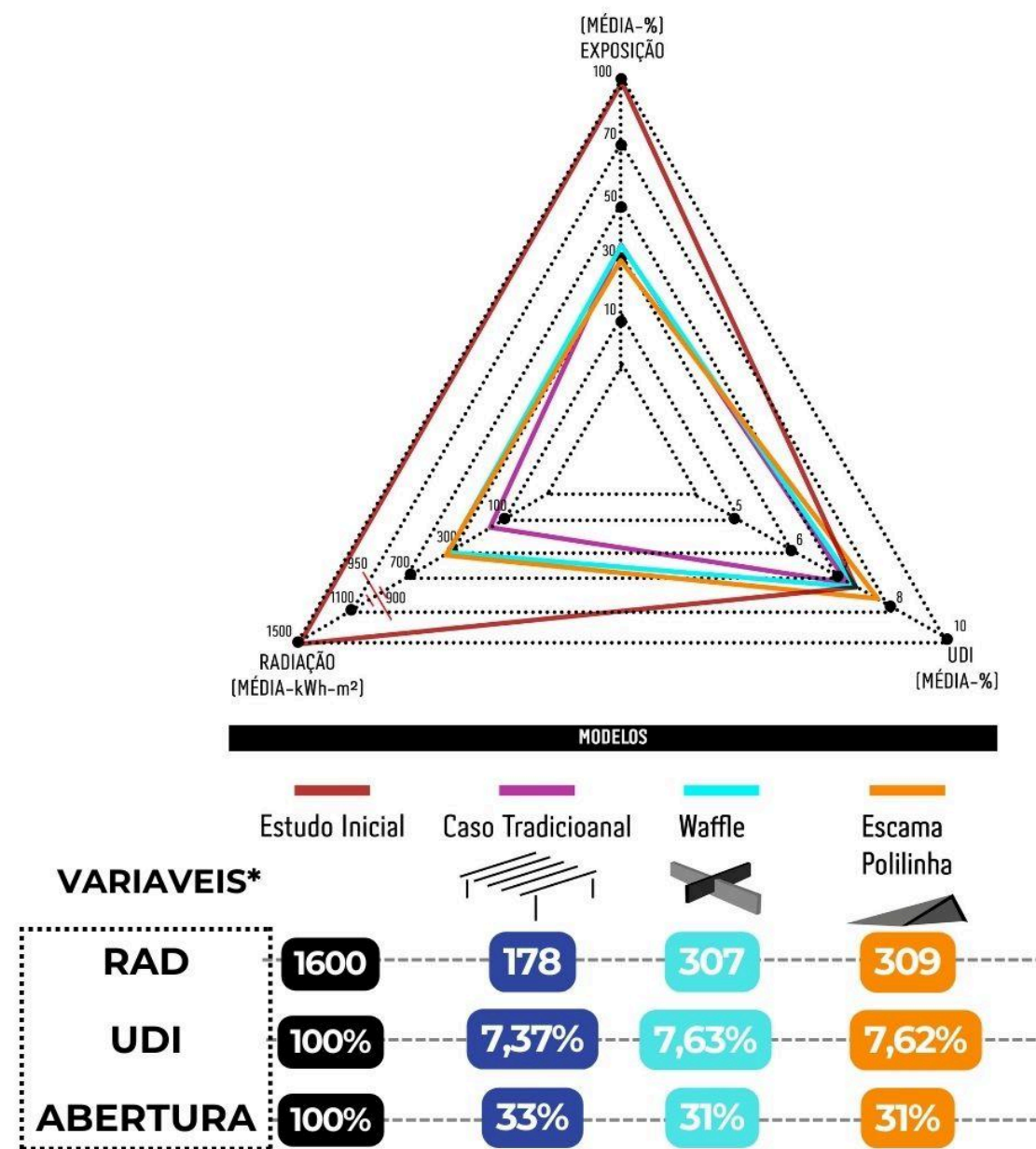
O insight central é que a variável de controle (Sky View/exposição) mostrou-se dominante para puxar a radiação para baixo e não penalizar a UDI — desde que a porosidade não seja indiscriminada, mas estruturada por orientação (Reinhart et al., 2006; Loonen et al., 2013).

### 5.5.2. ESTUDO SECUNDÁRIO

Para testar a hipótese de dominância do Sky View, repliquei a porosidade alvo das Escamas nas demais tipologias: configurei o Waffle para  $\approx 31\%$  de exposição e o Tradicional para  $\approx 33\%$ . A partir da figura 23, demonstro que, o Waffle(31%) resultou em radiação  $\approx 307 \text{ kWh/m}^2$  e UDI  $\approx 7,63\%$  — praticamente equivalente às Escamas ( $31\% \rightarrow 305 \text{ kWh/m}^2$ ;  $7,62\%$ ),

evidenciando que padronizar a abertura comprime a radiação a um patamar similar e mantém a UDI (figura 128).

Figura 128– Radar de síntese do estudo secundário



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Tradicional(33%) atingiu radiação  $\approx 178 \text{ kWh/m}^2$  e UDI  $\approx 7,37\%$ : ganhou muito em proteção térmica, mas não converteu a porosidade reduzida em UDI-a, possivelmente pela sua lógica

vertical e pouco direcional (maior porção de horas em insuficiência). Em síntese técnica, o Sky View controla a radiação de forma quase monotônica — reduzir abertura  $\downarrow$  reduz radiação  $\downarrow$  —, ao passo que a UDI depende também da distribuição direcional da porosidade e do acoplamento com a trajetória solar.

Em outras palavras, igualar a taxa de abertura nivela o “teto térmico”, mas a geometria e sua orientação é que determinam quanto dessa redução vira luz útil (Nabil & Mardaljevic, 2005; Reinhart et al., 2006).

## 6. BALANÇO

Ao decorrer do trabalho, o percurso confirma duas lições metodológicas: em si, é acessível e rápida de operar, mas a leitura crítica dos seus resultados permanece dependente do fator humano: perseguir “um melhor resultado absoluto” mostrou-se ingênuo quando descolado da variável de controle, isso por conta que o antigo objetivo era alcançar uma melhor resultado a partir da forma final.

Ao recentrar a análise na exposição/Sky View, o processo ganhou rigor e deslocou-se de uma parametria voltada ao estilo (isto é, orientada prioritariamente pela aparência final da forma) para uma parametria orientada por critérios mensuráveis, sem ficar preso a forma como um meio regulador, mas sim a variável de controle que, por sua vez, modula radiação e UDI (Benyus, 1997; Menges, 2012).

A segunda lição é operacional: simulações leves (radiação e Sky View) rodaram em ~30 s, permitindo intervalos rápidos e ampla exploração; UDI demandou ~2 min (aumentando com a complexidade geométrica), devendo ser reservada a verificação de finalistas. Em termos de custo-benefício, otimizar com proxies


leves e auditar com UDI rendeu mais variações testadas e melhor cobertura do espaço de soluções (Loonen et al., 2013; Ward, 1994; Roudsari & Pak, 2013).

Além, foi incorporado ainda um índice empírico “complexidade de modelagem”, a qual varia de uma nota de (0–10) para protótipo, assim, neste momento estabeleço que — Tradicional=2; Piramidal=5; Escama polilinha=5; Waffle=6; Escama circular=7; Voronoi=9; Encaixe=9 — que ajuda a ponderar custo de modelagem/simulação versus ganhos performativos. Observa-se que - geometrias muito facetadas ou orgânicas tendem a pesar as simulações sem garantir melhor desempenho; ao focar na variável de controle, obtive resultados superiores com custos computacionais menores.

E uma observação sobre o protótipo tradicional, quando analisado no segundo estudo, com exposição em (33%), apesar de simples e de rodar muito rápido, alcançou radiação 178 kWh/m<sup>2</sup> (melhor que as Escamas) — mas UDI 7,37%, inferior ao caso sem reparametrização, lembrando que proteção térmica isolada não basta. E um adendo, só foi possível fazer esse ajuste de exposição a partir do momento que tal caso ocupou uma área 1/3 maior que a do pavilhão.

Ainda neste contexto, outro peso na análise se dá ao contexto do pavilhão: o form-finding da casca, que ao comparar com o caso tradicional, que por si só já se faz uma grande diferença nos resultados, demonstrando que sua forma adaptada ao contexto já demonstra um bom resultado. E ainda mais quando se implementa células responsivas - a qual foi o foco deste trabalho - por quadrante (em vez de um padrão uniforme) são um caminho para elevar UDI mantendo radiação baixa (Reinhart et al., 2006; Loonen et al., 2013).

Em suma, o Sky View/exposição emerge como alavanca dominante - a geometria e orientação refinam quanto desse controle vira UDI-a. A estratégia que se desenha para as próximas etapas é varrer rapidamente a porosidade com métricas leves e, só então, selar escolhas com UDI — mantendo o foco no acoplamento forma-clima e evitando tanto o formalismo gratuito quanto a busca por “um único vencedor”, ficando preso ao processo de um bom resultado, e não simplesmente a sua forma.



# 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se dizer que, à luz dos ensaios climáticos e do balanço apresentados neste trabalho, intervém à uma contribuição operacional, pois o processo metodológico pautado pela morfogênese torna-se mais consciente porque sua gênese é parametrizada e rastreável, permitindo domínio das variáveis e do encadeamento causal entre regras, restrições e resultados.

Isso amplia o campo de experimentação: ao alterar parâmetros e reaplicar um protocolo consistente de avaliação, obtém-se um repertório não destrutivo de soluções cuja qualidade pode ser refinada por ciclos de simulação e seleção (Reinhart, Mardaljevic & Rogers, 2006). Os resultados deste trabalho indicam que a passagem de uma forma pautada no estilo para uma em critérios mensuráveis depende menos de formas complexas e mais da clareza sobre a variável de controle que governa o sistema. Aqui, a exposição/Sky View emergiu como alavanca dominante para reduzir ganhos térmicos sem, por si só, colapsar a luz útil — desde que a porosidade seja organizada de modo direcional e acoplada ao clima (Nabil & Mardaljevic, 2005; Loonen et al., 2013).

Do ponto de vista operacional, o Balanço mostrou uma estratégia pragmática: simulações leves (radiação e Sky View) entregam leituras em segundos, permitindo limpar rapidamente o espaço de soluções; a UDI — mais custosa — passa a funcionar como auditoria dos finalistas. Esse arranjo eleva o rendimento do processo porque aumenta o número de alternativas testadas antes de investir em métricas pesadas (Ward, 1994; Roudsari & Pak, 2013).

Também ficou claro que complexidade geométrica ≠ desempenho: modelos muito facetados ou orgânicos tendem a onerar o custo computacional sem garantias de ganho; por outro lado, malhas simples, calibradas para porosidades equivalentes às melhores candidatas, aproximam-se do patamar térmico e deixam evidente que a distribuição direcional da abertura é o fator que converte (ou não) essa proteção em horas úteis de iluminação. O caso “Tradicional” com ~33% de abertura ilustra: atingiu radiação inferior à de arranjos mais sofisticados, mas a UDI ficou aquém, lembrando que reduzir porosidade nivela o teto térmico, enquanto geometria/orientação governam a utilidade da luz (Nabil & Mardaljevic, 2005; Loonen et al., 2013).

Em síntese, se a arquitetura deve responder a contextos variáveis — clima e matéria —, então o procedimento projetual precisa ser adaptativo, capaz de converter restrições em agentes gerativos. Esta é, em essência, a tradição da morfogênese: de Thompson (1961), para quem a forma expressa campos de forças, às sínteses contemporâneas de Oxman (2006), Menges (2008) e Carpo (2011), a forma deixa de ser imposição a priori e passa a resultar de interações entre regras, dados e meios materiais.

O design digital, ao integrar simulação ambiental e estrutural desde a gênese, permite que decisões formais sejam testadas por sua capacidade de regular variáveis de controle (como a exposição/Sky View) que, por sua vez, modulam radiação e iluminância útil (Nabil & Mardaljevic, 2005; Reinhart et al., 2006).

O trabalho confirma ainda a relevância do ecossistema open source: a circulação de scripts e algoritmos — de plugins de simulação a rotinas de otimização — acelera a curva de aprendizado e gera desdobramentos imprevistos (Carpo, 2011; Menges, 2008). Persistem, contudo, reveses: tirar proveito pleno dessas técnicas exige alfabetização computacional, curadoria crítica de materiais (ainda dispersos e majoritariamente em inglês) e, não raro, capacidade de processamento além do disponível a muitos estudantes. A tática adotada aqui — proxies rápidos para exploração ampla e UDI para validação, com foco explícito na variável de controle — é, portanto, também uma forma de democratizar a abordagem: torna o processo factível em equipamentos modestos, sem abrir mão de rigor.

Em síntese, três conclusões orientam trabalhos futuros. Primeiro, definir e medir a variável de controle (aqui, exposição/Sky View) deve anteceder decisões formais e guiar a morfogênese. Segundo, simulações leves ampliam o horizonte de busca e, combinadas à auditoria com UDI, oferecem eficiência cognitiva e computacional. Terceiro, o acoplamento forma-clima — via porosidade direcional, máscaras solares e regras de abertura por quadrante — consolida a passagem de uma morfologia apenas “interessante” para uma morfogênese performativa, em que a forma é a assinatura visível de relações mensuráveis (Thompson, 1961; Oxman, 2006; Menges, 2008; Carpo, 2011; Nabil & Mardaljevic, 2005; Reinhart et al., 2006; Loonen et al., 2013; Ward, 1994; Roudsari & Pak

# 8. REFERÊNCIAS

## REFERÊNCIAS

- ADORNO, Theodor W.; HORKHEIMER, Max. *Dialética do Esclarecimento: Fragmentos filosóficos*. Rio de Janeiro: Zahar, 1985. (Obra original: 1947.)
- AHMED, M. M. G. *Bio-digital Morphogenesis in Architecture: An Application on Digital Botanic Architecture*. Dissertação de Mestrado—Alexandria, Egypt: Universidade de Alexandria, 2015.
- AHMED, S. *Biomimicry in architectural design: a comprehensive approach*. In: MYERS, J. (Org.). *Advanced Studies in Parametric Architecture*. São Paulo: Edusp, 2012. p. 125–142.
- ARSLAN, S.; SORGUC, G. A. Similarities between “Structures in Nature” and “Man-made Structures”: Biomimesis in Architecture. In: COLLINS, M. W.; BREBBIA, C. A. (Eds.). *Design and Nature II: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. [s.l.]: WIT Press, 2004. p. 45–54.
- BAKER, Geoffrey. *Le Corbusier: uma análise da forma*. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2014.
- BARTHLOTT, W.; RAFIQPOOR, M. D.; ERDELEN, W. R. *Bionics and Biodiversity – Bioinspired Technical Innovation for a Sustainable Future*. In: KNIPPERS, J.; NICKEL, K. G.; SPECK, T. (Eds.). *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction, Biologically-Inspired Systems 8*. Cham, Switzerland: Springer, 2016. v. 9p. 11–57.
- BAUMEISTER, Dayna; BENYUS, Janine; DWYER, Jamie; RITTER, Sherry; TOCKE, Rose. *Biomimicry resource handbook, a seed bank of knowledge and best practices*. Missoula MT/USA: Biomimicry 3.8, 2012.
- BEESELEY, Philip; SEEBOHM, Thomas. *Digital Tectonic Design. Promise and Reality: State of the Art versus State of Practice in Computing for the Design and Planning Process*. Weimar, 2000, p. 287-290.
- BENYUS, J. M. *Biomimética: Inovação inspirada pela natureza*. 6ª ed. São Paulo: Ed. Pensamento- Cultrix, 1997.
- BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE. *Exposition Universelle. expositions.bnf.fr*. Disponível em: <http://expositions.bnf.fr/universelles/grand/079.htm>.
- BJORKLUND, Kjell R.; GOLL, Robert. *Fotografia de radiolários*. radiolaria.org. Disponível em: [https://www.radiolaria.org/what\\_are\\_radiolarians.htm](https://www.radiolaria.org/what_are_radiolarians.htm). Licença: CC BY-NC-SA 3.0.
- BOFF, Leonardo. *Sustentabilidade: o que é - o que não é*. Petrópolis: Vozes, 2011.
- BONNER, John Tyler. *The Evolution of Complexity*. Princeton: Princeton University Press, 1964. Apud STEADMAN, Philip. *The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts*. London: Routledge, 2008.
- BROTAS, Luisa; RUSOVAN, Danijel. *Parametric daylight envelope*. In: PLEA, 2013 - Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, 29., 2013. Munique. Proceedings... Munique, 2013.
- BURRY, J.; BURRY, M. *The New Mathematics of Architecture*. Londres, Ed. Thames & Hudson, 2010.
- CACHE, Bernard. *Earth Moves: The Furnishing of Territories*. Cambridge: MIT Press, 1995.
- CAPRA, Fritjof. *A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos*. São Paulo: Cultrix, 1996.
- CARPO, Mario. *A short but believable history of the digital turn in architecture*. e-flux, Mar. 2023. Disponível em: <https://www.e-flux.com/architecture/chronograms/528659/a-short-but-believable-history-of-the-digital-turn-in-architecture/>.
- CARPO, Mario. *Partitioned Computation: Discretism, or the Rise of the Discrete Digital*. In: RETSIN, Gilles (Org.). *Discrete: reappraising the digital in architecture*. v. 89. Barcelona: Actar Publishers, 2019. p. 25–27.
- CARPO, Mario. *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*. 1st edition. [S. l.]: The MIT Press, 2017.
- CARTANA, Rafael Prado; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay; MAYER, Adir. *Estudo piloto para análise de elementos de controle solar com formas complexas*. In: Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto do Ambiente Construído, 14. e 10., 2017. Balneário Camboriú. Anais... Balneário Camboriú, 2017. p. 1684-1693.
- CHENG, N. Y.; KHORASGANI, M. L.; WILLIAMS, N.; PROHASKY, D.; BURRY, J. *Understanding Light in Building Skin Design*. In: THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN

RESEARCH IN ASIA,20., 2015, Hong Kong. Proceedings [...].Hong Kong: 2015, p. 323-3327.

COLQUHOUN, Alan. Modern Architecture. Oxford: Oxford University Press, 2002.

DE CARLO, Giancarlo. Arquitetura da participação. In: FARIAS, Ana Carolina Carvalho. A arquitetura da participação de Giancarlo de Carlo revisitada. Revista VIRUS, v. 2, n. 18, 2019. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/virus/article/view/228922>.

DELANDA, Manuel. A New Philosophy of Society: Assemblage Theory and Social Complexity. London: Continuum, 2006.

DELANDA, Manuel. Intensive Science and Virtual Philosophy. London: Continuum, 2002.

DELANDA, Manuel. Intensive Science and Virtual Philosophy. London: Continuum, 2002/2004.

DELANDA, Manuel. Intensive Science and Virtual Philosophy. London: Continuum, 2002/2004.

DELGARM, N.; SAJADI, B.; KOWSARY, F.; DELGARM, S. Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). Applied Energy, Tehran, v. 170, p. 293-303, may 2016.DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.141>

DEMPSEY, Alan; LOH, Paul; PIASECKI, Michal; STARCZEWSKI, Tomasz; CHUNG, James. Times Eureka Pavilion (Nex Architecture), 2011. Disponível em: <https://www.archdaily.com/142509/times-eureka-pavilion-nex-architecture>.

DESCARTES, René. Discurso do Método. São Paulo: Nova Cultural, 1996. (Obra original: 1637.)

DEUTSCHE WELLE. Refugiados Climáticos. Bonn: DW, 2019. Documentário.

DINO, Ipek. Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. METUUniversidade Federal do Espírito Santo Programa Institucional de Iniciação Científica Relatório Final de Pesquisa Journal of Faculty of Architecture, v. 29, n. 1, p. 207-224, 2012. Disponível em:<[http://jfa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2012/cilt29/sayi\\_1/207-224.pdf](http://jfa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2012/cilt29/sayi_1/207-224.pdf)>.

EASTMAN, Charles; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

EL AYOUTY, Heba; KOC, Baran. HexaWave. Disponível em: <https://blog.iaac.net/hexawave/>. Modificado em: 27 nov. 2024. Disponível em: <https://blog.iaac.net/hexawave/>

ELTAWHEEL, A.; SU, Y. Parametric design and daylighting: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Nottingham, v. 73, p. 1086-1103, jun. 2017.

EVANS, Robin. The Projective Cast: Architecture and Its Three Geometries. Cambridge: MIT Press, 1995.

FAJKUS, M. Superficial skins? Super Skins? Shading structures and thermal impact analysis.In: ADVANCED BUILDING SKINS –ENERGY FORUM, 2013, Itália.Proceedings [...].Itália: 2013, p. 23-27.

FEITOSA, Maria Luiza Pereira de Alencar Mayer; PEREIRA, A. G. D.; CARDOSO, H. R. (Orgs.). Hipervulnerabilidade, saúde e humanização do direito civil-constitucional. João Pessoa: Editora IDCC, 2017.

FONSECA, Ligiana Pricila Guimarães et al . Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. Ambient. constr., Porto Alegre , v. 17, n. 1, p. 267-288, mar. 2017.DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100135>.

FRAZER, J. An Evolutionary Architecture. London: Architectural Association School ofArchitecture, 1995.

FREEPIK. Composição de efeitos climáticos. Disponível em: <[https://img.freepik.com/fotos-gratis/composicao-de-efeitos-climaticos\\_23-2149853311.jpg](https://img.freepik.com/fotos-gratis/composicao-de-efeitos-climaticos_23-2149853311.jpg)>.

FULLER, Richard Buckminster. Critical path. New York: St. Martin's Press,1981.

GEIER, Sven. Eye Storm. uncovering.org. Disponível em: <[https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEg6a3UKOxHESCEJv6Nzffjhp8MUUtV0DQakav-fWBvLhDDwLfVXrklupEXfg2jXdm6s7zDFJnmg2voMDCkalrSzm35vhOfPn83rFC-nH2eginacH-03Fte8z2te6UTYdrRhurjYN6-kH2NY/s1600/070808\\_blog.uncovering.org\\_sven-geier\\_eye-storm\\_small.jpg](https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEg6a3UKOxHESCEJv6Nzffjhp8MUUtV0DQakav-fWBvLhDDwLfVXrklupEXfg2jXdm6s7zDFJnmg2voMDCkalrSzm35vhOfPn83rFC-nH2eginacH-03Fte8z2te6UTYdrRhurjYN6-kH2NY/s1600/070808_blog.uncovering.org_sven-geier_eye-storm_small.jpg)>.

GHYKA, Matila. O Número de Ouro: Ritos e Rítmicas na Construção das Civilizações. Lisboa: Edições 70, 1977.

GOEL, A. K.; MCADAMS, D. A.; STONE, R. B. Biologically Inspired Design -Computational Methods and Tools. London Heidelberg New York Dordrecht: Springer,2014.

GONZÁLEZ, J.; FIORITO, F. Daylight Design of Office Buildings: Optimization of External. Buildings, Sydney, v. 5, n. 2, p. 560-580, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.026>

GORDON, William. Sinética: El desarrollo de la capacidad creadora. México: HerrerosHnos. S. A., 1965.

GOSSARD, D.; LARTIGUE, B.; THELLIER, F. Multi-objective Optimization of a Building Envelope for Thermal Performance Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Network. Energy and Buildings, Oxford, v. 67, p. 253-260, 2013.

HAECKEL, Ernst. Kunstformen der Natur. Leipzig: Bibliographisches Institut, 1899-1904.

HANSMEYER, Michael; DILLENBURGER, Benjamin. Mesh Grammars—Procedural Articulation of Form. In: Proceedings of the Advances in Architectural Geometry Conference, London, 2012.

HEIDEGGER, Martin. Construir, Habitar, Pensar. In: \_\_\_\_\_. Ensaios e Conferências. Petrópolis: Vozes, 1954. (Texto original de 1951; em português geralmente no livro “Ensaios e Conferências”.)

HELMS, Michael E.; VATTAM, S.; GOEL, A. K. Biologically inspired design: process and products. Design Studies, v. 30, n. 5, p. 606–622, 2009.

HEMENWAY, Toby. Gaia's Garden: A Guide to Home-scale Permaculture. 2. ed. White River Junction: Chelsea Green Publishing, 2005.

HENSEL, M, A. Computational Morphogenesis: Integral Form Generation and Materialization. Em 'body'ing Virtual Architecture: The Third International Conference of the Arab Society for

Computer Aided Architectural Design (ASCAAD). Alexandria, Egypt: The Arab Society for Computer Aided Architectural Design, 2007.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim; WEINSTOCK, Michael. Emergence: Morphogenetic Design Strategies, Architectural Design, London: Wiley Academy, 2004.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim; WEINSTOCK, Michael. Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture. London: Routledge, 2010.

HESKETT, John. Design: A Very Short Introduction. Oxford: Oxford University Press, 2005.

I-ASC. First Fractal. Disponível em: <[https://i-asc.org/wp-content/uploads/2023/01/first\\_fractal-519x388.png](https://i-asc.org/wp-content/uploads/2023/01/first_fractal-519x388.png)>.

IGNATEVA, Anzhelika. Shadow Dome Configurator. IAAC Blog, Barcelona: Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 20 jun. 2025. Disponível em: <https://blog.iaac.net/shadow-dome-configurator/>.

INSTITUTE for Advanced Architecture of Catalonia. Climatic Canopy. Blog IAAC, 2023. Disponível em: <https://blog.iaac.net/climatic-canopy/>.

INSTITUTE FOR ECONOMICS & PEACE. Ecological Threat Report 2020: Analysing ecological threats, resilience & peace. Sydney: IEP, 2020. Disponível em: [https://www.visionofhumanity.org/wp-content/uploads/2020/10/ETR\\_2020\\_web-1.pdf](https://www.visionofhumanity.org/wp-content/uploads/2020/10/ETR_2020_web-1.pdf).

JAMES, K. Expressionism, Relativity, and the Einstein Tower. Journal of the Society of Architectural Historians, v. 53, n. 4, p. 392–413, 1994.

JASKULSKI, Yasmin; NAROLA, Vishesh; SHAH, Miti. Forces of Nature: Blue Saddle Roof. IAAC Blog, Barcelona: Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 20 mar. 2023. Disponível em: <https://blog.iaac.net/forces-of-nature-blue-saddle-roof/>

KALAY, Yehuda E. Architecture's new media: Principles, theories, and methods of computer-aided design. MIT Press, 498 p., 2004.

KAUFFMAN, Stuart A. At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity. Oxford: Oxford University Press, 1995.

KENGO KUMA & ASSOCIADOS. Museu GC Prostho Centro de Pesquisa. Kasugai-shi, Prefeitura de Aichi, Japão, 2010. Disponível em: <<https://www.exemplo.com/gcprostho>>.

KENGO KUMA & ASSOCIATES. Pavilhão Yure. Jardim das Tulherias, Paris, 2015. Disponível em: <<https://www.exemplo.com/pavilhao-yure>>. Acesso em: 16 jun.

KHORASGANI, M.L.; BURRY, J.; SALEHI, M. Thermal performance of patterned facades: Studies on effects of patterns on the thermal performance of facades. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE, 32., 2014, Inglaterra. Proceedings [...]. Inglaterra: eCAADe, 2014, p. 267-276.

KLEIN, Julie Thompson. Creating Interdisciplinary Campus Cultures. San Francisco: Jossey-Bass, 2009.

KNIPPERS, J.; SPECK, T. Design and Construction Principles in Nature and Architecture. *Bioinspiration & Biomimetics*, v. 7, p. 1–10, 2012.

KOLAREVIC, Branko. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, Branko. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. London: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, Branko. *Towards the Performative in Architecture*. Em: *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*. New York: Spon Press, 2005, p. 204–213.

KWINTER, Sanford. *Architectures of Time: Toward a Theory of the Event in Modernist Culture*. Cambridge: MIT Press, 2001.

LADYBUG TOOLS. What is Ladybug? Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/ladybug.html>>. Acesso

LAWSON, Bryan. *Como arquitetos e designers pensam*. São Paulo: oficina detalentos, 2011.

LEACH, Neil. *Designing for a Digital World*. London: Wiley, 2001.

LEFF, Enrique. *Saber Ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder*. 4. ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

LÉVI-STRAUSS, Claude. *O Pensamento Selvagem*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1976. (Tradução da obra original: *La pensée sauvage*, 1962.)

LÖBACH, Bernd. *Design Industrial: Bases para configuração dos produtos industriais*. Tradução Freddy Van Camp. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 2001.

LOVERIDGE, R. Parametric materiality: material properties as catalyst for design. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA)*, 16., 2011, Newcastle. *Proceedings...* Newcastle, Australia: The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 2011. p. 220-227.

LUCARELLI, Caio de Carvalho; CARLO, Joyce Correna; MARTÍNEZ, Andressa Carmo Pena. Parametrização e simulação de radiação solar para otimização de uma cobertura modular. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, v. 10, 2019.

MALKAWI, Ali M. *Simulation-based Decision Support Systems for Building Performance*. In: KOLAREVIC, Branko; MALKAWI, Ali M. (Orgs.). *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*. New York: Spon Press, 2005.

MANZINI, Ezio. *O Design do Quotidiano: objetos, lugares, memórias*. Lisboa: Centro Português de Design, 1993.

MARTINO, Jarryer Andrade; CELANI, Gabriela. Sistema Generativo Evolutivo como Método no Processo Criativo. *Blucher Design Proceedings*, v. 1, n. 8, p. 380-383, 2014. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/301397023\\_Sistema\\_Generativo\\_Evolutivo\\_como\\_Metodo\\_no\\_Processo\\_Criativo](https://www.researchgate.net/publication/301397023_Sistema_Generativo_Evolutivo_como_Metodo_no_Processo_Criativo)>.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York: North Point Press, 2002.

MEADOWS, Donella H.; MEADOWS, Dennis L.; RANDERS, Jørgen; BEHRENS III, William W. *Os limites do crescimento: um relatório*

para o projeto do Clube de Roma sobre o dilema da humanidade. São Paulo: Perspectiva, 1973.

MENGES, A. Integral Formation and Materialization: Computational Form and MaterialGestalt. In: *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*. Taylor & Francis Books (New York): Routledge, 2008. p. 195–210.

MENGES, A.; WEINSTOCK, M.; HENSEL, M. *Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture*. 270 Madison Avenue, New York: Routledge, 2010.

MICROSERVOS. Menger Post-It. Disponível em: <<https://www.microservos.com/images/MengerPostIt.jpg>>.

MIGAYROU, Frédéric. *Arquiteturas não padronizadas*, catálogo da exposição, Editions Du Centre Pompidou (Paris), 2003.

MITCHELL, William J. *A lógica da Arquitetura: projeto, computação e cognição*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008. 303 p.

MORAN, Emilio F. *Ecologia humana e mudança ambiental no Brasil*. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2008.

MOREL, Philippe. Cadeira Bolívar (Bolívar Chair), 2004. Centre Pompidou. Disponível em: <<https://collection.centrepompidou.fr/artwork/ezct-architecture-design-research-modele-test-multi-chargement-bolivar-320-apres-320-generations-32-000-evaluations-structurelles-150000000044572>>.

MORIN, Edgar. *A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento*. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.

NIGHT FIRE FILMS. Chasing Haeckel. the-scientist.com. Disponível em:

<<https://www.the-scientist.com/daily-news/chasing-haeckel-42576>>.

NIHAL; NANEKAR, Pradyumna. Computational Design Seminar: Triangulated Tectonics. IAAC Blog, Barcelona: Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 17 mar. 2025. Disponível em: <https://blog.iaac.net/computational-design-seminar-7/>

OXMAN, N. et al. (EDS.). Material Ecology. Computer-Aided Design, v. 60, p. 1–2, 2015.

OXMAN, Rivka. Theory and Design in the First Digital Age. Design Studies, Londres, Reino Unido, v. 27, p. 229-247, maio. 2006. Disponível em: <<http://arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

PASQUIRE, C.L.; SOAR, R; GIBB, A. Beyond Pre-Fabrication – The potential of next generation technologies to make a step change in construction manufacturing; In: 14th ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, Proceedings... Santiago, Chile, 2006.

PAWLYN, Michael. Biomimicry in Architecture. London: RIBA Publishing, 2011.

PICON, A. Architecture, Science, Technology and the Virtual Realm. In: PONTE, A.; PICON, A. (Eds.). Architecture and the Sciences. Exchanging Metaphors. [s.l.] Princeton Architectural Press, 2003. v. 4p. 292–313.

PICON, Antoine. Ornament: The Politics of Architecture and Subjectivity. Chichester: Wiley-Academy, 2003.

PREST, Clayton. WikiHouse NZ. 2013. Disponível em: <<https://cargocollective.com/claytonprest/WikiHouse-NZ-1>>.

QUEIROZ, Natália. Artefatos geradores de microclima: biomimética e parametrização na busca por soluções bioclimáticas para clima quente e úmido. Recife (PE), 2015. 137p. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Design) – Universidade Federal de Pernambuco.

RETSIN, Gilles. Real Virtuality. Instalação arquitetônica na Royal Academy of Arts. 2019. Disponível em: <<https://parametric-architecture.com/real-virtuality-gilles-retsina-architecture/>>.

RIAN, I. W.; SASSONE, M. Computational paradigms in structural hierarchy: a design exploration. Proceedings of the International Conference on Structural Design, p. 345–356, 2014.

ROUDAVSKI, Stanislav. Towards Morphogenesis in Architecture. International Journal of Architectural Computing, v. 7, n. 3, p. 345-374, 2009.

ROUDAVSKI, Stanislav. Towards Morphogenesis in Architecture. International Journal of Architectural Computing, v. 7, n. 3, p. 345-374, 2009.

ROUDAVSKI, Stanislav. Towards Morphogenesis in Architecture. International Journal of Architectural Computing, v. 7 (3), pp. 345-374, 2009. Disponível em: <<https://minerva-access.unimelb.edu.au/bitstream/handle/11>

343/26591/116799\_Roudavski\_Towards\_Morphogenesis\_in\_Architecture\_09.pdf?sequence=1>.

RUDGE, Tim & HASELOFF, Jim. A Computational Model of Cellular Morphogenesis In Plants. University of Cambridge, 2005.

SACHS, Wolfgang (Org.). Dicionário do desenvolvimento: guia para o conhecimento como poder. 2. ed. Petrópolis: Vozes, 2002.

SANCHEZ, José. Architecture for the Commons: Participatory Systems in the Age of Platforms. In: RETSIN, Gilles (Org.). Discrete: reappraising the digital in architecture. v. 89. Barcelona: Actar Publishers, 2019. p. 25–27.

SANTANA, L. O.; GUIMARÃES, I. B. B.; CARLO, J. C. Parametrização Aplicada ao Desempenho Energético de Edificações. VIRUS, 11, 2015. Disponível em: <http://www.nomads.usp.br/virus/virus11/?sec=4&item=4&lang=pt>.

SANTOS, Boaventura de Sousa. A gramática do tempo: para uma nova cultura política. São Paulo: Cortez, 2006.

SCHEER, David. The Death of Drawing: Architecture in the Age of Simulation. London: Routledge, 2014.

SCHMIDT III, Robert; AUSTIN, Simon. Adaptable Architecture: Theory and Practice. Oxford: Routledge, 2016.

SCHUMACHER, Patrik. The Autopoiesis of Architecture: A New Framework for Architecture. Chichester: Wiley, 2011.

SHARIF, A. Parametric simulation techniques for performance-driven architecture. International Journal of Architectural Computing, v. 8, n. 3, p. 205–221, 2010.

SILVA, Mário Alves da; CARLO, Joyce Correna; SILVA, Luciana Bosco e. Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos. Cadernos do Proarq, Rio de Janeiro, n. 30, p. 150–176, jul. 2018.

SISTEMA DE REGULAÇÃO. Ministério da Saúde. Sisreg. 1969.

SRNICEK, Nick. Platform Capitalism. Cambridge: Polity Press, 2016.

STEADMAN, Philip. The evolution of designs – biological analogy in architecture and applied art, 1ª ed., Cambridge, Cambridge University Press, 1979, 1988, revised edition, 2008..

STEADMAN, Philip. The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts. 2. ed. London: Routledge, 2008.

SUTHERLAND, Ivan E. Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System. PhD Thesis, MIT, 1963.

SZALAPAJ, Peter. Contemporary Architecture and the Digital Design Process. Oxford: Architectural Press, 2005.

TAFURI, Manfredo. Teorias e História da Arquitetura. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

TEDESCHI, A. AAD Algorithms-aided design: parametric strategies using grasshopper. Napoli: Edizioni Le Pensur, 2014.

TEDESCHI, Arturo. Parametric Architecture with Grasshopper. Le Pensur, 2010.

TERZIDIS, Kostas. Algorithmic Architecture. Oxford: Architectural Press, 2006.

TERZIDIS, Kostas. Algorithmic Architecture. Oxford: Architectural Press, 2006.

THOMPSON, D'arcy Wentworth. On growth and form. 1ªed., Cambridge, CambridgeUniversity Press, 1961.

THOMPSON, D'Arcy Wentworth. On Growth and Form. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

VARSHABI, N.; YOUSEFI, M.; NASSIRI, M. Evaluation of parametric–biomimetic façades for thermal performance. Building and Environment, v. 212, art. 108751, 2022. DOI:10.1016/j.buildenv.2022.108751.

VEREBES, Tom. Masterplanning the Adaptive City: Computational Urbanism in the Twenty-First Century. London: Routledge, 2014.

VINCENT, Julian F.V; BOGATYREVA, Olga A; BOGATYREV, Nikolaj R; BOWYER, Adrian;PAHL, Anja-Karina. Biomimetics: its practice and theory. J. R. Soc. Interface 22 August, 2006 vol. 3 no. 9 471-482.

WEINSTOCK, Michael. The Architecture of Emergence: The Evolution of Form in Nature and Civilisation. Chichester: Wiley, 2010.

WEINSTOCK, Michael. The Architecture of Emergence: The Evolution of Form in Nature and Civilisation. Chichester: Wiley, 2010.

WOODBURY, ROBERT. ELEMENTS OF PARAMETRIC DESIGN. New York: Routledge,2010.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Our Common Future. Oxford: Oxford University Press, 1987.

YELER, B. Biomimetic façade strategies: integrating natural principles into architectural envelopes. Journal of Architectural Science, v. 12, n. 2, p. 87–105, 2015.

ZARI, Maibritt Pedersen. Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability. PhD Thesis, Victoria University of Wellington, 2007.

ZARI, Maibritt Pedersen. Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability. PhD Thesis, Victoria University of Wellington, 2007.