Doutoramento em Design na
Universidade de Lisboa
Faculdade de Arquitetura

Regime de Cotutela com a
Universidade Federal de Pernambuco
Programa de Pós-graduação em Design – PPGD

Tarciana Araújo Brito de Andrade

BIOMÓDULO BIMETAL:
módulo cinético bioinspirado para fachadas adaptativas

Orientadores
Doutor José Nuno Dinis Cabral Beirão
Dottorato di Ricerca Amilton José Vieira de Arruda

Tese especialmente elaborada para
a obtenção do grau de doutor

2024

LISBOA
UNIVERSIDADE DE LISBOA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

FACULDADE DE ARQUITETURA
LISBON SCHOOL OF ARCHITECTURE
UNIVERSIDADE DE LISBOA

Doutoramento em Design 2024

Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de doutor

BIOMÓDULO BIMETAL:

módulo cinético bioinspirado para fachadas adaptativas

Tarciana Araújo Brito de Andrade

ORIENTADORES

Doutor José Nuno Dinis Cabral Beirão
Dottorato di Ricerca Amilton José Vieira de Arruda

CONSTITUIÇÃO DO JÚRI

PRESIDENTE

Doutor Hugo José Abranches Teixeira Lopes Farias
Professor Catedrático
Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

VOGAIS

Dottorato di Ricerca Amilton José Vieira de Arruda
Professor Associado
Universidade Federal de Pernambuco, orientador

Doutor José Pedro Ovelheiro Marques de Sousa
Professor Associado
Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

Doutor José Rui de Carvalho Mendes Marcelino
Professor Associado
Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

Doutora Letícia Teixeira Mendes
Professora Adjunta
Universidade Federal de Pernambuco

Doctor of Philosophy Jorge Roberto Lopes dos Santos
Professor Assistente
Pontífice Universidade do Rio de Janeiro PUC-Rio

Doutor José Nuno Dinis Cabral Beirão
Professor Auxiliar
Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, orientador

A presente tese foi elaborada seguindo as regras enunciadas no Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 2012, assinado em Lisboa. Está redigido em português do Brasil e formatado de acordo com a *American Psychological Association [APA*].

Dedicatória

Aos meus primeiros mestres: meus pais.

"Ensinar não é transferir conhecimento,
mas criar possibilidades para a sua
produção ou a sua construção".

Paulo Freire.

Agradecimentos

Por mais que a elaboração de uma tese de doutoramento seja uma atividade essencialmente individual, reconheço que essa investigação não alcançaria os resultados descritos nas próximas páginas se ao longo do seu percurso não houvesse uma estreita colaboração com atores essenciais ao seu desenvolvimento.

Nesse sentido, inicio os agradecimentos pelos meus mestres docentes. Obrigada querido professor e orientador **José Nuno Beirão** pela irrestrita colaboração. Foi uma dádiva desfrutar do seu saber. Reconheço em seu trabalho todo o esmero e primor em desenvolver ciência com qualidade. Agradeço também a contribuição do orientador **Amilton Arruda**, que incentivou proativamente a realização de cotutela entre a Universidade de Lisboa e a Universidade Federal de Pernambuco, e por sempre estimular seus discentes a produzirem. Não posso deixar de reconhecer o papel fundamental que os professores e mestres, **Leonardo Castilho**, **Cloves Parísio** e **Rui Marcelino**, tiveram e têm ao longo do meu desenvolvimento enquanto profissional. Eles acompanharam meu percurso acadêmico inicial e seus ensinamentos me acompanharão para todo o sempre.

Um dos desafios do processo de biomimética, é identificar um organismo de referência para se bioinspirar. Sem a contribuição das biólogas **Cristina Cruz**, **Juliana Rangel** e **Valetina Perricone** certamente essa tese não descobriria às sofisticadas estratégias de adaptação da *Ammophila arenaria*. Portanto, agradeço toda a colaboração durante o processo de descoberta de organismos potenciais. Agradeço também a todos os participantes da sessão de cocriação multidisciplinar, que muito contribuíram para a criação de conceitos para o projeto.

Não posso deixar de reconhecer a colaboração de: meu amor **Guilherme Azevedo**, por todo auxílio e compreensão durante todo o percurso; minhas queridas amigas **Ana Paula Freitas** e **Natália Vinagre,** que carinhosamente as chamo de orientadoras; o amigo **Paulo Carvalho** por todos os *inputs* de ideias e contribuição computacional; **Ricardo Isidro** pelo auxílio durante o processo de prototipação; o **FabLab Sintra** pela disponibilização de infraestrutura para prototipação; **Carol Bozzi** por me salvar tantas vezes nas traduções; **Fabrício Mattos** pela contribuição no tratamento dos dados estatísticos; **Leandro Dias** pelo auxílio na demonstração dos conceitos; **Silvia Felipe** pela ajuda com a documentação. Agradeço também a **Filipe Calegario**, **Vanessa Costa Longa** e **Rodrigo Barbosa.**

Agradeço à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e ao Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Design (CIAUD), por todo o apoio neste percurso acadêmico. Obrigada pela troca de conhecimento com os participantes dos grupos de investigação que faço parte: o *Design Computation Group* e o

Biodesign. Gratidão por todo o apoio: **Carolina Eysen**, **João Paulouro, Deborah Santos, Rui van Zeller, Ronaldo Fiuza e Humera Mughal. Agradeço** também às amigas **Morgana Cruz, Marília Porto** e **Theska Laila**.

Agradeço o amor incondicional dos meus pais, **Maria Aparecida** e **Bartolomeu José** (*in memoriam*), por me estimularem a crescer e acreditar que a conquista de um sonho é possível. A minha irmã amada **Julinha**, por ser uma grande dádiva na minha vida. A minha mãe do cosmo **Fátima Brito** por sempre rezar e torcer por minhas conquistas. Agradeço também as minhas filhas **Nina**, **Luna** e **Kelly** que sempre me apoiaram me fazendo companhia.

Gratidão a **todos meus familiares**, em especial: a minha inesquecível Tichinha e a tia Tôta (meu amor eternamente jovem); às minhas vozinhas Ismênia de Andrade e Severina Brito; aos meus padrinhos queridos Bertoldo e Horácio; aos meus amados tios e tias que tanto me incentivam: Nelson e Selma; Salete; Nego e Jeannette; Edinho e Verônica; Zé Maria e Fátima Freitas; Toinho; Miro e Olívia; Tão; Flávia Silva; Bartira e Zefa; Berlano e Cida; Lourdes e Jailson; Zé Bernardo e Mirian; Mena e Dadá; às minhas 'prirmãs' (Caca, Pati, Rafa, Cela, Lu, Ly, Milla, Gabi, Mirella, Dudinha, Deca, Nana, Manuquita, Vika e Poly) e aos primos Britos; aos meus primos Andrade (Fátima, Gevson, Genyross, Geril, Gernardes, Nismenia, Berlano, Braúlio e Gisele); aos **meus dindinhos** que estão na terra (Henry, Sassá, Malu, Thor e Thom) e aos que estão no céu; a minha família Azevedo e Bezerra, representada nas pessoas de vovô Ivanildo, Helena, Juju e Pablito; aos **amigos**, que estão sempre prontos para dizer uma palavra de carinho: Rafa Vieira, Jujoca, Tici, Pipa, Vinha, Zinha, Nando, Rafinha Queiroz, Carobina, Line, Mayra, Duda, Erica, Pipo, Zaca, Dé, Nandes, Ciro, Leiloca, Vini, Mano, Kenjoca, Nati Lima, Tia Ana, Rapha, Perolita, Tatá, Mari Fajardo, Mima, Aline Souza, Rodrigo Lauria, Alex Nogueira, Dani, Guga, Mário, Clara e Brenda.

Muito obrigada também a todos os que fazem a **Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa** e a **Universidade Federal de Pernambuco**, entre professores e funcionários, pelo profissionalismo. Em especial, agradeço a **Ana Cavaleiro** e **Marcelo Arcoverde**. Enfim, gratidão a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o meu crescimento enquanto pessoa e profissional. Sem todos vocês a realização dessa investigação não seria possível.

Muito Obrigada!

Resumo

A investigação busca propor um módulo cinético para fachadas adaptativas por bioinspiração, experimentação de material e algoritmo computacional. Possui natureza de pesquisa aplicada sob abordagem qualitativa. Foi estruturada em cinco fases: âmbito, descobrir, conceituar, solucionar, e avaliar/concluir.

Por meio de metodologia de biomimética, revisão de literatura, contato com biólogos e três estudos de observação, chegou-se aos movimentos násticos (movimentos de planta independentes da direção do estímulo), e mais precisamente à gramínea *Ammophila arenaria*, com movimento reversível foliar. Ao desenvolver *focus group* multidisciplinar e analisar treze projetos cinéticos, identificou-se o material inteligente bimetal. Esse material responde à variação térmica e se curva quando aquecido.

Em referência à morfologia foliar foram aplicados vincos na camada ativa do bimetal. Dez experimentos exploratórios evidenciaram que os vincos podem colaborar para a abertura do material diante do aumento de temperatura e fechamento ao se arrefecer (movimento contrário ao material sem intervenção). Protótipos dos módulos para autossombreamento de fachadas foram desenvolvidos com vincos por estampagem - os Biomódulos Bimetais. Experimento expôs amostras em ambiente aberto (no verão, outono e onda de calor). O tratamento estatístico dos dados identificou equações que explicam o comportamento dos biomódulos. Comprovou que são adaptáveis a diferentes condições climáticas. O algoritmo computacional integra as equações, gera variações paramétricas e simula a proteção por incidência solar.

O real contributo da pesquisa reside na relevância dos vincos para o controle do comportamento do bimetal, que permite o movimento cinético dos biomódulos sem eletricidade ou qualquer dispositivo mecânico. Desafios técnicos existem como o tênue limite entre potencializar e prevenir o movimento dos biomódulos. Futuros estudos buscarão desenvolver protótipo de esquadria 1:1; analisar a fadiga do material, o desempenho térmico e de iluminação; planejar ciclo de vida e processo produtivo. Por fim, espera-se que os biomódulos contribuam para conforto térmico em edificações com energia quase zero.

Palavras-chave:

Biomimética; movimento nástico; fachada adaptativa; material inteligente; bimetal com vincos.

Abstract

The research proposes a kinetic module for adaptive façades by bioinspiration, material experimentation, and computational algorithm. It has an applied research nature and a qualitative approach and is structured in five phases.

Through biomimetics methodology, literature review, contact with biologists and three observation studies, we arrived at nastic movements (plant movements independent of the direction of the stimulus), more precisely to the grass Ammophila arenaria, which possesses a reversible leaf movement. By developing multidisciplinary focus groups and analysing thirteen kinetic projects, we adopted the smart material, bimetal, to conduct our study. Bimetal responds to thermal variation and bends when heated.

In reference to leaf morphology, we applied creases to the active layer of the bimetal. Ten exploratory experiments showed that the creases can contribute to the opening of the material when the temperature rises and to its closing when it cools down (opposite movement of the material without intervention). We developed prototypes of the modules for self-shading façades with creases made by stamping - the Bimetal Biomodules. They were exposed to an open environment (in summer, fall, and during a heat wave). Statistical treatment of the data identified equations explaining the behaviour of the biomodules, proving that they are adaptable to different climatic conditions. The computational algorithm integrates the equations, generates parametric variations, and simulates protection by solar incidence.

The research's contribution lies in the creases' relevance to controlling the bimetal's behaviour enabling the biomodule's movement without needing electricity or mechanical devices. Technical challenges exist as there is a fine line between enhancing and preventing the movement of the biomodules. In future developments, we intend to build a 1:1 frame prototype; analyse material fatigue, thermal and lighting performance; plan the life cycle and production process. We hope the biomodules will contribute to thermal comfort in buildings with near-zero energy supply.

Keywords:

Biomimetic; nastic movements; adaptive façade; smart material; bimetal creases.

Índice

Dedicatória ..... **I**

Agradecimentos ..... **III**

Resumo ..... **V**

Abstract ..... **VII**

Índice ..... **IX**

Índice de Figuras ..... **XIII**

Índice de Tabelas ..... **XVIII**

Índice de Gráficos ..... **XIX**

Glossário ..... **XXI**

Acrônimos e Abreviaturas ..... **XXIII**

1. Contexto **25**
1.1. Introdução 27
1.2. Delineamento do Objeto de Estudo 30
1.3. Problemática da Investigação 31
1.4. Questões de Investigação 37
1.5. Hipótese 38
1.6. Objetivo Geral e Objetivos Específicos 38
1.7. Metodologia da Investigação 39
1.8. Estrutura da Investigação 47
1.9. Síntese do Capítulo 49

2. Biomimética e Sistema Climático **51**
2.1 Nota Introdutória 53
2.2 Biomimética 54
2.2.1 Perspectiva Histórica da Biomimética 54
2.2.2 Terminologia e Definição 57
2.2.3 Abordagem Metodológica em Biomimética 61
2.2.4 Níveis de Adaptação: Morfológico, Fisiológico e Comportamental 68
2.2.5 Movimento das Plantas 72
2.3 Sistema Climático 77
2.3.1 A Radiação Solar 80
2.3.2 Geometria Solar 88
2.3.3 Características Climáticas do Concelho de Lisboa 92
2.3.4 Diagrama Psicométrico e Conforto Térmico 98
2.3.5 Estratégias Passivas e Elementos para a Proteção Solar 101
2.3.6 Perspectiva Bioclimática: Edificações em Lisboa 107
2.3.7 Influência das Propriedades dos Materiais na Fachada 109
2.4 Síntese do Capítulo 111

3. Projeto Computacional e Fachadas Adaptativas **113**
3.1 Nota Introdutória 115
3.2 Projeto Computacional 116

3.2.1 Perspectiva Histórica *116*
3.2.2 Modelos Metodológicos de Projetos Computacionais em Arquitetura *118*
3.2.3 Síntese Conceitos *130*
3.2.4 Softwares e Ferramentas de Desenvolvimento *131*
3.2.5 Fabricação Digital *137*
3.3 Fachadas Adaptativas ou Cinéticas 140
3.3.1 Conceito e Projetos de Referência *140*
3.3.2 Diferentes estratégias para deformação de materiais *146*
3.4 Projetos de Referência: Estudos de Caso 148
3.4.1 Adaptex *156*
3.4.2 Air Flow(er) *157*
3.4.3 Al-Bahr Towers *158*
3.4.4 Bloom Pavilion *160*
3.4.5 Breathing Skins *161*
3.4.6 Flectofin™ *162*
3.4.7 Flectofold *163*
3.4.8 Homeostatic Facade System *164*
3.4.9 Hydroceramic *164*
3.4.10 HygroSkin Meteorosensitive Pavilion *165*
3.4.11 Ocean Pavilion *166*
3.4.12 Snapping Facade *168*
3.4.13 Spong 3D *170*
3.4.14 Considerações sobre os projetos *170*
3.5 Síntese do Capítulo 172

4. Descobrir 175
4.1 Nota Introdutória 177
4.2 Descobrir Organismos 178
4.2.1 Tipologias de Movimento Násticos *178*
4.2.2 Critério de Seleção e Organismos Pré-selecionados *183*
4.2.3 Definição do Organismo de referência *188*
4.3 Observar a Natureza 190
4.3.1 Revisão de literatura sobre a Ammophila arenaria *190*
4.3.2 Estudos de Observações *193*
4.4 Abstrair 200
4.5 Síntese do Capítulo 201

5. Conceituar 203
5.1 Nota Introdutória 205
5.2 *Brainstorming* 206
5.2.1 Caixa Morfológica e Esboços *207*
5.2.2 Sessão de Cocriação Multidisciplinar *208*
5.2.3 Análise dos dados *216*
5.3 Requisitos de Desenvolvimento 224
5.4 Bimetal: caracterização técnica e aplicação na arquitetura 226
5.4.1 Do que se trata o bimetal? *226*
5.4.2 O uso do bimetal na arquitetura *227*
5.4.3 Análise Comparativa entre propostas por Self-Shading *232*
5.5 Experimentação com o Bimetal 238
5.5.1 Objetivos dos experimentos *238*

5.5.2 Especificação do material....238
5.5.3 Procedimentos Metodológicos....239
5.5.4 Experimentos Exploratórios Iniciais.... 242
5.6 Modelo Conceitual: Biomódulo Bimetal 250
5.6.1 Biomódulo com Vincos Manuais.... 251
5.6.2 Biomódulo com Vincos o uso de Fabricação Digital....254
5.7 Síntese do Capítulo 271

6. Solucionar 274
6.1 Nota Introdutória 275
6.2 Sistema de Codificação do Algoritmo 276
6.3 Definição do Ambiente de Teste....277
6.4 Definição Algoritmo Paramétrico 279
6.4.1 Cluster A: Ambiente de teste e fachada com múltiplas superfícies....279
6.4.2 Cluster B: Definição do Biomódulo Bimetal....281
6.4.3 Cluster C: Definição para os Perfis de Fixação....295
6.5 Síntese do Capítulo 300

7. Avaliar 301
7.1. Nota Introdutória 303
7.2. Análise sobre a Influência da Temperatura Externa no Comportamento dos Biomódulos 304
7.2.1 Infraestrutura para a Coleta dos Dados.... 304
7.2.2 Coleta de Dados.... 308
7.2.3 Análise dos dados coletados.... 313
7.2.4 Análise Estatística por Experimento 319
7.2.5 Análise Estatística para Identificar Comportamento Geral....333
7.3. Algoritmo para Simulação do Comportamento dos Biomódulos 343
7.3.1 Algoritmo para Simulação pela Distância ao Sol....344
7.3.2 Algoritmo para Simulação por Incidência Solar....345
7.4. Simulação do Comportamento dos Biomódulos 351
7.4.1 Procedimentos metodológicos.... 351
7.4.2 Simulações para dias de referência 356
7.4.3 Simulações para horários específicos.... 361
7.5. Solução Híbrida com Algoritmo Evolutivo....372
7.6. Diferentes Aplicações Conceituais dos Biomódulos....374
7.7. Estudos Preliminares para Estudos Futuros 380

8. Concluir.... 383
8.1. Selecionar organismo de referência 385
8.2. Definição do Modelo Conceitual....386
8.3. Seleção do Material: o Bimetal....387
8.4. Abstrair níveis de adaptação da *Ammophila arenaria* 388
8.5. Experimentos Exploratórios com o Bimetal e Biomódulo....389
8.6. Identificação dos Comportamentos dos Biomódulos 391
8.7. Algoritmo Computacional 394
8.8. Algoritmo Paramétrico....394
8.9. Algoritmo de Simulação....395
8.10. Considerações Finais do Documento....397

REFERÊNCIAS **399**

APÊNDICES **420**
Apêndice A – Ficha Técnica do Bimetal. 420
Apêndice B – Fatura do Bimetal. 421

ANEXOS **422**
Anexo A – Organismos identificados na revisão 422
Anexo B – Referências do Anexo A. 426
Anexo C – Livre experimentação que contribuíram para a definição do conceito 430
Anexo D – Matriz versão positiva: vista frontal 434
Anexo E – Matriz versão positiva: perspectiva e cortes. 435
Anexo F – Matriz versão negativa: vista frontal. 436
Anexo G – Matriz versão negativa: perspectiva e cortes 437
Anexo H – Horário de referência para o meio-dia solar. 438
Anexo I – Conceito para fachada ventilada: diagrama de ventilação. 439
Anexo J – Conceito para fachada ventilada: detalhe D1 e D3. 440
Anexo K – Conceito para fachada ventilada: detalhe D2 e D4. 441

Índice de Figuras[1]

Figura 1. Movimento nástico da *Mimosa pudica* por contato. 31
Figura 2. Temperatura média diária do ar mundial (1979 – presente)..... 33
Figura 3. Mapa da intensidade da ilha de calor urbano em Lisboa ao entardecer. 35
Figura 4. Metodologia da Investigação..... 42
Figura 5. Desenho da Investigação..... 46
Figura 6. Desenho *sul volo degli uccelli* por Leonardo DaVinci. 54
Figura 7. *Crystal Palace* (1851) em Londres..... 55
Figura 8. Velcro® bioinspirado no carrapicho. 55
Figura 9. A Sagrada Família..... 56
Figura 10. Fachada da Paixão da Sagrada Família..... 56
Figura 11. Projeto ICD/ITKE Research Pavilion 2011..... 57
Figura 12. Projeto ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16. 57
Figura 13. Diagrama do *Biomimicry Thinking*..... 63
Figura 14. Comparação entre abordagens metodológicas em biomimética..... 64
Figura 15. Diagrama metodológico para coletar dados de adaptações de plantas..... 67
Figura 16. Adaptação morfológica, fisiológico e comportamental. 69
Figura 17. Níveis de adaptação do lagarto. 71
Figura 18. Pressão de Turgor a nível celular e do tecido da planta..... 74
Figura 19. Mecanismo do pulvino na *Mimosa pudica*. 75
Figura 20. Mecanismo na *Strelitzia reginae*. 76
Figura 21. Espectro Eletromagnético. 80
Figura 22. Radiação Direta, Difusa e Refletida..... 82
Figura 23. Solstícios e equinócios..... 83
Figura 24. Longitude e latitude..... 84
Figura 25. A declinação da Terra..... 85
Figura 26. Geometria Solar – Percurso do Sol ao longo do ano. 88
Figura 27. Geometria solar de Lisboa..... 91
Figura 28. Geometria solar de Lisboa, para temperaturas acima de 24°C. 91
Figura 29. Diagrama psicométrico para edifícios proposto por Givoni (1992)..... 98
Figura 30. Diagrama psicométrico para Lisboa – PT. 100
Figura 31. Modelo de conforto para Lisboa..... 101
Figura 32. Estratégias de sistema passivo para o verão. 102
Figura 33. Estratégias de sistema passivo para o inverno. 103
Figura 34. Dispositivos para sombrear com efeitos semelhantes.....104
Figura 35. Ângulos e longitudes de sombra em relação a uma superfície vertical. 106
Figura 36. Estratégias bioclimáticas para Lisboa. 108
Figura 37: Envidraçados da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.....109
Figura 38. Projeto Heydar Aliyev Center, de Zaha Hadid Architects. 121
Figura 39. Projeto *Stazione di Bologna e Reggio Emilia AV Mediopadana*.....122
Figura 40. Definição paramétrica inspirada na estação de Reggio Emilia. 122

[1] Todas as figuras foram produzidas pela autora exceto quando outra origem esteja indicada.

Figura 41. A forma do City Hall (2002) em Londres responde ao percurso solar. 123
Figura 42. Abordagem de processo de otimização. 128
Figura 43. Dominância de Pareto. 129
Figura 44. Termos em relação ao Projeto Computacional. 131
Figura 45. Algoritmo para curva senoidal em Python e em *Grasshopper®*. 132
Figura 46. Definição no *Grasshopper®*, composta por componentes conectados. 133
Figura 47. Soluções desenvolvidas com o uso do *Grasshopper®*. 133
Figura 48. Ladybug Tools 134
Figura 49. Exemplos com o uso das ferramentas de *Ladybug*. 135
Figura 50. Exemplos com o uso das ferramentas de *Honeybee*. 136
Figura 51. Obras de Frank Gehry. 137
Figura 52. Metropol Parasol (204 - 2011), em Sevilha-ES. 138
Figura 53. Edifício *Arab World Institute*. 143
Figura 54. *MEDIA – ICT*. 144
Figura 55. *SDU Campus Kolding*. 145
Figura 56. Movimentos das plantas podem inspirar soluções tecnológicas. 146
Figura 57. Adaptex Mesh: conceito de solução para proteção solar. 156
Figura 58. *Adaptex Wave*: conceito de solução para proteção solar. 157
Figura 59. Air Flow(er). 157
Figura 60. Diferentes versões de protótipo da Air Flow(er). 158
Figura 61. Al-Bahr Towers. 159
Figura 62. Instalação responsiva *Bloom Pavilion*. 160
Figura 63. *Breathing Skins*. 161
Figura 64. Flectofin™ 162
Figura 65. *Flectofold*. 163
Figura 66. *Homeostatic Facade System*. 164
Figura 67. Projeto Hydroceramic. 165
Figura 68. Projeto HygroSkin. 166
Figura 69. *Ocean Pavilion*. 167
Figura 70. Persiana operável do *Ocean Pavilion*. 168
Figura 71. *Snapping Façade*. 169
Figura 72. Aproximação *Snapping Façade*. 169
Figura 73. Spong 3D 170
Figura 74. Âmbito da Investigação. 173
Figura 75. Descobrir > ETAPA Descobrir Organismos. 178
Figura 76. Descobrir > Revisão de literatura sistemática. 179
Figura 77. Descobrir > Organismos com movimento násticos. 182
Figura 78. Descobrir > Quadro de registro sobre a Rhododendron. 184
Figura 79. Descobrir > Termonastia da *R. catawbiense Michx*. 185
Figura 80. Descobrir > *Poa pratensis*. 186
Figura 81. Descobrir > Quadro de registro sobre a *Poa pratensis*. 187
Figura 82. Descobrir > Quadro de registro: *Ammophila arenaria*. 188
Figura 83. Descobrir > Organismos em Portugal Continental. 189
Figura 84. Descobrir > Organismo de referência. 189
Figura 85. Descobrir > ETAPA Observar a natureza. 190
Figura 86. Observar > Distribuição da *Ammophila arenaria*. 191

Figura 87. Observar > Características da *Ammophila arenaria*. 191
Figura 88. Observar > Mecanismo da *Ammophila arenaria*. 192
Figura 89. Observar > Registro fotográfico da *Ammophila arenaria*. 194
Figura 90. Observar > Observação I: por desidratação. 195
Figura 91. Observar a natureza > Observação II: preparação das amostras. 196
Figura 92. Observar > Observação II: médias das cinco amostras. 197
Figura 93. Observar > Observação III: análise das secções transversais. 199
Figura 94. Abstrair > Quadro de registro das estratégias da *Ammophila arenaria*. 200
Figura 95. Conceituar > ETAPA *Brainstorming*. 206
Figura 96. *Brainstorming* > Caixa morfológica e Esboços. 207
Figura 97. Caixa D'água de Olinda (1935), em Olinda-PE. Projeto de Luiz Nunes. 208
Figura 98. Elemento construtivo: cobogó em Recife-PE, Brasil. 209
Figura 99. Elementos construtivos como cobogó em diferentes partes do mundo. 209
Figura 100. Aplicação de grelhas em Portugal. 210
Figura 101. Conjunto Habitacional na Av. EUA (1947 – 1955), em Lisboa. 210
Figura 102. Algoritmo *Project: Cobogó Façade Panels Prototype*. 211
Figura 103. Estudo de observação sobre diferentes usos de cobogó. 211
Figura 104. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Painel de Referência. 214
Figura 105. *Brainstorming* > Análise dos dados: síntese dos conceitos. 221
Figura 106. *Brainstorming* > Requisitos de Desenvolvimento: Quadro de registro. 225
Figura 107. Experimentar > Comportamento e constituição do bimetal. 227
Figura 108. Experimentar > Referência: Projetos de arquitetura com bimetal. 230
Figura 109. Experimentar > Referência: *Bimetal Facade System* 232
Figura 110. Experimentar > Referência: Detalhes do *Bimetal Facade System*. 233
Figura 111. Experimentar > Referência: Projeto *InVert Auto-Shading Windows*®. 233
Figura 112. Experimentar > Referência: Influência da variação da incidência solar. 234
Figura 113. Experimentar > Referência: *Pho'liage*® – versão 01. 234
Figura 114. Experimentar > Referência: *Pho'liage*® – versão 02 – inspiração. 235
Figura 115. Experimentar > Referência: *Pho'liage*® – versão 02. 236
Figura 116. Experimentar > Câmara quente para Teste Térmico. 240
Figura 117. Experimentar > Experimento Base. 243
Figura 118. Experimentar > Experimento Variantes. 244
Figura 119. Experimentar > Experimento com Versões Longitudinais. 246
Figura 120. Experimentar > Processo de confecção de amostras. 247
Figura 121. Experimentar > Síntese qualitativa: Diferentes ângulos de vincos. 248
Figura 122. Solucionar > ETAPA Definir Modelo Conceitual. 250
Figura 123. Experimentar > Teste térmico: módulo triangular com vincos manuais. 252
Figura 124. Experimentar > Nível de marcação dos vincos. 253
Figura 125. Experimentar > Teste com a cortadora a laser CO_2. 254
Figura 126. Experimentar > Gravação com a laser. 255
Figura 127. Experimentar > Processo de definição de vinco por estampagem. 257
Figura 128. Experimentar > Parâmetros para definição de vincos. 258
Figura 129. Experimentar > Teste de parâmetros: matrizes impressas em 3D. 259
Figura 130. Experimentar > Peças cortadas na cortadora a laser CO_2. 260
Figura 131. Experimentar > Matrizes e amostras bimetálicas estampadas. 260
Figura 132. Experimentar > Teste térmico: amostra manual x amostras da M3. 262

Figura 133. Experimentar > Experimento Tolerância. 264
Figura 134. Experimentar > Experimento Tolerância. 264
Figura 135. Experimentar > Experimento Concavidade. 265
Figura 136. Experimentar > Curvatura do bimetal central: aproximação. 266
Figura 137. Solucionar > Prototipagem: Matriz 05 para estampagem. 267
Figura 138. Solucionar > Teste térmico da Matriz 5. 268
Figura 139. Solucionar > Nível de marcação dos vincos. 269
Figura 140. Solucionar > Prototipação: Biomódulo Bimetal sem corte central. 270
Figura 141. Solucionar > Prototipação: Biomódulo Bimetal com corte central. 270
Figura 142. Solucionar > *Clusters* da definição algorítmica. 276
Figura 143. Solucionar > Sistema de identificação no Algoritmo Computacional. 277
Figura 144. Solucionar > Locação do Ambiente de Teste. 278
Figura 145. Solucionar > Ambiente de teste. 278
Figura 146. FASE Solucionar > Algoritmo Paramétrico: visão geral. 279
Figura 147. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* A – imagem síntese. 279
Figura 148. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* A – *Subclusters* A00 a A04 280
Figura 149. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – visão geral. 281
Figura 150. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B –*Subclusters* B00 a B05. 282
Figura 151. Solucionar > Parâmetros customizáveis: fachadas planas. 283
Figura 152. Solucionar > Síntese dos parâmetros de *output*: *subclusters* B06 e B07. 284
Figura 153. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – Código *Subclusters* B06 e B07. 285
Figura 154. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – Lógica para Superfícies Inteiras. 285
Figura 155. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B08. 286
Figura 156. Solucionar > Sentido em que os biomódulos deverão dobrar. 287
Figura 157. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – 'Biomódulos inteiros com vincos'. 288
Figura 158. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B09 e B10. 288
Figura 159. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – 'Superfícies recortadas' e 'Biomódulos recortados com vincos'. 290
Figura 160. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B11 e B12. 291
Figura 161. Solucionar > Algoritmo: Família paramétrica de Biomódulos. 292
Figura 162. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B13 e B14. 293
Figura 163. Solucionar > Algoritmo: Principais *outputs* do *Cluster* B. 294
Figura 164. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – Lógica para o *Subcluster* C00. 295
Figura 165. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – *Subcluster* C00. 296
Figura 166. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – Lógica para o *Subcluster* C01. 297
Figura 167. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – *Subcluster* C01. 297
Figura 168. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – *Subcluster* C02 e C03. 299
Figura 169. Solucionar > Algoritmo: Configurações paramétricas para os perfis. 299
Figura 170. Avaliar > Definição do ambiente aberto e fechado para a análise. 305
Figura 171. Avaliar > Definição da locação para o experimento. 307
Figura 172. Avaliar > Registro realizado na coleta de verão. 307
Figura 173. Avaliar > Horários de coleta de dados. 310
Figura 174. Avaliar > Algoritmo para identificar o diâmetro dos biomódulos. 311
Figura 175. Avaliar > Processo de identificação do diâmetro dos biomódulos. 312
Figura 176. Avaliar > Biomódulos expostos a radiação solar direta. 317
Figura 177. Avaliar > Vista frontal de mínima e máxima abertura. 318

Figura 178. Avaliar > Vista de topo de mínima e máxima abertura. 318
Figura 179. Solucionar > ETAPA Definir Algoritmo de Simulação: *Cluster* D 343
Figura 180. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D00 343
Figura 181. Solucionar > Seleção de diferentes períodos do ano para análise. 344
Figura 182. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D01. 345
Figura 183. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D02. 346
Figura 184. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D –*Subcluster* D03. 347
Figura 185. Solucionar > Algoritmo: Incidência solar sem biomódulos. 348
Figura 186. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D04. 349
Figura 187. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D05. 350
Figura 188. Solucionar > Algoritmo: Incidência solar com biomódulos. 351
Figura 189. Solucionar > Geometria solar das datas de referência. 352
Figura 190. Solucionar > Opções do ambiente de teste para simulação. 354
Figura 191. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.12 (0 às 23 h). 357
Figura 192. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.03 (0 às 23 h). 357
Figura 193. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.06 (0 às 23 h). 358
Figura 194. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.09 (0 às 23 h). 359
Figura 195. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 13.07.2022 (8 às 20 h). 359
Figura 196. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.12 (8 às 9h.) 361
Figura 197. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.12 (13 às 14h.) 362
Figura 198. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.03 (8 às 9h.) 363
Figura 199. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.03 (13 às 14h.) 364
Figura 200. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.06 (8 às 9h.) 365
Figura 201. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.06 (13 às 14h.) 365
Figura 202. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.09 (8 às 9h.) 366
Figura 203. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.09 (13 às 14h.) 367
Figura 204. Avaliar > Simulação por incidência solar – 13.07.2022 (8 às 9h.) 367
Figura 205. Avaliar > Simulação por incidência solar - 13.07.2022 (13 às 14h.) 368
Figura 206. Avaliar > Sombra por Biomódulos na vertical (13 às 14 h). 370
Figura 207. Avaliar > Sombra por Biomódulos na horizontal (13 às 14 h). 371
Figura 208. Digrama de Pareto para processo de otimização. 372
Figura 209. Incidência solar anual: contexto com pala e processo de otimização. 373
Figura 210. Solucionar > Renderização > Cobogó com Biomódulos. 375
Figura 211. Solucionar > Renderização > Elemento modular 1 x 1 x 0,08 m. 375
Figura 212. Avaliar > Simulação de incidência solar com elementos de 1 x 1 x 0,08 m. 376
Figura 213. Solucionar > Renderização > Envidraçado com biomódulos na vertical. 376
Figura 214. Solucionar > Renderização > Envidraçado sob baixas temperaturas. 378
Figura 215. Solucionar > Renderização > Envidraçado sob altas temperaturas. 378
Figura 216. Solucionar > Renderização > Pavilhão biomódulos na horizontal 379
Figura 217. Solucionar > Renderização > Pavilhão biomódulos na vertical. 379
Figura 218. Solucionar > Renderização > Vista Frontal Pavilhão sob altas temperaturas. 379
Figura 219. Estudo futuro > Fachada ventilada em elevadas temperaturas. 381
Figura 220. Estudo futuro > Fachada ventilada em baixas temperaturas. 382
Figura 221. Teste papel e faixas bimetálica com função de atuador. 430
Figura 222. Faixas bimetálicas com vincos como atuador. 431
Figura 223. Três peças que compõem o módulo cata-vento. 431

Figura 224. Diferentes testes para alteração de temperatura. 432
Figura 225. Estudos exploratórios com papel, com diferentes cortes e posições. 432
Figura 226. Pensar com o papel, materializar com o bimetal.....433

Índice de Tabelas[2]

Tabela 1. Questões de investigação. 37
Tabela 2. Descrição dos objetivos específicos. 39
Tabela 3. Quadro com cinco grupos que aplicam metodologias de biomimética. 64
Tabela 4. Quadro comparativo de cinco metodologias de biomimética. 65
Tabela 5. Radiação solar nas fachadas das edificações em Lisboa. 90
Tabela 6. Caraterísticas das estações térmicas em Lisboa. 94
Tabela 7. Síntese de terminologia na arquitetura contemporânea. 140
Tabela 8. Parâmetros de avaliação de projetos de fachada adaptativa ou cinética. 149
Tabela 9. Análise comparativa entre projetos de fachada adaptativa ou cinética. 154
Tabela 10. Descobrir > Conceitos de movimentos násticos. 181
Tabela 11. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Participantes multidisciplinares. 212
Tabela 12. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Aquecimento. 214
Tabela 13. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Geração de ideias..... 215
Tabela 14. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Equipes para cocriação. 216
Tabela 15. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Cocriação..... 216
Tabela 16. *Brainstorming* > Análise dos dados: temas, subtemas e estratégias. 217
Tabela 17. *Brainstorming* > Análise dos dados: Oportunidades conceituais. 220
Tabela 18. Experimentar > Análise comparativa entre projetos com bimetal.....236
Tabela 19. Experimentar > Análise qualitativa: diferentes ângulos de vincos. 249
Tabela 20. Experimentar > Especificações das matrizes e resultados. 261
Tabela 21. Avaliar > Verão > Estatísticas descritivas das variáveis (internas). 319
Tabela 22. Avaliar > Verão > Correlações das variáveis (internas). 320
Tabela 23. Avaliar > Verão > Estatísticas descritivas das variáveis (externas). 323
Tabela 24. Avaliar > Verão > Correlações das variáveis (externas). 323
Tabela 25. Avaliar > Onda de calor > Estatísticas descritivas das variáveis (internas). 325
Tabela 26. Avaliar > Onda de calor > Correlações das variáveis (internas).....325
Tabela 27. Avaliar > Onda de calor > Estatísticas descritivas das variáveis (externas). 327
Tabela 28. Avaliar > Onda de calor > Correlações das variáveis (externas). 328
Tabela 29. Avaliar > Outono > Estatísticas descritivas das variáveis (internas). 329
Tabela 30. Avaliar > Outono > Correlações das variáveis. 330
Tabela 31. Avaliar > Outono > Estatísticas descritivas das variáveis (externas).....332
Tabela 32. Avaliar > Outono > Correlações das variáveis.....332
Tabela 33. Avaliar > Geral > Estatísticas descritivas das variáveis (internas). 334
Tabela 34. Avaliar > Geral > Correlações das variáveis.....334
Tabela 35. Avaliar > Geral > Estatísticas descritivas das variáveis. 337
Tabela 36. Solucionar > Funções do comportamento dos Biomódulos Internos.....339
Tabela 37. Avaliar > Geral > Estatísticas descritivas das variáveis (externas). 340

[2] Todas as tabelas foram produzidas pela autora exceto quando outra origem esteja indicada.

Tabela 38. Avaliar > Geral > Correlações das variáveis..... 340
Tabela 39. Avaliar > Geral > Comparação da variância dos DBEs..... 341
Tabela 40. Solucionar > Funções do comportamento dos Biomódulos Externos.....342
Tabela 41. Solucionar > Dias dos ensaios para simulação.....353
Tabela 42. Solucionar > Horários dos ensaios para simulação. 353
Tabela 43. Solucionar > Temperaturas para simulação em temperaturas extremas.....354
Tabela 44. Avaliar > Síntese de índices de proteção das simulações. 360
Tabela 45. Avaliar > Síntese de índices de proteção > entre as 8 e 9h. 368
Tabela 46. Avaliar > Síntese de índices de proteção > entre as 13 e 14h. 369

Índice de Gráficos[3]

Gráfico 1. Temperatura e radiação em Lisboa. 93
Gráfico 2. Temperaturas médias estacionais em Lisboa (2009-2018)..... 94
Gráfico 3. Umidade relativa do ar em Lisboa. 96
Gráfico 4. Rosa-dos-ventos em Lisboa, para temperaturas acima de 24°C. 97
Gráfico 5. Rosa-dos-ventos em Lisboa, para temperaturas abaixo de 18°C. 97
Gráfico 6. Descobrir > Tipos de movimentos násticos.....180
Gráfico 7. Observar > Observação II: Variação média da largura das folhas. 197
Gráfico 8. Avaliar > Umidade relativa do ar em relação aos horários dos ensaios..... 315
Gráfico 9. Avaliar > Temperatura do ambiente interno e externo ao Sol em relação aos horários dos ensaios. 315
Gráfico 10. Avaliar > Temperatura do ambiente ao Sol e das amostras em relação aos horários dos ensaios. 316
Gráfico 11. Avaliar > Diâmetro das amostras em relação a temperatura do ambiente ao Sol. 316
Gráfico 12. Avaliar > Verão > Comparação da variância entre os DBIs..... 321
Gráfico 13. Avaliar > Verão > Comparativo entre as médias dos DBIs.....322
Gráfico 14. Avaliar > Verão > Comportamento dos Biomódulos Internos. 322
Gráfico 15. Avaliar > Verão > Comparação da variância entre os DBEs. 324
Gráfico 16. Avaliar > Verão > Comportamento dos Biomódulos Externos. 324
Gráfico 17. Avaliar > Onda de calor > Comparativo entre as médias dos DBIs. 326
Gráfico 18. Avaliar > Onda de calor > Comparação da variância entre os DBIs. 326
Gráfico 19. Avaliar > Onda de calor > Comportamento dos Biomódulos Internos. 327
Gráfico 20. Avaliar > Onda de calor > Comparação da variância entre dos DBEs. 328
Gráfico 21. Avaliar > Onda de calor > Comportamento dos Biomódulos Externos.....329
Gráfico 22. Avaliar > Outono > Comparação da variância entre os DBIs. 330
Gráfico 23. Avaliar > Outono > Comparativo entre as médias dos DBIs. 331
Gráfico 24. Avaliar > Outono > Comportamento dos Biomódulos Internos. 331
Gráfico 25. Avaliar > Outono > Comparação da variância entre os DBEs..... 333
Gráfico 26. Avaliar > Outono > Comportamento dos Biomódulos Externos..... 333
Gráfico 27. Avaliar > Geral > Comparativo de médias de DBIs. 335
Gráfico 28. Avaliar > Geral > Comparação da variância dos DBIs. 335

[3] Todos os gráficos foram produzidos pela autora exceto quando outra origem esteja indicada.

Gráfico 29. Avaliar > Geral > Comportamento dos Biomódulos Internos. 336
Gráfico 30. Avaliar > Geral > Comportamento dos DBIs para Temperaturas Externas acima dos 32°C. 338
Gráfico 31. Solucionar > Gráficos do comportamento dos Biomódulos Internos.....339
Gráfico 32. Avaliar > Geral > Comportamento dos Biomódulos Externos. 341
Gráfico 33. Solucionar > Gráfico do comportamento dos Biomódulos Externos. 342

Glossário

Abstração - processo indutivo em que se obtém uma conclusão geral com base na observação de um objeto específico. Na biomimética, esta conclusão é idealmente um contexto físico para descrever os princípios funcionais e operacionais subjacentes dos sistemas biológicos (ISO 18458:2015, 2015).

Algoritmo (*Algorithmn*) - procedimento usado para retornar uma solução usando operações lógicas ("se-então-senão) - ou para executar uma tarefa específica – através de uma lista finita de instruções básicas bem definidas (Tedeschi, 2018, p. 22).

Analogias - semelhança nas relações entre os parâmetros relevantes utilizados para descrever dois sistemas diferentes. Para a biologia, esse termo refere-se a semelhanças nas características funcionais entre diferentes organismos que resultam da necessidade de adaptação e não em relação aos organismos estarem de alguma forma relacionados. Passou também a ser compreendida como forma dinâmica e enfatiza, em particular, as diferenças entre os pontos de partida de dois desenvolvimentos evolutivos (ISO 18458:2015, 2015).

Anisotropia - materiais que exibem propriedades com distintos valores, quando medidos em diferentes direções (V. Charpentier et al., 2017).

Bimetal *(thermobimetal* e *thermostatic bimetal)* - material inteligente e de mudança de forma que tende a se curvar quando aquecido, de uma forma previsível e repetível. A explicação para tal comportamento está em sua composição, que consiste em pelo menos duas camadas de metal com diferentes coeficientes de expansão térmica (Ritter, 2007; Sung, 2016; Vazquez et al., 2019). A variação de temperatura fará com que o componente ativo se expanda mais do que o passivo, causando a curvatura. Em inglês:

Biomimética (*Biomimetic*) - linguagem transdisciplinar que liga os projetistas aos biólogos e à tecnologia (Mazzoleni, 2013; M. Oliveira, 2019). O elemento central da biomimética baseia-se na transferência dos princípios biológicos para a tecnologia e inovação (Badarnah, 2012; ISO 18458:2015, 2015).

Bioinspiração - abordagem criativa baseada na observação de sistemas biológicos (ISO 18458:2015, 2015).

CAD/CAM (*Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing*) - Desenho Assistido por Computador / Manufatura Assistida por Computador - uso de modelos geométricos gerados por computador como a base para as instruções a processos de controle numérico por máquina (Mitchell & McCullough, 1995, p. 468).

Cinética - compreende o estudo sobre as leis do movimento que incluem as forças e as massas, e enfatiza a relação entre o movimento e suas respectivas causas (Al-obaidi et al., 2017; Lienhard, 2014).

Cobogó ou Combogó - elemento vazado, "[...] pré-fabricado, próprio a ser construído em série, baseado na vazadura de uma retícula modular sobre uma placa prismática de concreto" (Vieira et al., 2013, p. 32). Possui a função de ventilar, iluminar, promover a proteção solar e iluminação (Camacho et al., 2018). O termo 'concreto' em Portugal corresponde à 'betão'.

Estímulo - sinal físico ou químico que desencadeia uma sequência de reações na célula, cuja demanda de energia é suprida pelo próprio organismo (Bresinsky et al., 2012, p. 485).

Fachada adaptativa - corresponde à capacidade de um sistema de se ajustar por si só em relação a um ambiente em mudança (Al-obaidi et al., 2017). Um sistema adaptativo, como a construção de peles, tem a capacidade de adaptar as características, comportamento ou configuração do ambiente externo (Dewidar et al., 2013, como citado em Al-obaidi et al., 2017).

Movimento de Hidronastia - tipologia movimento nástico das plantas que proporciona ajuste osmótico e proteção contra os efeitos da radiação excessiva (Chergui et al., 2017). Para tanto, reduz a transpiração, a desidratação das folhas, e a intercepção de luz (Kadioglu et al., 2012).

Movimento Nástico - referem-se aos movimentos mecânicos não direcionais das plantas em resposta a estímulos externos, que não dependem da direção do estímulo desencadeador e são predominantemente reversíveis (Fiorito et al., 2016; Schleicher et al., 2015).

Acrônimos e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACADIA	Association for Computer Aided Design in Architecture
A_h	Ângulo Horário
A_{hs}	Ângulo Horizontal da Sombra
A_{vs}	Ângulo Vertical da Sombra
A	Ângulo dos dentes na versão negativa (°)
AITECB	Análise sobre a Influência da Temperatura Externa no Comportamento dos Biomódulos
ACS	*Adaptative Comfort Standard*
AC	Adaptação Comportamental
AE	Armazenamento de Energia
AF	Adaptação Fisiológica
AG	Água
APA	*American Psychological Association*
AM	Adaptação Morfológica
AQ	Aquecimento
AQ/AR	Aquecimento/Arrefecimento
AR	Ar
ASHRAE	*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
AT	*Análise Temática*
BBCC	*Building Bioclimatic Chart*
ca	*Camada ativa*
CAD	*Computer Aided Design*
CAM	*Computer Aided Manufacturing*
CF	Componente de Fachada
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
CNC	*Computer Numerical Control*
cp	Camada passiva
CTE	Conforto Térmico
CVI	Conforto Visual
DA	Design Algorítmico
DBE	Diâmetro dos Biomódulos Externos, ou simplesmente Diâmetros Externos
DBI	Diâmetro dos Biomódulos Internos, ou ainda Diâmetros Internos
DE	Demanda de Energia
DEN	Demanda de Energia
DG	Design Gerativo
DP	Design Paramétrico
E	Espacejamento entre os vincos
EG	Estratégia Geométrica
EN	Energia
EPW	*Energy Plus Weather*
EXP	Experimental
EXT	Controle Extrínseco
FEA	*Finite Element Analysis*
FFD	*Fast Fluid Dynamics*
FRP	*Fiber Reinforced Plastic*
GFRP	*Glass Fiber Reinforced Polymer*
HVAC	*Heating, Ventilation and Air-Conditioning*
h_s	Altura Solar
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
ICU	Ilha de Calor Urbano (em inglês *Urban Heat Island*)
IF	Incompressibilidade de fluidos (encolhimento e expansão)

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INT	Controle Intrínseco
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
LCZ	Local Climate Zones
LEED	*Leadership in Energy and Environmental Design*
LMFA	Largura Média de Folha Aberta
L_{hs}	Longitude Horizontal da Sombra
L_{vs}	Longitude Vertical da Sombra
LZ	Luz
M	Matriz
MIT	*Massachusetts Institute of Technology*
MOF	Morfológica
MP	Modelo Preliminar
MS	Modelo de Simulação
NURBS	Sigla referente às *b-splines* não-uniformes racionais (do inglês, non-uniform rational b-spline)
OR	Organismo de referência
OUT	Outro
PC	Projeto Computacional
PE	Pernambuco
PIK	*Potsdam Institute for Climate Impact Research*
PP	Protótipo em Escala Piloto
QA	Qualidade do ar
QAI	Qualidade do ar interna
R	Raio do dente (mm)
RMFF	Raio Médio da Folha Fechada
SC	Sessão de Cocriação
SF	Subcomponente de Fachada
SM	Secções de Matrizes- Correspondem a matrizes que compreendem a largura máxima das peças em bimetal em escala 1:1.
SO	Sombreamento
SR	Sistema em Escala 1:1
T	Tolerância entre matriz positiva e negativa (mm)
TRM	Temperatura Radiante Média
UM	Umidade
VE	Vincos por estampagem
VM	Vincos manuais
VP	Variação da propriedade do material
VT	Ventilação
VPL	Visual Programming Language
WBDG	*Wolding Building Design Guide*
z	Azimute
z_c	Azimute da superfície da construção
α	Difusibilidade Térmica
β	Longitude
λ	Condutibilidade térmica
ρ	Densidade
P	Profundidade do dente (mm)
a	Coeficiente de absorção
e	Calor Específico
r	Coeficiente de reflexão
t	Coeficiente de transmissão
δ	Declinação
φ	Latitude

Incêndio florestal de eucaliptos em Portugal. Foto: ©anagh.

1. Contexto

1.1. Introdução

O advento da consciência ambiental, por volta dos anos setenta, vislumbrou um novo olhar para a eficiência energética através do desenvolvimento de estratégias que promovam eficazmente o arrefecimento, aquecimento e iluminação nas construções (Lechner, 2009). A adoção de estratégias bioclimáticas contribui para aprimorar o desempenho dos edifícios em termos de adaptação ao clima, com atenção às especificidades climáticas locais (Olgyay, 1973), à função da edificação, e consequentemente ao seu modo de ocupação e operação (H. Gonçalves & Graça, 2004; Olgyay, 1973, 2002).

As fachadas, peles arquitetônicas ou envelopes dos edifícios têm um papel relevante na regulação e controle dos recursos energéticos (Böke et al., 2022; Herzog et al., 2017; López et al., 2017), pois intermedeiam a relação entre as condições ambientais externas e os requisitos desejados para a promoção de conforto ao usuário (Herzog et al., 2017; Loonen et al., 2015). Ao idear uma solução de fachada, os projetistas procuram conciliar parâmetros de desempenho muitas vezes controversos, como: ganho/perda de calor e visibilidade; iluminação e ventilação natural (Heisserer et al., 2013b).

Para propiciar conforto térmico a um dado ambiente construído, deve-se gerir quatro condições ambientais que possibilitam a perda de calor, que são: temperatura do ar (˚C), umidade, movimento do ar (m/s) e temperatura média radiante (Lechner, 2009). Para além desses parâmetros, têm-se a dissipação do calor por mecanismo do corpo humano. A **coordenação da construção com a exposição solar e sistemas de sombreamento** é uma parte fundamental no processo de planejamento e desenvolvimento da solução de arquitetura (H. Gonçalves & Graça, 2004; Olgyay, 1973, 2002).

As **fachadas adaptativas** ou **cinéticas** têm demonstrado potencial para reduzir o consumo de energia de um edifício (Böke et al., 2022; Glynn & Sheil, 2011; Henning Larsen, n.d.). Investigação proposta por Bui et al. (2020), por exemplo, constatou a redução em até 29% quando comparou o sistema de fachada adaptativo ao estático. A maior parte das propostas possuem funções monofuncionais que primam por sombrear ou ventilar (Aelenei et al., 2016; Böke et al., 2022; Loonen et al., 2013). O desenvolvimento de projetos para fachada cinético deve levar em consideração as condições climáticas naturais do ambiente e pesquisa de materiais alternativos à edificação, na busca pelo equilíbrio entre reduzir o ganho/perda de calor e mitigar o consumo desenfreado dos recursos naturais.

O atual estado de conhecimento demonstra a **intensificação de propostas para fachada adaptativa que unem a bioinspiração[4] à pesquisa de materiais, e ao projeto computacional[5]** (Fiorito et al., 2016; Kuru et al., 2019; Menges, 2012b; Reichert et al., 2014). As soluções utilizam **abstrações[6] e analogias[7] com sistemas biológicos em associação à capacidade de resposta inerente do material** (L. Charpentier et al., 2022; V. Charpentier et al., 2017; Fiorito et al., 2016; Kuru et al., 2019; Menges, 2012b; Menges & Reichert, 2015; Reichert et al., 2014; Schleicher et al., 2015; Sung, 2016; TBM Designs, 2020); sendo possível **reduzir a utilização do sistema mecânico** (Lift Architects, n.d.; Menges, 2012a; Menges & Reichert, 2015)**, do consumo energético** (Kuru et al., 2020; TBM Designs, 2020); e ainda **ampliar a capacidade de resposta às condições ambientais** (Hosseini et al., 2019; Kuru et al., 2019).

Para Sung (2016):

> […] o envelope de um edifício deve ser considerado mais como a pele de um organismo, com uma relação ecológica com o seu ambiente, então precisa de atuar como um **mediador dinâmico entre os dois ambientes (interior e exterior) e menos como a parede impenetrável de uma cápsula que ignora o ambiente[8]**. (Sung, 2016, p. 96, tradução livre, grifo nosso)

---

[4] Bioinspiração: abordagem criativa baseada na observação de sistemas biológicos (ISO 18458:2015, 2015).

[5] **Projeto Computacional** ou **Design Computacional** (em inglês *Computational Design)*. No Brasil, *o termo* Design Computacional é comumente utilizado. A tese em questão adota a terminologia Projeto Computacional.

[6] Abstração: processo indutivo em que se obtém uma conclusão geral com base na observação de um objeto específico. Na biomimética, esta conclusão é idealmente um contexto físico para descrever os princípios funcionais e operacionais subjacentes dos sistemas biológicos (ISO 18458:2015, 2015).

[7] Analogias: semelhança nas relações entre os parâmetros relevantes utilizados para descrever dois sistemas diferentes. Para a biologia, esse termo refere-se a semelhanças nas características funcionais entre diferentes organismos que resultam da necessidade de adaptação e não em relação aos organismos estarem de alguma forma relacionados. Passou também a ser compreendida como forma dinâmica e enfatiza, em particular, as diferenças entre os pontos de partida de dois desenvolvimentos evolutivos (ISO 18458:2015, 2015).

[8] *"[…] the envelope of a building is to be considered more like the skin of an organism, which has an ecological relationship with its environment, then it needs to perform as a dynamic mediator between the two environments (interior and exterior) and less like the impenetrable wall of a capsule ignorant to its surroundings"* (Sung, 2016, p. 96, transcrição literal).

Assim, os elementos construtivos para fachadas podem ser concebidos de modo a proporcionar aos edifícios a flexibilidade necessária em termos de fluxo energético e conforto térmico**,** capazes de reagir a condições externas não contínuas e variáveis.

Os projetistas – sejam arquitetos, urbanistas, designers ou engenheiros – precisam questionar os conhecimentos inerentes à profissão para **propor soluções sustentáveis e inovadoras** (Benyus, 2012; Estévez, 2021). A natureza desenvolve materiais, processos e soluções que funcionam desde a nanoescala até à macroescala (Bhushan, 2009). **Um olhar atento às soluções da natureza, que evoluiu durante 3,85 bilhões de anos, pode contribuir para revolucionar os produtos, processos e a vida** (Benyus, 2012). É relevante também que o projetista tenha atenção ao planejamento do ciclo de vida da solução, para que ao final da vida útil do produto, os materiais constituintes possam retornar à natureza (no caso de "nutrientes biológicos") ou a ciclos industriais de ciclo fechado (se forem "nutrientes técnicos") (McDonough & Braungart, 2002). E assim, evitar o desperdício do potencial dos materiais tecnológicos em processos de reciclagem que não levarão em consideração a sua potencialidade.

Atualmente, os **materiais inteligentes e de mudança de forma** são utilizados para desenvolver arquiteturas sensíveis que se adaptem a diferentes condições climáticas (Ritter, 2007; Vazquez et al., 2019). Os materiais mais frequentemente utilizados são: *Shape Memory Alloys* [SMA] e biocompósitos à base de madeira; seguidos, por ordem de incidência por: bimetais, polímeros eletroativos, compósitos de bimetais, polímeros com memória de forma e hidrogéis (Vazquez et al., 2019).

No que tange à concepção algorítmica sobre fachadas, o **projeto computacional** pode ser utilizado desde as etapas iniciais de desenvolvimento, a fim de aliar a criatividade ao desempenho. O **design paramétrico** por meio da geometria associativa possibilita o estabelecimento de relações de dependência, ou codependência, e pode controlar o comportamento dos modelos que mantêm características topológicas (Menges & Ahlquist, 2011; Oxman, 2006, 2017; Woodbury, 2010). **O controle dinâmico de objetos pode ser condicionado a influências ambientais como forças motrizes nas simulações** (Oxman, 2006). Ou ainda, a criação de forma da fachada resultar do desempenho desejado (*performance-based design*) (Oxman, 2006, 2008). As definições algorítmicas podem ser idealizadas mediante abordagens de **design gerativo**[9]. Como é o caso

[9] **Design Gerativo**: (em inglês *Generative Design*, do verbo '*to generate*', cuja tradução em português corresponde ao verbo gerar onde a forma verbal *generative* tem como equivalente em português o termo gerativo). Tal termo também pode ser encontrado como **Design Generativo**. A tese em questão adota a terminologia Design Gerativo.

dos algoritmos genéticos e evolutivos que se inspiram na evolução biológica para otimizar soluções, processos de aprendizagem e modelação de dados (Bentley, 1999). E assim, permitir a emergência de soluções formais inusitadas (Gero, 1996; Hensel et al., 2004).

Abordagens algorítmicas podem contribuir para um ou mais parâmetros de desempenho, como parâmetros para aprimorar: **sombreamento** (Fiorito et al., 2016; Kirimtat et al., 2016, 2019; Kong et al., 2002; Whitehead, 2003); **iluminação natural** (Bui et al., 2020; Caetano, Leitão, et al., 2020; Caldas, 2008; Fang, 2017; Karanouh & Kerber, 2015; Kirimtat et al., 2019; Knippers et al., 2012, 2018; Lienhard et al., 2012; Vazquez, 2018); **conforto térmico** (Caldas, 2008; L. Charpentier et al., 2022; DOSU Studio Architects, 2021; Lift Architects, n.d.; Reichert et al., 2014; Vazquez, 2018); e **eficiência energética** (Bui et al., 2020; Caldas, 2008; Fang, 2017; Gadelhak, 2019; Kirimtat et al., 2016; Kong et al., 2002; TBM Designs, 2020; Whitehead, 2003), **conforto visual** (Heisserer et al., 2013b) e **ventilação** ((Fox, 2016), entre outros.

Nesse sentido, a presente investigação pretende aliar o conhecimento sobre o clima, bioinspiração na natureza, materiais adaptáveis e sustentabilidade, e concepção algorítmica para desenvolver **módulos cinéticos** e **adaptáveis para fachadas** que contribuam para a proteção solar do ambiente construído, **sem fazer uso de dispositivos eletromecânicos**.

A solução modular será proposta através da **bioinspiração no movimento das plantas, em consonância com a experimentação de materiais e o projeto computacional**. Tenciona-se integrar abstrações do organismo de referência ao material de criação do módulo cinético e à definição algorítmica (paramétrica e de simulação) sob abordagem personalizável. Assim, será proposta ferramenta de suporte à modelação das fachadas e, portanto, também ao projeto de arquitetura.

1.2. Delineamento do Objeto de Estudo

A presente investigação se **concentra nas plantas**, **por entender que se assemelham aos edifícios e que não podem escapar às condições ambientais adversas** como os animais (Ahmar & Fioravanti, 2012; Azcon-Bieto & Talon, 2008; López et al., 2017). Uma compreensão detalhada dos **movimentos das plantas** quando aplicada à arquitetura pode inspirar o desenho de fachadas adaptáveis a diferentes condições climáticas (V. Charpentier et al., 2017; López et al., 2017; Schleicher et al., 2015). Portanto, induzindo comportamentos responsivos ao meio ambiente.

A **abordagem biomimética** busca identificar organismo de referência que apresente **movimento nástico** (que corresponde aos movimentos mecânicos não direcionais em resposta a estímulos externos). A direção do movimento é predominantemente reversível e independente da direção do estímulo desencadeador (Fiorito et al., 2016; Schleicher et al., 2015).

Um exemplo de movimento nástico é a abertura das pétalas das flores ao amanhecer e o fechamento ao anoitecer. Algumas folhas fecham-se sob vários estímulos. Um dos tipos de comportamento responsivo das folhas da *Mimosa pudica* é se dobrar em reação ao contato (López et al., 2017) (Figura 1).

Figura 1. Movimento nástico da *Mimosa pudica* por contato.

Foto: ©AjayTvm.

Existem diferentes tipologias, que serão posteriormente detalhadas. Por ora, destaca-se que as **plantas possuem estratégias de adaptação mediante estruturas flexíveis e sensíveis às condições climáticas** (Ahmar & Fioravanti, 2014).

1.3. Problemática da Investigação

Registros de alterações climáticas, esgotamento de recursos naturais e formação de ilhas de calor urbanas são cada vez mais recorrentes. O relatório das Nações Unidas, produzido pela *Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC] (2018), recomendou a **necessidade de reduzir, até 2030, 45% da emissão do CO_2** (um dos principais causadores do efeito estufa) e **utilizar 85% da eletricidade global a partir de fontes de energias renováveis em 2050.** Especialistas têm pouca esperança de que o mundo seja capaz de enfrentar esse desafio, já que essas mudanças requerem elevados custos a curto prazo.

O IPCC (2018) chamou a atenção mundial para a necessidade de transformações rápidas e sem precedentes para **limitar, nos próximos doze anos, o aquecimento global a 1,5°C, em vez da previsão de aumento de 2°C**. Caso contrário, a sociedade irá lidar com fenômenos extremos de secas, inundações e picos de calor que poderão alterar drasticamente a dinâmica das pessoas e os ecossistemas do planeta.

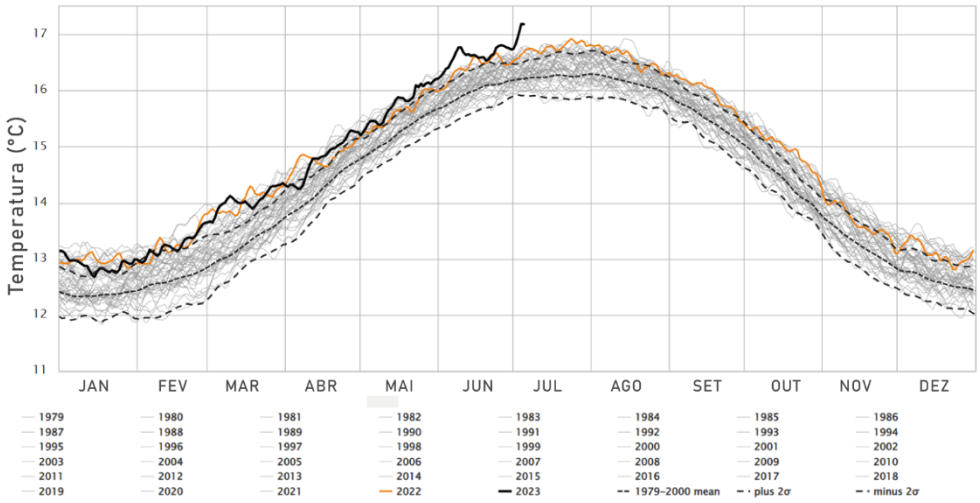
De acordo com **Johan Rockström**, diretor da *Potsdam Institute for Climate Impact Research* (2018), os elevados níveis de emissões de combustíveis fósseis poderão proporcionar um mundo com cerca de 3 a 4 graus a mais neste século XXI. A título de exemplo do que pode ocorrer com maior frequência no planeta têm-se o incêndio florestal sem precedentes na **Austrália**, no verão de 2019 -2020, que culminou na queima de mais de 20% das florestas (Cox, 2020). Apesar dos incêndios serem comuns na Austrália, a situação foi agravada pela influência humana (Cox, 2020). As atividades antropogênicas contribuem para a aceleração das **alterações climáticas globais** (Lopes et al., 2020).

Em **Portugal**, segundo o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas [ICNF] (2022), entre 01 de janeiro e 15 de outubro de 2022, registraram-se 10.449 incêndios rurais com 110.007 hectares de área consumida. As causas mais frequentes são atribuídas ao incendiarismo (28%) e às queimadas de sobrantes florestais ou agrícolas (19%). Ainda segundo o ICNF, o mês de julho de 2022 é aquele que deflagou a maior quantidade e maior área consumida por incêndios.

Contudo, as queimas podem tomar grandes proporções se forem somados a condições climáticas que agravem a propagação do fogo. Foi o caso do **dia 13 de julho de 2022**, **que colocou Portugal Continental em situação de alerta vermelho de risco de incêndios** (Amaral et al., 2022), devido a **extremas temperaturas do período com onda de calor e forte incidência de vento** (SIC Notícias, 2022). Foram registrados 27 pontos de incêndio no país e houve mobilização das operações nacionais para conter a propagação do fogo (Amaral et al., 2022).

Já no dia 04 de julho de 2023 foi registrada a maior temperatura média global, desde 1979 (Sands, 2023). Atingiu 17,18 °C segundo U.S. National Centers for Environmental Prediction (Climate Change Institute, 2023; Sands, 2023). O recorde anterior foi no dia 3 de julho de 2023, com 17,01°C. O registro máximo havia sido em 2016, com temperatura média mundial em 16,92°C (Sands, 2023). Alguns cientistas acreditam que 04 de julho pode ter sido um dos dias mais quentes na Terra em cerca de 125.000 anos (Sands, 2023). A Figura 2 apresenta a temperatura média do ar global a partir de janeiro de 1979 (Climate Change Institute, 2023).

Figura 2. Temperatura média diária do ar mundial (1979 – presente).



Nota. Temperatura média diária do ar de 2 metros (90°S–90°N, 0–360°E) do *NCEP Climate Forecast System (CFS) version 2* (abril de 2011 – presente) e *CFS Reanalysis* (janeiro de 1979 – março de 2011). Fonte: *Climate Change Institute* (2023).

Dada a urgência da crise climática, o programa de pesquisa dos **Estados Unidos** busca **analisar a viabilidade para escurecer o Sol**, e como essa tecnologia poderia ser governada de maneira ética (Carrington, 2021). A opinião sobre o projeto é controversa, sobretudo para ambientalistas. Julgamentos à parte, **cada indivíduo a partir do seu próprio campo de atuação, deve esforçar-se para mitigar o impacto no planeta, antes que seja demasiadamente tarde** (Estévez, 2021).

Vale salientar que o **desenvolvimento sustentável** busca mudar o estilo de vida atual, de um modo não impositivo, mas que modifique o modo de produção e promova o consumo consciente, em que o indivíduo considera a relação local e global, e os impactos das suas ações (Gumuchdjian & Rogers, 2011).

A demanda por soluções **arquitetônicas passivas** praticamente desapareceu da arquitetura contemporânea, dando espaço para o surgimento de ambientes fechados em vidro (Hensel, 2008), devido aos desenvolvimentos quer estéticos quer tecnológicos estimulados pelo modernismo. A sociedade contemporânea passou a **utilizar desenfreadamente sistema elétrico de resfriamento (ar-condicionado) ou de calefação (aquecimento)**, sem estimular a análise performativa dos ambientes, pelos que pensam e projetam os espaços. Por consequência, houve a elevação exacerbada do consumo de energia pelas edificações, nas décadas posteriores (J. Gonçalves & Duarte, 2006).

De acordo com Omrany et al. (2016) o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento de espaços **representa 60% do total da energia consumida nos edifícios**. As construções na **União Europeia** [UE] consomem por volta de **40% do**

total da energia final e produzem 36% dos gases com efeito de estufa relacionados com a energia (European Commission, 2022).

Para melhorar o desempenho energético dos edifícios, a UE estabeleceu a Diretiva 2012/27/UE relativa à eficiência energética e a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios. A primeira diretiva revela necessidade de os Estados-Membros da UE aumentarem o número de edifícios de energia zero (nZEB) (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2010). Um elemento-chave na segunda diretiva são os requisitos relativos para a promoção dos nZEBs (Aelenei et al., 2016).

No que tange às mudanças climáticas nas cidades, pesquisas recentes indicam tendência para o acontecimento de **Ilhas de Calor Urbano** [ICU] (em inglês *Urban Heat Island*) (Alcoforado et al., 2005; Lopes et al., 2020). Os primeiros estudos sobre ICU foram desenvolvidos pelo britânico **Luke Howard** (1772 – 1864) no início dos anos 1800, na obra monumental '*The Climate of London*' (Mills, 2006). Contudo, somente a partir de meados do século XX que pesquisas substanciais começaram a investigar o fenômeno com mais detalhes, principalmente em relação ao seu impacto nas áreas urbanas e na saúde humana. O termo ICU surgiu propriamente no final da década de cinquenta, na Inglaterra (Alcoforado et al., 2005). Compreende zonas centrais urbanas que proporcionam áreas de sobreaquecimento de temperaturas, com menores índices de umidade (Higueras, 2006).

As ilhas de calor urbano são consideradas como uma alteração climática por origem antrópica para uma dada localidade urbana (Alcoforado et al., 2005; Chapman et al., 2017), em decorrência das características materiais e morfológicas do território, bem como das emissões de poluentes e calor (Lopes et al., 2020). Entre os fatores que influenciam na formação das ICU estão:

- **Elevada densidade das construções nas cidades** – que acumulam energia e reduzem a circulação de ar;

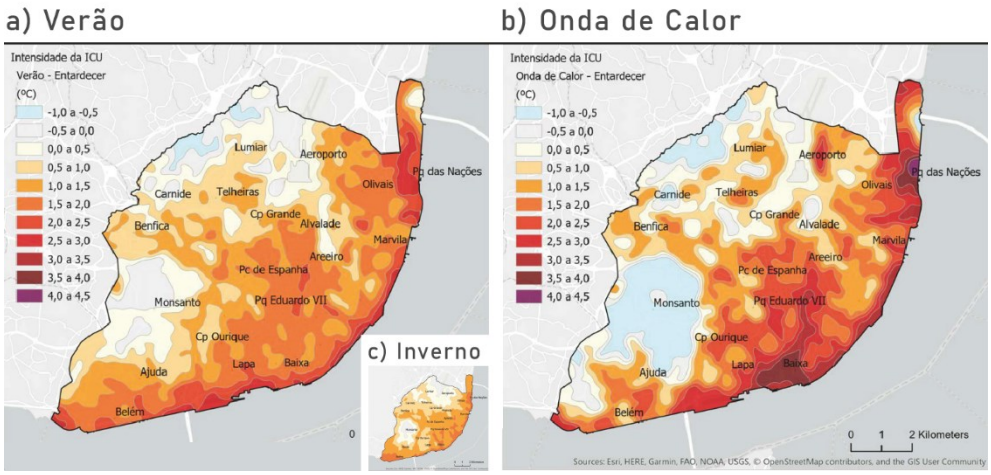
- **Tipo de acabamento superficial** – a alta impermeabilização dos solos e o material das edificações podem influenciar no grau de absorção de radiação, com consequente elevação da temperatura do ar circundante;

- **Recepção do calor nas construções** – varia conforme a orientação dos edifícios e efeitos do sombreamento (Higueras, 2006).

O estudo sobre ICU para a área metropolitana de Lisboa desenvolvido por Lopes et al. (2020) fornece informações sobre as áreas da cidade mais propensas ao

desconforto térmico ao entardecer, em dias de calor extremo (Figura 3). Segundo Lopes et al. (2020), durante o inverno a intensidade máxima da ICU atinge valores entre 1,5˚C e 2˚C. No verão há um padrão mais heterogéneo. O maior gradiente de intensidade pode chegar à 2,5˚C. O estudo constatou que o Parque das Nações e a região da Baixa apresentam índices de ICU superiores a 4˚C (Lopes et al., 2020) (Figura 3).

Figura 3. Mapa da intensidade da ilha de calor urbano em Lisboa ao entardecer.



Fonte: Lopes et al. (2020, pp. 40, 42 e 45).

Aumento significativo da ocorrência de **ondas de calor** são verificados nas últimas três décadas (A. Oliveira et al., 2022) com **maior quantidade, duração e severidade na região mediterrânica do sul da Europa** (Lopes et al., 2020; Reis et al., 2022; Nematchoua et al., 2022; A. Oliveira et al., 2021). A partir da previsão de radiação global diárias e da temperatura do ar, estimativas **preveem a ocorrência de ondas de calor repetitivas distribuídas em Madrid, Atenas e Lisboa, por longos períodos entre 2050 e 2100** (Nematchoua et al., 2022).

O **cenário prospectivo e crítico para a cidade de Lisboa, foi previsto em circunstâncias de ampla concentração dos gases de efeito estufa** (Lopes et al., 2020). Tal cenário evidenciou que a média da temperatura máxima poderá ser superior à atual em 1,6˚C, no período 2046-2065 e 3,6˚C em 2081-2100 (Lopes et al., 2020). Já a média da mínima, poderá ser superior 1,6˚C e 3,1˚C, nos mesmos períodos, ainda segundo autores. A ocorrência média anual de dias com onda de calor, em meados do século, poderá ser cerca de quatro vezes superior à atual (Lopes et al., 2020). No fim do século, poderá ocorrer seis vezes mais (Lopes et al., 2020). Essa altura, será provavelmente registrado o pior cenário de **ondas de calor em Lisboa**, **com cerca de sessenta dias de ocorrências**, ainda segundo os autores.

Nesse sentido, projeções futuras indicam a **elevação significativa da temperatura do ar, bem como a quantidade, duração e severidade de episódios de onda de calor**

em Lisboa (Reis et al., 2022). Durante as ondas de calor nessa região as **temperaturas podem chegar a 40°C.** Regista-se predominância do vento norte e maiores amplitudes térmicas (aproximadamente 10 °C) (A. Oliveira et al., 2021). Como consequência, há a elevação das necessidades de arrefecimento no verão, e ainda, a ampliação dos riscos para a saúde (Lopes et al., 2020).

Em decorrência da exposição ao calor extremo, os idosos representam o percentual da população com maior índice de mortalidade (Lopes et al., 2020; A. Oliveira et al., 2022). De acordo com estimativas por Casimiro et al. (2006), as taxas de mortalidade referentes ao calor em Lisboa poderão ser de:

- **5,4 a 6 mortes**/100.000 habitantes – entre 1980 e 1998;
- **8,5 a 12,1 mortes**/100.000 habitantes – em 2020;
- **29,5 mortes**/100.000 habitantes – em 2050.

Em **Portugal**, há uma baixa adesão a equipamentos de ar-condicionado no contexto doméstico dada a pobreza energética (Lopes et al., 2020). Segundo dados dos Observatórios de Lisboa, a capital portuguesa possui 2,8 milhões de habitantes na região metropolitana, de um país com população em 10,3 milhões de pessoas (Lisboa E-Nova – Agência de Energia e Ambiente de Lisboa, n.d.). Em 2019, a eletricidade respondeu por 35,8% da energia de Lisboa (Lisboa E-Nova – Agência de Energia e Ambiente de Lisboa, n.d.). Para o mesmo período, o setor residencial consumiu cerca de 23,6% da eletricidade, enquanto o setor de serviços compreendeu 66,1% do consumo (Lisboa E-Nova – Agência de Energia e Ambiente de Lisboa, n.d.). Percebe-se que o setor de serviços de Lisboa demanda quase três vezes mais energia elétrica que o residencial.

As **fachadas adaptativas** ou **cinéticas** podem contribuir para a redução do consumo energético da edificação através da redução do ganho de calor e da necessidade de ar-condicionado artificial, e assim contribuir para a economia de energia (Karanouh & Kerber, 2015; TBM Designs, 2020). Nesse sentido, pode-se tirar partido do campo de atuação de design e de arquitetura para projetar um módulo bioinspirado, que possa contribuir para a mitigar a incidência solar direta nas fachadas. A investigação insere-se no campo da prática de projeto para fachadas de edifícios sob abordagem biomimética, experimentação de materiais e uso de ferramentas computacionais.

1.4. Questões de Investigação

A principal questão de pesquisa corresponde a:

> De que modo se pode potencializar a adaptabilidade climática dos ambientes construídos por meio do desenvolvimento de elemento modular cinético para fachadas por bioinspiração no movimento de plantas?

Tabela 1. Questões de investigação.

TÓPICO	DESCRIÇÃO
IDENTIFICAÇÃO DE ORGANISMOS DA NATUREZA	▪ Como **identificar estratégias e mecanismos dos movimentos das plantas** que permitam a concepção de módulo cinético para fachadas? ▪ Qual organismo e características que devem ser as referências para a investigação?
MATERIAL	▪ Qual **material** adotar para o elemento modular a fim de **reduzir a necessidade de dispositivos eletromecânicos** para acionar o sistema?
PROJETO COMPUTACIONAL	▪ Como desenvolver o **algoritmo computacional** de modo a proporcionar a concepção de módulo para fachadas em Lisboa?

Fonte: Autora (2023).

A Tabela 1 direciona o desenvolvimento para a identificação das estratégias de adaptação do organismo para a bioinspiração; experimentação de materiais que contribua para a redução do uso de dispositivos eletromecânicos; e concepção algorítmica capaz de simular o funcionamento de solução em diferentes contextos climáticos do Concelho de Lisboa-PT.

1.5. Hipótese

A hipótese da presente investigação consiste em:

> Por meio de processo biomimético sobre os movimentos násticos das plantas, experimentação com material inteligente e do projeto computacional, é possível desenvolver um módulo cinético para fachadas, adaptável a diferentes condições climáticas e que não necessita de dispositivo eletromecânico para funcionar.

1.6. Objetivo Geral e Objetivos Específicos

A '*2030 Agenda for Sustainable Development*' foi adotada em 2015 pelos estados-membros das Nações Unidas, pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento (*United Nations*, 2015). A investigação em questão se relaciona a dois dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [ODS] estabelecidos nessa agenda, nomeadamente:

- **ODS 9:** Construir infraestruturas resistentes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação;

- **ODS 13:** Tomar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos.

Nesse sentido, a presente investigação tem por **objetivo geral**:

> Propor módulo cinético para fachadas, bioinspirado e adaptável a diferentes condições climáticas, que não necessita de dispositivo elétrico e mecânico para funcionar.

A solução deverá ser desenvolvida por metodologia de biomimética inspirada no movimento das plantas; experimentação de material (por testes sistemáticos que permitam dominar o comportamento do material, adequando-o aos objetivos comportamentais do módulo cinético idealizado e avaliando a sua aplicabilidade face aos mesmos objetivos). E avaliado em projetos de Arquitetura por meio de simulação por incidência solar baseada em modelação computacional.

Os **objetivos específicos** da investigação compreendem (Tabela 2):

Tabela 2. Descrição dos objetivos específicos.

OBJETIVOS	DESCRIÇÃO
OBJETIVO 1	Selecionar **organismo de referência** para abordagem metodológica de biomimética, do ponto de vista morfológico e comportamental.
OBJETIVO 2	**Definir conceito para o elemento modular cinético para fachadas adaptáveis.** Escolher material capaz de replicar estratégias do organismo, para promover a proteção solar **sem haver necessidade de utilização de dispositivo eletromecânico** para acionar o sistema.
OBJETIVO 3	**Desenvolver algoritmo** que gere e simule a implementação dos módulos em fachadas. Opta-se por simular para o contexto climático de Lisboa, dado o desafio em controlar elevadas amplitudes térmicas diárias nesse clima. Soma-se a isso o fato das propensas estimativas de ocorrência de onda de calor nessa localidade. O algoritmo, no entanto, permitirá simular para qualquer zona climática desde que seja fornecido o arquivo climático do local de referência e orientação solar da construção.
OBJETIVO 4	**Verificar** e **avaliar** a proteção solar da solução proposta através de simulação de incidência solar.

Fonte: Autora (2023).

Espera-se conceber **algoritmo computacional**, que integre abstrações sobre o organismo de referência e sobre as características comportamentais (responsivas) do material selecionado a fim de simular e otimizar o **comportamento de fachadas adaptáveis**. A solução deverá permitir a **personalização das informações.** O sistema evoluirá do particular (os módulos unitários) para o complexo (o conjunto de elementos que formam a fachada do edifício).

1.7. Metodologia da Investigação

A concepção de projeto de design e arquitetônico é composta por **processo constante de reflexão e ação**, cuja estrutura básica 'ver – movimentar – ver novamente' proporciona um contínuo processo de descoberta e a interação (Schön & Wiggins, 1992). A apreciação das circunstâncias possibilita que o projetista reconheça propensas incompatibilidades e reaja com o 'movimento' (Schön & Wiggins, 1992). Através de ciclos de 'retrocessos e avanços' é possível aprimorar os resultados. A **reflexão crítica** é, portanto, crucial para a eficácia da sistematização metodológica de design.

Em linha, Snodgrass & Coyne (1996) afirmaram que a atividade do design provém de um círculo hermenêutico que envolve projeção de conhecimento prévio, pergunta e resposta, em que a revisão contínua das previsões é necessária para a interpretação. "A nossa interpretação das experiências modifica a nossa percepção do passado e as nossas antecipações do futuro; e a nossa compreensão do passado e do futuro forma o contexto em que interpretamos as experiências[10]" (Snodgrass & Coyne, 1996, p. 21). Para Munari, (1993):

> O método projectual para o designer não é de nada absoluta nem definitivo; é algo que se pode modificar se se encontrarem outros valores objetivos que melhorem o processo. E isto liga-se à criatividade do projectista que, ao aplicar o método, pode descobrir algo para melhorar. Portanto, as regras do método não bloqueiam a personalidade do projectista mas, pelo contrário, estimulam-no a descobrir coisas que, eventualmente, poderão ser úteis também aos outros. (Munari, 1981, pp. 21–22)

O processo de design é aprendido principalmente pela prática (Lawson, 2006). Compreende uma negociação entre o problema e a solução através da análise, síntese e avaliação (Lawson, 2006). No entanto, a ideia de que essas atividades ocorrem de modo sequencial, ou até sob acontecimentos distintos e bem identificáveis é bastante questionável, ainda segundo o autor. É provável que durante o processo de desenvolvimento o problema e a solução surjam em conjunto (Lawson, 2006).

No que diz respeito à resolução de problemas, os problemas de design contêm componentes determinados, como também a subdeterminação e indeterminação de problemas (Dorst, 2004). O projetista, por sua vez, deve adotar abordagem para o pensamento sistêmico (Bomfim, 1995; Bürdek, 2006), a fim de desenvolver soluções otimizadas e mitigar a ocorrência de problemas indeterminados, inerentes ao processo de desenvolvimento. Nesse sentido, as fases metodológicas determinadas pelo designer podem se sobrepor, em sucessivos níveis, em uma relação dual de independência e dependência (Schön & Wiggins, 1992; Vassão, 2010). Destarte, cada nível dá suporte para o próximo, mas também é influenciado

---

[10] *Our interpretation of experiences modifies our perception of the past and our anticipations of the future; and our understanding of the past and the future forms the context in which we interpret experiences* (Snodgrass & Coyne, 1996, p. 21).

por ele (Schön & Wiggins, 1992), de um modo complexo em que a complexidade decorre de um conjunto de simplicidades (Vassão, 2010). Ressalta-se que cada projeto possui necessidades e características específicas ao seu desenvolvimento (Bomfim, 1995).

O design está dinamicamente relacionado ao aparecimento de tecnologias e inovações disruptivas, novidades na indústria e novos serviços; e uma oferta de profissionais aptos a impulsionar a inovação (Muratovski, 2016). As metodologias de biomimética, por sua vez, apresentam-se com uma **linguagem transdisciplinar que liga os projetistas aos biólogos e à tecnologia** (Mazzoleni, 2013; M. Oliveira, 2019). Segundo Lawrence e Després (2004), "**a transdisciplinaridade lida com a complexidade na ciência e desafia a fragmentação do conhecimento**"[11] (Lawrence & Després, 2004, p. 399, tradução livre, grifo nosso). Frequentemente efetua conexões não apenas entre fronteiras disciplinares, mas também entre o desenvolvimento teórico e a prática profissional.

Para Muratovski (2016), uma investigação transdisciplinar majoritariamente acontece sob "uma "fusão de disciplinas" - uma maneira de trabalhar na qual os designers 'transgrediram' ou 'transcenderam' suas próprias normas disciplinares e adaptaram maneiras de trabalhar de outras disciplinas"[12] (Muratovski, 2016, p. 20, tradução livre). Tal abordagem é mais adequada para trabalhar em problemas complexos e heterogêneos, aceita os contextos locais e a incerteza, é geralmente orientado para a ação, se caracteriza pela não linearidade e reflexão; e transcende a estrutura disciplinar acadêmica (Lawrence & Després, 2004).

Nesse sentido, a presente investigação utiliza uma abordagem **transdisciplinar que cruza o campo das ciências da natureza** (com o conhecimento advindo da biologia vegetal e da biomimética), com o das **ciências sociais** (por meio de sessão de cocriação com especialistas multidisciplinares) e **o das ciências exatas** (através de estudo do sistema climático, condutibilidade térmica de material inteligente, realização de ensaios e tratamento estatístico dos dados, desenvolvimento de algoritmo computacional e simulação de incidência solar).

A pesquisa possui **natureza de pesquisa aplicada**, sob abordagem qualitativa ao problema. A **metodologia biomimética utilizada é a baseada em problemas**, que busca identificar solução da natureza para um desafio pré-determinado (Badarnah & Kadri, 2014; López et al., 2017; M. Oliveira, 2019). Essa abordagem

---

[11] *"[...] transdisciplinarity tackles complexity in science and it challenges knowledge fragmentation"* (Lawrence & Després, 2004, p. 399).

[12] *"Transdisciplinary ways of working call for a 'fusion of disciplines' – a way of working in which designers have 'transgressed' or 'transcended' their own disciplinary norms and have adapted ways of working from other disciplines"* (Muratovski, 2016, p. 20).

possibilita a criação de cenários de desenvolvimento. A investigação está **estruturada em cinco fases**, nomeadamente: Âmbito, Descobrir, Conceituar, Solucionar e Avaliar (Arruda, 2020; Biomimicry 3.8, 2015; López et al., 2017; M. Oliveira, 2019) (Figura 4 e Figura 5).

Figura 4. Metodologia da Investigação.

Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021) e T. Andrade et al. (2022).

Muito embora as fases na Figura 4 estejam representadas de modo cíclico, entende-se que **o método de desenvolvimento de projeto possui uma abordagem de pensamento sistêmico** (Bomfim, 1995; Bürdek, 2006)**, que admite retrocessos, realimentações de informações e *feedbacks*.** Tais processos, possibilitam o alcance de melhores resultados das soluções e a economia de capital (Bürdek, 2006; Schön & Wiggins, 1992). As fases serão sinteticamente pontuadas a seguir.

- FASE '**Âmbito**' – compreende o processo de definição do contexto e revisão da literatura. A estratégia de pesquisa adotado nessa etapa foi o desenvolvimento de referencial teórico mediante revisão bibliográfica e fontes de dados científicos (internacionais e nacionais), a fim de esclarecer os problemas computáveis (Dorst, 2004). Os três primeiros capítulos compreendem o enquadramento teórico da presente investigação.

- FASE '**Descobrir**' – corresponde ao processo de descoberta do organismo, observação da natureza e abstração que dará suporte ao conceito de design do sistema proposto. Utilizou revisão sistemática de literatura sobre os movimentos násticos através do método PRISMA (Moher et al., 2015); coleta e registros dos dados dos organismos identificados segundo método proposto por López et al. (2017); contato com especialistas e o desenvolvimento de três estudos de observação sobre a planta de referência;

- FASE '**Conceituar**' – contempla o domínio da concepção da solução, em três etapas: *Brainstorming*, Requisitos de Desenvolvimento e Experimentação de Material. Durante a etapa de *Brainstorming*, desenvolveu *focus group* com equipe multidisciplinar de participantes para coleta de dados (Martin & Hanington, 2012); processos de geração de alternativas (esboços, caixa morfológica e método de *Design Sprint* (Google, n.d.)), e análise dos dados do *focus group* através da análise temática (Braun & Clarke, 2013).

O processo de experimentação com o material de desenvolvimento contou com abordagem qualitativa ao problema, que apresenta classificada como **método científico hipotético-dedutivo**. Ou seja, busca definir um problema e oferecer solução provisória (teoria-tentativa), que deverá ser criticada, com vista à eliminação de erros (Marconi & Lakatos, 2003). Tal como na dialética, esse processo se renovaria, dando surgimento a novos problemas e variáveis que persistem como válidas, resistindo às tentativas de falseamento, ainda segundo as autoras. A investigação com o material de referência aconteceu sob a abordagem:

> **Exploratória** – corresponde a pesquisa empírica com a finalidade de formular questões ou problemas, a partir de três finalidades: a) desenvolver hipóteses; b) aprimorar a familiaridade do pesquisador com um ambiente, fato ou fenômeno, para a realização de uma pesquisa futura mais precisa; ou ainda, c) modificar e clarificar conceitos. (Marconi & Lakatos, 2003, p. 188)

Foram desenvolvidos dez experimentos exploratórios, entre estudos manuais e por fabricação digital. A análise dos dados foi efetuada de modo qualitativo, através da comparação entre dados coletados;

Essas três fases contemplam os estágios iniciais da investigação. Para Baxter (2011), os estágios iniciais são os mais relevantes para o processo de desenvolvimento de novos produtos. Deve-se investir mais tempo e pesquisa durante esse período, que possui menores custos inerentes ao desenvolvimento.

- FASE '**Solucionar**' – definição do algoritmo computacional e prototipagem. Para essa fase, buscou-se não apenas registrar visualmente a informação algorítmica, como também determinar sistema de codificação capaz de definir padrões visuais e dá-lhes significados para além deles próprios (Schön & Wiggins, 1992) A codificação demonstra as relações de dependência entre as partes constituintes do algoritmo por meio de códigos escritos e cores, que esclarece visualmente a natureza da informação, seja *input* ou *output*.

  Dentre os distintos métodos de desenvolvimento de projetos computacionais em arquitetura, a presente investigação utiliza o **modelo composto integrado** (Oxman, 2006) entre **modelo de formação associativo e modelo de desempenho** (Oxman, 2006, 2008). A geometria associativa no desenho paramétrico será utilizada para permitir o estabelecimento de relações de dependência e codependência, entre os elementos geométricos. Tenciona-se controlar o comportamento dos elementos cinéticos via transformações que mantêm características topológicas (Oxman, 2008) e que sejam condicionados pela simulação dinâmica ambiental (Oxman, 2006) por incidência solar. Para fins de exploração de possibilidades para o ambiente de teste sob análise será também utilizada o **modelo gerativo** sob abordagem do algoritmo evolutivo (Oxman, 2006);

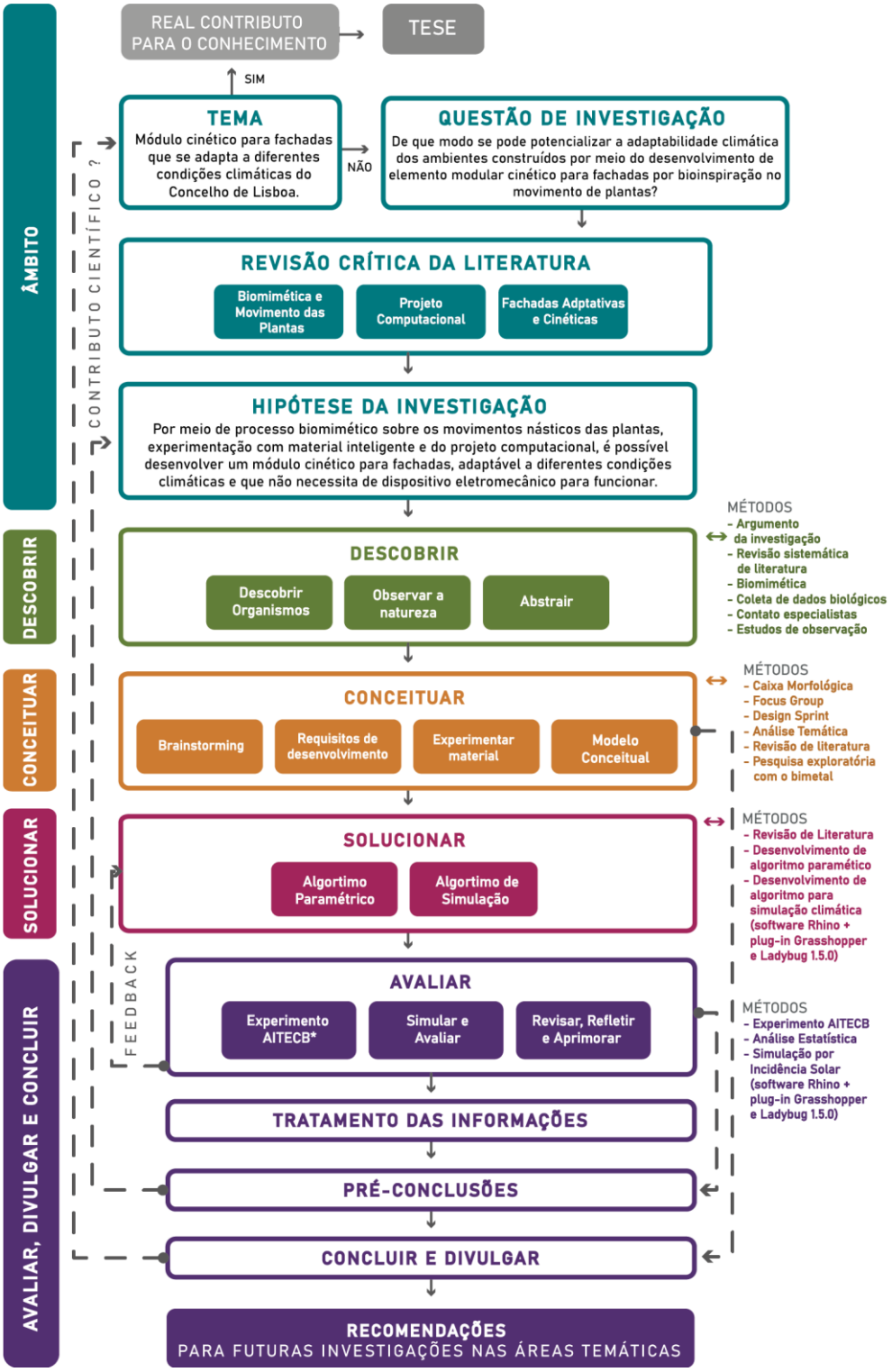
- FASE '**Avaliar, Divulgar e Concluir**' – busca testar, avaliar e aprimorar o sistema proposto, assim como evidenciar as conclusões e oportunidades para estudos futuros. A princípio, desenvolve estudo experimental sobre a influência da temperatura externa no comportamento dos módulos cinéticos. Utiliza coleta e registros dos dados do experimento, com posterior tratamento estatístico a fim de possibilitar a generalização das descobertas sobre o comportamento dos módulos. As variáveis relevantes ao estudo foram especificadas para poderem ser descritas quantitativamente (Marconi & Lakatos, 2003), a saber: temperatura das amostras e temperatura dos ambientes. Posteriormente, os comportamentos foram integrados à definição algorítmica. E foram desenvolvidas simulações por incidência solar para avaliar a proteção solar desencadeada pelos módulos cinéticos.

Por meio da compreensão das regras subjacentes aos **movimentos de projeto** (Schön & Wiggins, 1992) e da **abordagem transdisciplinar ao desenvolvimento** (Lawrence & Després, 2004; Muratovski, 2016) dão suporte para progressivamente compor o desenvolvimento de elemento modular cinético para fachadas por

bioinspiração, o qual contemplou diferentes áreas do conhecimento, a saber: Sustentabilidade, Biologia Vegetal, Biomimética, Design, Arquitetura, Clima, Engenharia de Materiais, Design Gerativo e Simulação Digital, e Tecnologias de Fabricação Digital.

Os métodos de **projeto** são por natureza condutores de síntese holísticas transdisciplinares, portanto característicos das áreas disciplinares que os elegem nomeadamente: o design e a arquitetura. Daí serem esses os métodos utilizados nesta pesquisa. O desenho da investigação revela síntese de etapas por fase, assim como métodos e ferramentas utilizados (Figura 5).

Figura 5. Desenho da Investigação.



Nota. *Análise sobre a Influência da Temperatura Externa no Comportamento dos Biomódulos' [AITECB] (mais informações item 0). Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2022).

1.8. Estrutura da Investigação

Para consolidar os **requisitos de conhecimento** necessários ao desenvolvimento do estado da arte da presente investigação, a **revisão crítica da literatura** foi desenvolvida sobre: a) **biomimética, movimentos das plantas e organismo de referência**; b) **aspectos climáticos e clima de Lisboa**; e c) **projeto computacional, fachada cinética e estratégias de deformação de material.**

À medida que a investigação for desenvolvida, temas específicos serão revisitados através de revisão de literatura pertinente à pesquisa. Por exemplo, informações sobre o organismo de referência (capítulo 4) e sobre o material selecionado para concepção do elemento modular cinético (capítulo 5). A pesquisa está estruturada em oito capítulos, nomeadamente:

- **CAPÍTULO 1 |** Contexto – o presente capítulo contextualiza o tema da investigação através da introdução e problematização; delineia o objeto de estudo e hipótese; especifica os objetivos, metodologia da pesquisa e estrutura da tese;

- **CAPÍTULO 2 |** Biomimética e Sistema Climático – compreende a revisão de literatura sobre **biomimética** (terminologia e definição; abordagens metodológicas e níveis de adaptação do organismo). Define recorte de estudo biomimético em **biologia vegetal** (**movimento das plantas > movimentos násticos**). A segunda parte do capítulo aborda o **sistema climático e relevância do Sol** para a perspectiva bioclimática das edificações em Lisboa. O contexto climático de Lisboa é esclarecido;

- **CAPÍTULO 3 |** Projeto Computacional e Fachadas Adaptativas ou Cinéticas – realiza revisão de literatura sobre a teoria e aprendizagem do **projeto computacional** e de **fachadas adaptativas ou cinéticas**. Conceitua diferentes terminologias que abarcam o conceito de **fachada cinética**; apresenta diferentes **estratégias de deformação de material** e análise de treze projetos de referência sob diferentes estratégias de transformação;

- **CAPÍTULO 4 |** Descobrir – Evidencia **revisão sistemática de literatura** sobre tipologias de movimento násticos e diferentes organismos. Define **critérios de seleção** e organismo de referência com apoio de profissionais de biologia. Desenvolve **estudos de observação** sobre o organismo de referência da presente investigação: a gramínea *Ammophila arenaria*. Por fim, exibe quadro síntese das estratégias do organismo sob o ponto de vista fisiológico, comportamental e morfológico;

- **CAPÍTULO 5 |** Conceituar – realiza processo de ***brainstorming*** e **sessão de cocriação multidisciplinar**; revisão de literatura e processo de experimentação exploratório com o material de mudança de forma utilizado na investigação, o bimetal; define **modelo conceitual do 'Biomódulo Bimetal'**, que integra abstrações sobre o organismo de referência; desenvolve **testes térmicos e respectivas avaliações dos experimentos exploratórios**; desenvolve **protótipos dos módulos cinéticos** por processo de fabricação digital; por fim, avalia os protótipos em teste térmico;

- **CAPÍTULO 6 |** Solucionar – define o **modelo computacional da investigação**, o qual contempla o algoritmo paramétrico e de simulação, que integra abstrações sobre o objeto de estudo ao comportamento do material, e simula o contexto climático do Concelho de Lisboa-PT para adaptar a solução de fachadas;

- **CAPÍTULO 7 |** Avaliar – desenvolve **experimento de exposição dos biomódulos ao ambiente climático de Lisboa** (na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa), em diferentes datas; analisa os dados; Demonstra as simulações dos **biomódulos bimetais em diferentes condições climáticas**.

- **CAPÍTULO 8 |** Concluir – Demonstra os contributos científicos da investigação, de modo a reanalisar a hipótese da pesquisa, se os objetivos foram atendidos e questões de investigação foram respondidas. Ademais, apresenta-se as conclusões do estudo e oportunidades de investigação em estudos futuros.

1.9. Síntese do Capítulo

O presente capítulo contempla a contextualização da pesquisa, introduz o **tema** que compreende o desenvolvimento de **módulo cinético para fachadas adaptáveis a diferentes condições climáticas do Concelho de Lisboa**. Discorre-se sobre a problemática da pesquisa, que aborda alterações climáticas; a necessidade de cada profissional no campo de atuação contribuir para mitigar o aquecimento global; preocupantes previsões sobre a ampliação das ocorrências ICU e severidade das ondas de calor no sul da Europa, que compreende Lisboa. Posteriormente, os **objetivos da investigação** são apontados. O principal objetivo busca propor módulo cinético para fachadas, bioinspirado e adaptável a diferentes condições climáticas, que não necessita de dispositivo elétrico e mecânico para funcionar. Após o esclarecimento dos objetivos, abordou-se a **metodologia geral da pesquisa**, que está estruturada cinco fases, nomeadamente: âmbito, descobrir, conceituar, solucionar e avaliar/concluir. A seção **estrutura da investigação** expõe síntese do conteúdo abordado em cada capítulo. O leitor está convidado a desfrutar dos próximos níveis de complexidade da presente investigação nas páginas que se seguem.

Folha da *Mimosa pudica*. Fonte: Wallpaper Flare (n.d.).

2.

Biomimética e Sistema Climático

2.1 Nota Introdutória

Para consolidar os requisitos de conhecimento necessários ao desenvolvimento do estado da arte, o **Capítulo 2** desenvolve revisão crítica da literatura sobre biomimética e sistema climático.

Em relação à **biomimética** explicita-se a perspectiva histórica sobre a nomenclatura e conceito. Busca-se esclarecer as distintas abordagens metodológicas (baseada em problema e baseada em solução), como também os diferentes níveis de adaptação do organismo da natureza (morfológico, fisiológico e/ou comportamental). Aborda-se também a temática movimento das plantas, com ênfase no movimento nástico, objeto de estudo da presente investigação.

Em relação ao **sistema climático**, a simulação computacional pode ser uma ferramenta valiosa para entender como diferentes fatores climáticos influenciam no desempenho dos edifícios. Contudo, é preciso entender os pressupostos sobre o clima, para então futuramente adotar simulações climáticas. Para tanto, o presente capítulo explicitará referencial sobre a relação entre a Terra e o Sol, a relevância da radiação solar para conforto térmico das edificações, ferramenta da geometria solar e diagrama psicométrico, por exemplo. Será abordado a perspectiva bioclimática para as edificações e clima de Lisboa.

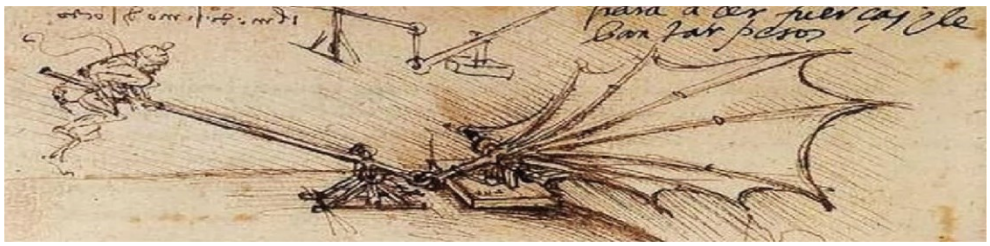
2.2 Biomimética

"O grande livro, sempre aberto e que devemos nos esforçar para ler, é o da Natureza [...]."
Antoni Gaudí

2.2.1 Perspectiva Histórica da Biomimética

A aplicação direta de princípios e estratégias, e o uso de **analogias da natureza podem ser constatadas ao longo da história**. Durante o Renascimento, **Leonardo DaVinci** estudou a forma e função de organismos da natureza, sendo considerado precursor na realidade de voar por meio da idealização de máquinas voadoras. DaVinci desenvolveu o famoso desenho ***Sul volo degli uccelli*** (em português: sobre o voo das aves), com conceito para proporcionar o voo humano através da imitação mecânica das asas do morcego, entendendo também a base dos movimentos dos pássaros (Soares & Arruda, 2018) (Figura 6)). Algumas das estratégias e soluções mecânicas, propostas por DaVinci, são semelhantes às presentes nos aviões da atualidade (M. Oliveira, 2019).

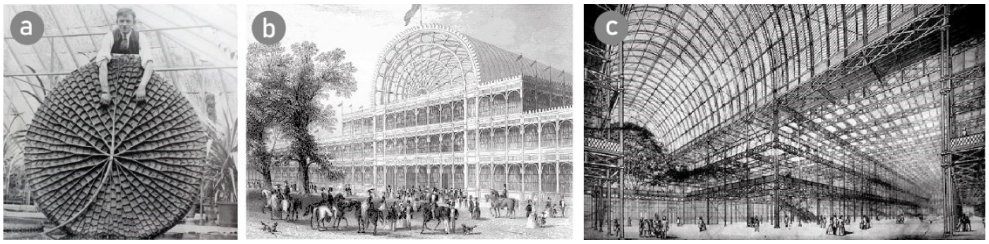
Figura 6. Desenho *sul volo degli uccelli* por Leonardo DaVinci.



Fonte: Associazione Culturale Silvia Dell'Orso (2010).

Em 1851, **Joseph Paxton** construiu o pavilhão do *Crystal Palace*, em Londres, para a *Great Exhibition of the Works of Industry of All Nation* (Figura 7). O Palácio de Cristal foi construído em ferro fundido e vidro, e possuiu 92 mil metros quadrados de espaço aberto. Utilizou a folha aquática *Victoria regia* (conhecida como Victoria amazônica, o maior lírio-d'água do mundo). A planta foi utilizada como referência para conceber solução estrutural para apoiar o telhado curvo, baseado nas costelas da folha (M. Oliveira, 2019; Soares & Arruda, 2018).

Figura 7. *Crystal Palace* (1851) em Londres.



Nota. a) inspiração na estrutura da *Victoria regia;* b) *Crystal Palace*; c) vista interior do edifício. Fonte: a) ©Hulton-Deutsch Collection/CORBIS/Corbis ; b – c) Merin (2013).

Apesar dos vários pontos negativos relativos às duas **guerras mundiais** que aconteceram durante o século XX, são inquestionáveis os avanços tecnológicos decorrentes desse período (por exemplo, a tecnologia de criptografia avançada determinante para a Segunda Guerra Mundial, que culminou na invenção do primeiro computador).

A natureza também foi uma fonte de inspiração para muitos dos avanços. Um dos exemplos mais conhecidos foi desenvolvido pelo engenheiro Suíço **George de Mestral** (Bhushan, 2009), que patenteou o **Velcro®** em 1941 (Velcro IP Holdings LLC, 2023). O Velcro corresponde a um **produto para fixação bioinspirado no popular carrapicho** (Arruda, 2018; Velcro IP Holdings LLC, 2023), planta pegajosa e espinhosa do gênero *Arctium* (Figura 8**a** – **b**). O estudo de observação dos carrapichos a permitiu visualização microscópica das pontas dos espinhos que contêm formato de gancho. A analogia com o organismo proporcionou o desenvolvimento do velcro, um sistema de fixação flexível proposto que pode ser conectado e desconectado várias vezes (Arruda, 2018) (Figura 8 **c** – **d**).

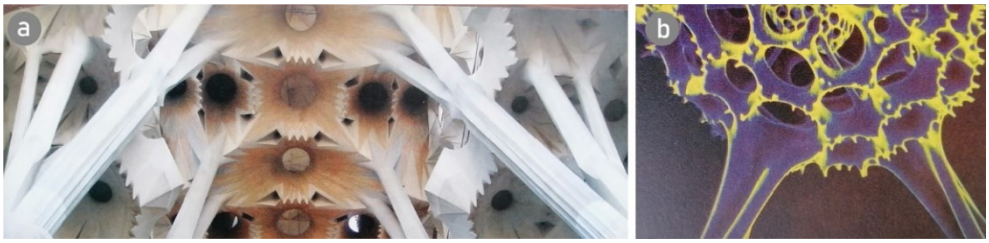
Figura 8. Velcro® bioinspirado no carrapicho.

Nota. Organismo de referência, o carrapicho (a; b), para criação do velcro® (c; d); b; d) correspondem a aproximações. Fonte: a – b) Dijigow (2021); c) Faria (2012); d) Anderson (2005).

São inúmeros os exemplos de inspiração na natureza desenvolvidos por **Antoni Gaudí** (1852 – 1926). A Figura 9 exibe a abóboda da nave central da **Sagrada Família** em referência ao esqueleto do protozoário marinho radiolário e ao filtro de luz proporcionado pelas cúpulas das árvores (Anglès, 2010). Na microfotografia do

protozoário percebe-se que constam nas intersecções pequenos dentes semelhantes às pontas dos hiperboloides da nave central (Anglès, 2010).

Figura 9. A Sagrada Família.



Nota. a) abóboda hiperbólica da nave central, b) semelhante ao esqueleto de um radiolário, da ordem dos protozoários marinhos. Fonte: adaptado de Anglès (2010, pp. 54, 55).

A Figura 10, por sua vez, expõe as superfícies regradas através de paraboloide hiperbólico. Esses elementos arquitetônicos foram constantemente utilizados por Gaudí, na **fachada da Paixão da Sagrada Família** (Anglès, 2010). As colunas, por exemplo, têm estreita relação no modo como as árvores ceiba emergem do solo, a formar parábolas (Anglès, 2010). Tais árvores são também conhecidas como árvore de algodão de seda e são da América Central.

Figura 10. Fachada da Paixão da Sagrada Família.

Nota. a) desenho em escala 1:200; b) tronco da árvore ceiba que emerge do solo a formar parábolas; c) colunas do pórtico da fachada, com pedras parabólicas semelhantes ao tronco de algumas árvores. Fonte: adaptado de Anglès (2010, pp. 50, 51).

O projeto **ICD/ITKE Research Pavilion 2011** (Figura 11) corresponde a um pavilhão bioinspirado na morfologia do esqueleto do ouriço-do-mar mediante métodos de biomimética, design computacional e de simulação, bem como fabricação digital para a sua construção (Menges et al., 2011).

Figura 11. Projeto ICD/ITKE Research Pavilion 2011.

Fonte: Menges et al. (2011). Foto: ©Roland Halbe.

Outro exemplo, é o **ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16** (Figura 12) é um projeto inspirado na morfologia do esqueleto do ouriço-do-mar, cuja leveza está relacionada ao sistema oco de dupla camada (Menges et al., 2015).

Figura 12. Projeto ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16.

Fonte: Menges et al. (2015). Foto: ©Roland Halbe.

O organismo de referência possui placas que são conectadas com articulações em ziguezague, com elementos fibrosos. Em referência a essa característica, o pavilhão bioinspirado empregou braço robótico para efetuar costura entre o sistema modular de compensado de madeira. Como resultado obteve-se uma estrutura arquitetônica orgânica.

2.2.2 Terminologia e Definição

Ao longo do século XX, as **atividades humanas frente à natureza receberam diferentes nomenclaturas**. *Biomimetics, bionics* e *biomimicry* são os termos centrais dessa discussão (Arruda, 2018; Kapsali, 2016; Kuru et al., 2019; Mazzoleni, 2013), cujas definições exibem algumas diferenças.

Em 1958, o **Major Jack Steele**, da Força Aérea dos EUA, definiu o termo ***Bionic*** em inglês e '*Bionik*' em alemão, em uma conferência intitulada '*Bionics Symposium: Living prototypes* – a chave para a nova tecnologia'. A palavra *Bionic* (**Biônica**, em português) surge por meio da combinação entre *bio* (vida) e *onics* (tecnologia) (Arruda, 2018; Gruber & Gosztonyi, 2010), sendo definido por '**ciência dos sistemas**

cujo funcionamento se baseia em sistemas naturais, ou que apresentam analogias com estes' (Kapsali, 2016, p. 5).

Na atualidade, biônica é frequentemente associada à robótica, à otimização de matéria viva, tecido, partes do corpo e órgãos por versões tecnológicas (Gruber & Gosztonyi, 2010). Recebeu crítica por seu conhecimento ter sido aplicado para a indústria bélica. Contudo, há vertentes de investigação que continuam a utilizá-lo no conceito original (Aguiar et al., 2017).

O termo ***Biomimetic*** (português, **biomimética**), do grego *bios* (vida) e *mimesis* (imitação), surgiu na década de sessenta, por autoria do engenheiro biomédico **Otto H. Schmitt**, com a intenção de **distinguir o conhecimento advindo da biofísica e evidenciar o potencial da natureza para a inovação, sendo aplicado principalmente na engenharia** (Mazzoleni, 2013). Otto dedicou o princípio da sua carreira para produzir um dispositivo que imitava a ação elétrica do nervo (M. Oliveira, 2019). O termo *biomimic*, no entanto, foi considerado um termo controverso por sua terminologia sugerir a imitação da natureza (Gruber & Gosztonyi, 2010).

Por volta da década de 70, o casal **John Todd** e **Nancy Jack-Todd**, fundaram o *New Alchemy Institute*, a fim de explorar soluções ecológicas como prerrogativas para desenvolver soluções às necessidades humanas (Arruda, 2015). O casal foi considerado como pioneiro para a definição do termo ***Biomimicry*** (também traduzido como Biomimética para o português), representado na época pelo termo *Bionic Design*.

O conceito sobre *Biomimicry* foi adaptado e difundido por **Janine Benyus**, em 1997, que propõe para a biomimética bases assentadas "[...] **não naquilo que podemos extrair da natureza, mas no que podemos aprender com ela, tomar emprestado uma ideia para inspirar outras**" (Benyus, 1997, p. 34). Benyus atrela à definição do *Bioimimicry*, as inovações sustentáveis como um real contributo do homem ao meio (Benyus, 2012), pois:

Utiliza o conceito de 'Princípios da Vida' que representam as lições da natureza que evoluíram ao longo de mais de 3,8 bilhões de anos e sobreviveram. Ao aprendermos estas lições, "[...] podemos modelar estratégias inovadoras, medir nossos projetos em relação a esses padrões sustentáveis e nos permitir ser orientados pelo gênio da natureza usando os princípios da vida [...][13]" (Biomimicry 3.8, 2015). Benyus propõe uma abordagem de desenvolvimento embasada na tríade a natureza como: modelo,

[13] "*By learning from these deep design lessons, we can model innovative strategies, measure our designs against these sustainable benchmarks, and allow ourselves to be mentored by nature's genius using Life's Principles*"(Biomimicry 3.8, 2015).

medida e mentora (Benyus, 2012). Atrela à definição do Bioimimicry, as inovações sustentáveis como um real contributo do homem ao meio (Benyus, 2012). Pois, a natureza usa apenas o que precisa.

> A natureza é movida a energia solar.
>
> A natureza usa apenas a energia de que precisa.
>
> A natureza adapta a forma à função.
>
> A natureza recicla tudo.
>
> A natureza recompensa a cooperação.
>
> A natureza confia na diversidade.
>
> A natureza exige especialização geograficamente localizada.
>
> A natureza inibe excessos em seu seio.
>
> A natureza explora o poder dos próprios limites. (Benyus, 2012, p. 15)

Assim, Janine propõe uma abordagem de desenvolvimento de soluções embasadas na tríade a natureza como: modelo, medida e mentora (Benyus, 2012). Apesar do termo *Biomimicry* derivar da palavra grega *biomimesis*, em que *bios* significa vida e *mimesis*, imitação, tal abordagem "não se restringe a apenas uma imitação da forma biológica, mas considera também o conceito de replicação do comportamento dos organismos biológicos", e **inclui aspectos relacionados à sustentabilidade** e de respeito à natureza (Arruda, 2018, p. 12).

A investigação em questão adotará a segunda terminologia explicitada, ***Biomimetic*** ou **Biomimética, que corresponde a uma linguagem transdisciplinar que liga os projetistas aos biólogos e à tecnologia** (Mazzoleni, 2013; M. Oliveira, 2019). Para Badarnah (2012, p. 21), a '**biomimética tem a ver com a transferência das estratégias da natureza para tecnologia para a inovação**'[14].

A '*ISO 18458:2015(en) Biomimetics - Terminology, concepts and methodology*' define Biomimética como a:

---

[14] "*Biomimetics is about the transfer of nature's strategies into technology for innovation*" (Badarnah, 2012, p. 21, transcrição literal).

> […] aplicação de abordagens de investigação e desenvolvimento de interesse para aplicações práticas e que utilizam os conhecimentos adquiridos através de analogias de sistemas biológicos para encontrar soluções para problemas, criar novas invenções e inovações, e transferir esses conhecimentos para sistemas técnicos. **A ideia de transferir princípios biológicos para a tecnologia é o elemento central da biomimética** […][15]. (ISO 18458:2015, 2015, tradução livre, grifo nosso)

Os projetos que utilizam a biomimética resultam de "[…] metodologia de investigação baseada na observação, replicação de morfologias, mecanismos, processos e comportamentos provenientes de campos de estudo como a biologia, a biofísica, a biomecânica, as neurociências, as matemáticas complexas e a cibernética" (Couceiro, 2016, p. 36). **Têm validado e intensificado o recurso à biomimética como abordagem à solução dos problemas de design e arquitetura** (Arruda, 2018; Gruber & Gosztonyi, 2010).

Ademais, a **pesquisa avançada de materiais** e respectivos processos de produção são campos do conhecimento que se destacam na biomimética (Couceiro, 2016; Menges & Ahlquist, 2011). Muitos **sistemas biológicos possuem capacidade de resposta inerente ao próprio material e podem minimizar a utilização de dispositivos mecânicos e eletrônicos quando associados à modelação computacional** (Menges & Ahlquist, 2011). Podem propiciar a concepção de estratégias de deformação do material, materiais inteligentes e de mudança de forma (V. Charpentier et al., 2017; Schleicher et al., 2015; Vazquez et al., 2019). Esses em consonância com algoritmos computacionais poderão permitir o desenvolvimento de soluções baseadas em desempenho através da bioinspiração (Couceiro, 2016; Menges & Ahlquist, 2011).

---

[15] "*Biomimetics is understood to be the application of research and development approaches of interest to practical applications and which use knowledge gained from the analysis of biological systems to find solutions to problems, create new inventions and innovations, and transfer this knowledge to technical systems. The idea of transferring biological principles to technology is the central element of biomimetics"* (ISO 18458:2015, 2015, transcrição literal).

2.2.3 Abordagem Metodológica em Biomimética

Existem três grandes obstáculos para a relação entre biologia – biomimética – arquitetura (M. Oliveira, 2019). O primeiro deles consiste em **estabelecer uma metodologia sistemática de design seletivo capaz de identificar os sistemas biológicos relevantes** (Badarnah & Kadri, 2014; Martín-Gómez et al., 2019; M. Oliveira, 2019). O segundo versa sobre a **dificuldade de escala**, pois algumas funções aplicam-se apenas para escalas específicas (como: escalas nano ou micro) (M. Oliveira, 2019); O último obstáculo consiste em **integrar partes de diferentes contextos em um conceito de design único, em que muitas vezes possuem partes conflitantes entre si** (M. Oliveira, 2019; Royall, 2010).

Para fins de contextualização do último obstáculo, adotaremos as considerações propostas por Royall (2010), nomeadamente: **para que um sistema da natureza seja considerado sustentável, suas partes constituintes devem ser integradas (órgãos e organismos) em uma relação mutuamente dependente.** A produção de soluções por métodos de biomimética, quando analisadas isoladamente podem não representar soluções sustentáveis.

Royall (2010) exemplificou o sistema de automação, o ***Smart Switch***, desenvolvido pela *REGEN Energy*, para gerenciar a energia a partir da lógica de auto-organização das abelhas. O produto se comunica com eletrodomésticos, e desliga os eletrodomésticos não utilizados, sem haver intervenção humana. Testes revelaram que o aparelho pode **reduzir 30% do consumo energético** em estabelecimentos comerciais e edifícios residenciais. Assim, o *Smart Switch* 'não é inerentemente sustentável (quando se leva em conta o material ou processo de fabricação utilizado), mas torna-se sustentável quando integrado ao organismo (um sistema de distribuição de energia de rede inteligente)[16]' (Royall, 2010, p. 12). No geral, os três obstáculos estão inter-relacionados e conectados (M. Oliveira, 2019).

Existem duas **abordagens metodológicas** principais que abarcam diferentes terminologias para os processos em biomimética (Badarnah & Kadri, 2014; Biomimicry 3.8, 2015; M. Oliveira, 2019), nomeadamente:

- **Baseado em soluções *(Solution-Based)*** – a observação da natureza conduz a uma concepção tecnológica. Recebe nomenclaturas como: *biology to design; bottom-up* e *biomimetics by induction*. Conforme Badarnah (2012) e M. Oliveira (2019), a direção da abordagem baseada em soluções depende a princípio:

[16] *For example, an organ produced by Biomimicry (the smart switch) is not inherently sustainable but becomes so when integrated into the organism (a smart grid energy distribution system) (Royall, 2010, p. 12).*

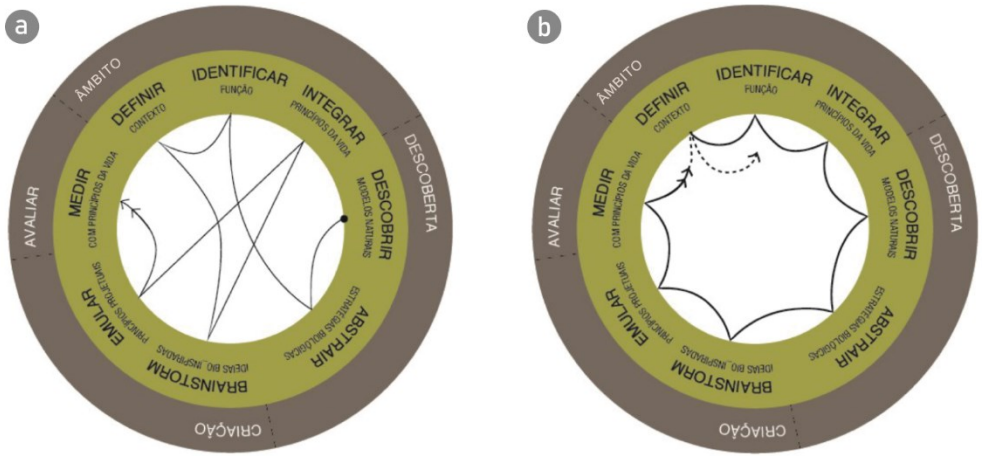
> […] dos biólogos, para adaptar as propriedades biológicas à tecnologia humana, a fim de encontrar respostas, e então identificar os problemas de design humano. A identificação deve ser dirigida a uma característica ou comportamento particular de um organismo ou ecossistema e, em seguida, moldá-lo como uma diretriz para o desenvolvimento de projetos […].[17] (M. Oliveira, 2019, p. 82)

- **Baseado em problemas (*Problem-based)* –** buscam uma solução da natureza para um **desafio pré-determinado** 'baseado em problemas'. Pode ser encontrada com diferentes nomenclaturas, nomeadamente: *challenge to biology; top-down* e *biomimetics by analogy*. Nesse caso, '[…] os problemas de design e as necessidades humanas estão na base do processo que busca encontrar respostas em outros organismos ou ecossistemas com problemas semelhantes' (M. Oliveira, 2019, p. 82). Tal abordagem possibilita a criação de cenários, sobretudo, quando se tem um problema em mãos e se tem a intenção de identificar ideias biológicas para desenvolver soluções (Biomimicry 3.8, 2015).

Na visão de a principal Badarnah e Kadri (2014), diferença entre as abordagens metodológicas, baseada em soluções e baseada em problemas, reside no modo como são abordadas as diferentes estratégias de biomimética. A Figura 13 e Figura 14 apresentam síntese comparativa entre as duas abordagens. A primeira corresponde à metodologia *Biomimicry Thinking –Design Lens* (Biomimicry 3.8, 2015), grupo de consultoria que pertence a Janine Benyus.

[17] *This direction relies first on the biologists to adapt biological properties into human technology to find answers and then identify human design problems. The identification has to be directed at a particular characteristic or behavior of an organism or ecosystem and then shape it as a guideline for developing architectural designs or industrial products* (M. Oliveira, 2019, p. 82).

Figura 13. Diagrama do *Biomimicry Thinking*.



Nota. Evidencia as etapas: a) baseada em solução e b) em problema. Fonte: adaptado de Biomimicry 3.8 (2015).

Janine Benyus e equipe são responsáveis por criar três plataformas online para estimular a prática da biomimética globalmente:

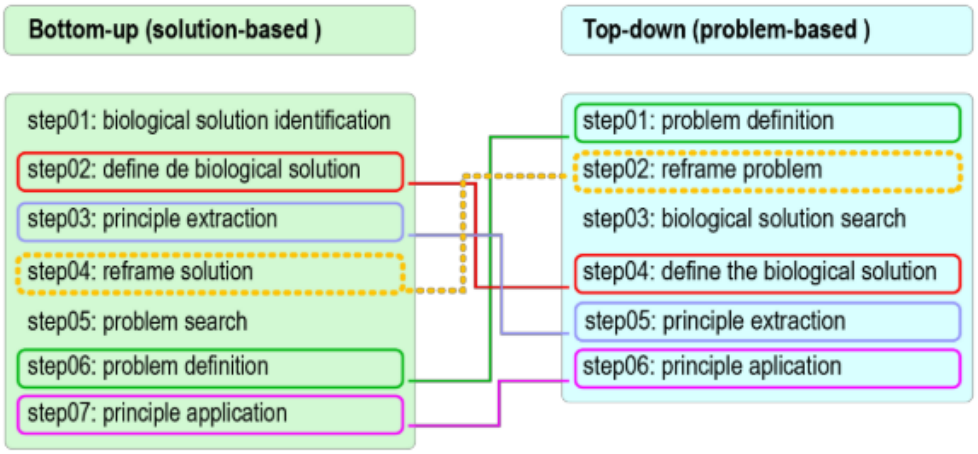
- *Biomimicry 3.8:* grupo de consultoria em bioinspiração que oferece consultoria em inteligência biológica, treinamento profissional e palestras (Biomimicry 3.8, 2023);

- *Biomimicry Institute:* organização sem fins lucrativos, que busca capacitar indivíduos a criar soluções inspiradas na natureza para um planeta saudável (Biomimicry Institute, 2019);

- *Ask Nature:* banco de dados sobre inteligência biológica disponibilizado para a interação com a comunidade online (Biomimicry Institute, 2021);

Tais plataformas disponibilizam conteúdos, reúnem pessoas interessadas em biomimética, divulgam palestras, workshops, concursos, cursos e parcerias institucionais. A Figura 14, por sua vez, contempla estudo comparativo entre as duas abordagens proposto por M. Oliveira (2019).

Figura 14. Comparação entre abordagens metodológicas em biomimética.



Nota. a) baseado em soluções; b) baseado em problemas. Fonte: M. Oliveira (2019, p. 83).

Estudo desenvolvido por Badarnah e Kadri (2014) comparou cinco metodologias de biomimética de distintos grupos classificados entre abordagens, baseada em solução e baseada em problemas, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Quadro com cinco grupos que aplicam metodologias de biomimética.

GRUPOS	ESTRATÉGIAS POR	BASEADO EM SOLUÇÃO	BASEADO EM PROBLEMA
G1	*Biomimicry 3.8* (AskNature 2008; Benyus 2002; Biomimicry 3.8 2010)	•	•
G2	*BioTriz* (Bogatyreva, Pahl, and Vincent 2002; Bogatyreva et al. 2003; Craig et al. 2008; Lerner 1991; TRIZ 2011; Vincent 2009; Vincent et al. 2006)	•	
G3	*Biomimetics for Innovation and Design Laboratory* led by L.H. Shu (Chiu and Shu 2007; Mak and Shu 2004; Shu 2010, 2011; Vakili and Shu 2001)	•	
G4	*Design & Intelligence Laboratory* led by Goel (DANE 2011; Goel 2011; Goel, Rugaber, and Vattam 2009; Helms, Vattam, and Goel 2009; Vattam et al. 2010)	•	•
G5	*Plants Biomechanics Group* led by *Thomas Speck* (Masselter et al. 2010; Milwich et al. 2006; PBG 2011)	•	•

Fonte: adaptado de Badarnah & Kadri (2014).

A Tabela 4 evidencia as fases de cada grupo para cada tipologia metodológica, ainda segundo as autoras. As **metodologias baseadas em problemas** são subdivididas em três fases gerais, nomeadamente:

- definição de problemas
- exploração e investigação
- desenvolvimento de soluções

Tabela 4. Quadro comparativo de cinco metodologias de biomimética.

	FASES	G1	G2	G3	G4	G5
BASEADO EM PROBLEMA	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	. Identificar a função . Definir o contexto. . Integrar os Princípios da Vida na concepção	. Definir problema . Analisar e entender o problema	. Definição do problema	. Definição de problema . Reestruturação do problema	. Formular o problema tecnológico.
	EXPLORAÇÃO & INVESTIGAÇÃO	. Descobrir modelos naturais. . Abstrair estratégias biológicos em princípios de design.	. Encontrar analogia funcional em biologia . Comparar soluções da biologia e da TRIZ	. Pesquisa de analogias biológicas . Avaliar as analogias biológicas	. Pesquisar soluções biológicas . Definir a solução biológica . Princípio de extração.	. Procurar analogias em biologia . Identificar os princípios correspondentes . Abstrair modelo biológico
	DESENVOL-VIMENTO DE SOLUÇÃO	. *Brainstorm* de ideias bioinspirada . Emular o princípio de design . Medir usando os Princípios de Vida.	. Enumerar princípios tanto do domínio biológico quanto tecnológico . Desenvolver ideia	. Aplicando analogias biológicas	. Princípio de aplicação	. Implementar tecnologia através da prototipagem e testes
BASEADO EM SOLUÇÃO	DOMÍNIO BIOLÓGICO	. Descoberta de modelos naturais	N/A	N/A	. Identificação de solução biológica . Definição dos princípios de extração	. Identificar um sistema biológico. . Analisar biomecânica, morfologia funcional e anatomia . Compreender os princípios
	FASE DE TRANSFERÊNCIA	. Abstrair estratégias biológicas em princípios de design . Identificar função e definir contexto . *Brainstorm* ideias bioinspirada	N/A	N/A	. Reenquadrar solução	. Abstrair do modelo biológico
	DOMÍNIO TECNOLÓGICO	. Integrar Princípios de Vida . Emular Princípios de design . Medir, usando os Princípios da Vida	N/A	N/A	. Pesquisa de problema . Definição de problema . Aplicação do princípio	. Implementar tecnologia através da prototipagem e testes.

Nota. Comparação entre com abordagem baseada em solução e em problema dos cinco grupos pesquisa em biomimética. N/A significa não se aplica. Fonte: adaptado de Badarnah e Kadri (2014, p. 3, tradução livre).

Na fase de '**Definição do problema'**, o Grupo 1 apresenta uma pequena distinção das demais, que consiste em incluir os princípios da vida como uma das etapas. Segundo Biomimicry 3.8 (2015), por princípios da vida entende-se a integração e otimização de estratégias de projeto a partir de seis princípios, que são: a) Evoluir para sobreviver; b) Adaptar-se as condições de mudança; c) ser atento e responsivo com as questões locais; d) usar química amigável à vida; e) ser eficiente (materiais e energia); e f) integrar conhecimento e crescimento.

Apesar das distintas nomenclaturas das etapas, a fase '**exploração e investigação**' indicam que as metodologias analisadas visam identificar modelo biológico (Badarnah & Kadri, 2014). Vários bancos de dados são propostos. A partir da pesquisa de índice de livros biológicos; contato com biólogos; e/ou acesso a banco de dados de organismos biológicos. G1, G2 e G4 criaram as plataformas*: AskNature; BioTriz* e DANE, das quais a *AskNature* encontra-se com cerca de 1.700 estratégias biológicas inscritas e acessíveis ao público.

As fases designadas por '**desenvolvimento da solução'** apontam para diferenças significativas, ainda segundo as autoras, como: G1 incorpora os princípios da vida para validar o conceito de design para a sustentabilidade; um conjunto de princípios a partir de domínios biológicos e técnicos são evidenciados em G2; analogias biológicas são fornecidas em G3; princípios para o desenvolvimento de soluções são utilizados em G4; e são desenvolvidos processos de prototipação física e teste das soluções em G5

As **metodologias baseadas em solução** foram classificadas em três fases (Tabela 4), a saber:

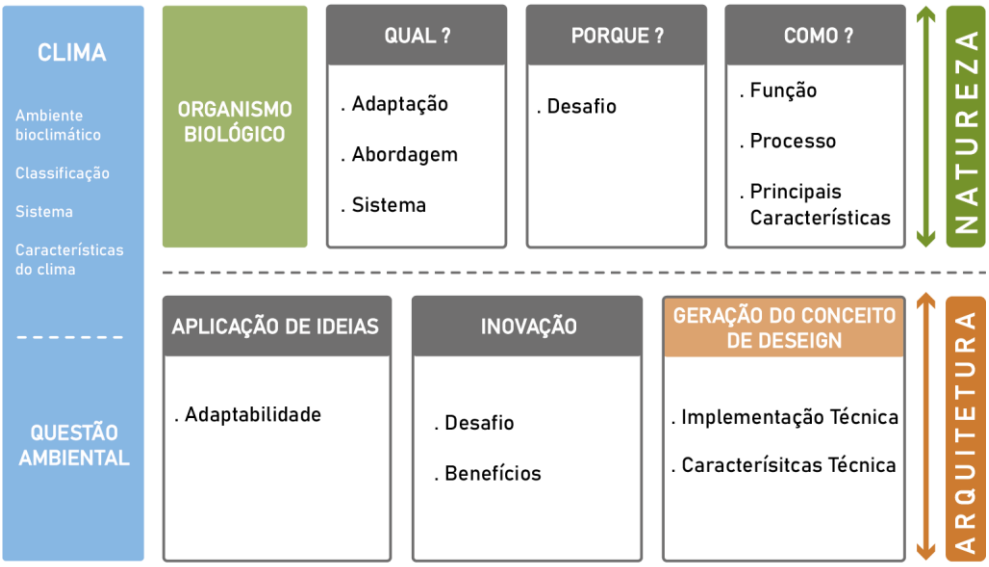
- domínio biológico
- fase de transferência (entre os domínios)
- domínio tecnológico

Na opinião de Badarnah e Kadri (2014), a principal diferença entre as abordagens metodológicas, baseada em problemas e baseada em soluções, reside no modo como são abordadas as diferentes estratégias biomiméticas. Pois, há uma ampla gama de estratégias e mecanismos a serem emulados; dificuldades na representação do conhecimento biológico e desafiadora abstração de princípios relevantes.

Como visto, um grande desafio para a relação entre biologia – biomimética – arquitetura é **estabelecer uma metodologia sistemática de design seletivo capaz de identificar os sistemas biológicos relevantes** (Badarnah & Kadri, 2014; Martín-Gómez et al., 2019; M. Oliveira, 2019). E posteriormente, abstrair as estratégias e mecanismos a serem implementados nos projetos.

Para auxiliar no processo de coleta e registro de dados sobre os organismos, López et al. (2017) propôs método para identificar **como os princípios das plantas podem ser utilizados para desenvolver fachadas adaptativas** (Figura 15).

Figura 15. Diagrama metodológico para coletar dados de adaptações de plantas.



Nota. Tais dados passam a orientar a transferência de princípios biológicos para a arquitetura.
Fonte: adaptado de López et al. (2017, p. 698).

Tal método **baseia-se na compreensão das plantas, no nível macro e microescala**, **com ênfase na relação entre a natureza e o clima**, **e assume o clima como principal fator de influência para adaptação dos organismos**. Está estruturado em duas fases (López et al., 2017), nomeadamente:

- **Natureza:** identificar na natureza estratégias e mecanismos adaptativos em diferentes condições climáticas, categorizando e organizando o levantamento baseado na fisiologia, comportamento e morfologia dos organismos identificados;

- **Arquitetura:** desenvolver conceitos para o projeto de arquitetura, de modo a facilitar a transferência entre a informação biológica e a arquitetura. Esse estudo trará aplicação conceitual de desenvolvimento.

As características dos organismos são identificadas por meio de três principais questões (López et al., 2017), a saber:

- **Qual adaptação do organismo analisado?**
- **Por que é que o organismo necessita dessa estratégia?**
- **Como é que o organismo desenvolve essa estratégia?**

Tal método possui uma abordagem voltada para a fase conceitual do projeto, sem necessariamente identificar a transformação das soluções técnicas e avaliação de simulação (M. Oliveira, 2019).

2.2.4 Níveis de Adaptação: Morfológico, Fisiológico e Comportamental

Uma característica fundamental dos organismos é a *Homeostasis*[18] (**homeostase**, em português), que consiste na constante regulação de parâmetros do tecido corporal (como oxigênio, calor, nutrientes, pH, pressão osmótica, resíduos, entre outros) para manter em condições estáveis à sobrevivência (Badarnah, 2012; Cambridge University Press & Assessment, n.d.-b; Randall et al., 2002).

A homeostase é um relevante conceito biológico. Está presente desde o mais simples organismo unicelular (como os protozoários, no qual diferentes concentrações de açúcares, sais ou aminoácidos em seu citoplasma são consumidas por permeabilidade seletiva da membrana), até os organismos complexos e multicelulares (plantas e animais).

A correspondência do conceito de homeostase para a arquitetura seria a busca em promover o conforto nas edificações (Badarnah, 2012). Isso posto, os projetistas podem desenvolver analogias com a homeostase dos organismos ou inspirar-se em algum mecanismo a fim de proporcionar condições à sua sobrevivência (Badarnah, 2012).

No que tange aos diferentes níveis de adaptação das plantas, existem três categorias que são: morfológica, fisiológica e comportamental (Figura 16).

[18] *Homeostasis: "the ability or tendency of a living organism, cell, or group to keep the conditions inside it the same despite any changes in the conditions around it, or this state of internal balance".* (Cambridge University Press & Assessment, n.d.).

Figura 16. Adaptação morfológica, fisiológico e comportamental.

Nota. a) Folhas com pelos de *Gynandriris setifolia*; b) *Echeveria glauca* possui adaptação para eficácia da fotossíntese; c) Movimento rápido por contato das folhas de *Mimosa pudica*. Fonte: adaptado de López et al. (2017). Foto: adaptado de a – b) López et al. (2017, p. 697); c) ©AjayTvm.

- **Morfológica** – De acordo com Steadman (2008), **Goethe** foi o precursor na utilização do termo morfologia em '*Zur Naturwissenschaft uberhaupt, besonders zur Morphologie (1817)*' por meio do estudo da forma orgânica e inorgânica, bem como os fatores geométricos que governam a forma. Para Menges e Ahlquist (2011), Goethe delineou a distinção entre forma e formação. Investigou as relações geométricas em certas plantas, e esclareceu o comportamento geométrico do organismo forma uma lógica funcional, de modo a compreender os princípios gerais matematicamente (Menges & Ahlquist, 2011; Steadman, 2008).

  A compreensão matemática da relação entre forma e formação foi aprofundada por **D'Arcy Thompson**. Conforme Menges e Ahlquist (2011), Thompson objetivava identificar sistemas matemáticos abstratos que balizassem a forma estrutural e as transformações de um dado organismo. Para além dessa perspectiva, que também era comum à Goethe, Thompson:

  > […] oferece uma componente crítica para a compreensão da forma, na medida em que se trata de um sistema que se organiza na presença de forças internas e externas, e que as organizações podem moldar padrões traçados através de regras matemáticas.19 (Menges & Ahlquist, 2011, p. 19)

  Assim, para Thompson (1992, p. 19) "a morfologia não é apenas um estudo das coisas materiais e das formas das coisas materiais, mas tem o seu aspecto

[19] *"Thompson offers a critical component to the understanding of form in that it is a system which organizes itself in the presences of both internal and external forces, and that the organizations can shape patterns traced through mathematical rules"* (Menges & Ahlquist, 2011, p. 19).

dinâmico, no âmbito do qual tratamos da interpretação, em termos de força, das operações de energia[20]".

Bonsiepe (1992), por sua vez, afirma que a morfologia consiste em identificar relações de similaridade entre as formas de um dado organismo na natureza para transpor referências a projetos. O organismo da natureza aprimora a sua adaptação ao meio ambiente para promover a sua sobrevivência (Badarnah, 2012; López et al., 2017). Procura estudar e analisar o porquê da forma natural e as inter-relações da sua geometria (Soares, 2023).

Pode acontecer por meio de referências às formas, dimensões, padrões (tendências de segmentação da superfície), cores e estruturas. Exemplo: biomecânica das pétalas das flores (estrutura); forma das folhas das plantas (forma), e camadas epidérmicas hidrofóbicas das folhas (textura) (Kuru et al., 2019). A exemplo, têm-se as folhas com pelos da *Gynandriris setifolia*, que refletem a luz solar e correspondem a uma adaptação para ambientes secos e quentes (López et al., 2017) (Figura 16**a**). A abstração morfológica busca reinterpretar as formas de uma referência natural, do ponto de vista micro ou macro escala;

- **Fisiológica –** corresponde ao funcionamento dos organismos vivos (como eles se alimentam, respiram e o que eles fazem para se manterem vivos); a compreensão do funcionamento, como se ajustam às adversidades ambientais e regulam-se para sobreviver (Schmidt-Nielsen, 1997); compreende características e respostas fisiológicas relacionadas com os processos químicos (López et al., 2017), em busca de manter a homeostase (Badarnah, 2012). Por exemplo, resposta da *Echeveria glauca* a um estímulo externo específico, a fim de manter a homeostase da fotossíntese CAM [*Crassulacean Acid Metabolism]*. O CAM é uma adaptação às condições áridas para promover maior eficiência na utilização da água (López et al., 2017) (Figura 16**b**).

  No artigo intitulado por '*Biomimetic: Lessons from Nature – an overview*', Bhushan (2009) explora as adaptações morfológicas e físico-químicas da natureza para o desenvolvimento de materiais. As aplicações comerciais incluem novos nanomateriais, nanodispositivos e processos. Exemplifica dispositivos bioinspirados sobre: superfícies super-hidrofóbicas autolimpantes;

[20] *Morphology: "is not only a study of material things and of the forms of material things, but has its dynamical aspect, under which we deal with the interpretation, in terms of force, of the operations of energy"* (Thompson, 1992, p. 19).

superfícies para conversão e conservação de energia; materiais e fibras com elevada resistência mecânica; implantes biomédicos; materiais autocicatrizantes, para antirreflexo ou aprimorar a aderência, para citar alguns exemplos.

- **Comportamento –** relacionadas sobre como um organismo atua para sobreviver. "Esse tipo de adaptação está ligado a um sistema de *feedback* de sinal e resposta, onde o comportamento marca uma interação entre o organismo e o seu ambiente[21]" (López et al., 2017, p. 697). Estudo desenvolvido por Kuru et al. (2019) exemplifica as respostas cinéticas das plantas, como o tropismo e movimentos násticos. Exemplo, os movimentos das folhas da *Mimosa pudica*, em reação a diferentes estímulos (Figura 16**c**).

Um exemplo dos diferentes níveis de adaptação no reino animal é o lagarto (Figura 17) que regula a temperatura corporal por meio de uma combinação de suas características de pele (fisiológico e morfológico) e comportamentais.

Figura 17. Níveis de adaptação do lagarto.

Nota. O lagarto apresenta ajuste de posição corporal como comportamento para controlar a incidência dos raios solares, e enrola os dedos para cima para minimizar o contato com o chão quente. Foto: © D. McShaffrey. Fonte: Mazzoleni (2013).

A morfologia da pele do lagarto possui configuração com escamas que permitem camuflagem e proteção contra objetos pontiagudos. A composição principal da escama é a queratina (substância presente na unha humana), que se interligam por dobradiças de queratina fina (abordagem fisiológica e morfológica).

O lagarto comum possui manchas laterais com padrão escuro de coloração da pele nas costas (para absorção da luz solar) e uma cor clara no abdômen (para refletir o calor do solo). Para otimizar o acesso à luz do Sol, apresenta ainda alteração comportamental por ajuste da posição corporal. O movimento dos dedos proporciona a diminuição da área de contato com o solo e, em dias muito quentes,

[21] *"This type of adaptation is linked to a signal feedback system of signal and response, where behaviour marks an interaction between the organism and its environment"* (López et al., 2017, p. 697).

o lagarto de colarinho se levanta do chão para evitar o aquecimento por radiação (Mazzoleni, 2013).

A presente investigação, no entanto, possui como objeto de estudo o **movimento das plantas**, e mais precisamente os movimentos násticos. O próximo tópico versará sobre esses assuntos.

2.2.5 Movimento das Plantas

A observação dos **movimentos das plantas** começou nos gregos antigos, sendo amplamente investigada entre o século XVII e XIX, e de relevância científica na atualidade (Rivière et al., 2017). Destaca-se a obra '*The Power of Movement in Plants*', de 1880, cuja autoria pertence a **Charles Darwin**. Darwin analisou o comportamento das plantas, que muitas vezes é imperceptível ao observador (Darwin, 2009).

Muitos dos movimentos vegetais são **induzidos por estímulos**[22] ambientais, e implicam 'movimento' para aperfeiçoar a sua relação com o meio ambiente (Azcon-Bieto & Talon, 2008). Pois, "[...] as plantas sentem seu ambiente, e coordenam informações sensoriais em respostas que otimizam seu crescimento e reprodução" (Koller & Volkenburgh, 2011, pp. XIII–XIV, tradução livre). Os movimentos nas plantas podem acontecer para proporcionar: aquisição de nutrientes, polinização, dispersão de sementes ou sistema de defesa (em relação aos animais ou a radiação, por exemplo)(V. Charpentier et al., 2017).

As plantas fixas exibem tipicamente duas categorias de movimentos: **tropismo** e **nástico**. O **tropismo** corresponde aos movimentos que implicam no crescimento do órgão orientado por um sinal ambiental (Guo et al., 2015). Em geral, influenciam a direção do crescimento das células ou o crescimento diferencial para os lados opostos de um órgão (como: desenvolvimento do caule da planta em direção à luz)(V. Charpentier et al., 2017), e apresentam-se como respostas lentas ao longo do tempo (Bresinsky et al., 2012).

Os **movimentos násticos** referem-se aos movimentos mecânicos não direcionais como resposta a estímulos externos, que não dependem da direção do estímulo desencadeador e são predominantemente reversíveis (Fiorito et al., 2016; Schleicher et al., 2015). As **tulipas** e as **flores de açafrão**, por exemplo, são plantas que possuem o movimento nástico classificado como *Thermonasty* (**termonastia**,

[22] Estímulo: sinal físico ou químico que desencadeia uma sequência de reações na célula, cuja demanda de energia é suprida pelo próprio organismo (Bresinsky et al., 2012, p. 485).

em português), ou seja, que respondem a temperatura do ambiente (Wood, 1953), através da abertura e fechamento das pétalas.

As plantas reagem a partir de estruturas flexíveis e sensíveis às condições ambientais (Ahmar & Fioravanti, 2014). Os mecanismos moleculares subjacentes à direcionalidade dos movimentos trópicos foram bem investigados, enquanto os **movimentos násticos** são pouco compreendidos (Kim et al., 2019; Park et al., 2019). **O objeto de estudo da presente investigação são os movimentos násticos.**

A orientação do movimento nástico é determinada pela anatomia do órgão da planta (Azcon-Bieto & Talon, 2008; Bresinsky et al., 2012; V. Charpentier et al., 2017).

> Esses órgãos apresentam **diferenças estruturais e/ou fisiológicas entre seu lado superior, designado como ventral ou adaxial, e o lado inferior, designado como dorsal ou abaxial.** À medida que se expandem, tais órgãos em desenvolvimento podem exibir igual expansão em ambos os lados, permanecendo planos. Alternativamente, a expansão de um lado pode ser mais rápida que a do outro, resultando em órgãos curvados para baixo (epinástico) ou para cima (hiponástico). Tais movimentos de flexão das folhas jovens são mediados pelo crescimento, fazem parte do seu desenvolvimento normal e estão totalmente sob controle endógeno. O crescimento é irreversível, mas a curvatura é reversível[23]. (Koller & Volkenburgh, 2011, pp. 5–6, tradução livre, grifo nosso)

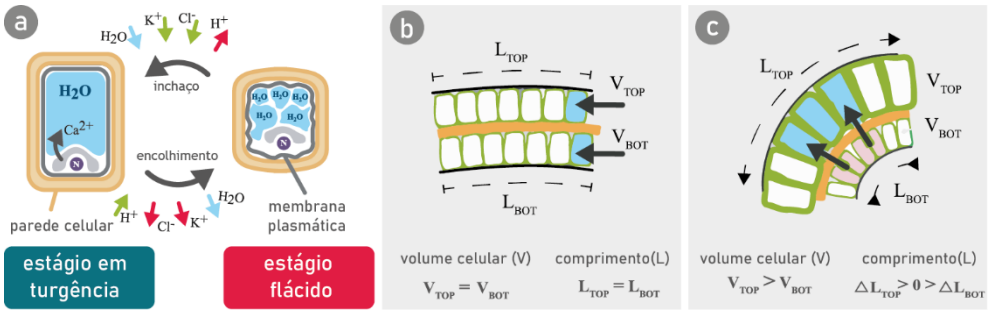
Segundo Rivière et al. (2017), **a direção dos movimentos násticos é ditada por intrínsecas assimetrias na anatomia da própria planta**, que está atrelada à

[23] "*These organs exhibit structural and / or physiological differences between their upper side, designated as ventral or adaxial, and the lower side, designated as dorsal or abaxial. As they expand, such developing organs may exhibit equal expansion on both sides, remaining flat. Alternatively, expansion of one side may be more rapid than the other, resulting in organs that are curved downward (epi-nastic) or upward (hyponastic). Such bending movements of young leaves are growth mediated, part of their normal development and entirely un-der endogenous control. The growth is irreversible, but the curvature is reversible*". (Koller & Volkenburgh, 2011, pp. 5 – 6, transcrição literal)

variação do potencial hídrico (V. Charpentier et al., 2017). Em grande parte, resulta de mudanças nas concentrações de íons, tanto na escala celular quanto na escala do tecido vegetal (V. Charpentier et al., 2017).

A bioquímica representa um dos principais fatores para o movimento das plantas, mediada pela **pressão de turgor** (V. Charpentier et al., 2017; Uehlein & Kaldenhoff, 2008). Por pressão de turgor entende-se a variação de uma grande pressão hidrostática interna às células (V. Charpentier et al., 2017) (Figura 18).

Figura 18. Pressão de Turgor a nível celular e do tecido da planta.



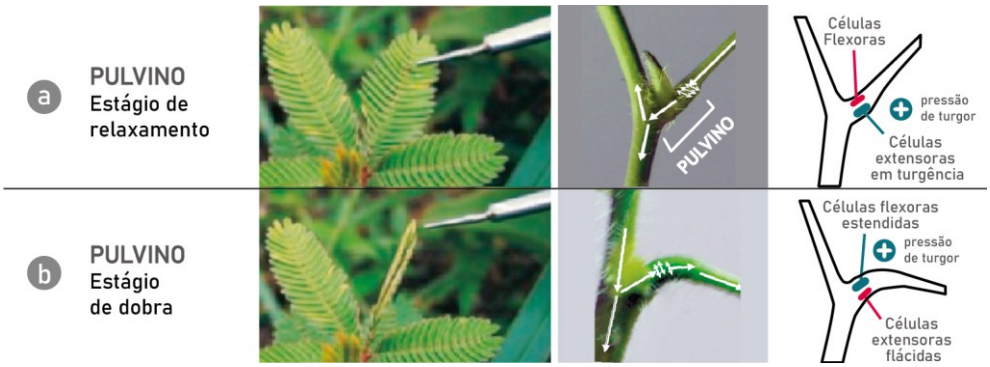
Nota. a) alterações de turgor em uma célula extensora e as mudanças de forma resultantes da célula à medida que se altera entre estados turgor (lado esquerdo) e flácido (lado direito); movimentos iônicos subjacentes a essas mudanças de turgor são exemplificados; N (núcleo celular); b – c) Vtop e Vbot representam o volume das células superior e inferior, respectivamente; Ltop e Lbot é o comprimento da parte superior e inferior, e ΔL é sua variação. Fonte: a) adaptado de Guo et al. (2015) e Volkov et al.(2013); b – c) adaptado de: V. Charpentier et al. (2017).

Os movimentos das plantas são também regidos pela **anisotropia microestrutural das paredes celulares e composição tecidual** (Gladman et al., 2016). V. Charpentier et al., (2017) afirmam que: na escala celular, o transporte de água pode ocorrer por meio da membrana semipermeável. E na escala do tecido vegetal, o transporte de água ocorre pela variação de volume, em que a área receptora amplia o volume e a emissora encolhe. Ou seja, o **tecido é composto por células motoras** (localizadas em lados assimétricos da articulação: o **lado superior (adaxial**, contém células flexoras) e **o lado inferior (abaxial**, tem células extensoras).

O desequilíbrio entre as partes do tecido proporciona a dobra para acomodar a deformação. Um exemplo de órgão com células motoras é o **pulvino**, uma articulação localizada na base das folhas, que ajuda no movimento de rotação de folhetos ou folhas (Rivière et al., 2017) (Figura 19). O pulvino contém células motoras com paredes finas; quando a espessura da parede amplia, aumenta sua rigidez. Células que apresentam uma parede mais grossa que 20% de seus raios tornam-se insensíveis às variações da pressão de turgor (Niklas, 1989). Pulvino está presente na *Mimosa pudica*.

A *Mimosa pudica* (Figura 19) exibe movimentos rápidos em resposta a estímulos de toque ou vibração (por estímulo elétrico), conhecidos por *Seismonasty* (**seismonastismo**, em português) (Azcon-Bieto & Talon, 2008; V. Charpentier et al., 2017). Tal tipologia corresponde a uma subclassificação do movimento **tigmonastia**, que consiste em movimento abrupto e defensivo contra estímulos externos, como o fechamento de suas folhas (funcionamento mediado pelo pulvino) desencadeado pela propagação de sinal elétrico bidirecional, devido à sacudida da planta. A *Mimosa pudica* também exibe dobramento das folhas em resposta a intensidade da luz.

Figura 19. Mecanismo do pulvino na *Mimosa pudica*.

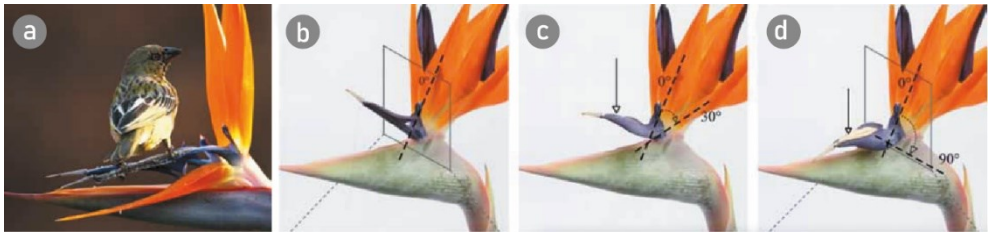


Nota. a) folhetos abertos; b) folhetos fechados após alterações induzidas pelo toque. Ilustração revela estados correspondentes das células motoras (em estado flexor e extensor). Fonte: adaptado de Guo et al. (2015).

Não são todos os organismos násticos que exibem pulvino. O **mecanismo de tigmonastia para o fechamento de plantas carnívoras**, por exemplo, realça um comportamento baseado na sucessiva deformação de algumas células ciliadas (Rivière et al., 2017). Nesse caso, o movimento é impulsionado pelas simetrias do órgão a partir de um estímulo externo à planta (Rivière et al., 2017), cuja reação é desencadeada por simultânea sensibilidade entre os tentáculos e substâncias orgânicas secretadas pela presa (Bresinsky et al., 2012). Assim, os órgãos vegetais ligados ao sistema vascular vegetal produzem movimentos a partir amplificação de forças externas criadas, como uma presa, agente polinizador ou por estímulos ambientais repetidos (V. Charpentier et al., 2017).

Nas **flores**, o peso do polinizador gera atuação durante as visitas dos polinizadores. É o caso da *Strelitzia reginae* que apresenta local de pouso previsível na flor (Lienhard et al., 2012) (Figura 20). Esse foi o organismo para a bioinspiração do projeto *Flectofin*™ (ver seção 3.4.6).

Figura 20. Mecanismo na *Strelitzia reginae*.



Nota. a) pássaro na flor; b – d) flexão da haste sob o peso do polinizador causa deformação elástica em até 90˚. Fonte: adaptado Lienhard et al. (2012).

Aspectos relacionados a **orientação das fibras de celulose** presente nos tecidos vegetais podem **determinar a forma e o comportamento geral das células e dos tecidos da planta** (V. Charpentier et al., 2017), seja para: a direcionalidade das propriedades materiais irreversíveis (por exemplo, movimentos de crescimento relacionados ao tropismo), como para os reversíveis (como movimentos násticos).

Os tecidos são materiais complexos que implementam uma organização de **múltiplos níveis hierárquicos estruturais, desde a escala de nanômetros (micro fibrilas de celulose) até o nível de centímetro (como o tecido de madeira)** (Kennedy & Garaita, 2001), sob uma complexa e combinatória variabilidade (V. Charpentier et al., 2017), que proporciona uma extensa diferenciação dos tecidos vegetais.

Assim, os movimentos násticos também são determinados pela natureza anisotrópica[24] da distribuição das células vegetais, pois a orientação das fibras de celulose influencia a forma e o comportamento geral das células e tecidos vegetais (V. Charpentier et al., 2017). O comportamento mecânico dos tecidos vegetais resulta de características celulares, como espessura da parede, geometria celular e magnitude da pressão do turgor (Niklas, 1989).

A produção de **estômatos ou estomas – poros epidérmicos necessários para as trocas gasosas nas plantas – é altamente plástica e fornece uma plataforma poderosa para lidar com a influência ambiental na diferenciação celular** (Lau et al., 2018). O número de pesquisas científicas anatômicas e ultraestruturas é limitado a poucas espécies de plantas (T. Rodrigues & Machado, 2008), sendo a maior das abordagens voltadas para a análise fisiológica.

[24] Por anisotropia entende-se materiais que exibem propriedades com distintos valores, quando medidos em diferentes direções (V. Charpentier et al., 2017).

2.3 Sistema Climático

O **sistema climático** compreende a atmosfera, superfície terrestre, neve e gelo, oceanos e outros afluentes, e organismo vivos que interagem de um modo complexo (*World Meteorological Organization*, 2018).

A **atmosfera atua como um filtro à radiação solar** sendo composta por diferentes gases, como oxigênio e azoto (Higueras, 2006; González, 2004). A **temperatura atmosférica é definida em decorrência da energia solar**, seja para as variações diárias ou anuais (Olgyay, 2002). Há a influência da radiação solar direta e difusa nas propriedades da superfície terrestre, no processo de obtenção de energia para a atmosfera. A energia é constantemente redistribuída através de processos termodinâmicos que buscam proporcionar equilíbrio ao sistema. E o Sol influencia todas as formas de energia natural renovável, como a energia eólica, solar e hidráulica (González, 2004).

A **radiação solar é o fator fundamental no processo de integração entre os distintos elementos para a caracterização do clima** (H. Gonçalves & Graça, 2004; González, 2004; Olgyay, 1973, 2002). Alguns elementos climáticos (**temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento** etc.) têm um efeito significativo sobre a radiação solar global (Nematchoua et al., 2022) e sobre as condições climáticas em uma dada região (Olgyay, 2002).

A obra de *Victor* Olgyay '*Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*', originalmente publicada em 1963, aborda relação entre clima e arquitetura, enfatizando a importância de projetar edifícios que respondam às condições climáticas do entorno (Olgyay, 1973).

A *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* [ASHRAE] especifica os parâmetros necessários para o conforto térmico para 80% ou mais dos ocupantes a partir de compilação e análise de dados provenientes de quatro distintos continentes (Dear & Brager, 2002).

A norma '*ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*' de 2020 busca especificar a combinação entre os fatores climáticos que permitem **condições ambientais térmicas aceitáveis** para a maior parte dos ocupantes de um dado espaço, que são:

- **Fatores para o ambiente térmico interno** (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa). A norma estabelece que os ocupantes estejam em períodos não inferiores a 15 minutos;

- **Fatores pessoais** (taxa metabólica e nível de vestuário) (ASHRAE, 2020; Lechner, 2009).

A integração entre esses **fatores é de fundamental importância para a promoção do conforto térmico** (ASHRAE, 2020). O ambiente interior é complexo e responde à interação entre todos os fatores supracitados. A Temperatura Radiante Média (TRM) difere muito da temperatura do ar (Lechner, 2009). Por exemplo, em uma situação hipotética em que um indivíduo está localizado próximo a uma janela de vidro a sul, em ambiente com temperatura do ar a 24°C e influência de radiação solar direta, a pessoa poderá sentir calor. Isso ocorre, segundo autor, porque os raios solares elevaram a TMR para um nível demasiado alto para o conforto. Se o indivíduo estiver no mesmo local e com temperatura do ar semelhante, mas sem influência da radiação, poderá sentir frio. Pois, as propriedades do vidro contribuíram para reduzir em demasia a TRM, e o utilizador sofreu uma perda radiante líquida. Em geral, para se proporcionar o conforto, o objetivo é manter a TRM próxima da temperatura do ar ambiente (Lechner, 2009). A TRM será próxima da temperatura do ar interior em edifício bem isolado e sombreado.

Em relação aos **fatores pessoais**, a percepção de conforto é subjetiva ao usuário e pode variar conforme gênero, faixas etárias, nível de atividade física e tipo de vestuário dos envolvidos (Olgyay, 2002). Soma-se ainda a aclimatização do usuário com relação às condições climáticas e geográficas do local sob análise.

Vale salientar ainda que os seres vivos, assim como os objetos e edificações, efetuam o intercâmbio de calor com seu entorno através de quatro processos principais, a saber: **radiação, condução, convecção** e **evaporação** (Badarnah, 2016; Schmidt-Nielsen, 1997; Olgyay, 2002).

- **Radiação** – é quando a transferência de calor ocorre sem contato físico. Todos os objetos físicos e organismos vivos a uma temperatura acima do zero absoluto emitem e absorvem calor sob a forma de radiação eletromagnética (Schmidt-Nielsen, 1997). Ou seja, os corpos podem ganhar calor do Sol, quando estão mais frios que a temperatura ambiente, e perdem calor quando seus corpos estão mais quentes. Objetos à temperatura ambiente irradiam na região infravermelha do espectro eletromagnético. O comprimento de onda ou a frequência da radiação emitida influenciam na temperatura do objeto (Lechner, 2009).

- **Condução** – ocorre quando dois objetos de diferentes temperaturas entram em contato um com o outro. Sempre acontece de uma temperatura mais alta para uma mais baixa. Por exemplo: se parede externa a um edifício for aquecida pelo

Sol, e um ser humano com temperatura corporal menor se encostar na mesma, o indivíduo sentirá a condução do calor.

- **Convecção** – Por meio de movimento da massa de fluidos (proveniente do gás ou líquido) há a aquisição de calor por condução (Lechner, 2009). O fluido expande-se e torna-se menos denso que tende a subir, e flutuar sob o fluido mais denso e mais frio. As correntes resultantes transferem calor através do mecanismo designado por convecção natural (Lechner, 2009). Um exemplo é quando a parede externa a uma construção está mais fria que o ar circundante: o fluido adjacente à parede se tornará mais denso, e tenderá a descer, de modo a acionar a convecção natural de fluidos. Em uma sala, o ar mais quente estará próximo ao teto, enquanto o frio estará nas proximidades do chão. Nesses dois casos, a convecção ocorre por diferença de temperatura, sendo conhecida por convecção natural.

  Um outro tipo de convecção, é a convecção por força mecânica externa, em decorrência do vento, correntes de água ou ventilador elétrico, por exemplo. Em síntese a **convecção depende da transferência de massa de fluidos**, a qual é conduzida pelas complexas leis de dinâmica dos fluidos, que incluem variáveis como: condutividade térmica, densidade e viscosidade dos fluidos. O aquecimento ou resfriamento dos fluidos geralmente altera a densidade, e isso, por sua vez, causa fluxo de massa.

- **Evaporação** – consiste em um mecanismo de resfriamento que ocorre quando o calor é liberado da conversão de água líquida em vapor de água. Os animais se resfriam usando a evaporação através da transpiração, e proporcionam a perda de calor (quando a temperatura do ar é mais quente do que a temperatura do corpo) (Mazzoleni, 2013; Schmidt-Nielsen, 1997).

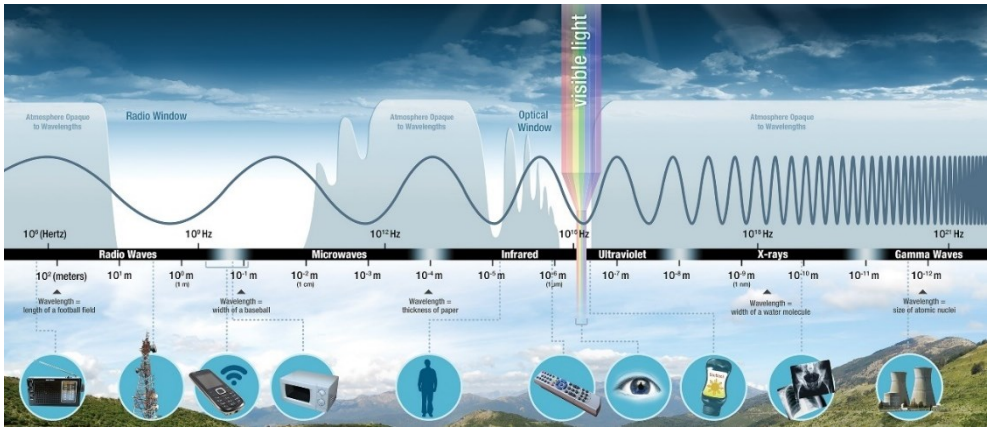
Assim, o desafio para um profissional de arquitetura é projetar um ambiente que não produza tensões negativas sobre o mecanismo de compensação de calor do corpo humano (Olgyay, 2002), e que busque promover o conforto térmico.

Mas afinal, em que consiste a radiação solar? A posição do Sol em relação a Terra influencia na intercepção da radiação solar na superfície terrestre? E ainda, como a orientação solar contribui para os efeitos bioclimáticos de uma edificação na cidade de Lisboa? O próximo subtópico detalhará os questionamentos supracitados, a fim de esclarecer a **relevância do controle da radiação solar como meio para contribuir para o conforto térmico de uma construção**.

2.3.1 A Radiação Solar

A emissão de onda eletromagnética pelo Sol, que se propaga à velocidade da luz, no espaço, aos materiais e organismos na atmosfera, é designada por **radiação** (NASA Science, 2010; M. Oliveira, 2019). O olho humano detecta apenas uma pequena porção desse espectro eletromagnético chamado de luz visível. Contudo, a radiação eletromagnética possui diferentes tipologias, segundo a variação dos comprimentos de onda, como: infravermelho (com valor térmico), ultravioleta (interessante por fixar o cálcio e ser bactericida) (Higueras, 2006), ondas de rádio, micro-ondas, raios-x, raios gama, e raios cósmicos (Figura 21).

Figura 21. Espectro Eletromagnético.



Fonte: NASA Science (2010).

A atmosfera protege da exposição de uma série de ondas eletromagnéticas que podem ser prejudiciais à vida, como raios gama, raios-x e algumas ondas ultravioletas (NASA Science, 2010). A exposição pode ser negativa (nos casos de insolação na pele, como também, provocar secas e desertificação ambiental) e positiva (quando a radiação é usada para tratamento de câncer ou para fotossíntese) (NASA Science, 2010; Nematchoua et al., 2022).

Em 1917, **Albert Einstein** desenvolveu estudo seminal sobre a radiação intitulado por *'The Quantum Theory of Radiation'* (Einstein, 1917). Nesse artigo, Einstein ratificou que as moléculas de gás estão em equilíbrio termodinâmico e buscou identificar as propriedades do campo de radiação incidente necessárias para manutenção desse equilíbrio (Einstein, 1917; Kleppner, 2005). Investigou a interação entre a matéria e a radiação por absorção e emissão, e por radiação incidente e emitida (Einstein, 1917). E observou que a energia é absorvida como uma partícula e não como uma onda (Einstein, 1917; Kleppner, 2005).

Todas as partes do espectro eletromagnético transferem energia radiante. Segundo Lechner (2009), todos os corpos emitem e absorvem energia radiante

continuamente, estejam no ar livre ou no vácuo. Os objetos quentes perdem calor por radiação porque emitem mais energia do que absorvem. Por sua vez, os corpos à temperatura ambiente irradiam na região infravermelha do espectro eletromagnético. Se os objetos estiverem suficientemente quentes para brilharem, podem irradiar na parte visível do espectro.

Quando a intercepção da energia solar é produzida na superfície de um dado material, a energia será parcelada entre **reflexão**, **absorção** e **transmissão** e **emitância**[25]. A fração absorvida, no entanto, será transmitida ao ambiente interno e externo, por **convecção** e **irradiação** (conceito que compreende a exposição à radiação) (Lechner, 2009).

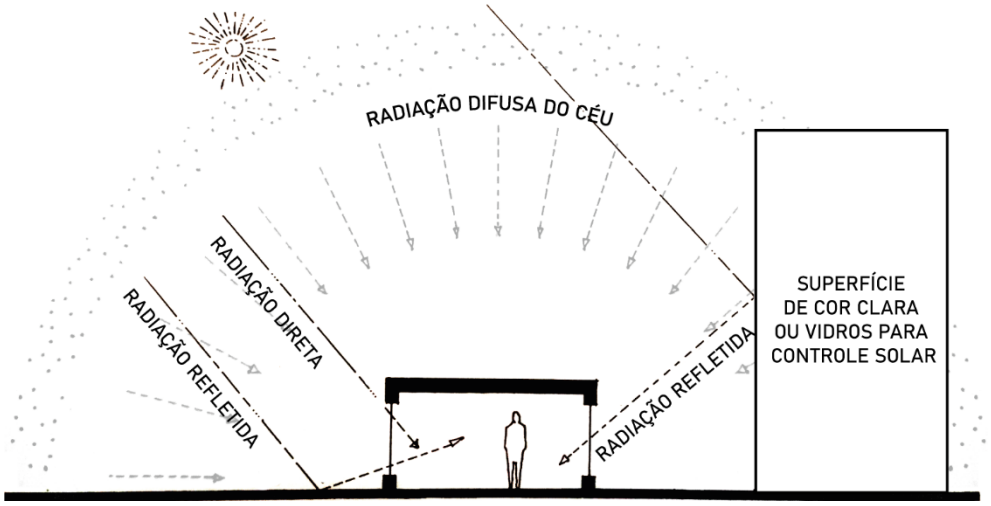
Para além do entendimento sobre o conceito radiação como composição de ondas eletromagnéticas, é necessário compreender a definição sobre **radiação solar global**, que consiste no total de radiação recebida na superfície (González, 2004), sendo a soma entre a **radiação direta** e a **radiação difusa** (Olgyay, 2002).

Existem enormes perdas de radiação solar até que os raios atinjam o solo (Olgyay, 2002). A **radiação direta** corresponde à radiação que atravessa atmosfera sem sofrer alteração de direção (González, 2004), sendo o valor influenciado pelas condicionantes geográficas (Higueras, 2006). Parte da radiação direta é absorvida ou refletida pelos componentes atmosféricos (como gases, vapor de água e nuvens) (González, 2004). Em relação à radiação direta que alcança o solo, parte é refletida pela superfície terrestre. Outra parte, que significa uma maior parcela, é absorvida e se transforma em calor elevando a temperatura do ar, do solo e dos objetos que circundam o entorno (Olgyay, 2002).

A energia refletida muda a direção e parte dela retorna ao espaço. Uma fração da energia refletida chega à superfície da Terra, sendo difundida pela abóboda celeste e denominada por **radiação difusa** (González, 2004). Assim, a radiação difusa compreende a soma entre a radiação refletida e a dispersa, e possui menor relevância do que a radiação direta como fonte de calor (Olgyay, 2002). A nebulosidade, a poluição e falta de nitidez da atmosfera fazem parte da radiação difusa (González, 2004) (Figura 22).

[25] Emitância: radiação é emitida pela superfície (Lechner, 2009).

Figura 22. Radiação Direta, Difusa e Refletida.



Fonte: adaptado de Lechner (2009, pp. 214–215).

Para realizar os cálculos de radiação solar de um local é necessário coletar dados por longo período (pelo menos dez anos), com posterior tratamento estatístico (González, 2004). Assim, poderão dispor de dados microclimáticos de uma zona (como: temperatura, umidade e índices de nebulosidade). Expressões trigonométricas descritivas dos fenômenos de refração (e ainda reflexão e difusão) da luz podem ser utilizadas para prever a quantidade de radiação solar direta e difusa.

2.3.1.1 A relação entre o Sol e a Terra

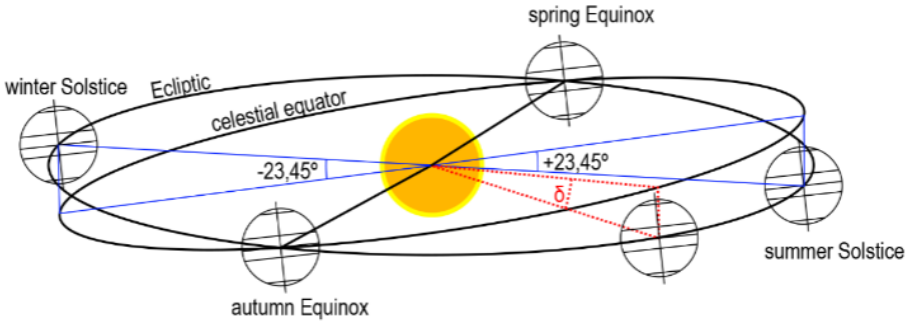
A radiação solar que chega à superfície terrestre é diretamente influenciada pela(o): momento do ano (dia e horário), posição geográfica sobre a Terra (latitude, longitude e altitude) e posição relativa do Sol em relação a superfície da Terra (González, 2004).

O movimento da Terra em torno do Eixo Polar é designado por **rotação**. O período necessário para que a Terra gire 360° a Leste, acontece em 23 horas, 56 minutos e 4,09 segundos (Strahler, 1989). O movimento da Terra em torno do Sol, nomeado por **translação**, corresponde a uma trajetória elíptica que ocorre em 365 dias, 5 horas, 48 minutos e 45,68 segundos (Olgyay, 2002). A soma dessa diferença de quase seis horas irá constituir o ano bissexto, a cada quatro anos. A trajetória elíptica é conhecida como eclíptica (González, 2004).

A **localização do Sol na eclíptica** proporciona diferentes distâncias entre a Terra e o Sol, durante diferentes épocas do ano. Tais diferenças influenciam a quantidade de energia solar que chegará ao planeta. Há quatro posições críticas do planeta na órbita elíptica, que representam os **critérios astronômicos para as viradas de**

estação, a saber: **solstício de verão; solstício de inverno**; **equinócio de primavera** e **equinócio de outono** (Figura 23).

Figura 23. Solstícios e equinócios.



Fonte: M. Oliveira (2019, p. 41) como citado em González (2004, p. 132).

Segundo Strahler (1989), no dia 21 ou 22 de junho, a Terra se encontra com seu eixo inclinado em direção ao Sol, com ângulo máximo de 23,5°. Nessa época, o hemisfério norte recebe a máxima radiação solar por estar mais perto do Sol, enquanto o hemisfério sul está mais distante. Tal situação é designada no hemisfério norte por **solstício de verão**, e proporciona dias mais longos que a noite no hemisfério norte**.** Nesse dia, o ângulo de altura do Sol apresenta os valores mais altos de todo o ano (H. Gonçalves & Graça, 2004).

Já em 22 ou 23 de dezembro, a Terra se encontra na posição diametralmente oposta da órbita elíptica. A inclinação máxima ocorre agora em relação ao hemisfério sul, estando o norte mais afastado do Sol. Essa circunstância é nomeada como **solstício de inverno**, e caracteriza-se por: noites mais longas que o dia no hemisfério norte, e a diferença entre a duração dia e da noite se amplia conforme aumento da distância da linha do equador (Olgyay, 2002)**.**

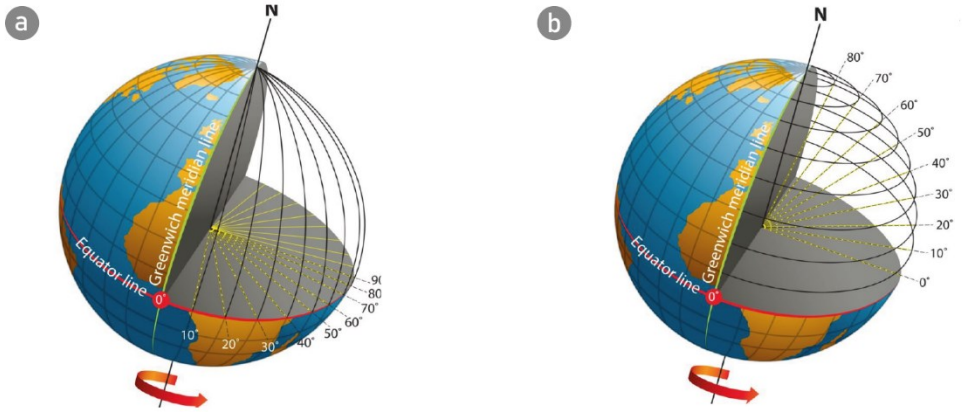
Entre os solstícios acontecem os equinócios, que consistem na formação do ângulo de 90° entre o eixo da Terra e linha que passa pelo centro do planeta e o Sol. Nos equinócios ambos os hemisférios recebem iluminação semelhantes, pois as condições dos raios solares são idênticas em ambas as situações. O **equinócio de primavera** acontece no dia 20 ou 21 de março. E o **equinócio de outono** no dia 22 ou 23 de setembro. Os dias e as noites tendem a ter a mesma duração de 12 horas em todas as latitudes.

Desse modo, pode-se afirmar que as **variações de incidência da radiação solar ao longo do dia devem-se ao período de rotação em torno de 24 horas, enquanto as variações durante o ano devem-se a inclinação do eixo de rotação da Terra**, o qual está inclinado 23,45° em relação ao plano que contém o Sol e a Terra em todo o seu movimento de translação (M. Oliveira, 2019).

2.3.1.2 Longitude e Latitude

Para compreender qualquer local na Terra é necessário entender a princípio o conceito de **longitude**, **latitude**, e **coordenadas solares** (M. Oliveira, 2019) (Figura 24).

Figura 24. Longitude e latitude.



Nota. a) longitude e b) latitude. Ilustração por: ©Erebor Mountain. Fonte: adaptado de Mountain, (n.d.).

Longitude (β) é o ângulo entre dois planos concorrentes, em que ambos contêm os polos norte e sul e um deles contém o plano de referência que atravessa a superfície do planeta no Meridiano de Greenwich (Inglaterra) (M. Oliveira, 2019). As longitudes variam de 0 a 180°, tanto em direção leste quanto em direção a oeste, adquirindo sinal negativo para indicar o hemisfério ocidental (Olgyay, 2002). **A posição do Sol ao meio-dia é a mesma para todos os locais com a mesma longitude no globo terrestre** (Strahler, 1989). Os raios solares atingem a Terra em diferentes ângulos em relação ao plano do horizonte (M. Oliveira, 2019). O plano do horizonte é o plano tangente na superfície da Terra, em um dado ponto e que coincide com o horizonte visível (González, 2004).

Latitude (φ) corresponde a distância em graus entre o plano do horizonte até a Linha do Equador (Olgyay, 2002). A distância pode variar entre 0 e 90°, tanto em relação ao hemisfério norte quanto para o hemisfério sul. Pela determinação da latitude localiza-se um dado local na posição norte-sul (M. Oliveira, 2019). As linhas com latitude constante são conhecidas como paralelas. A intensidade de radiação não é comparável em distintas latitudes (García, 1995). Ou seja, superfícies com áreas idênticas e exposta a radiação solar pelo mesmo período, não receberão a mesma quantidade de calor, se uma superfície estiver no Polo Norte e a outra no Equador.

De acordo com González (2004), as **latitudes baixas** compreendem zonas da Terra cujos raios solares incidem de modo uniforme e próximo a 90° em qualquer época

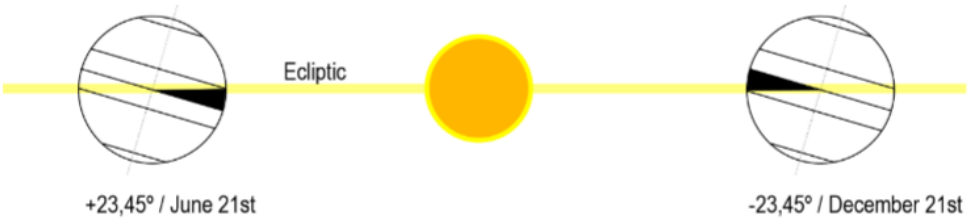
do ano (como locais que se situam próximo à Linha do Equador). As **latitudes médias** compreendem as zonas que evidenciam claras diferenças entre as distintas épocas do ano. Os verões, por exemplo, possuem dias com duração maiores que as noites, e raios solares possuem inclinação suficiente para provocar altas temperaturas. Nas **latitudes altas**, há dias que não chegam a amanhecer (como verões que não chegam a anoitecer). Nesses locais a incidência dos raios solares têm uma baixa angulação, e por consequência baixos índices de radiação.

2.3.1.3 Coordenadas Solares: Coordenada Equatoriais + Coordenadas Horizontais

Para uma compreensão didática sobre as influências para as variações de radiação, convencionou-se o **movimento aparente do Sol**, que consiste em representar a Terra como o centro da abóboda celeste e que o Sol gira em torno do planeta Terra (González, 2004; M. Oliveira, 2019). Por exemplo, tomando-se a localização de um observador em Lisboa, ele verá o Sol, a lua e as estrelas parecerem se mover sobre uma cúpula semiesférica, situada sobre ele (Strahler, 1989).

O movimento aparente do Sol utiliza as **coordenadas solares** como referência que compreende: **coordenadas equatoriais** e **coordenadas horizontais**. As **coordenadas equatoriais** são medidas sobre o plano do equador celeste, e abrangem a **declinação** e o **ângulo horário**. A **Declinação (δ)** consiste no ângulo formado entre os raios solares e o plano do equador celeste (Figura 25).

Figura 25. A declinação da Terra.



Fonte: M. Oliveira (2019, p. 42).

A declinação (δ) pode ser calculada consoante a equação de Cooper (Garcia, 1995), sendo 'n' o dia do ano. A unidade de medida resultante é em graus.

A declinação (δ) pode ser calculada consoante a equação de Cooper (García, 1995), sendo 'n' o dia do ano. A unidade de medida resultante é em graus.

$$\delta = 23.45 \cdot sen[360 \cdot \left(\frac{284 + n}{365}\right)] \qquad \textbf{EQ. 1}$$

O ângulo máximo é de +23,45° (no solstício de verão – localização na latitude do Trópico de Câncer) em junho, até o mínimo de -23,45° (no solstício de inverno – no Trópico de Capricórnio). Na altura dos equinócios a declinação é zero, que é o momento em que a trajetória da Terra corta o plano do equador (González, 2004).

O **Ângulo Horário (A_h)**, por sua vez, consiste no ângulo formado entre a posição, em um dado horário do dia, em relação ao meio-dia solar (González, 2004; M. Oliveira, 2019). Em outras palavras, é o ângulo que contém o plano com a radiação solar e o plano do meridiano local de referência. A segunda equação é utilizada para calcular o ângulo horário:

$$A_h = 15 \cdot (12 - h) \qquad \textbf{EQ. 2}$$

O h se refere ao horário do dia. Para cada hora do dia, desde o nascimento ao pôr do sol, o ângulo horário se amplia a uma razão de quinze graus (García, 1995). Por convenção deve-se considerar para todos os cálculos solares sempre a hora solar, visto que as horas oficiais dos locais podem variar segundo acordos internacionais, a fim de aprimorar o aproveitamento da luz (González, 2004).

As **coordenadas horizontais** consistem na medição sobre o plano do horizonte do lugar (González, 2004). Como visto anteriormente, o plano do horizonte é designado por um plano tangente à superfície da Terra em um ponto que coincide com o horizonte visível. As coordenadas horizontais compreendem o cálculo da **Altura Solar** (h_s) e do **Azimute** (z).

A avaliação da altura solar é relevante, pois qualquer obstáculo (natural ou construído) irá produzir sombreamento (Higueras, 2006). A **Altura Solar (h_s)** é o ângulo formado entre um raio solar e o plano horizonte de um dado lugar, e pode ser calculado segundo a terceira equação:

$$h_s = sen^{-1}(sen\varphi \cdot sen\delta + cos\varphi \cdot cos\delta \cdot cosA_h) \qquad \textbf{EQ. 3}$$

A altura solar depende diretamente da(o): φ (latitude do lugar); δ (declinação), e A_h (ângulo horário). Inicia por zero ao amanhecer e alcança a altura solar máxima ao meio-dia, quando o ângulo horário é zero (González, 2004).

A energia transmitida varia segundo a distância que percorre os raios do Sol através da atmosfera (Strahler, 1989). Quando o Sol se encontra na posição mais vertical, ao meio-dia, os raios percorrem a menor distância, por conseguinte há a ocorrência de maior quantidade de energia. Em contrapartida, a primeira hora da manhã e a última hora da tarde, apresentam a maior distância dos raios solares, e por consequência menores índices de energia. Isso acontece porque a quantidade de massa atmosférica que os raios solares atravessam aumenta à medida que a

inclinação dos raios se amplia, havendo perdas de radiação por reflexão e absorção da atmosfera (García, 1995; Lechner, 2009). As alturas solares são diferentes com relação às latitudes (Higueras, 2006).

O **Azimute Solar (z)**, por sua vez, corresponde ao ângulo que compreende o deslocamento do plano vertical que contém o Sol em relação a sua posição ao meio-dia no plano do horizonte (González, 2004; M. Oliveira, 2019). Tal medição deve ser efetuada sobre o plano do horizonte, a partir do Sul (a origem da referência dos ângulos) (Higueras, 2006). As medidas são consideradas positivas quando a direção da radiação solar é para Leste da referência ou negativa quando para oeste (M. Oliveira, 2019).

A avaliação do azimute solar em diferentes estações é importante para se planejar uma edificação na cidade (Higueras, 2006). Sempre se deve comparar a situação entre o inverno como o verão, de modo que a orientação da construção favoreça ou evite a captação solar, dadas as condições climáticas do local sob análise (Higueras, 2006). M. Oliveira (2019) considera que existem duas convenções para calcular o azimute solar. A primeira refere-se ao norte geográfico. o norte geográfico corresponde a 0°, e segue no sentido anti-horário passando pelo leste (90°), sul (180°), oeste (270°), até tender a retornar ao norte em 359°.

Ainda segundo a autora, a segunda convenção é amplamente utilizada na arquitetura, porque analisa como a radiação solar atinge a superfície da Terra e como isso influencia as atividades humanas. Por exemplo, como a radiação solar afeta as edificações e respectiva utilização. Essa convenção considera a direção da radiação solar ao meio-dia solar como 0°. O azimute solar pode assumir valores positivos (quando a direção da radiação solar é para leste da referência) ou negativos (quando se situa a oeste da referência). Por fim, o Azimute Solar (z) pode ser calculado pelas seguintes equações (M. Oliveira, 2019):

$$z = sen^{-1}\left(\frac{cos\delta \cdot senA_h}{cosh_s}\right) \qquad \textbf{EQ. 4}$$

$$z = cos^{-1}\left(\frac{sen\varphi \cdot senh_s - sen\delta}{cos\varphi \cdot cosh_s}\right) \qquad \textbf{EQ. 5}$$

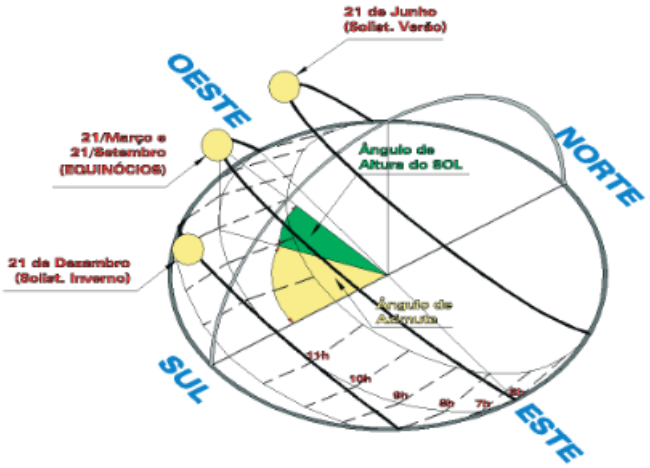
As variáveis utilizadas para o cálculo do azimute solar são: φ (latitude do lugar); δ (declinação); A_h (ângulo horário) e h_s (altura solar). González (2004) e M. Oliveira (2019) afirmam que a quarta equação possui maior precisão para locais de baixas latitudes e azimutes solares com valores negativos. Já a quinta só é exata em latitudes superiores a 10° para o hemisfério norte.

Por fim, o estudo do movimento do Sol tem por objetivo avaliar os condicionantes geográficos de uma dada localidade, para planejar novos assentamentos para a cidade, levando em conta aspectos urbanos que já existem (Higueras, 2006). Nesse sentindo, objetiva-se proporcionar melhores condições de insolação para a construção e qualidade de vida para os ocupantes.

2.3.2 Geometria Solar

A **Geometria Solar** é uma ferramenta que busca compreender como a radiação solar atinge a superfície da Terra, bem como o ambiente urbano e o edifício (H. Gonçalves & Graça, 2004; M. Oliveira, 2019) (Figura 26).

Figura 26. Geometria Solar – Percurso do Sol ao longo do ano.



Fonte: H. Gonçalves e Graça (2004, p. 5).

Consiste no estudo da forma do edifício e respectivas obstruções à incidência de radiação (H. Gonçalves & Graça, 2004). Usualmente compreende o estudo do efeito de palas, sombreamento do próprio edifício e efeito de sombreados correlatos à construção (como: construções vizinhas, vegetação etc.) (H. Gonçalves & Graça, 2004). A Figura 26 sintetiza:

- O **percurso do Sol** representado pelas linhas curvas (nas datas de virada de estação, os equinócios e solstícios);
- As **diferentes localizações do astro solar em várias horas do dia** (indicado pelas linhas curvas que partem do polo norte. Nesse gráfico estão projetadas no plano do horizonte);
- O **ângulo da altura solar**;
- e o **ângulo azimute** (z).

O diagrama da geometria solar demonstra não apenas a posição do Sol, mas também se a sombra é necessária ou não em um determinado momento para o local sob análise (Olgyay, 2002). Ainda segundo o autor, tal diagrama proporciona a base para a avaliar os elementos de proteção solar.

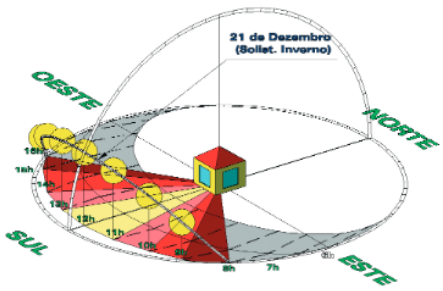
2.3.2.1 Orientação do Edifício

O tema orientação de edifício pressupõe a integração conjunta entre o Sol e o ar, mais precisamente entre os elementos climáticos: **radiação solar** e **temperatura do ar** (H. Gonçalves & Graça, 2004; Olgyay, 2002). Para H. Gonçalves e Graça (2004), a radiação e temperatura do ar exterior são os elementos que mais influenciam na transferência de calor ou arrefecimento dos edifícios. A orientação das edificações abarca ainda questões que devem ser levadas em consideração, como: topografia do local, fatores climáticos referentes à ventilação, permeabilidade visual, promoção de privacidade e redução de ruído (Olgyay, 2002).

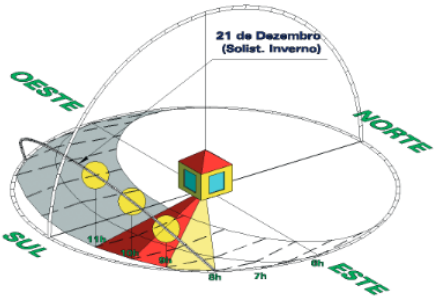
Os impactos térmicos da radiação solar devem ser considerados em relação à conversão de calor, a fim de promover níveis de temperatura dentro da **zona de conforto** para o ser humano (Olgyay, 2002). A definição da orientação determinará a quantidade de radiação incidente nos diferentes lados da construção e pode influenciar na sensação de conforto.

A temperatura do ar determina o estabelecimento de fluxos energéticos do exterior para o interior, como **ganhos térmicos** que ocorrem geralmente no **verão**. No **inverno**, o fluxo tende a se inverter de modo a proporcionar **perdas térmicas**. Por esse motivo, a determinação da orientação deve proporcionar a um mesmo edifício a **redução da radiação durante o período de excesso de calor e máxima radiação possível durante o período de frio** (Olgyay, 2002) (Tabela 5).

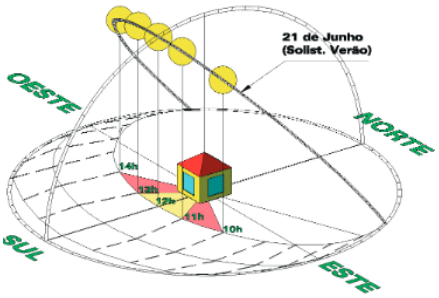
Tabela 5. Radiação solar nas fachadas das edificações em Lisboa.



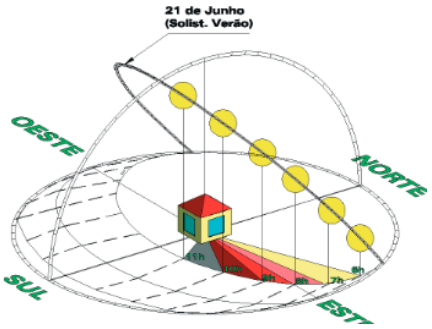
No inverno é necessário aquecer os edifícios. É possível maximizar a entrada de radiação solar para um edifício com fachada orientada a sul.



Em Lisboa, o Sol nasce próximo da orientação sudeste. Para uma fachada orientada a nascente, haverá poucas horas de incidência da radiação solar durante o inverno. Tal incidência acontecerá no período da manhã e com um pequeno ângulo solar.



Durante o verão é necessário minimizar os ganhos solares por radiação. O percurso do Sol se aproximará do zênite, portanto a incidência solar nos envidraçados verticais orientados a sul formará grandes ângulos, de modo a reduzir os ganhos solares.



Uma fachada orientada a nascente no verão, a incidência da radiação solar ocorrerá durante longas horas da manhã (entre o nascer do Sol e o meio-dia). Nesse período, os ângulos solares serão próximos da perpendicular aos envidraçados verticais. É recomendado evitar o excesso de incidência solar no verão.

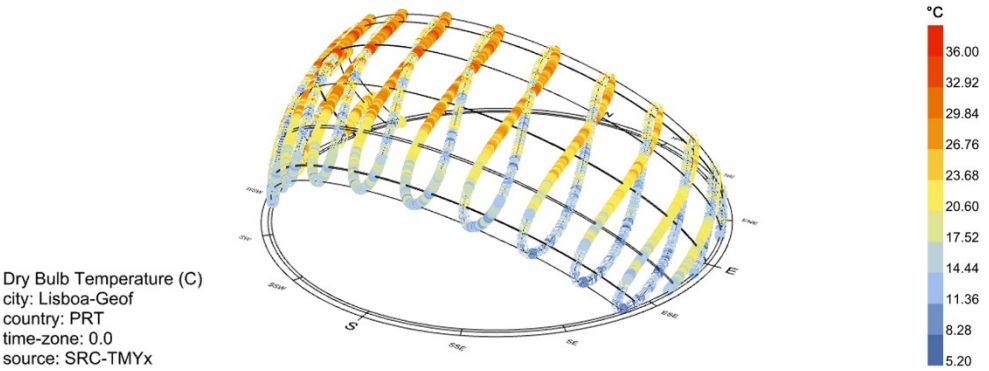
Fonte: H. Gonçalves e Graça (2004, p. 4).

2.3.2.2 Geometria Solar em Lisboa

A **geometria solar para a latitude de Lisboa** foi simulada através da associação entre o arquivo climático de Lisboa e algoritmo desenvolvido no *software Rhinoceros 3D 6.0*®, em consonância com os *plug-ins* no *Grasshopper*® e *Ladybug*®. O **arquivo climático** foi coletado no repositório de dados climáticos livres para a simulação de desempenho de edifícios (climate.onebuilding.org, 2021). O arquivo climático para Lisboa sintetiza os dados coletados entre 2007 e 2021, e possui o formato *EnergyPlus Weather* [.EPW]. Tal arquivo será utilizado durante a presente investigação para desenvolver análises e simulações climáticas.

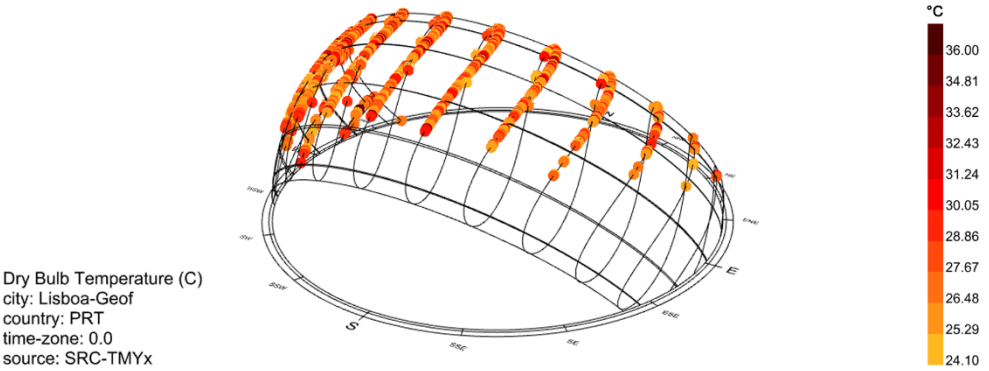
A integração entre o arquivo climático de uma dada localidade e o *softwares* supracitados permite o desenvolvimento de algoritmo capaz de simular a variação de temperatura e radiação solar, ao longo das diferentes estações e horários do ano. A Figura 27, por exemplo, simula a geometria solar durante um ano em Lisboa.

Figura 27. Geometria solar de Lisboa.



Nota. O algoritmo elaborado no *software Rhino*ceros 6.0® com o *plug-in Grasshopper*® e *Ladybug® 1.2.0*. Fonte: Autora (2023).

Figura 28. Geometria solar de Lisboa, para temperaturas acima de 24°C.



Nota. O algoritmo elaborado no *software Rhinoceros 6.0*® com o *plug-in Grasshopper*® e *Ladybug® 1.2.0*. Fonte: Autora (2023).

A Figura 28, por sua vez, evidencia área de **propensão ao sobreaquecimento** para uma edificação em Lisboa, através da identificação temperaturas superiores a 24˚C. A **orientação das construções para o quadrante sul** permite o máximo aproveitamento dos ganhos solares, por receber a maior radiação solar durante o dia (H. Gonçalves & Graça, 2004; M. Oliveira, 2019).

2.3.3 Características Climáticas do Concelho de Lisboa

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a maior parte de **Portugal Continental** possui **clima temperado**, do Tipo C, verificando-se subtipo Cs (clima temperado com verão seco) (IPMA, 2022). O Concelho de Lisboa-PT foi definido como contexto climático de referência para a investigação em questão. Lisboa está localizada dentro da **região climática mediterrânea de verão quente e seco** (classe Köppen Csa) (Alcoforado et al., 2005; IPMA, 2022; A. Oliveira et al., 2021). O clima do Lisboa possui **verões quentes e secos, e invernos amenos** (*World Weather & Climate Information*, 2020), sendo fortemente influenciado pela corrente do Golfo (IPMA, 2022).

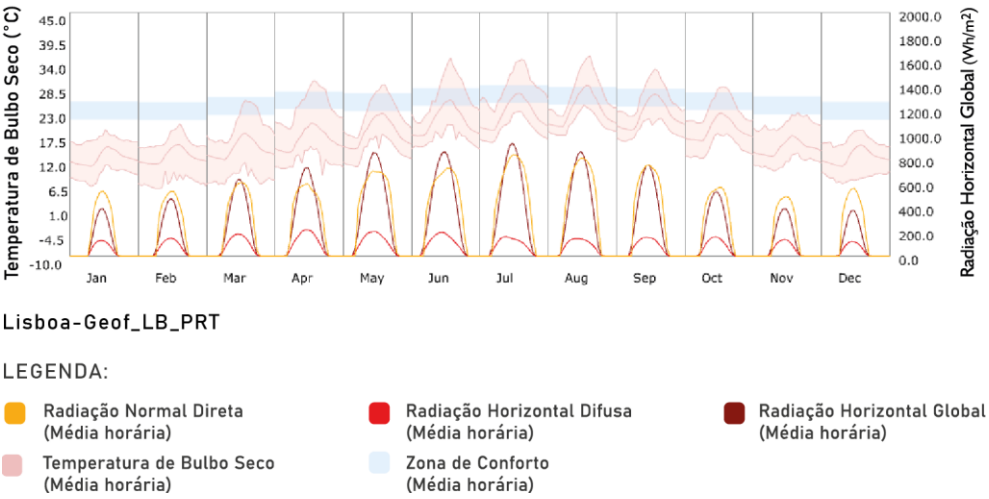
Segundo H. Gonçalves e Graça (2004) a influência marítima suaviza a variação de amplitudes térmicas no Concelho de Lisboa. A topografia revela vales por toda a cidade. Segundo A. Oliveira et al. (2021), no geral as altitudes mais elevadas se localizam-se à norte (planalto do Aeroporto e colina florestal de Monsanto), enquanto as altitudes mais baixas correspondem à margem de estuário, nos limites leste e sul da cidade.

A temperatura média anual máxima de Lisboa é de 21°C e a mínima é de 13,7°C (*World Weather & Climate Information*, 2020). O mês de janeiro, considerado o mês mais frio, aponta para temperaturas que variam de 10 a 19°C durante o dia, e de 4 a 11 °C à noite (M. Oliveira, 2019). A chuva acontece principalmente nos meses de inverno, em consonância com a elevação da velocidade do vento, que influencia na percepção do clima para um pouco mais frio (*World Weather & Climate Information*, 2020). As temperaturas extremas no inverno caem perto de 0°C durante a noite, mas ocorrem com menor frequência. Os meses de julho e agosto, são considerados os meses mais quentes e secos do ano (*World Weather & Climate Information,* 2020). Em agosto, as temperaturas oscilam entre 24 e 28°C durante o dia e cerca de 15 a 19°C durante a noite (M. Oliveira, 2019).

O Gráfico 1 sintetiza as **temperaturas médias mensais mínimas e médias máximas por hora para Lisboa.** Constata ainda informações sobre a **incidência de radiação solar ao longo do ano**. Observa-se que a intensidade da radiação direta é superior à difusa. A área azul clara no gráfico expoõe a **zona de conforto** adaptativo para o local de referência.

Estudos evidenciam o **aumento generalizado da temperatura do ar na região de Lisboa, tanto da máxima como da mínima** (Lopes et al., 2020). Tal elevação é verificada sobretudo na primavera e no verão (Lopes et al., 2020). Verifica-se também a **ampliação das incidências e dias consecutivos de onda de calor** (Lopes et al., 2020; Reis et al., 2022; Nematchoua et al., 2022; A. Oliveira et al., 2021).

Gráfico 1. Temperatura e radiação em Lisboa.



Nota. Temperatura médias mensais mínimas e médias máximas por hora para a região de Lisboa. Gráfico produzido através da inserção do arquivo .EPW de Lisboa, síntese dos dados entre 2007 e 2021, (climate.one.building.org, 2021). O algoritmo foi elaborado por Avarth no *software Rhinoceros 6.0*® com o *plug-in Grasshopper*® e *Ladybug*® *0.0.63*. Fonte: adaptado de Avarth (2016).

2.3.3.1 Ciclo Térmico Anual para Lisboa

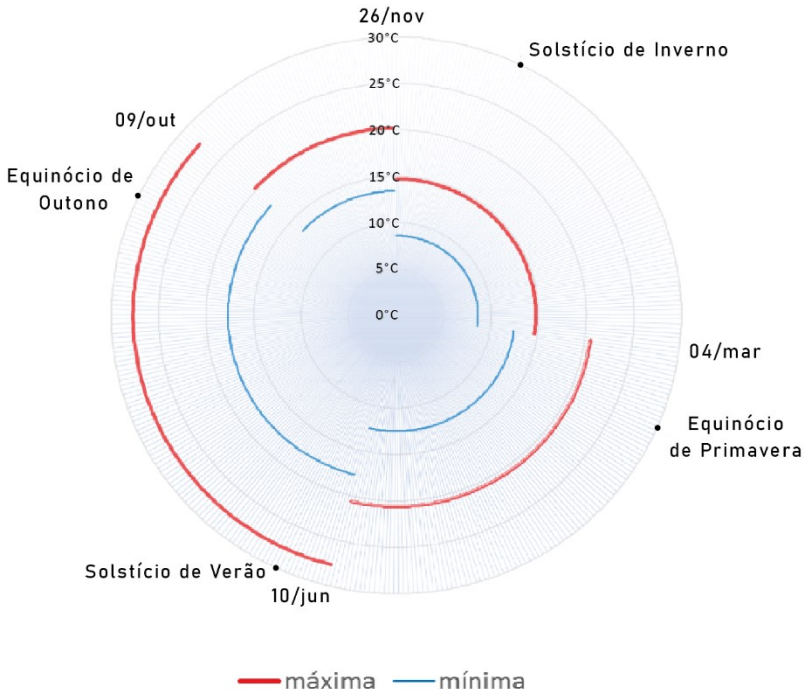
Como visto anteriormente, Lisboa apresenta **mudança no ciclo anual da temperatura** com o alargamento do período mais quente. Segundo Lopes et al. (2020), cada vez mais se percebe em caraterísticas térmicas semelhantes para períodos do ano que pertencem a estações astronômicos diferentes. Ou seja, que não compreendem necessariamente os dias referentes à virada de estação.

O ensaio desenvolvido por Lopes et al. (2020) propôs **identificar quatro períodos com caraterísticas térmicas homogêneas ao longo do ciclo anual da temperatura.** Para tanto, houve a análise dos valores diários da temperatura do ar registrados entre 2009 e 2018, a partir da estação meteorológica do Aeroporto. O ensaio atestou **datas de início e fim dos períodos mais quente e mais frio do ano** (Gráfico 2). As nomenclaturas das estações foram mantidas para os diferentes períodos, mas adverte-se que a classificação se relaciona apenas com as suas caraterísticas térmicas.

O Gráfico 2 e a Tabela 6 indicam que as datas de virada de estação, por critérios astronômicos, não coincidem com os dados por caraterísticas térmicas homogêneas do ano. O gráfico também evidencia temperaturas médias (máximas e mínimas) para cada período térmico sob análise, através dos arcos vermelhos e

azuis que se relacionam às temperaturas de referência das circunferências concêntricas.

Gráfico 2. Temperaturas médias estacionais em Lisboa (2009-2018).



Fonte: adaptado de Lopes et al. (2020).

Tabela 6. Caraterísticas das estações térmicas em Lisboa.

PERÍODOS ESTACIONAIS	DATAS DE INÍCIO E FIM	TEMPERATURA (°C)		
		MÍNIMA	MÉDIA	MÁXIMA
INVERNO	26/11 a 04/03	8,6	11,7	14,7
PRIMAVERA	05/03 a 10/06	12,5	16,6	20,6
VERÃO	11/06 a 08/10	17,7	22,7	27,7
OUTONO	09/10 a 25/11	13,4	16,8	20,2

Fonte: adaptado de Lopes et al. (2020).

O período mais frio do ano exibe temperatura mínima média de 8,6°C e máxima de 14,7°C. Acontece entre os dias 26 de novembro e 04 de março. Já o período mais quente decorre com temperatura mínima média de 17,7°C e máxima de 27,7°C, entre os dias 11 de junho e 8 de outubro. Ainda segundo os autores, o período de

transição não possui diferenças significativas em relação aos valores médios da temperatura. A principal distinção reside em relação à amplitude térmica média, que é maior na primavera (8,1˚C) do que no outono (6,8˚C). Assim, os autores concluem que:

> […] o período mais frio do ano inicia-se cerca de 1 mês antes do inverno astronómico e o seu fim é antecipado em cerca de 2 semanas; a primavera mantém a sua dimensão, mas com cerca de duas semanas de desfasamento; **a alteração mais significativa, verifica-se nos outros dois períodos: o período mais quente do ano inicia-se 2 semanas antes do verão astronómico e prolonga-se por cerca de 120 dias, até ao início da 2ª semana de outubro.** O outono vê a sua duração encurtada, resumindo-se a cerca de 1 mês e meio. (Lopes et al., 2020, p. 16, grifo nosso)

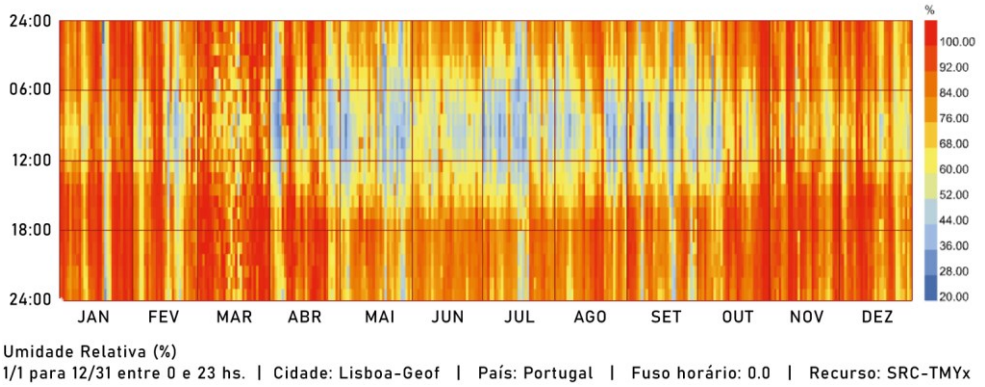
2.3.3.2 Umidade Relativa do Ar

Para proporcionar condições de conforto térmico a um dado ambiente, em geral, a umidade relativa do ar deve ser superior a 20% durante todo o ano, inferior a 80% no inverno e a 60% no verão (Lechner, 2009). Tais limites são adaptáveis às condições climáticas do local sob análise. Ressalta-se, no entanto, que os níveis de umidade muito baixos influenciam diretamente na insalubridade do ambiente, e podem gerar problemas de saúde aos indivíduos.

O Gráfico 3 exibe a umidade relativa do ar para Lisboa, a qual evidencia que o período seco está referido nos meses mais quentes do ano. Durante o amanhecer e o anoitecer os índices de umidade tendem a estar elevados.

A umidade do ar influencia diretamente na evaporação da umidade da pele. O ar seco pode absorver facilmente a umidade da pele, e a rápida evaporação resultante arrefecerá efetivamente o corpo (Lechner, 2009).

Gráfico 3. Umidade relativa do ar em Lisboa.



Nota. Gráfico produzido através da inserção do arquivo .EPW de Lisboa, síntese dos dados entre 2007 e 2021, (climate.one.building.org, 2021). O algoritmo elaborado no *software Rhinoceros 6.0*® com o *plug-in Grasshopper*® e *Ladybug*® *1.2.0*. Fonte: Autora (2023).

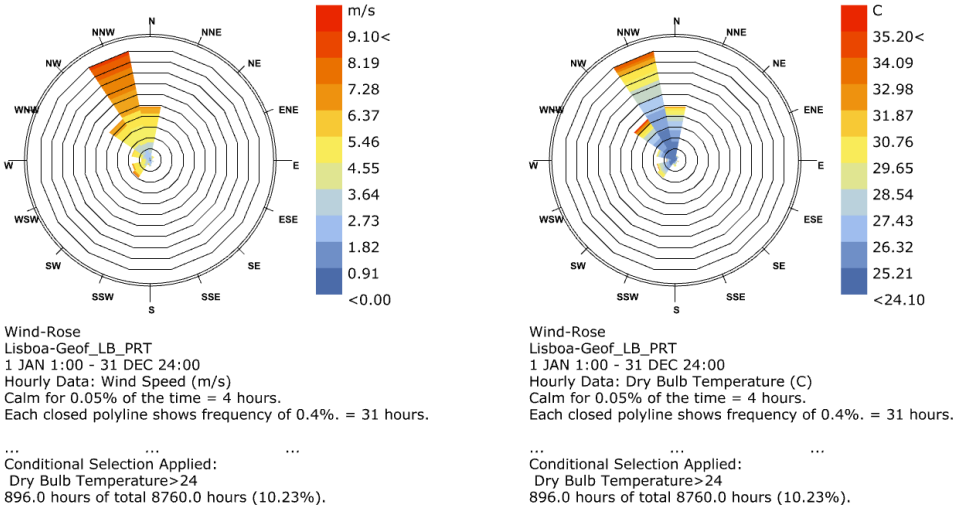
2.3.3.3 Movimento do Ar

O **movimento do ar** afeta diretamente na taxa de perda de calor tanto por convecção e evaporação, e pode influenciar na percepção do conforto térmico (Lechner, 2009). O vento contribui para o arrefecimento significados das cidades, e pode atuar positivamente para a promoção do conforto térmico e promoção de saúde aos habitantes (Alcoforado et al., 2005). Segundo Lechner (2009), o intervalo confortável está entre 0,1 e 0,3 m/s. Acima de 0,89 m/s, o movimento do ar pode ser ligeiramente desagradável e perturbador.

No verão o movimento de ar é considerado como uma vantagem, por colaborar para o arrefecimento (Lechner, 2009). Contudo, pode ser desvantajoso quando o clima for quente e seco. Se o ar estiver acima de 37°C, aquece a pele por convecção enquanto arrefece por evaporação. O autor considera ainda o movimento do ar como uma desvantagem para o inverno.

Com relação à ventilação natural para Lisboa, considera-se que deve ser promovida no verão português. Apresenta um importante papel para o processo de arrefecimento noturno, no interior da construção (H. Gonçalves & Graça, 2004). O Gráfico 4 indica a previsão da velocidade de ventos para temperaturas acima de 24°C. Cerca de 10% das horas do ano possuem ventilação proveniente dos quadrantes N e NW. Já durante o horário comercial, a incidência de ventos ocorre durante 1,46% das horas.

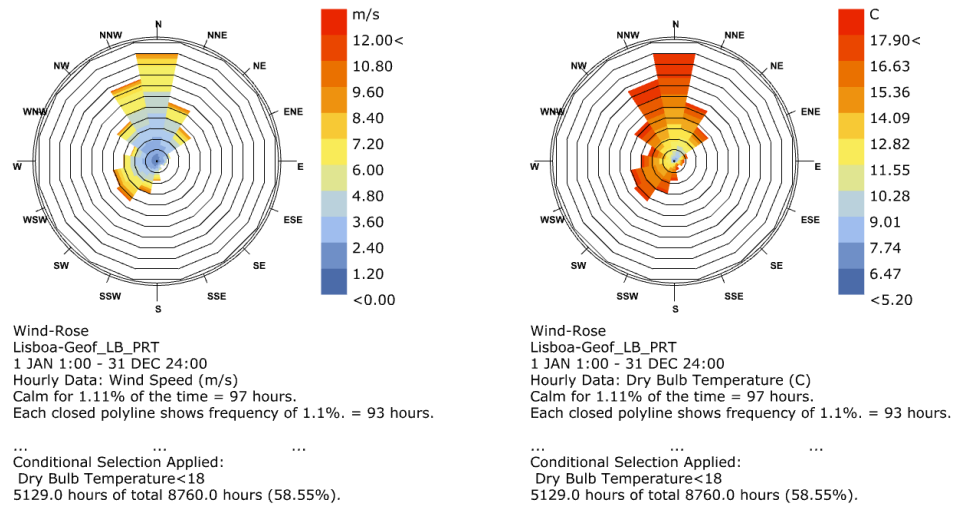
Gráfico 4. Rosa-dos-ventos em Lisboa, para temperaturas acima de 24°C.



Nota. O algoritmo elaborado no *software Rhinoceros 6.0*® com o *plug-in Grasshopper*® e *Ladybug*® *1.5.0*.
Fonte: Autora (2023).

Já no inverno, interessa limitar as infiltrações de ventilação, quando a temperatura exterior indica valores abaixo das condições de conforto. No entanto, a renovação do ar interior é uma medida necessária à manutenção das condições de salubridade interior dos edifícios. Durante 58% das horas do ano, ocorre ventos hegemonicamente em direção ao norte, para temperaturas abaixo de 18°C. No horário comercial (8:00 às 18:00), os ventos acontecem em cerca de 36%, na preponderante direção entre norte e noroeste (Gráfico 5).

Gráfico 5. Rosa-dos-ventos em Lisboa, para temperaturas abaixo de 18°C.



Nota. O algoritmo elaborado no *software Rhinoceros 6.0®* com o *plug-in Grasshopper®* e *Ladybug® 1.5.0*. Fonte: Autora (2023).

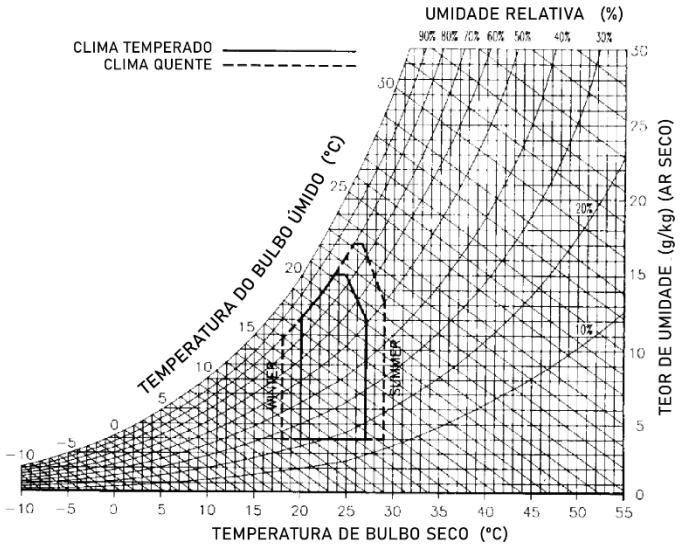
Devido ao crescimento urbano de Lisboa, Alcoforado & Lopes (2005) afirmaram que há modificações da velocidade do vento na cidade, a qual foi verificada no início dos anos 80 (período que houve forte expansão urbana). A velocidade média do vento pode ser atenuada à medida que a rugosidade aerodinâmica da cidade tende a crescer (Alcoforado et al., 2005). A rugosidade corresponde à altura acima do solo (em metros), a que o perfil logarítmico do vento é zero.

Deve-se ter atenção para não reduzir a velocidade média dos ventos na cidade, de modo a colaborar para a intensificação das ICU. Estudos recentes demonstraram que durante a ocorrência das ondas de calor em Lisboa, as temperaturas podem chegar a 40°C e que se registram a predominância do vento à norte (A. Oliveira et al., 2021).

2.3.4 Diagrama Psicométrico e Conforto Térmico

O **diagrama psicométrico** proposto por **Bruno Givoni** tornou-se referência para a **avaliação de desempenho térmico** (Figura 29), adaptando-se ao contexto de diferentes nações através do Zoneamento Bioclimático (apresenta diretrizes estratégias para a concepção de construções adaptadas ao local e que proporcione condicionamento térmico passivo (Givoni, 1992)).

Figura 29. Diagrama psicométrico para edifícios proposto por Givoni (1992).



Nota. Evidencia os limites da zona de conforto, para o clima temperado e para o clima quente. O gráfico considera condições do ar calmo, tanto no verão e quanto no inverno. Fonte: adaptado de Givoni (1992).

O diagrama expõe temperatura de bulbo seco em °C (abcissas) em função das taxas de umidade (ordenadas). As curvas explicitam a umidade relativa (%) e as linhas inclinadas evidenciam a temperatura do termômetro úmido em °C.

O conforto térmico deve ser levado em consideração a **análise das características climáticas de um determinado local, que coleta simultaneamente dados de temperatura e umidade, e averigua o conforto humano** (Givoni, 1992). Segundo Lechner (2009), o intervalo de conforto para a maior parte dos indivíduos está entre 20°C no inverno e para 25°C no verão. Essa amplitude leva em consideração o uso de roupas mais quentes durante o inverno.

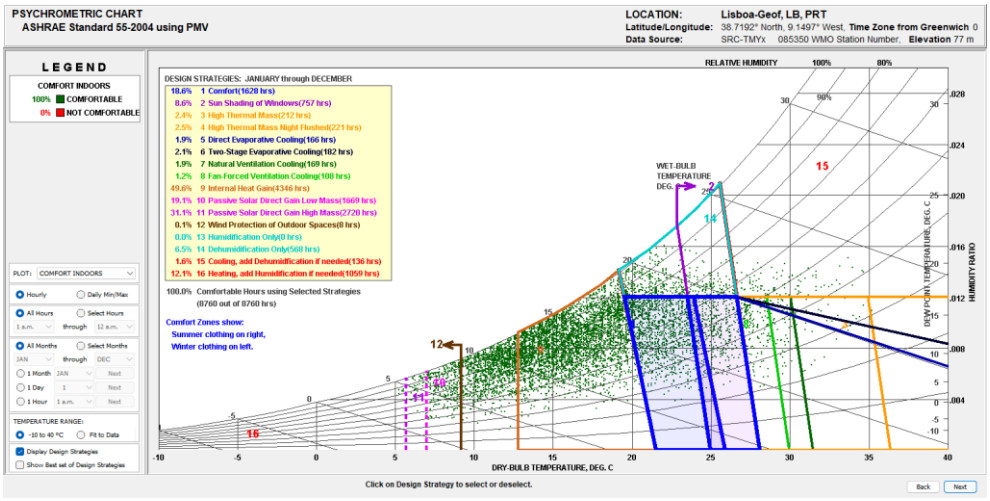
2.3.4.1 Diagrama Psicométrico em Lisboa

Desenvolvido pelo *Department of Architecture and Urban Design* da Universidade da Califórnia [UCLA] em Los Angeles, o ***Climate Consultant 6.0*** é um *software* gratuito para auxiliar projetistas a compreender um dado clima (M. Oliveira, 2019; Smeer, 2022). Tal *software* utiliza arquivos climáticos no formato *.EPW* para produzir vários gráficos significativos, de modo intuitivo e simples. O arquivo climático de Lisboa será associado ao *Climate Consultant* para produzir versão do diagrama psicométrico para a região de Lisboa.

Durante a utilização do *software* optou-se pela norma *ASHRAE Standard 55* e o *Current Handbook of Fundamentals Model*. Tal referência normativa considera que a temperatura radiante média está próxima da temperatura do bulbo seco no espaço interior. Já com relação aos ambientes residenciais, considera que as pessoas adaptam o vestuário de acordo com a estação do ano e sentem-se confortáveis em velocidades de ar mais elevadas, pelo que têm uma maior amplitude de conforto do que em edifícios com sistemas centralizados de *Heating, Ventilating and Air Conditioning [HVAC]*.

O **diagrama psicométrico para Lisboa** (Figura 30) exibe a temperatura de bulbo seco em °C (localizado nas abcissas) em função das taxas de umidade (nas ordenadas). As curvas explicitam a umidade relativa (%) e as linhas inclinadas evidenciam a temperatura do termômetro úmido em °C.

Figura 30. Diagrama psicométrico para Lisboa – PT.

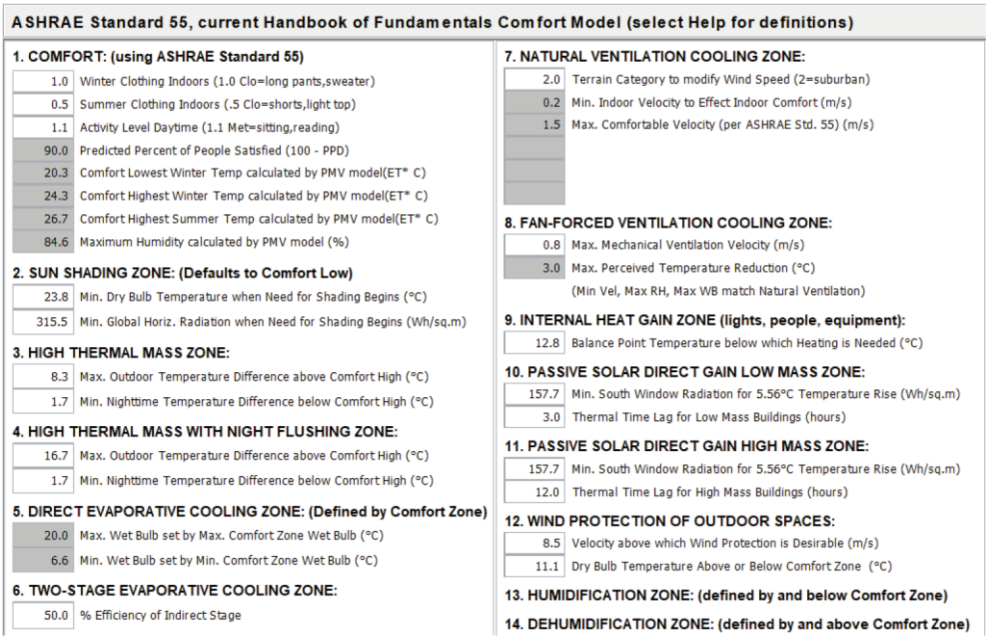


Fonte: gráfico gerado a partir do *software Climate Consultant 6.0* e arquivo climático de Lisboa conforme padrão normativo ASHRAE Standard 55-2004.

Cada ponto verde-escuro no gráfico representa a temperatura e a umidade de cada uma das 8.760 horas por ano (Smeer, 2022). As linhas em azul-escuro evidenciam a **zona de conforto**, tanto para o inverno (área preenchida em azul, com linha de contorno em azul-escuro) quanto para o verão (área em vermelho com contorno em azul-escuro).

A Figura 31 explicita temperaturas para promoção de conforto térmico em Lisboa no ambiente usando o padrão normativo ASHRAE Standard 55. O inverno apresenta mínima de 20,3°C e máxima de 24,3 °C, enquanto no verão máxima de 26,7 °C.

Figura 31. Modelo de conforto para Lisboa.



Fonte: gráfico gerado a partir do *software Climate Consultant 6.0* e arquivo climático de Lisboa conforme padrão normativo ASHRAE Standard 55-2004.

2.3.5 Estratégias Passivas e Elementos para a Proteção Solar

O *International Style*, vigorou após a Segunda Guerra Mundial, através da **recorrente utilização de caixas de vidro na arquitetura**, que ampliaram consideravelmente consumo energético das edificações, nas décadas posteriores (J. Gonçalves & Duarte, 2006; Hensel, 2008).

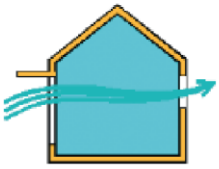
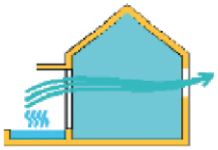
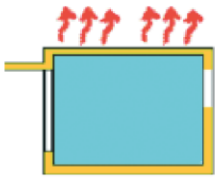
A partir do final dos anos oitenta, as **questões de sustentabilidade** chegaram internacionalmente de modo incisivo para a arquitetura e o urbanismo (J. Gonçalves & Duarte, 2006). As preocupações foram direcionadas para as consequências da crise energética mundial, o impacto ambiental gerado pelo elevado consumo da energia de base fóssil e as crescentes previsões de demandas por recursos para as próximas gerações.

A **construção sustentável** demanda por soluções arquitetônicas passivas, e essas, por sua vez, praticamente desapareceram da arquitetura contemporânea (Hensel, 2008). Os sistemas passivos são um recurso utilizado nas estratégias bioclimáticas. Entende-se por **sistema passivo** o desenvolvimento de dispositivos construtivos integrados às edificações, com a finalidade de contribuir para o seu aquecimento ou arrefecimento natural (H. Gonçalves & Graça, 2004). Por exemplo, no verão são empregados elementos massivos para minimizar a captação do Sol, através dos

vãos envidraçados. Já no inverno, esses mesmos elementos armazenarão energia solar de modo a reduzir a perda térmica para o ambiente.

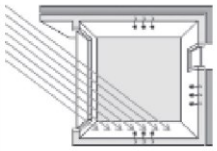
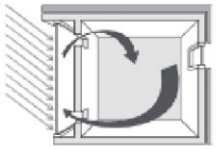
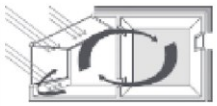
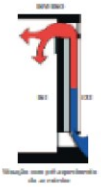
A Figura 32 e a Figura 33 sintetiza estratégias de sistema passivo para o verão e inverno respectivamente (H. Gonçalves & Graça, 2004).

Figura 32. Estratégias de sistema passivo para o verão.

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos		Tipo de Edifício
Verão – Estação de Arrefecimento	Restringir Ganhos Solares	Sombrear Envidraçados		Todos os edifícios
	Restringir Ganhos por Condução	Isolar Envolvente		Principalmente nos edifícios de Habitação
	Ventilação		Ventilação natural	Mais importante nos Edifícios de Habitação
	Arrefecimento pelo Solo		O edifício é arrefecido por contacto com o solo e o ar exterior é arrefecido no solo e introduzido no edifício	Todos os edifícios
	Arrefecimento Evaporativo		Promover ventilação com pequenas velocidades de ar através de fontes, espelhos de água, etc	Todos os edifícios
	Arrefecimento Radiativo (pouco utilizado)		A emissão de radiação por parte dos elementos da envolvente exterior de um edifício	
	Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior		

Fonte: H. Gonçalves e Graça (2004, p. 47).

Figura 33. Estratégias de sistema passivo para o inverno.

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos		Tipo de Edifício
Inverno – Estação de Aquecimento	Promover Ganhos Solares		**Ganho Directo,** promove o aquecimento rápido do espaço. Os vãos envidraçados, devem localizar-se preferencialmente no quadrante Sul	Todos os Edifícios com ocupação nocturna ou diurna
			**Ganho Indirecto.** A Parede de Trombe absorve energia solar durante o dia fazendo-se sentir o seu efeito com mais intensidade durante a noite	Sistemas a utilizar em zonas dos edifícios com ocupação nocturna
			**Ganho desfasado - Estufas.** Comportamento semelhante ao da Parede de Trombe, embora exija maior preocupação na sua desactivação durante o Verão	As estufas, são utilizadas no período diurno no Inverno, devendo ser desactivadas no Verão
			**Ganho separado - colector a ar** permite a introdução de ar quente em espaços com grandes necessidades de renovação de ar no período de Inverno	Edifícios com ocupação diurna e com grande nº. de ocupantes. Salas de aula, auditórios, etc
	Restringir Perdas por Condução	Isolar Envolvente é condição fundamental em Portugal		Principalmente nos edifícios de Habitação

Fonte: H. Gonçalves e Graça (2004, p. 46).

O **sombreamento** pode poupar mais energia economicamente do que qualquer outra estratégia solar, sendo considerada como uma estratégia fundamental para obter conforto térmico (Lechner, 2009). Cada orientação da construção requer diferentes estratégias de sombreamento.

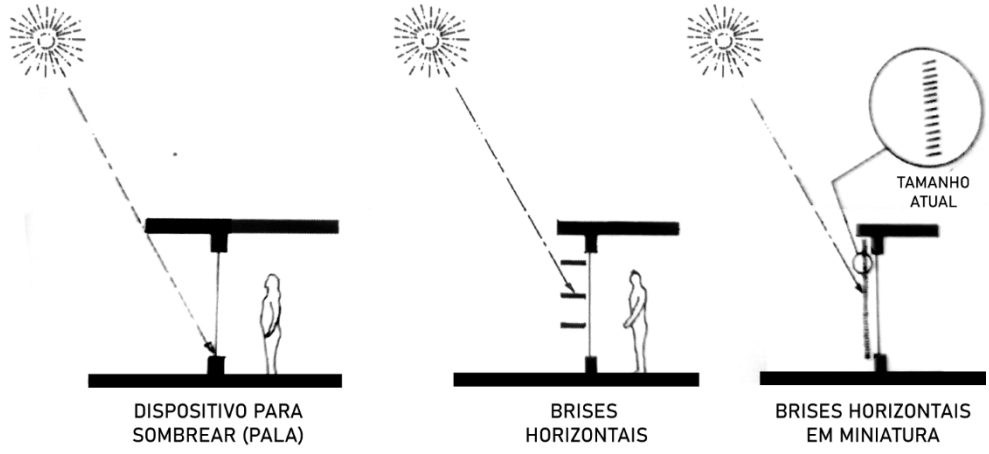
Ainda segundo o autor, **dispositivos horizontais** implementados na fachada sul exercem proteção bastante eficaz durante o verão. São também relevantes, mas em

menores proporções que os anteriores, quando aplicados nas orientações: leste, sudeste, sudoeste e oeste. Em climas quente, dispositivos verticais podem contribuir para o sombreamento quando alocados na fachada norte. Em vários casos é possível combinar dispositivos de sombreamento verticais e horizontais

Os elementos de proteção solar devem ser concebidos de forma a proporcionar aos edifícios a **flexibilidade necessária em termos de fluxo energético e conforto térmico, capazes de reagir a condições externas não contínuas e variáveis.** O nível de proteção solar dependerá da localização e orientação da barreira protetora, que pode estar no próprio vidro, aplicado internamente ou externamente às superfícies envidraçadas (Olgyay, 2002).

A proteção solar pode contribuir para a redução de energia durante as diferentes estações do ano e apresentar uma redução viável das taxas de consumo de CO_2 (European Solar Shading Organization, 2006). Conforme Lechner (2009), vários pequenos elementos aplicados próximos aos envidraçados podem criar efeito de sombreamento semelhante a um grande dispositivo, como a pala (Figura 34). Contudo, a permeabilidade visual é melhor com o dispositivo de grande proporção.

Figura 34. Dispositivos para sombrear com efeitos semelhantes.



Nota. Para o efeito de sombreamento ser semelhante a relação entre o comprimento da saliência e a parte vertical da janela sombreada deve ser a mesma. Fonte: adaptado de Lechner (2009, p. 217).

Vale salientar que para **dispositivo de sombreamento estáticos**, o período de exposição solar da janela estará em função da orientação solar e não da temperatura (Lechner, 2009). Na opinião de Olgyay (2002), os **elementos de controle solar ajustáveis permitem um relevante controle por se adaptarem ao caminho solar**, sendo possível alcançar a sombra no verão e benefícios caloríficos no inverno. Esses podem ser controlados pelo usuário, ou ainda possuir sistema de acionamento mecânicos, com sensores e atuadores.

Para fachadas em que os **elementos de proteção solar são localizados internamente ou após o vidro,** os elementos interceptarão uma parcela da energia solar que já ultrapassou a superfície do vidro (Olgyay, 2002). Refletirão uma porção dessa energia, que deverá passar novamente pelo vidro. Outra fração será absorvida, e por convecção e irradiação, a energia será direcionada para o interior da edificação. Os elementos de proteção externos, por sua vez, transmitirão ao ar exterior sua porção de energia por convecção e irradiação.

Há ainda **sistemas de proteção autoajustáveis pelas condições climáticas** da localidade sob análise, que independem de dispositivos eletromecânicos, e funcionam por meio de materiais inteligentes e de mudança forma (Fiorito et al., 2016; Reichert et al., 2014; Schleicher et al., 2015; Sung, 2016; Vazquez et al., 2019). Esses elementos fazem parte do objeto da presente investigação.

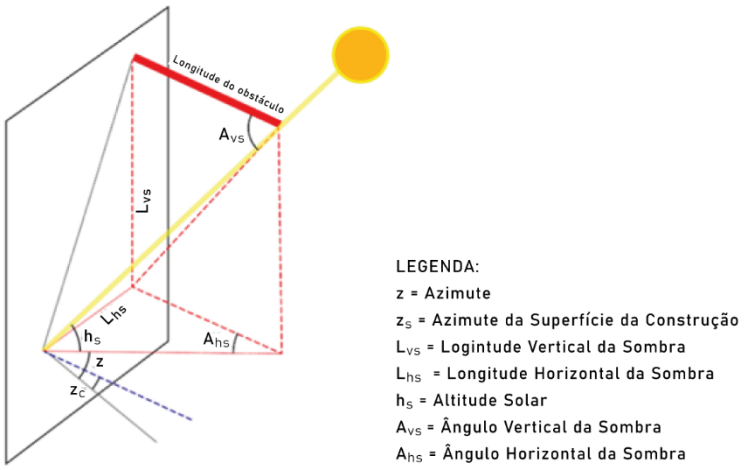
A **orientação dos elementos de proteção solar influencia o impacto calorífico para a construção**, sejam estas orientações: horizontais, verticais ou a associação concomitante entre verticais e horizontais (Olgyay, 2002). Os **elementos de sombreamento** podem ainda conferir **efeito estético à construção arquitetônica**, como composição entre luz e sombra, ou ainda a proporcionar ritmo e textura (Olgyay, 2002). Ademais, podem incluir uma linguagem arquitetônica própria, de modo a expressar uma autêntica identidade regional.

2.3.5.1 Cálculo para a Proteção Solar

Uma das básicas aplicações das coordenadas solares é o cálculo para proteções solares no contexto da arquitetura bioclimática (González, 2004). Assim, pode-se planejar os dispositivos de sombreamento para controle dos ganhos solares da edificação, como orientação e dimensão de janelas de vidro, por exemplo.

O sombreamento é determinado através do cálculo dos ângulos: **Ângulo Horizontal da Sombra** (*Ahs*) e **Ângulo Vertical da Sombra** (*Avs*) (González, 2004) (Figura 35).

Figura 35. Ângulos e longitudes de sombra em relação a uma superfície vertical.



Fonte: adaptado de M. Oliveira (2019, p. 48) como citado em González (2004, p. 165).

O **Ângulo Horizontal da Sombra (A_{hs})** é identificado através da diferença entre o azimute do Sol (z) e o azimute da superfície da construção (z_c) (M. Oliveira, 2019), conforme a sexta equação:

$$A_{hs} = z - z_c \qquad \textbf{EQ. 6}$$

O **Ângulo Vertical da Sombra (A_{vs})**, por sua vez, está em função da altura solar (h_s) e do ângulo horizontal da sombra (A_{hs}), segundo M. Oliveira (2019).

$$A_{vs} = \text{arctg}\,[\text{tg}\,h_s \cdot (cos A_{hs})^{-1}] \qquad \textbf{EQ. 7}$$

Após a identificação desses ângulos e com a longitude do obstáculo é possível calcular a **Longitude Horizontal da Sombra** (L_{hs}) e **Longitude Vertical da Sombra** (L_{vs}) (González, 2004), segundo as seguintes equações:

$$L_{hs} = \text{longitude do obstáculo} \cdot \text{tg}\,A_{hs} \qquad \textbf{EQ. 8}$$

$$L_{vs} = \text{longitude do obstáculo} \cdot \text{tg}\,A_{vs} \qquad \textbf{EQ. 9}$$

Através das coordenadas solares e da definição das equações supracitadas é possível determinar o sombreamento referente a uma dada obstrução.

2.3.6 Perspectiva Bioclimática: Edificações em Lisboa

Para González (2004), o aproveitamento e controle do Sol como fonte de energia primária é a base de arquitetura bioclimática. No que que tange a perspectiva bioclimática para as edificações em Portugal, **o clima é uma variável essencial** para a concepção do projeto e a **interação do Sol com os edifícios é uma parte fundamental no processo de projeto** (H. Gonçalves & Graça, 2004). Segundo os autores, a **radiação solar e a temperatura externa do ar são as variáveis climáticas que mais influenciam a transferência de calor para os edifícios.** H. Gonçalves e Graça (2004) recomendam a abertura de vãos envidraçados no quadrante sul das fachadas em Portugal.

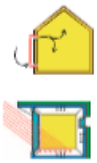
2.3.6.1 Perspectiva Bioclimática: Edificações em Lisboa

Como estratégias bioclimáticas para o Concelho de Lisboa, a variável **radiação solar** constitui uma fonte de calor **imprescindível para o inverno**, de modo a contribuir para a elevação da temperatura interior dos ambientes. Já **no verão, a radiação solar é uma fonte de calor a se restringir**, a fim de evitar o aumento da temperatura interior nos edifícios. Para tanto, é importante que tais vãos sejam dotados de **dispositivos de sombreamento eficazes** (H. Gonçalves & Graça, 2004). Ainda segundo os autores, pelo verão ser mais exigente que o inverno:

- a arquitetura deve responder à **defesa da radiação solar**;
- os edifícios devem primar por níveis adequados de **isolamento** (redução da condução térmica);
- os **envidraçados deverão ser dotados de sistemas para promoção de sombreamento**.

A Figura 36 realça estratégias bioclimáticas para o aquecimento no inverno e arrefecimento no verão em Lisboa (H. Gonçalves & Graça, 2004).

Figura 36. Estratégias bioclimáticas para Lisboa.

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos	
Inverno – Estação de Aquecimento	Promover Ganhos Solares.	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes	
	Restringir Perdas por Condução	Isolar Envolvente	
	Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior	
Verão – Estação de Aquecimento	Restringir Ganhos Solares	Sombrear Envidraçados	
	Restringir Ganhos por Condução	Isolar Envolvente	
	Ventilação	Ventilação transversal (nocturna)	
		Tubos enterrados	
	Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior	

Fonte: H. Gonçalves e Graça (2004, p.16).

A Figura 30 apresentou diferentes estratégias de design no gráfico e no quadro amarelo superior esquerdo, recomendadas pelo *software* *Climate Consultant 6.0* (ver item 2.3.4.1). A porcentagem de horas é evidenciada em cada uma das dezesseis zonas de estratégia para um projeto, que dão uma noção sobre estratégias eficazes o desenvolvimento de sistemas passivos para o contexto climático de Lisboa. A Figura 30 expõe ainda que 49,6% das estratégias passivas para Lisboa devem promover o ganho interno de calor nas edificações, enquanto 31,1% indicam ganho passivo solar direto de alta massa.

Na **Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa [FAUL]**, verifica-se a adoção de sistema de ganho solar ao longo dos envidraçados destinados a salas de aula. Palas de sombreamento são aplicadas tanto na fachada sul quanto no norte das edificações (Figura 37).

Figura 37: Envidraçados da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.

Nota. Sistema de ganho solar: a) fachada sul no edifício 4; b) fachada norte no edifício 5. Fonte: Autora (2023).

2.3.7 Influência das Propriedades dos Materiais na Fachada

Olgyay (2002) desenvolveu ensaio que para uma dada latitude, no equinócio de verão e orientação de Nova York, uma parede com uma única lâmina de vidro obteve trinta vezes mais vulnerabilidade aos efeitos solares do que uma parede opaca em madeira.

Olgyay (2002) desenvolveu ensaio que para uma dada latitude, no equinócio de verão e orientação de Nova York, uma parede com uma única lâmina de vidro obteve trinta vezes mais vulnerabilidade aos efeitos solares do que uma parede opaca em madeira.

Muito embora os resultados sejam próprios ao ambiente sob análise, quando rege condicionantes climáticos específicos, o resultado evidencia a **relevância das propriedades do material no processo de absorção, reflexão e transmissão da radiação para o desempenho térmico de uma edificação** (Mendonça, 2005; Olgyay, 2002). Pois, a pele do edifício atua como um filtro entre as condições externas e internas (Sung, 2016), e exerce o controle da(o): luz, entrada de ar, calor, frio, ruído e odor. Mendonça (2005) afirmou ser possível determinar o acabamento dos materiais através da identificação das frações do coeficiente de absorção (a), de reflexão (re) e de transmissão (t), segundo a equação:

$$a + re + t = 1 \qquad \textbf{EQ. 10}$$

A soma desses coeficientes é igual a um (Mendonça, 2005). Se a superfície é negra ($a = 1$). Caso o material seja opaco ($a \geq 0;\ re \geq 0\ e\ t = 0$); e se for transparente ($t > 0$).

Ainda segundo o autor, tendo em vista que a maioria dos materiais de construção são opacos, o coeficiente de reflexão pode ser uma variável de relevância para auxiliar no processo de determinação de material para a superfície exterior ou

interior, pois exercerá influência seja para os ganhos térmicos da edificação, como para a iluminação natural (Mendonça, 2005). **As cores escuras absorvem o impacto do Sol, enquanto as claras refletem** (Olgyay, 2002).

A transmissão de calor por um dado material se alterará segundo tipologia da radiação. Para o vidro, por exemplo, a radiação direta transmitida variará conforme o ângulo de incidência dos raios solares, enquanto a transmissão da radiação difusa independe da posição do Sol (Olgyay, 2002).

A **Difusibilidade Térmica (α)** caracteriza a propriedade do material de aquecer mais ou menos rapidamente (Mendonça, 2005). Ou seja, compreende a capacidade de um dado material conduzir calor, em função do calor armazenado por unidade de volume. Pode ser obtida em função da condutibilidade térmica, do calor específico, e da densidade (ρ) do material, pela expressão:

$$\alpha = \lambda \div \rho \cdot e \qquad \textbf{EQ. 11}$$

Onde: λ: Condutibilidade térmica [kcal/h.m.˚C]; ρ: Densidade [kg/m3]; e: Calor específico [kcal/kg˚C. A **Densidade (ρ)** do material relaciona o volume de um material com a sua massa. A **Condutibilidade Térmica (λ)** é uma propriedade inerente a cada material, seja para o estado sólido, líquido ou gasoso. Por definição, a condutibilidade térmica é definida pela quantidade de calor (W) que atravessa 1 m^2 do material, com uma espessura de 1 m, durante o período de 1 hora (Mendonça, 2005). Duas faces opostas da superfície devem apresentar uma diferença de 1˚C, e o fluxo de calor dá-se apenas em uma direção entre as superfícies. Para fins de cálculos, as demais superfícies são consideradas isoladas. A unidade é J/s. ˚K.m ou W/˚K.m.

Ainda segundo o autor, o valor da condutibilidade térmica, em geral não é constante durante a vida útil do material. Por exemplo, o valor da λ diminui com o aumento da temperatura; pode ainda ser influenciado se sujeito a cavidades ocupadas por ar; o contrário acontece com a umidade, pois a elevação da umidade do material influencia na ampliação do valor de λ; E por fim, o envelhecimento do material pode influenciar na redução da eficácia da λ, através, por exemplo, da dispersão do gás que promove o isolamento. A compressão, esmagamento ou umidade podem influenciar os valores de referência na condutibilidade térmica do material.

O **Calor Específico (*e*)** compreende a energia produzida ao elevar uma unidade de temperatura, ou seja, uma unidade de massa. O teor de umidade dos materiais influencia significativamente a capacidade de armazenamento térmico do material (Mendonça, 2005). Normalmente utiliza as unidades em Kcal/kg.˚C ou J/kg.K.

2.4 Síntese do Capítulo

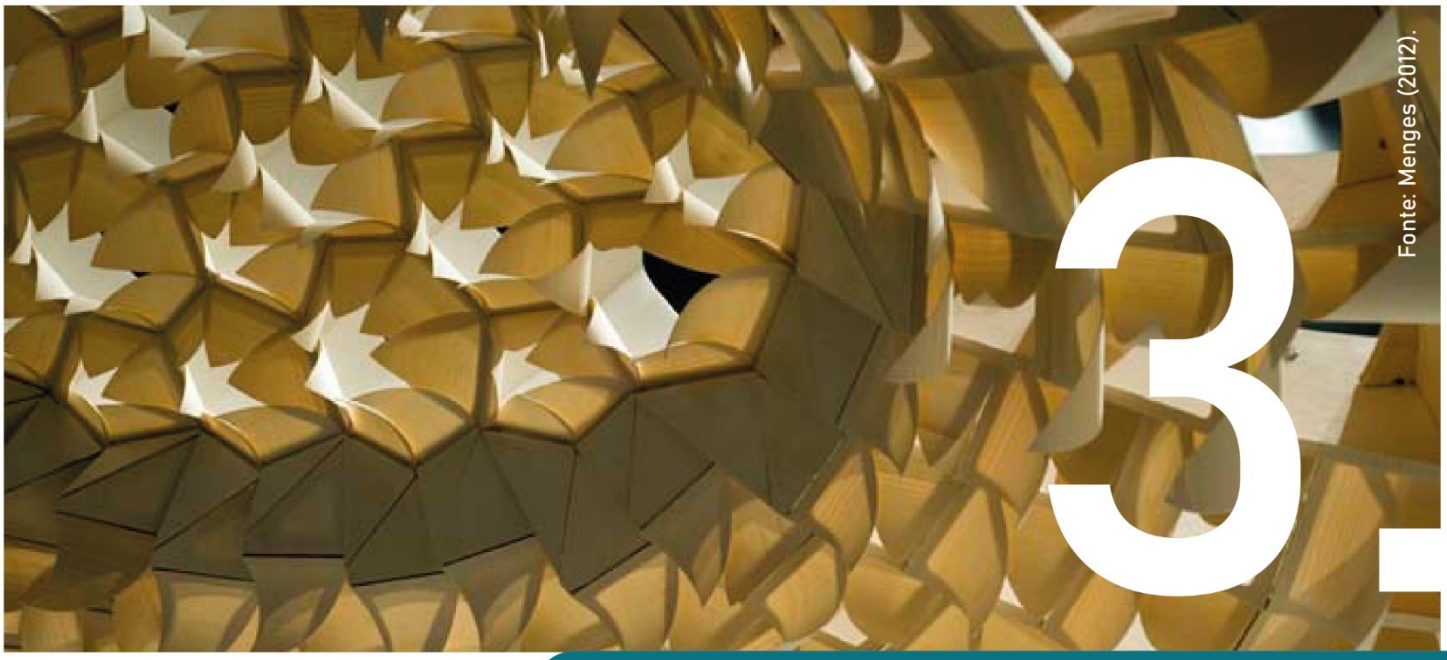
O desafio de uma solução para fachadas que vise à **inter-relação entre biologia – biomimética – arquitetura e design**, como visto anteriormente, é superar três obstáculos: a) metodologia sistemática para identificação e seleção de **sistemas biológicos relevantes**; b) dificuldade de transposição das estratégias do organismo para a **escala** de implementação do projeto; e por fim, c) a **integração de diferentes contextos** de modo que não haja conflitos entre as partes constituintes (M. Oliveira, 2019). Diferentes **níveis de adaptação** podem ser adotados, seja ao nível fisiológico, comportamental e/ou morfológico do(s) organismo(s) de referência (Badarnah & Kadri, 2014; Kuru et al., 2019; López et al., 2017).

Os **movimentos estão presentes desde o início da vida da planta**, com objetivos predefinidos, eixos e simetrias. Há muitas incertezas sobre o funcionamento. **A mesma planta pode apresentar várias tipologias de movimentos násticos** (a exemplo, a *Mimosa pudica*), que acontecerão concomitantemente, e em sintonia entre si, sob um complexo movimento interno entre diferentes componentes (do nível micro ao da macroestrutura) (Rivière et al., 2017). Dessa forma, poderão possibilitar **respostas dos órgãos da planta de modo reversível**.

A presente investigação, buscou esclarecer o conhecimento sobre o **sistema climático** e as particularidades inerentes ao **clima de Lisboa**. Dissertou sobre a importância da **radiação solar** e a **geometria solar** como ferramenta para compreensão sobre como os raios solares atingem a superfície terrestre; assim como a utilização de elementos para a proteção solar e a influência das propriedades do material para o desempenho térmico da edificação (Dear & Brager, 2002; Olgyay, 1973, 2002). O objetivo, no entanto, é promover condições de **conforto térmico** aceitáveis para o ambiente construtivo. E naturalmente o **clima lidará com parâmetros de desempenho contraditórios entre si**, como visibilidade e ganho/perda de calor, e iluminação e ventilação naturais ao longo do dia ou do ano.

A arquitetura bioclimática para Portugal, por sua vez, deve considerar a **interação do Sol como parte fundamental** no processo de desenvolvimento de projeto de edificações (H. Gonçalves & Graça, 2004). Foi exposto o cenário prospectivo de maiores **ocorrências de onda de calor** no sul da Europa, mais severas e em maior quantidade; assim como **aumento das temperaturas máximas e mínimas para Lisboa**, e ampliação do período referente ao verão, dada a análise das caraterísticas térmicas homogêneas para o ciclo anual em Lisboa (Lopes et al., 2020). O próximo capítulo versará sobre projeto computacional e fachadas adaptativas.

Fonte: Calatrava (2023).



Fonte: Menges (2012).

3

Projeto Computacional e Fachadas Adaptativas

Fonte: Knippers et al. (2018).

3.1 Nota Introdutória

O **projeto computacional** [PC] utiliza a computação e a tecnologia para apoiar o processo de desenvolvimento de projetos em várias áreas, que incluem a arquitetura e o design. Permite que projetistas projetem soluções com geometrias complexas e eficientes, que contribuam para a redução do impacto ambiental e atendam às necessidades dos usuários.

O desenvolvimento de projeto computacional para a arquitetura pode ainda exercer um relevante papel no processo de concepção de fachadas cinéticas ou adaptáveis, pois oportuniza a integração de simulações climáticas no processo de controle do comportamento das geometrias.

O presente capítulo incialmente dissertará sobre projeto computacional através da definição de conceito; modelos de desenvolvimento de PC para arquitetura e design; *softwares*, ferramentas e processos de fabricação digital que podem ser utilizados no desenvolvimento de soluções.

Posteriormente são demonstradas distintas terminologias sobre **Fachada Adaptativa ou Cinética** que compreendem a capacidade adaptativa das fachadas e diferentes estratégias de deformação de material. Treze projetos de referência são expostos, bem como respectiva análise comparativa.

3.2 Projeto Computacional

3.2.1 Perspectiva Histórica

No final do século XIX, os desenhos convencionais começaram a ser questionados por arquitetos como **Antoní Gaudí** (1852 – 1926); **Heinz Isler** (1926 – 2009); **Frei Otto** (1925 – 2015) e **Sergio Musmeci** (1926 – 1981), que levavam em consideração a investigação da forma e dos materiais para desenvolver estruturas complexas (Tedeschi, 2018). Nesse período, surgem abordagens para *form-finding* que buscam "[...] investigar estruturas novas e otimizadas encontradas por meio de relações complexas e associativas entre materiais, formas e estruturas[26]"(Tedeschi, 2018, p. 18).

Em 1963, a primeira aplicação de computador para a arquitetura foi criada por **Ivan Sutherland** com o sistema gráfico *Sketchpad* (Caetano, Santos, et al., 2020; Tedeschi, 2018). Tal sistema também permitiu que as geometrias fossem desenhadas como instâncias paramétricas (Woodbury, 2010) que representam diferentes aspectos da forma, do espaço e das estruturas (Ahlquist & Menges, 2011). O *Sketchpad* foi fundamental para a definição de métodos computacionais através da geração de sistemas baseados em regras, do estabelecimento de parâmetros e associatividade (Ahlquist & Menges, 2011). Lançou as bases para o sistema CAD (*Computer-Aided Design*), em português 'desenho assistido por computador'.

O sistema CAD consiste no uso dos sistemas computacionais (*softwares*) para confeccionar desenhos técnicos e/ou modelos 3D dos projetos (Oxman, 2006). Utiliza lógica semelhante dos desenhos tradicionais, que consiste em adicionar gradualmente informações (Tedeschi, 2018). O designer insere "[...] digitalmente os signos ou geometrias primitivas na folha digital/espaço digital e controla as camadas CAD [...][27]" (Tedeschi, 2018, p. 16, tradução livre). Ou seja, a abordagem do sistema CAD consiste em adicionar complexidade à medida que se sobrepõe traços no papel (desenho tradicional) e/ou informações no ambiente digital.

As ferramentas CAD e *Building Information Modeling* [BIM] se tornaram soluções comerciais na década de 1980 (Caetano & Leitão, 2020). Os avanços tecnológicos modificaram a prática como os projetos de design, arquitetura e engenharia são pensados, representados e analisados (Oxman, 2006, 2008; Peters & Peters, 2013).

---

[26] *"[...] to investigate novel and optimized structures found through complex and associative relations between materials, shape and structures"* (Tedeschi, 2018, p. 18).

[27] *"[...] digital signs or geometric primitives on digital sheet/space and controlling CAD layers [...]"*. (Tedeschi, 2018, p. 16).

Ferramentas de simulação do desempenho dos edifícios passaram a ser desenvolvidas, de modo a permitir a análise de projetos em relação a diferentes critérios de desempenho (Kirimtat et al., 2016; Oxman, 2008; Turrin et al., 2011).

Por sua vez, a **abordagem computacional numa metodologia de design consiste em formular o específico** (Menges & Ahlquist, 2011). Inicia-se com o elementar e regras gerativas, e através do processamento das informações e da interação entre os elementos constituintes alcança-se **a derivação da forma com um sistema dinâmico**, tendo tais interações papel fulcral nesse processo (Menges & Ahlquist, 2011).

Assim, "a computação proporciona uma estrutura para negociar e influenciar a inter-relação entre conjuntos de dados sobre a informação, com a capacidade de gerar ordem, forma e estrutura complexas[28]" (Menges & Ahlquist, 2011, p. 13). Tais definições podem gerar **algoritmos**, que consistem em um conjunto de instruções ou regras matemáticas, que se fornecidas a um computador permitirão calcular uma resposta para um dado problema (Cambridge University Press & Assessment, n.d.-a). Acontece mediante um número finito de passos que envolve dedução, indução, abstração, generalização e estruturação lógica (Terzidis, 2004). Ainda segundo a autora:

> As estratégias algorítmicas utilizam a procura de padrões repetitivos, princípios universais, módulos intercambiáveis e ligações indutivas. O poder intelectual de um algoritmo reside na sua capacidade de inferir novos conhecimentos e de alargar certos limites do intelecto humano[29]. (Terzidis, 2004, p. 202)

A intenção dos projetos baseados em informação computacional é **revelar a simplicidade dentro da complexidade geométrica** (Shelden, 2002). O **Projeto Computacional** [PC] ou **Design Computacional** (em inglês, *computational design*)

---

[28] *"Computation provides a framework for negotiating and influencing the interrelation of these datasets on information, with the capacity to generate complex order, form, and structure."* (Menges & Ahlquist, 2012, p. 13)

[29] *"Algorithmic strategies utilize the search for repetitive patterns, universal principles, interchangeable modules, and inductive links. The intellectual power of an algorithm lies in its ability to infer new knowledge and to extend certain limits of the human intellect"* (Terzidis, 2004, p. 202).

para a arquitetura fundamenta a representação do desenho na sua lógica computacional ao invés dos aspectos geométricos (Caetano, Santos, et al., 2020).

O projeto computacional abriu espaço para que os profissionais da área de design, arquitetura e construção possam: delinear processos de construção coerentes com a prática contemporânea (Shelden, 2002), que busca racionalizar a forma, de modo exequível a menores custos (Pottmann et al., 2015); proporcionar variedade de soluções formais consoante o desempenho dos resultados (Oxman, 2006, 2008); desenvolver soluções com uma liberdade experimentação em tempo real (Burry, 2003; Kolarevic, 2003); ou ainda, projetos morfogenéticos (meta-design de projeto que opera sobre os parâmetros de código evolutivo em que há a emergência de soluções (Frazer, 1995; Soddu, 1995)); e promover a personalização em série (Pine, 1993).

Para Kolarevic (2003), os projetos orientados digitalmente caracterizam-se pela dinamicidade e imprevisibilidade, e promovem consistentes transformações das estruturas tridimensionais, as quais dão origem a novas possibilidades arquitetônicas. Diferentes estratégias de desenvolvimentos podem ser exploradas algoritmicamente através de: algoritmos evolutivos, redes neurais, inteligência artificial, *machine learning*, simulações físicas estruturais, análise ambiental (desempenho energético, térmico e de iluminação), análises de elementos finitos e autômato celular, por exemplo.

Leach (2014) destaca unidades de investigação que surgiram para a prática comercial de projetos computacionais em arquitetura, como: *Advanced Geometry Unit* da *Arup*, *CODE* da *Zaha Hadid Architects, Gehry Technologies spun off* da *Gehry Partners, e Specialist Modelling Group* na *Foster and Partners*

3.2.2 Modelos Metodológicos de Projetos Computacionais em Arquitetura

Os métodos de projetos computacionais para a arquitetura e design revelam **tendência para projetistas contemporâneos como idealizadores e controladores de processos gerativos ao invés de apenas criadores de forma**, pois as soluções resultam da combinação entre a imaginação do projetista e as capacidades gerativas das ferramentas computacionais (Caetano, Santos, et al., 2020; Leach, 2009; Oxman, 2006).

Para compreender a **evolução metodológica** dos métodos de desenvolvimento de projetos computacionais em arquitetura, Oxman (2006) propôs o desenvolvimento de projetos digitais (*digital design*, em inglês) em quatro fases principais, que são:

representação (representação e conteúdo formal); geração; avaliação, e desempenho. A partir dessas fases, a autora estruturou cinco modelos teóricos e conceituais para desenvolvimento de projetos, nomeadamente:

- **Modelo CAD**
- **Modelo Formação**
- **Modelos Gerativos**
- **Modelos de Desempenho**
- **Modelos Compostos**

Tais modelos serão explicados sucintamente a seguir.

3.2.2.1 Modelo CAD

Marcou um afastamento do processo de desenvolvimento projetual a partir do papel (Mitchell & McCullough, 1995; Tedeschi, 2018). Comumente utilizado para controlar representações gráficas de objetos digitais. Apresenta duas abordagens:

- **CAD descritivo** – a interação com representações formais bi e tridimensionais dão suporte para a produção de desenhos, modelagens geométricas ou renderização) ou para uma integração entre o virtual e o material (materialização do projeto por CNC, impressora 3D e corte a laser, por exemplo), ou vice e versa (digitalização 3D) (Oxman, 2006).

- **CAD preditivo de geração-avaliação** – integra processos analíticos aos modelos geométricos que permitem estimativas de custo, comportamentos estruturais, desempenho ambiental etc. (Oxman, 2006). A geração, representação e avaliação ocorrem por consequência, e não ao mesmo tempo. Caso haja a necessidade de alteração do modelo digital, será executada a retroalimentação de informações e novas avaliações através do projetista. Tal modelo proporciona troca colaborativa de informações entre a equipe multidisciplinar.

3.2.2.2 Modelo de Formação

Diferenciam-se dos modelos CAD, pelo processo de representação, pois **extrapolam as abstrações estáticas** de representações formais que vigoravam até então. O conceito de forma relaciona-se ao conceito de formação (Menges & Ahlquist, 2011; Oxman, 2006).

Para Leach (2009), o termo 'formação' está diretamente relacionado à 'informação' e ao 'desempenho'. Segundo Oxman (2006), através das técnicas digitais baseadas na informação é possível desenvolver **modificação digital interativa de processos de formação que podem proporcionar a emergência**. Como resultado, pode-se afirmar que os modelos de formação permitem o desenvolvimento de soluções complexas da forma; de sistemas capazes de gerar várias opções potenciais e a personalização dos atributos desejáveis.

Ainda segundo a autora, o projetista incorpora técnicas de formação gerativas, propensas à emergência de soluções, sob processos considerados não-determinísticos (como outrora desenvolvidos nos modelos CAD). Existem três subclassificações do modelo de formação, a saber:

- **Modelo de formação topológica** – A topologia estuda a estrutura relacional entre os objetos e não apenas a geometria em si (Oxman, 2006). O modelo de formação topológica, por sua vez, reconsidera a topologia e a geometria não-euclidiana como base formal para desenvolvimento do projeto a partir dos recursos digitais.

  As coordenadas estáticas são substituídas por construções dinâmicas computacionais, de modo a permitir a concepção de geometrias complexas através do uso da representação matemática NURBS [*Non Uniform Rational B-Splines]* (Oxman, 2006), que descrevem curvas controladas por pesos (Woodbury, 2010).

  > O que torna as curvas e superfícies NURBS particularmente atrativas é a sua capacidade de controlar facilmente a sua forma através da manipulação interativa dos pontos de controlo, pesos e nós [...]. Mas porque NURBS? A principal razão para a sua adopção generalizada é a capacidade do NURBS de construir uma vasta gama de formas geométricas, desde linhas retas e sólidos platónicos até superfícies altamente complexas.
  >
  > > Do ponto de vista computacional, o NURBS proporciona uma **representação de dados eficiente das formas geométricas, utilizando uma quantidade mínima de dados e relativamente**

> **poucos passos para o cálculo da forma, razão pela qual a maioria dos atuais programas de modelação digital utilizam NURBS** como método computacional para a construção de modelos de superfície complexos [...]30. (Kolarevic, 2003, p. 21, tradução livre, grifo nosso)

O modelo formação topológico amplia a complexidade formal, e se afasta metodologias determinísticas e estáticas dos modelos CAD. A exemplo, têm-se o projeto *Heydar Aliyev Center*, de *Zaha Hadid Architects*, que utilizou curvas NURBS para a sua concepção (Figura 38). Assim, as representações matemáticas NURBS estão presentes na arquitetura da vanguarda digital (Kolarevic, 2003).

Figura 38. Projeto Heydar Aliyev Center, de Zaha Hadid Architects.

Nota. Localizado no Azerbaijão (2007 a 2012). A geometria foi desenvolvida no *software* Maya® e teve a racionalização dos painéis através do *software* *Rhinoceros*® e *Grasshopper*®. Fonte: Zaha Hadid Architects, 2012).

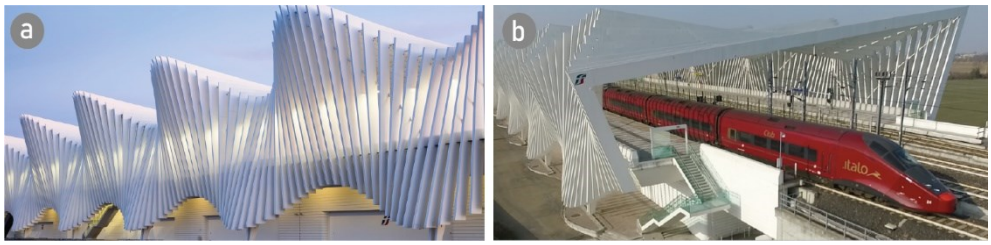
- **Modelo de formação de design associativo** – baseia-se no *parametric design* (em português design paramétrico) que explora a geometria associativa (Burry, 2003; Leach, 2014; Oxman, 2006; Woodbury, 2010). As relações de concepção paramétrica são explicitamente descritas, e **se estabelece interdependências entre os diversos objetos constituintes** (como parâmetros de controle do modelo gerador e componentes gerativos). Permite a liberdade de

[30] *"What makes NURBS curves and surfaces particularly appealing is their ability to easily control their shape by interactively manipulating the control points, weights, and knots [...]. But why NURBS? The main reason for their widespread adoption is the ability of NURBS to construct a broad range of geometric forms, from straight lines and Platonic solids to highly complex, sculpted surfaces. From a computational point of view, NURBS provide for an efficient data representation of geometric forms, using a minimum amount of data and relatively few steps for shape computation, which is why most of today's digital modelling programs rely on NURBS as a computational method for constructing complex surface models [...]"* (Kolarevic, 2013, p. 21, transcrição literal).

experimentação em tempo real (Burry, 2003) e de exploração de ideias, assim como reduz o tempo de retrabalho (Woodbury, 2010).

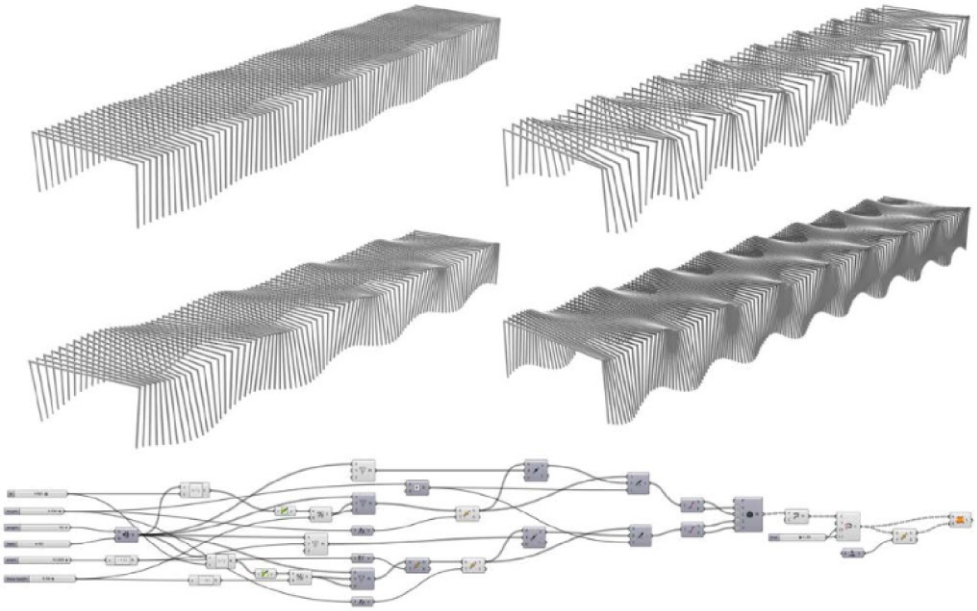
Uma vez manipulados os parâmetros, haverá transformações na geometria resultante (*outputs*) (Leach, 2014). Diferentes configurações gerarão múltiplas variações formais, e os resultados manterão relações topológicas com o modelo de formação (Oxman, 2006). Poderá ainda apresentar emergência de formação nas soluções. A exemplo, projeto *Stazione di Bologna e Reggio Emilia AV Mediopada*na (2002 -2014), na Itália, de autoria de Santiago Calatrava (Figura 39) e variações paramétricas inspiradas na estação em questão (Figura 40).

Figura 39. Projeto *Stazione di Bologna e Reggio Emilia AV Mediopadana*.



Fonte: a) Calatrava (2023); b) Mediopadana (2022).

Figura 40. Definição paramétrica inspirada na estação de Reggio Emilia.



Nota. Algoritmo paramétrico desenvolvido com o *Grasshopper*® e ArchiCAD®, permite diferentes soluções do modelo. A alteração das variáveis da estação de Reggio Emilia, com diferentes números e tamanhos de vigas, e diferentes amplitudes de onda sinusoidal. Fonte: Wahbeh, (2017, p. 1106).

Através da combinação entre o design paramétrico e ferramentas de avaliação do desempenho é possível criar opções de projeto com base nos critérios de desempenho.

- **Modelo de formação baseado no movimento –** compreende técnicas de modelagem para animação em movimento, utilizadas principalmente na indústria cinematográfica. Os desenhos podem se desenvolvidos por processos interativos de mudança paramétrica.

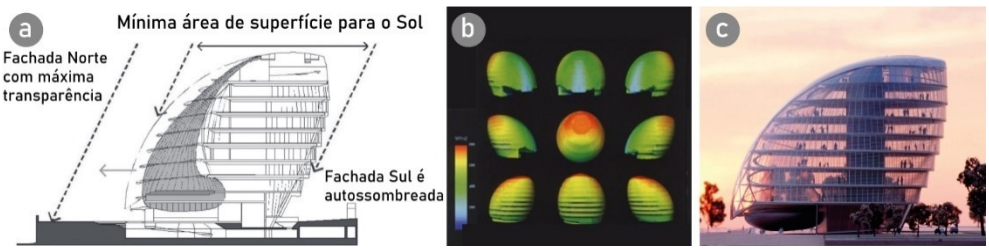
3.2.2.3 Modelo de Desempenho

De acordo com Oxman (2008), um recurso fundamental para o avanço do conhecimento no campo de projetos, que incorporam métodos de simulação aos processos de design, têm sido os sistemas de modelagem paramétrica. Tais sistemas reconsideram a topologia e a geometria não euclidiana como base metodológica do projeto computacional, e permitem explorar novas possibilidades geométricas.

Performance-based design corresponde à criação de forma resultante a partir do desempenho desejado (Oxman, 2006). Para Oxman (2006), os modelos de desempenho utilizam tecnologias digitais para criação de formas resultantes a partir da simulação de desempenho (sob processo pautado em parâmetros definidos para o problema em questão, *software* utilizado etc.). **Podem ser utilizados não apenas para a avaliação, mas sobretudo como instrumentos de transformação das ideias, dos conceitos e forma arquitetônica** (Garcia, 2015).

A exemplo, a forma incomum do ***City Hall***, concluído em 2002 em Londres. De autoria do escritório *Foster + Partners*, esse edifício foi projetado a fim de aprimorar o desempenho energético ao maximizar o sombreamento e minimizar a área de superfície exposta à luz solar direta (Kong et al., 2002; Whitehead, 2003). A forma do edifício é derivada de uma esfera. A análise de incidência solar anual permitiu replanejar a disposição dos envidraçados na fachada norte e confirmou o autossombreamento na sul.

Figura 41. A forma do City Hall (2002) em Londres responde ao percurso solar.



Nota. a) Diagrama da iluminação solar; b) Estudos solares anuais; c) Renderização. Fonte: a – b) adaptado de Whitehead (2003, pp. 121–122); c) Kong et al. (2002).

A edificação integra soluções passivas e ativas (com painéis fotovoltaicos para melhorar o desempenho, e utiliza um quarto da energia consumida por um edifício de escritório típico com ar-condicionado (Kong et al., 2002)).

Outro exemplo, foi proposto por por Bui et al. (2020) por meio de solução de **fachada adaptativa** que apresentou potencial para reduzir em até 29% o consumo de energia de um edifício no verão e até 22,7% no inverno, quando comparado com sistema de fachada estático.

Segundo Oxman (2006) existem as seguintes subclassificações para *performance-based design:*

- **Formação baseada em desempenho** – simulações digitais de forças externas são aplicadas na condução de um processo de criação da forma (Oxman, 2006). Tal modelo pode incluir parâmetros como: desempenho ambiental, perspectiva espacial, social, custo financeiro, cultural, ecológica e tecnológica.

  Ainda segundo a autora, as forças externas advindas da simulação podem ser aplicadas para influenciar o comportamento de um dado modelo, o qual poderá ser deformado e transformado. Oxman (2006) afirma a relevância dessa abordagem para a concepção de objetos dinâmicos, em que a **simulação dinâmica pode ser calculada considerando as influências ambientais como as forças motrizes**.

- **Modelos gerativos baseados em desempenho** – os dados das simulações de desempenho conduzem processos gerativos para gerar a forma. As forças externas que atuam no modelo podem ser consideradas como forças ambientais (como: cargas estruturais, acústica, transporte, local, programa, entre outros). Pode-se desenvolver sistemas que integrem geração de forma gramatical, avaliação de desempenho, análise comportamental e processos de otimização. Existem diferentes ferramentas para efetuar simulações, por exemplo: consumo energético (*EnergyPlus*[31]) (U.S. Department of Energy's et

[31] *EnergyPlus™* é um software para simulação de energia de edifícios que profissionais do setor da construção utilizam para analisar o consumo de energia, seja para aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação, assim como para o uso de água nas edificações (U.S. Department of Energy's et al., 2023). De acordo com Kirimtat (2016), é a ferramenta de simulação mais utilizada. Ainda segundo os autores, esse software permite construir rapidamente diferentes soluções, pode calcular diferentes disposições de janelas, manipular a luz do dia, criar modelos de conforto térmico, a transferência de calor e massa pode ser integrada.

al., 2023); programa de análise energética de edificações (DOE-2[32]) (Kirimtat et al., 2016); análise climática *Ladybug*[33] (Ladybug Tools LLC, 2022) e *Ecotect*[34] (Autodesk, 2016); simulação de iluminação a exemplo *Radiance*[35](Fritz & Mcneil, 2019) e *Honeybee*[36] (Ladybug Tools LLC, 2022); análise estrutural como *Karamba3D*[37] (McNeel Europe, 2023); *Kangaroo Physics* [38] (McNeel Europe, 2023) e *Robot Structural Analysis*[39](Autodesk, 2023), entre outros.

3.2.2.4 Modelo de Projeto Gerativo

O modelo **gerativo disponibiliza mecanismos computacionais para processos de criação formalizados** (Oxman, 2006), sendo possível gerar famílias ou gerações inteiras de soluções potenciais (Martino, 2015). Como ponto de partida, o projetista

---

[32] DOE-2 é um programa gratuito de análise energética de edifício, que estima o desempenho energético e o custo do ciclo de vida da operação (Kirimtat, 2016). É necessário fornecer a planta e orientação do edifício, assim como a localização geográfica, o contexto urbano, os materiais de construção, os horários de funcionamento, os sistemas de condicionamento e o esquema de tarifas de serviços públicos, os custos dos componentes do edifício, juntamente com os dados meteorológicos (Kirimtat, 2016).

[33] *Plug-in* integrado ao *Grasshopper®* e *Rhino 7.0®*. Maiores detalhes na seção 3.2.4.

[34] *Ecotect* – ferramenta da *Autodesk* integrada ao software Revit. Permite realizar: visualizar dados climáticos; análise solar; geometria solar; estudo de Sol e sombra; análises de iluminação natural e elétrica; desempenho térmico e análise de energia. Fonte: Autodesk (2016). É possível identificar as emissões de carbono, o consumo de água, a acústica, o custo, a radiação solar e os reflexos através desta ferramenta (Kirimtat et al., 2016).

[35]*Radiance* foi criado Building *Technologies Pro-gram in the Environmental Energy Technologies Division ofLawrence Berkeley National Laboratory* em *Berkeley, California* (Kirimtat et al., 2016). É um conjunto de programas para visualização e análise de iluminação em projetos, com iluminação natural ou artificial. Utiliza avançado método Monte Carlo de rastreamento de raios solares com otimizações para geometrias de edifícios complexas e sistemas de envidraçamento. Fonte: Fritz & Mcneil (2019).

[36] *Plug-in* integrado ao *Grasshopper®* e *Rhino 7.0®*. Maiores detalhes na seção 3.2.4.

[37]*Karamba 3D* – ferramenta de engenharia que permite realizar *Finite Element Analysis* [FEA], com agilidade e precisão. Utilizado nas fases iniciais de projeto. Fonte: McNeel Europe (2023).

[38]*Kangaroo Physics* – é um *plug-in* integrado ao *Grasshopper®* de simulação de física que pode ser usado para simular interativamente superfícies e estruturas leves, na busca por formas, otimização e resolução de restrições. Fonte: McNeel Europe (2023).

[39] *Robot Structural Analysis Professional* – software da Autodesk para análise de carga estrutural integrados ao BIM para trocar dados com o Revit. Pode ajudá-lo a criar designs mais resistentes e viáveis. Fonte: Autodesk (2023).

desenvolve um modelo interativo, que fornece controle e opções de escolha para se conduzir a seleção e resultados desejadas.

As regras pré-estabelecidas no modelo influenciarão na criação da forma, a partir da interação do projetista com estas (Oxman, 2006). Assim, o sistema gerativo atua sob método em que o projetista não interage diretamente com materiais e produtos, mas sim por meio do **sistema baseado em definições abstratas capazes de produzir produtos de design** (Fischer & Herr, 2001), **sendo possível proporcionar a emergência de soluções formais** (Hensel et al., 2004; Oxman, 2006).

> A emergência é simultaneamente uma explicação do modo como os sistemas naturais evoluíram e se mantiveram, como um conjunto de modelos e processos para a criação de sistemas artificiais concebidos para produzir formas e comportamentos complexos e, talvez, até mesmo uma inteligência real[40]. (Hensel et al., 2004, p. 7, tradução livre)

Duas abordagens de relevância no campo dos modelos gerativos são:

- **Gramática da forma** (em inglês *shape grammar*) – são expressões matemáticas para modelos computacionais que influenciam o processo de concepção da forma, a partir de regras pré-estabelecidas (Oxman, 2006). Por exemplo, George Stiny e Gips (1971) criaram uma gramática para servir de sistema de geração de formas para a pintura e a escultura. Ao invés de projetar diretamente sua pintura ou escultura, o artista projetou regras de composição, a partir da simplicidade, sendo então capaz de gerar diferentes combinações e criar uma variedade de obras de arte, todas elas fiéis às especificações do projeto e difíceis de serem projetadas por outros meios.

  Uma característica fundamental das gramáticas é a possibilidade de serem livremente decompostas e recompostas pelo projetista (Knight, 1989). As gramáticas da forma não são consideradas determinísticas, pois pode-se aplicar as regras de diferentes maneiras, de modo a obter diferentes resultados (Knight, 1989).

---

[40] "*Emergence is both an explanation of how natural systems have evolved and maintained themselves, and a set of models and processes for the creation of artificial systems that are designed to produce forms and complex behaviour, and perhaps even real intelligence*" (Hensel et al., 2004, p. 7).

Para Beirão e Duarte (2018), a gramática da forma pode ser utilizada para codificar um estilo de um designer particular ou um tipo específico de artefato. Contudo, essas gramáticas não codificam o universo das linguagens, podendo não contemplar aspectos idiossincráticos de um designer específico ou de movimentos de design recorrentes.

Trabalhos como o de Beirão e Duarte (2018) indicam a aplicação do conceito *Grammar Generic* a domínios do design urbano. Já Castro e Duarte (2013) e Garcia (2015) aplicaram esse conhecimento ao domínio de desenvolvimento de produtos. Vazquez (2018) propôs gramática para fachadas de alvenaria em tela de tijolos e otimizou o desempenho de iluminação natural para as soluções.

- **Modelos evolutivos** – A emergência de forma é considerada o resultado de um processo evolutivo (Oxman, 2006). **Algoritmo Genético** (termo cunhado por **Jonh Holland,** em 1992) é um exemplo desse modelo que se baseia na teoria da evolução natural, descrita por Darwin. Tal abordagem enfatiza que os melhores sobrevivem quando um experimento é submetido a um processo de seleção natural e que: "não há uma solução única, não há solução ótima, mas há um experimento contínuo[41]" (Frazer, 2002, p. 254, tradução livre).

  Os critérios de seleção devem ser cuidadosamente definidos (Frazer, 1995). "A evolução da forma genética baseia-se em regras que definem o 'código genético' para uma extensa família de objetos semelhantes [42]" (Oxman, 2006, p. 256, tradução livre). As variações são alcançadas a partir do cruzamento e mutação, de modo interativo que influencia diretamente na alteração e criação da forma sob processo evolutivo (Oxman, 2006).

  Caldas (2008) avaliou a eficiência energética de soluções arquitetônicas, por meio de algoritmo genético com o *software* de simulação de energia de construção DOE2.1E. Um caminho para desenvolvimentos sob a abordagem algoritmo genético de simples execução é através do *plug-in* **Galapagos**, integrado ao *software Rhinoceros*® e *plug-in Grasshopper*® (Martino, 2015). A exemplo, tem-se o testudo desenvolvido por Fang et al. (2017) para avaliar o desempenho de iluminação natural e energético.

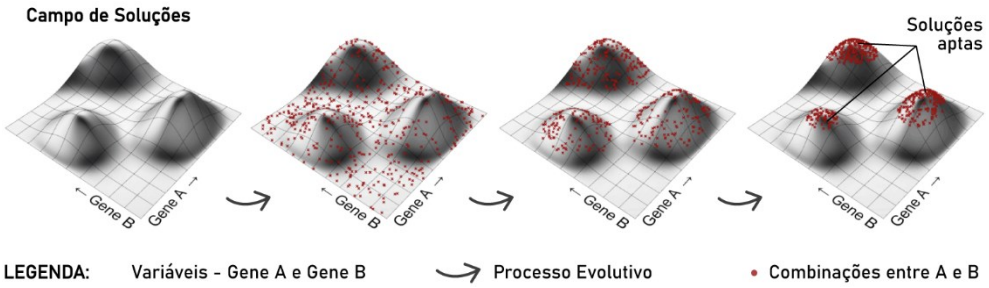
---

[41] *"There is no one solution, there is no optimal solution, but there is continuous experiment"* (Frazer, 2002, p. 254, transcrição literal).

[42] *"[...] genetic form evolution is based on rules defining the 'genetic code' for a large family of similar objects"* (Oxman, 2006, p. 256).

Na computação evolutiva os '*Genes*' correspondem às variáveis que expressa intervalo de variação, enquanto os '*Fitness*' compreendem os critérios de avaliação (*Fitness Function*), que devem ser flexíveis para permitir a variação de resultados (Martino, 2015; Rutten, 2011). A Figura 42 tenta esclarecer didaticamente o processo de otimização, por meio da procura por soluções mais aptas em relação aos *Fitness* (expressas no pico das montanhas) (Rutten, 2011).

Figura 42. Abordagem de processo de otimização.



Fonte: adaptado de Rutten (2011).

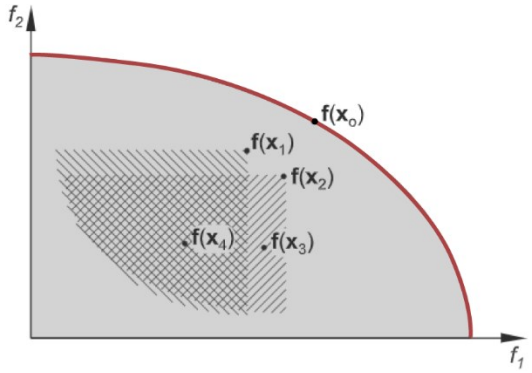
Os **Algoritmos Evolutivos** se inspiram na evolução biológica e correspondem a um conjunto de métodos para otimização, aprendizagem e modelação de dados (Bentley, 1999) ou emergência de soluções formais inusitadas (Gero, 1996; Martino, 2015). A morfogênese (em inglês *design of morphogenesis*) corresponde a um meta-design de projeto que pode gerar muitos cenários paralelos possíveis baseados na emergência.

Dentre a diversidade de opções, decorrente das iterações algorítmicas, identificam-se soluções aptas que atendem aos **multiobjetivos** (Floreano et al., 2008), aliando desempenho à criatividade. Por multiobjetivo entende-se busca de vários objetivos ao mesmo tempo, produzindo uma gama de soluções otimizadas entre os extremos de cada objetivo.

O algoritmo evolutivo é normalmente composto por objetivos que podem ser heterogêneos e contraditórios (Floreano et al., 2008). Uma abordagem à gestão de objetivos múltiplos baseia-se no conceito de **Dominância de Pareto** (Figura 43). Dadas duas opções x1 e x2, diz-se que uma domina a outra se for pelo menos tão boa em relação a todas as funções objetivos e estritamente melhor em relação a pelo menos um objetivo (Floreano et al., 2008). Assim, a solução dominante pode ser considerada mais adequada do que a solução dominada.

O conjunto ótimo de pareto é designado por **Fronteira de Pareto**, e corresponde ao conjunto de opções que não são dominadas por nenhuma outra alternativa no espaço de soluções viáveis. A fronteira de pareto está representada na Figura 43 pela curva vermelha, que gera um limite no gráfico. Em fase posterior do projeto, o projetista seleciona opção dentre as produzidas pelo algoritmo evolutivo.

Figura 43. Dominância de Pareto.



Nota. Os eixos representam as duas funções objetivo f1e f2. Para esse caso, quanto maiores os valores, melhor será o desempenho. A função vetorial f(x)=(f1(x), f2(x)) é referente aos objetivos. Na figura, as soluções x1 e x2 dominam ambas x4. Contudo, x1 não domina x3, enquanto x2 domina. A curva vermelha representa a fronteira de pareto e é composta pelos valores f(x) das soluções que, tal como x0, não são dominadas por nenhum outro elemento no espaço de soluções viáveis. Fonte: adaptado de Floreano et al. (2008, p. 89).

Integrados ao *Grasshopper®*, os *plug-ins* ***Octopus***[43] e ***Wallacei***[44] proporcionam abordagem para otimização evolutiva por multiobjetivo, e utilizam a fronteira de pareto. O trabalho de Vazquez (2018) aliou estudos de gramática da forma sobre muros de alvenaria em Paraguai a processos de otimização por algoritmo evolutivo que utilizaram o *plug-in* *Octopus*.

[43] *Octopus* foi originalmente desenvolvido para processo de otimização evolutiva multiobjetivo. Funciona de forma semelhante ao *Galapagos*, mas introduz a fronteira de pareto para objetivos múltiplos.

[44] *Wallacei* é um mecanismo de otimização multiobjetivo evolutivo que permite aos usuários executar simulações evolutivas em *Grasshopper®* 3D através da utilização de ferramentas analíticas. Wallacei também fornece aos usuários a capacidade de selecionar, reconstruir e produzir qualquer fenótipo da população depois de completar sua simulação.

3.2.2.5 Modelos Compostos Integrados

Os modelos compostos integrados correspondem a desenvolvimentos que visam integrar em rede processos advindos da formação, geração, avaliação e desempenho (Oxman, 2006). Segundo a autora, idealmente, uma solução nessa tipologia de modelo proporcionará interação com qualquer modelo tipologia de atividade, mediante dados e o fluxo de informação a partir de múltiplas direções.

Turrin et al. (2011) apresentam estudos que combinam o modelo de formação associativo (design paramétrico) ao modelo de desempenho (algoritmos genéticos) para alcançar um processo orientado ao desempenho desde a fase conceitual do projeto. O estudo de caso explorou a geração de ampla variedade de soluções geométricas, assim como avaliação de desempenho estrutural e de iluminação. Por sua vez, Kirimtat et al. (2019) propuseram dispositivo de sombreamento energeticamente eficiente por modelagem paramétrica e otimização multiobjetivo. Obtiveram como resultado uma redução do consumo anual de 14% de energia, mantendo a disponibilidade de luz do dia acima de 50%.

3.2.3 Síntese Conceitos

No que tange às terminologias, o campo do PC envolve distintas nomenclaturas, como elucidado na seção anterior: Design Paramétrico [DP], Design Gerativo [DG], Design Algorítmico [DA], Design Baseado em Desempenho, Design Digital, Design Evolutivo[45].

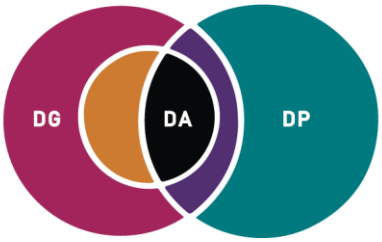
Para Leach (2014), as técnicas paramétricas baseiam-se na manipulação da forma, enquanto as técnicas algorítmicas baseiam-se na utilização de código. Contudo, ainda segundo o autor, as técnicas algorítmicas são frequentemente utilizadas em associação com as técnicas paramétricas. Assim, há dificuldade em estabelecer definições consensuais entre as distintas nomenclaturas, havendo sobreposições e ambiguidades entre elas (Caetano, Santos, et al., 2020).

A fim de dirimir as imprecisões e esclarecer as distinções entre os três primeiros termos (DP, DG, DA) serão adotadas as definições propostas por Caetano, Santos, et al. (2020). As definições são fruto da análise das publicações por palavras-chave relacionadas ao PC, entre 1978 e 2018. Os três termos supracitados representam 71% da ocorrência total das publicações sobre PC para esse período. Cada um dos termos possui sobreposições conceituais entre si, que são a principal causa do seu

[45] Em inglês: *Parametric Design, Generative Design, Algorithmic Design, Performance-based Design, Digital Design, and Evolutionary Design.*

uso inconsistente. A Figura 44 aponta para DA como um subconjunto de DG e com interseção com a área do DP.

Figura 44. Termos em relação ao Projeto Computacional.



Fonte: adaptado de Caetano, Santos, et al. (2020, p. 295).

A seguir segue definição proposta por Caetano, Santos, et al. (2020):

- **Design Paramétrico** é uma abordagem de projeto baseada no uso de parâmetros, que controlam as dimensões, proporções e outras características do modelo, para descrever projetos. Não necessariamente utiliza definição algorítmica (como um projeto em BIM para o detalhamento das dimensões de uma dada parede);

- **Design Gerativo** ou **Design Generativo** requer o uso explícito de um algoritmo para gerar o projeto. É uma abordagem mais autônoma do que o DP. Pois pode envolver processos de gramática da forma e evolutivos (esclarecidos no item 3.2.2). Mas não se restringe a essa abordagem, visto que o sistema proposto pode executar instruções até que o critério de parada seja satisfeito. Assim, os métodos baseados em DG podem gerar saídas complexas mesmo a partir de descrições algorítmicas simples.

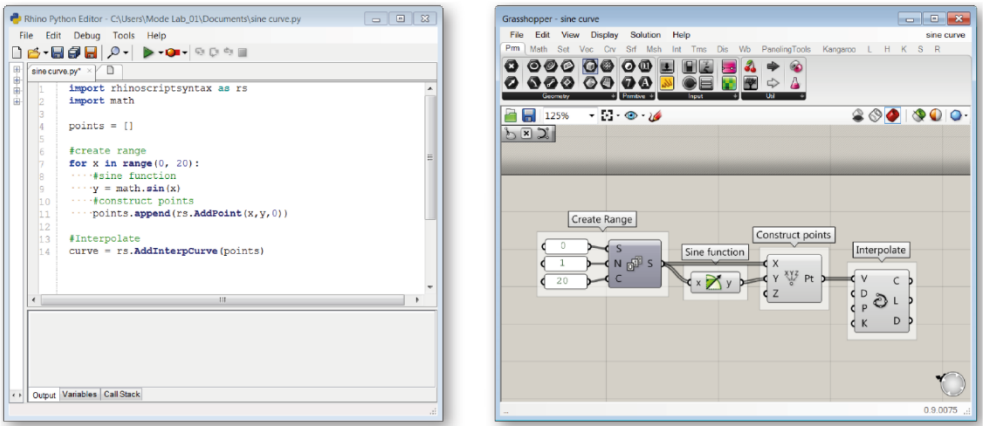
- **Design Algorítmico** é uma abordagem DG caracterizada por uma correlação identificável entre o algoritmo e seu resultado. Ou seja, é possível rastrear o processo de desenvolvimento da solução, com consistentes resultados.

3.2.4 *Softwares* e Ferramentas de Desenvolvimento

Rhinoceros*® 3D**, também conhecido como ***Rhino®, é um *software* de modelagem, desenvolvido Robert McNeel & Associates (2023), que possui a capacidade de criar modelos 3D, complexos e com precisão, mediante superfícies NURBS, malhas e modelos sólidos. É utilizado em diversos setores, como arquitetura, design industrial, engenharia, fabricação e construção.

No que tange às ferramentas para desenvolvimento de algoritmos computacionais para a arquitetura, estes podem ser desenvolvidos com linguagem de programação: **textual** (através da escrita de código em linguagens como C+, Java ou Python) ou **visual** (por representações gráficas se desenvolve o código) (Figura 45).

Figura 45. Algoritmo para curva senoidal em Python e em *Grasshopper*®.

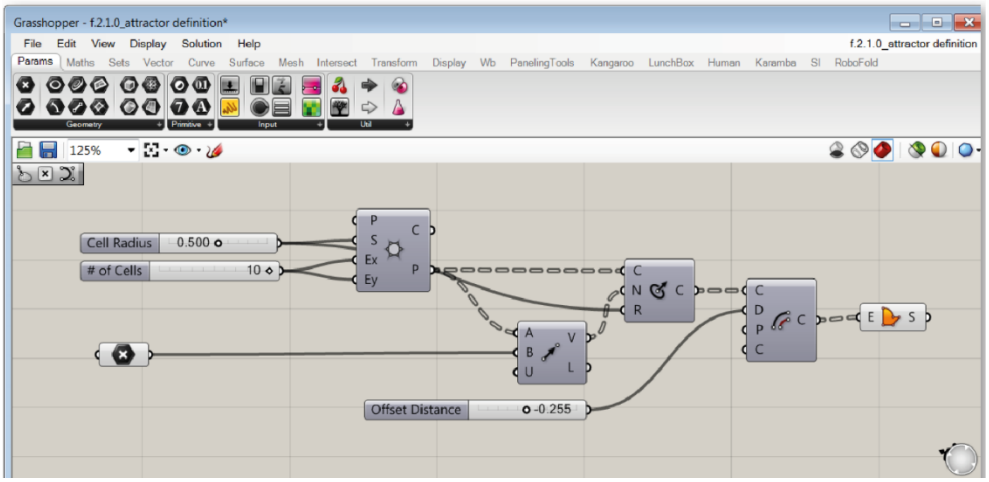


Fonte: Mobe Lab (2015).

Na arquitetura, a **linguagem de programação visual** está a ganhar relevância, porque pode facilitar o processo de criação algorítmica, de modo mais acessível, sobretudo para aqueles que não têm experiência em programação textual. O ***Grasshopper***® e o ***Dynamo***®, por exemplo, são duas ferramentas que utilizam interface visual gráfica, e estão integrados em *softwares* de modelagem 3D, como o ***Rhino***® e o ***Revit***®, respectivamente. ***Grasshopper***®, por sua vez, é um **editor de programação visual**, integrado ao *Rhino*® como um *plug-in*. Foi desenvolvido por **David Rutten** na *Robert McNeel & Associates*.

O funcionamento conjunto entre o *Rhinoceros*® e *Grasshopper*® permite gerar: um controle paramétrico preciso sobre as geometrias associativas dinâmicas; e a capacidade de explorar fluxos de trabalho de design gerativos e uma plataforma para desenvolver lógica de programação complexas (Mobe Lab, 2015). O projetista cria uma rede de **componentes interconectados** (Figura 46), capaz criar soluções de projeto computacional **com ampla variedade de formação e desempenho**.

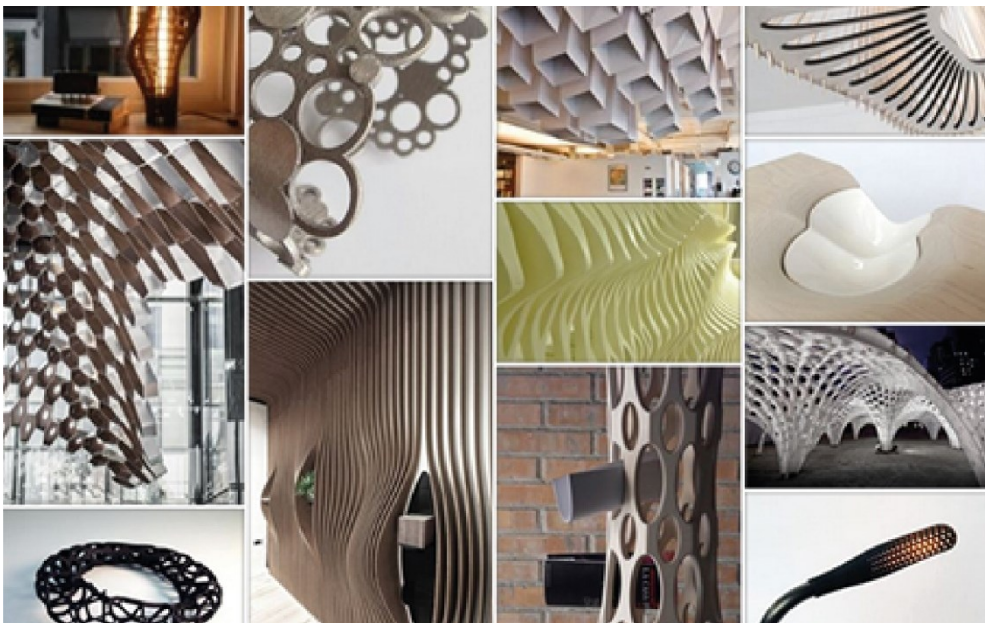
Figura 46. Definição no *Grasshopper®*, composta por componentes conectados.



Fonte: Mobe Lab (2015).

A Figura 47 apresenta soluções complexas que emergem de iterações algorítmicas simples desenvolvidas através do *Grasshopper®*.

Figura 47. Soluções desenvolvidas com o uso do *Grasshopper®*.



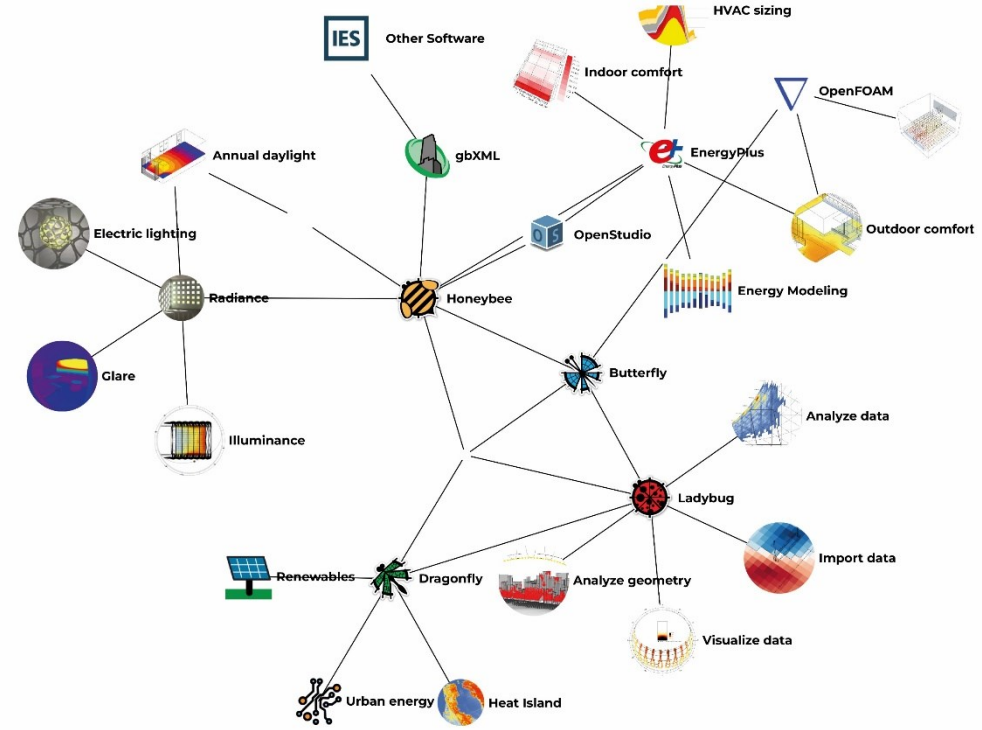
Fonte: Mobe Lab (2015).

3.2.4.1 Análise climática com Ladybug Tools

Desenvolvimentos avançados através do uso do ***Rhino*® + *Grasshopper*® + um rico ecossistema de *plug-ins***[46] podem possibilitar análise e simulações climáticas.

O ***Ladybug Tools*** (Figura 48) é uma plataforma de código aberto que utiliza as linguagens de programação *Python* e *Rhino*®*/Grasshopper*®, e proporcionam um conjunto de ferramentas para a **análise climática** (Ladybug Tools LLC, 2022). Compreende os *plug-ins Ladybug, Honeybee, Dragonfly* **e** *Butterfly*.

Figura 48. Ladybug Tools



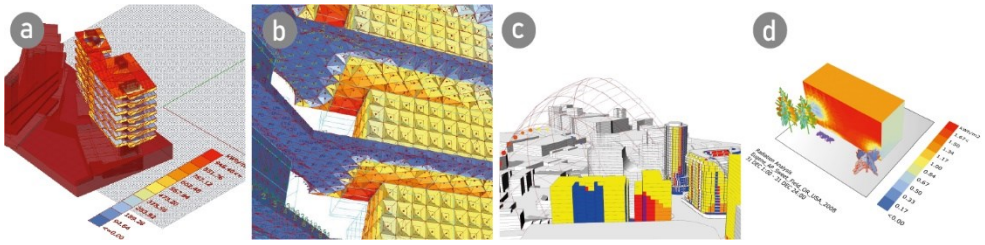
Fonte: Ladybug Tools LLC (2022).

- ***Ladybug*** importa arquivo climático no formato .EPW para realizar visualizações e análises detalhadas de **dados climáticos** no *Grasshopper*® de uma dada localidade. Fornece uma variedade de **gráficos interativos que apoiam a tomada de decisões**, seja nos estágios iniciais ou para a avaliação dos desenvolvimentos (Ladybug Tools LLC, 2022).

  Os gráficos 2D e 3D incluem: geometria solar, rosa-dos-ventos, gráfico psicométrico, etc., bem como estudos de geometria como análise de radiação solar e estudos de sombra (Figura 49).

[46] Rico ecossistema de *plug-ins* disponível em: McNeel Europe (2023).

Figura 49. Exemplos com o uso das ferramentas de *Ladybug*.



Nota. a) análise de radiação solar para processos evolutivos; b) níveis de exposição da radiação solar em uma malha geométrica; c) análise de radiação por hora para um projeto de Sydney; d) análise de radiação com vegetação. Fonte: adaptado de H. Andrade (2021).

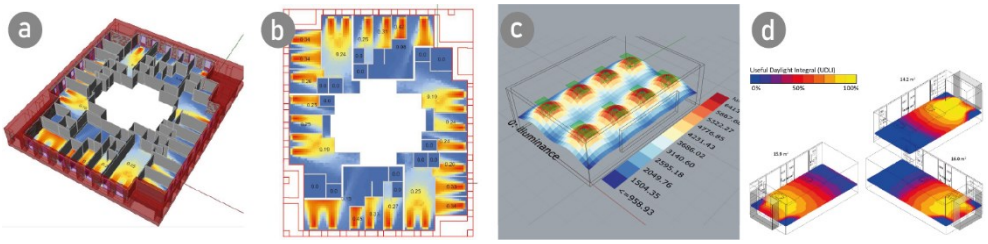
A integração do *Ladybug* com ambientes de programação visual permite feedback instantâneo sobre modificações de projeto e elevado grau de personalização (Ladybug Tools LLC, 2022).

- ***Honeybee*** conecta o *Grasshopper® 3D* a mecanismos de simulação validados, que contemplam o ***Radiance*** (para iluminação natural e simulação de brilho) e ***EnergyPlus/OpenStudio***[47] (para eficiência energética da construção, dimensionamento HVAC, conforto térmico, etc.) (Figura 50) (Ladybug Tools LLC, 2022; National Laboratory of the U.S. Department of Energy, 2023).

  Honeybee tende a ser uma ferramenta para estágios mais avançados (Ladybug Tools LLC, 2022), onde a modelagem termodinâmica é produzida seguindo uma gama maior de *inputs*, como a geometria, os materiais e todas as fontes de luz.

[47] *OpenStudio®* é uma plataforma de modelagem energética de edifícios que suporta a criação de modelos detalhados em 3D e análises de desempenho energético através do *EnergyPlus* e da análise avançada de iluminação natural com o *Radiance*. Além disso, é uma ferramenta de código aberto, com multiplataforma (Windows, Mac e Linux) com o objetivo de incentivar o desenvolvimento coletivo, extensão e adoção pelo setor privado. Fonte: OpenStudio® (2023).

Figura 50. Exemplos com o uso das ferramentas de *Honeybee*.



Nota. a) análise da média de iluminação diária; b) cálculo de iluminação artificial; c) estudos de iluminação anual. Fonte: adaptado de H. Andrade (2021).

- ***Dragonfly*** permite a criação e manipulação de modelos em escala de distrito integrados ao ***EnergyPlus*** e ***Radiance***. Para a simulação de energia executa-se o URBANopt e de infraestrutura elétrica o OpenDSS. Para a otimização de energias renováveis utiliza-se o REopt e para a modelagem de ilha de calor urbana o *Urban Weather Generator* [UWG] (Ladybug Tools LLC, 2022).

- ***Butterfly*** conecta o *Grasshopper®/Dynamo®* ao mecanismo *OpenFOAM*, que pode ser usado para executar simulações avançadas de *Computational Fluid Dynamics [CFD]* (Ladybug Tools LLC, 2022). Essas incluem simulações ao ar livre para modelar padrões de vento urbanos, simulações orientadas por flutuabilidade interna para averiguar o conforto térmico e a eficácia da ventilação. Atualmente, o *OpenFOAM* admite simulações para turbulência.

  As simulações computacionais por CFD envolvem modelos matemáticos para investigar o comportamento de fluidos (líquidos e gases) em diferentes situações complexas. Por exemplo o estudo do fluxo ao redor de um objeto em movimento ou ainda a interação entre fluidos e estruturas. A CFD é amplamente utilizada em diferentes setores da engenharia, como aeroespacial, automotivo, energia, naval, processos industriais, entre outros, para otimizar o projeto e a operação de sistemas que envolvem o fluxo de fluidos. Os resultados da CFD são usados para melhorar o desempenho, a eficiência e a segurança de diversos produtos e processos.

As *Ladybug Tools* são amplamente utilizadas por profissionais do setor da construção para análises de eficiência energética e para aprimorar o conforto térmico das edificações.

3.2.5 Fabricação Digital

Por volta dos anos 50, pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* [MIT] conectaram um computador a uma fresadora, de modo a criar a primeira máquina de controle numérico, conhecida por *Computer Numeric Control* [CNC] (Gershenfeld, 2012).

Frank Gehry foi um dos precursores na concepção e produção de projetos para a arquitetura por CNC, na década de 90. Seu processo se baseou na prototipagem física manual como principal ferramenta para explorar a forma para além das restrições da lógica euclidiana. Em um segundo momento, reconstruiu digitalmente através do Sistema CAD/CAM. CAM significa *Computer-Aided Manufacturing* (em português, manufatura assistida por computador). O processo desenvolvido por Gehry permitiu criar estratégias de construção (conjunto de regras e operações para lidar com os materiais), de modo a viabilizar a exequibilidade dos projetos em escala real (Shelden, 2002) (Figura 51). Na ocasião, o *software* utilizado foi o CATIA®, cujo uso vigorava na indústria de aviação e militar.

Figura 51. Obras de Frank Gehry.

Nota. a) *Fish Sculpture*, para a Vila Olímpica, confeccionado em 1992 em Barcelona-ES (escultura de 50 metros de comprimento de malha de aço inoxidável, fixado em uma estrutura de aço estrutural). Fonte: Shelden (2002, p. 27); b) *Guggenheim Museum Bilbao*, inaugurado em 1997, em Bilbao - ES. Fonte: Guggenheim Museum Bilbao (1997).

O projeto *Fish Sculpture*, para a Vila Olímpica, em Barcelona - ES (em 1992), é composto por superfícies difíceis de serem racionalizadas por processos construtivos convencionais. A partir da experiência de Gehry, as tecnologias de fabricação digital CNC, desenvolvidas para atender as indústrias automotiva, aeroespacial e de animação de *Hollywood*, foram integradas ao processo de construção e permitiram a exatidão entre o que fora planejado e o produzido, de modo a contribuir para ampliação do potencial criativo e de prototipação (Kolarevic, 2003; Shelden, 2002).

Por meio do avanço nas tecnologias CAD/CAM, foi possível **revolucionar a complexidade geométrica** para além dos limites de variedade formal tratados pelos métodos geométricos tradicionais (Pottmann et al., 2007, 2015). Novas dimensões

para práticas de projetos em arquitetura foram concebidas no início dos anos 90, que possibilitou a produção de maquetes em escala; protótipos em tamanho real; e peças finais para a construção civil (Mitchell & McCullough, 1995).

A modelação digital passou a ser utilizada como instrução a processos de controle numérico para a prototipagem rápida (Mitchell & McCullough, 1995), pois até recentemente, "[...] a produção e construção de formas muito complexas [...] eram muito difíceis e caras de projetar, produzir e montar usando tecnologias de construção tradicionais[48]" (Mitchell & McCullough, 1995, p. 418 tradução livre).

Para Pottmann et al. (2015), construções que envolvem geometrias complexas tornam-se edifícios de referência na atualidade (Figura 52). Contudo, não basta ampliar a complexidade da forma, sem **delinear processos de construção coerentes com a prática contemporânea** (Shelden, 2002).

Figura 52. Metropol Parasol (204 - 2011), em Sevilha-ES.

Nota. Projeto paramétrico desenvolvido por Jürgen Mayer H. Architects, composto por 3.400 peças de madeira laminada confeccionadas através de processos de fabricação digital. Fonte: (J.Mayer.H architects, 2023).

O conceito de *mass customization* (personalização em série), criado por **Stanley Davis**, em 1987, no seu livro '*Future Perfect*', foi definido por Pine (1993, p. 588): "como um processo através do qual as empresas, em diferentes setores, aplicam tecnologia e métodos de gestão para fornecer variedade e personalização de produtos por meio da flexibilidade e da rápida capacidade de resposta[49]". A diferença entre os métodos de produção em massa (da indústria em escala) e os

[48] *"It allows fabrication of complex shapes that would be very difficult or impossible to describe and produce in traditional ways"* (Mitchell & McCullough, 1995, p. 418).

[49] *"[...] as a process by which firms, in different industries, apply technology and management methods to pro- vide product variety and customization through flexibility and quick responsiveness"* (Pine, 1993, p. 588).

métodos baseados em modelos digitais é "que esses últimos não se destinam a produzir cópias idênticas de um mesmo produto. Pelo contrário, constituem-se em sistemas suficientemente adaptáveis para produzir um grande espectro de formas diferentes" (Celani & Pupo, 2008, p. 31).

Nesse sentido, os avanços do projeto computacional possibilitaram a democratização da fabricação de produtos sendo possível que qualquer indivíduo recorra aos equipamentos CNC para a prototipagem. E em seguida, possam colocar em movimento linhas de montagem na China, dispondo apenas de: um laptop, uma boa ideia e expertise (C. Anderson, 2010). As barreiras produtivas não são mais intransponíveis e podem permitir o desenvolvimento de soluções personalizáveis e novas oportunidades para os empreendedores interessados no movimento *maker* (adeptos ao DIY - "*do it yourself*", faça você mesmo), que se insere no universo da fabricação digital.

O conceito de **Fabricação Digital** (*Digital Fabrication,* em inglês) corresponde à convergência entre o uso de um equipamento CNC e a execução de elementos construtivos que serão encaminhados diretamente à obra. Atualmente, tal termo vem sendo utilizado de modo genérico para descrever o uso das tecnologias CNC, de modo a possibilitar a confecção de objetos, peças e sistemas personalizáveis (Gershenfeld, 2012). As tecnologias desses equipamentos podem ser classificadas como: a) **subtrativas** (caracterizado pelo desbaste do material, como fresa CNC, cortadora a laser, jato de água etc.); b) **aditivas** (sobreposição de camada de um dado material, até formar um produto tridimensional. A exemplo, as impressoras 3D); e c) **formativas** (conformação de material) (Pupo, 2009). Os braços robóticos vêm sendo amplamente utilizados na arquitetura, por ser versátil na execução de tarefas (seja, subtrativo, aditivo ou formativo), com elevada precisão. Por haver um menor desperdício de materiais, o sistema aditivo e o formativo vêm sendo considerado abordagens mais sustentáveis.

Os métodos de fabricação aditivo apresentam vantagens como uma grande liberdade e complexidade da forma, escala e utilização de materiais (Sarakinioti et al., 2018). Existem diferentes tipologias de processos aditivos, como: modelagem por deposição de filamentos fundidos, estereolitografia, sinterização seletiva a laser, impressora de pó, manufatura de objetos em lâminas e impressão por jato de tinta (Pupo, 2009). Conhecer a potencialidade dos equipamentos de fabricação digital e seu *modus operandi* "permite que os arquitetos [e designers] projetem especificamente para as capacidades dessas máquinas[50]" (Kolarevic, 2003, p. 50).

[50] *"[...] fabrication equipment enables architects to design specifically for the capabilities of those machines"* (Kolarevic, 2003, p. 50).

Na atualidade tais recursos vêm sendo utilizados para projetar formas orgânicas, complexas e personalizáveis para cada projeto (Pottmann et al., 2015).

3.3 Fachadas Adaptativas ou Cinéticas

3.3.1 Conceito e Projetos de Referência

São inúmeras as terminologias, com poucas distinções entre si, sobre a capacidade adaptativa das fachadas, como: arquitetura cinética, edifícios adaptáveis, edifícios dinâmicos, edifícios interativos, fachadas inteligentes, sistema de automação predial, etc. Segundo Achten (2014), não há um consenso entre as distintas nomenclaturas. As distinções são influenciadas por um conjunto de tecnologia e pelos avanços tecnológicos. A Tabela 7 exibe síntese das terminologias mais comumente utilizadas na arquitetura contemporânea segundo Al-obaidi et al. (2017).

Tabela 7. Síntese de terminologia na arquitetura contemporânea.

TERMINOLOGIA	TRADUÇÃO	DESCRIÇÃO
ADAPTIVE	Adaptativo	Corresponde à capacidade de um sistema de se ajustar por si só em relação a um ambiente em mudança (Al-obaidi et al., 2017). Um sistema adaptativo, como a construção de peles, tem a capacidade de adaptar as características, comportamento ou configuração do ambiente externo (Dewidar et al., 2013, como citado em Al-obaidi et al., 2017).
CONVERTIBLE	Conversível	O termo está sobretudo associado à mobilidade dos edifícios. Assemelha-se aos envelopes dos edifícios, a forma de mudança mais frequente a curto prazo, dependendo das necessidades e funções (Otto, 1971, como citado em Al-obaidi et al., 2017).
DYNAMICS	Dinâmico	O estudo do movimento, que ocorre devido a forças aplicadas a um objeto (Al-obaidi et al., 2017) rígido (Lienhard, 2014). O termo é comumente associado a envelopes de edifícios em movimento (Meriam & Kraige, 2012, como citado em Al-obaidi et al., 2017).
INTERACT	Interativo	Corresponde às respostas intuitivas ou automáticas para satisfazer os requisitos do utente. Utilizam sensores para operar sistemas cinéticos e permitem o uso de materiais inteligentes a fim de iniciar mudanças na aparência e no ambiente (Sung, 2012, como citado em Al-obaidi et al., 2017).

KINETICS	Cinética	Compreende o estudo sobre as leis do movimento que incluem as forças e as massas, e enfatiza a relação entre o movimento e suas respectivas causas (Al-obaidi et al., 2017; Lienhard, 2014).
PERFORMATIVE	Performativo	Refere-se a sistemas que podem mediar o ambiente circundante para promover conforto ao utente, como as peles das edificações. Os sistemas de construção de peles podem controlar fatores externos em relação a desempenhos arquitetônicos predefinidos (Turrin, 2012, como citado em Al-obaidi et al., 2017).
RESPONSIVE	Responsivo	Refere-se a um sistema que se move e responde do exterior com base em fatores específicos, de modo a permitir a interação com um ambiente passivo (Hasselaar, 2006, como citado em Al-obaidi et al., 2017).
RETRACTABLE	Retrátil	Usado na arquitetura para telhados de membrana têxtil, dobráveis ou dobrado; um termo ou expressão semelhante a móvel (Barozzi et al., 2016, como citado em Al-obaidi et al., 2017).
TRANSFORMABLE	Transformável	Descreve unidades ou sistemas com a propriedade intrínseca de mudança controlada, tais como a capacidade de ser dobrável, retrátil ou de mudança de forma (Hoberman, 2006, como citado em Al-obaidi et al., 2017).
SMART or INTELLIGENT	Inteligente	Um conceito relacionado com o processo que permite o controle automático ou o funcionamento de edifícios. Inclui o controle de perda ou ganho de calor, iluminação do dia, ventilação e outros sistemas. Os sistemas inteligentes utilizam tecnologias de informação para ligar vários subsistemas que normalmente operam independentemente (Brooks, 2011, como citado em Al-obaidi et al., 2017).

Fonte: adaptado de Al-obaidi et al.(2017).

Para Lienhard (2014):

> O estudo das forças em um **corpo rígido** estacionário é geralmente circunscrito pelo campo da estática. A **dinâmica** descreve as **forças em um corpo rígido em movimento**, enquanto a **cinemática é a consideração do movimento sem as suas causas** e a **cinética é o estudo do movimento incluindo a massa e as forças**.

> Se um sistema sofre uma **deformação elástica** como causa do seu movimento, não pode ser descrito pela cinemática apenas porque o movimento e a deformação estão interdependentes com as propriedades mecânicas do sistema e as forças que causam o movimento. (Lienhard, 2014, p. 15, tradução livre, grifo nosso)

A nomenclatura **deformação elástica** corresponde ao retorno à forma original de um dado corpo, após a remoção dos esforços que atuavam nesse corpo (Centro de Informação Metal Mecânica, 2020). A **deformação plástica**, por sua vez, consiste na não recuperação da forma original após a retirada dos esforços (Centro de Informação Metal Mecânica, 2020). Ocorre quando se passa dos limites de deformação elástica, e proporciona uma deformação permanente.

> Sugere-se, portanto, que **um sistema que transfere força de entrada ou deslocamento para outro ponto através da deformação elástica do corpo se enquadra na categoria de cinética**, ou mais precisamente: Cinética Elástica[51]. (Lienhard, 2014, p. 15, tradução livre, grifo nosso)

O conceito utilizado na presente investigação compreende aos conceitos referidos para fachadas adaptativas e fachada cinéticas. Antes de se iniciar os estudos sobre fachadas cinéticas, convém explicitar alguns projetos de referência sobre a temática. Pois, para se obter êxito no desenvolvimento de uma solução é necessário aprender com o que já fora desenvolvido, e assim aperfeiçoar o processo de desenvolvimento, bem como a solução (Baxter, 2011). Nesse sentido, serão apresentados os projetos: *Arab World Institute, MEDIA-ICT* e *SDU Campus Kolding*.

O edifício ***Arab World Institute*** (Figura 53) é um dos primeiros exemplos de fachada cinética (Vaz et al., 2016). Construído entre 1981 e 1987, pelo arquiteto **Jean Nouvel**,

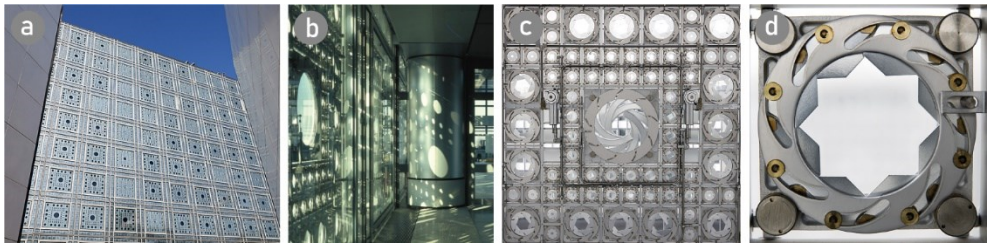
---

[51] "*The study of forces on a stationary rigid body is generally circum-scribed by the field of statics. Dynamics describes the forces on a rigid body in motion, whereas Kinematics is the consideration of motion without its causes and Kinetics is the study of motion including mass and the forces. If a system undergoes elastic de-formation as a cause of its motion, it cannot be described by kinematics [...] only because motion and deformation are interdependent with the mechanical properties of the system and the forces causing the motion. It is therefore suggested that a system which transfers input force or displacement to another point through elastic body deformation falls under the category of Kinetics, or more precisely: Elastic Kinetics"* (Lienhard, 2014, p. 15).

em Paris. A fachada sudoeste dessa edificação está envolta em vidro retangular e possui 240 **painéis metálicos e dinâmicos, inspirados nos muxarabiês**[52].

Os painéis são **sensíveis à luz** (Caetano, Leitão, et al., 2020), **controlam o fluxo de energia entre ambientes internos e externos**, a partir da movimentação das partes, por meio de motores fotossensíveis. Corresponde a um sofisticado *brise soleil* (Nouvel et al., 2019). **Tal projeto abriu caminho para que várias edificações tirassem partido das potencialidades cinéticas** do local nas próximas décadas (Caetano, Leitão, et al., 2020).

Figura 53. Edifício *Arab World Institute.*



Nota. a) fachada; b) controle de iluminação; c – d) detalhes dos elementos. Fonte: a; c – d) ©Cateloy, (n.d.) ; b) Nouvel et al., 2019.

De acordo com López et al. (2017), testes laboratoriais e para a escalabilidade dos módulos cinéticos foram desenvolvidos a fim de evidenciar o conforto visual e os benefícios energéticos. Contudo, houve críticas em relação ao sucesso funcional da solução, sendo considerado como um sistema de fachada complexo, ainda segundo os autores. Tal sistema funciona totalmente a partir de automatização, exibe elevado índice de ruído, elevada necessidade de manutenção e não permite o controle pelo usuário para aprimorar o conforto visual (López et al., 2017). Após trinta anos da inauguração do *Arab World Institute,* prevê-se remodelação que inclui a reparação do sistema cinético da fachada.

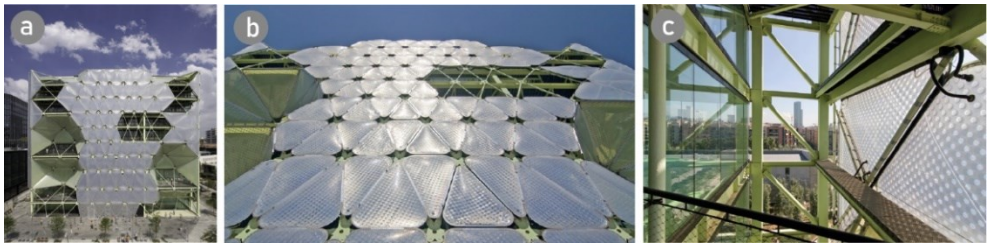
Projetado por **Enric Ruiz-Geli** em 2007, em Barcelona, o **MEDIA-ICT** (Figura 54Figura 54) é um edifício 'inteligente' que regula a energia através da luz do dia e da detecção de ocupação (Glynn & Sheil, 2011). **Exibe arquitetura performativa de eficiência energética com uma pele pneumática em *Ethylene Tetra Fluoro Ethylene* [ETFE]** (López et al., 2017).

O envelope adaptável do MEDIA-TIC foi projetado para alcançar uma redução de 65% de CO_2, através de sensores inteligentes e filtro solar insufláveis em ETFE (López et al., 2017). O revestimento ETFE são constituídos com no máximo por três

[52] Os muxarabiês ou muxurabi possuem forte apelo às formas geométricas. Consistem em treliças de madeira fixadas nas sacadas e janelas das casas, no intuito de assegurar ventilação e sombreamento e, também, possibilitar que as mulheres observassem o exterior, sem que fossem vistas nas ruas (Vieira et al., 2013).

câmaras de ar (Glynn & Sheil, 2011; M. Oliveira, 2019). Isso contribui para o isolamento térmico e proteção solar.

Figura 54. *MEDIA – ICT*.



Nota. a) fachada; b) almofadas pneumáticas em ETFE; c) detalhe interno de fixação. Foto: a) ©Luis Ros; b, c) ©José Hernandez

Segundo Glynn e Sheil (2011), a primeira camada é transparente. A segunda e a terceira camada têm um desenho de padrão invertido, que quando inflado e unido, proporciona opacidade e por conseguinte, sombreamento. Desse modo, é possível gerir o comportamento responsivo da fachada através do movimento do ar. Para a fachada sudeste, que recebe em média de seis horas de Sol por dia, foi executado um sistema pneumático em duas camadas, com filtro solar ETFE, que regula a luz e possui baixo consumo de energia, ainda segundo os autores.

Muito embora, a fachada sudoeste apresente a mesma quantidade de horas de incidência solar, há maior intensidade nessa orientação. Nesse sentido, as duas camadas de ETFE são associadas ao gás nitrogênio (Glynn & Sheil, 2011; López et al., 2017), de modo a ampliar a densidade do ar das almofadas de ETFE. O sistema, por sua vez, se acionará automaticamente através dos sensores de temperatura. Assim, a regulação da energia solar funciona como um filtro na fachada, que combina um sistema de partículas de gás nitrogênio com o ar dos ETFE, para potencializar redução do ganho de calor e proteção solar para o edifício (López et al., 2017). A mudança de opacidade das células pneumáticas contribui para o acionamento responsivo. Ao todo, foram utilizados 2.500m² de ETFE (Glynn & Sheil, 2011). Estimativas apontaram para uma redução de consumo energético de 20% (Glynn & Sheil, 2011).

No Sul da Dinamarca, o edifício triangular ***SDU Campus Kolding*** (Figura 55) cuja autoria pertence ao escritório de *Henning Larsen Architects* em *Kolding*, foi concluído em 2014 (Henning Larsen, n.d.). Ganhou vários prêmios internacionais de design, incluindo o *International Architecture Award* 2015 (University of Southern Denmark, 2021).

A fachada cinética se ajusta automaticamente a diferentes índices de luz, a través de 1.600 persianas triangulares em aço perfurado (M. Oliveira, 2019). As persianas

se adaptam às condições ambientais, respondem à variação de iluminação e otimizam o equilíbrio entre a luz natural e artificial no edifício. Segundo M. Oliveira (2019), cada unidade triangular possui um sistema pivotante, que permite o movimento rotacional independente ou sincronizado. Assim, o sistema de sombreamento cinético colabora para a iluminação e o conforto térmico dos espaços.

Figura 55. *SDU Campus Kolding.*

Nota. a) fachada; b) persianas cinéticas; c) retícula no aço que permite a entrada de iluminação natural. Fonte: a) Henning Larsen (n.d.); b, c) Foto: ©Jens Lindhe.

Sensores monitoram os níveis de calor e luz no entorno da edificação, de modo a permitir que os painéis adaptem o grau de abertura. Mesmo quando totalmente fechado, uma quantidade controlada de luz natural ultrapassa o padrão personalizado e reticulado no aço (Freio, 2015).

O *SDU Campus* destaca-se pelo baixo consumo energético (Classe de Energia 1), sendo umas das primeiras universidades mundiais de baixa energia (Henning Larsen, n.d.). A estratégia bioclimática adotada para o edifício otimizou sistemas passivos em relação à: iluminação, ventilação, aquecimento e refrigeração. Isso resultou em um consumo de energia de apenas 48 kWh/ m² por ano, que equivale entre 20 e 25% do consumo de edifícios semelhantes (Henning Larsen, n.d.).

Em comum, as fachadas adaptativas e cinéticas explicitadas respondem ativamente às condicionantes ambientais. Adotam dispositivos eletromecânicos para acionar o sistema que podem necessitar de manutenção.

Outro ponto que merece ser pensado para concepção de soluções de fachada é o planejamento do **ciclo de vida das soluções**, de modo a oportunizar que ao final da vida útil, seus insumos possam se tornar "nutrientes biológicos" ou "nutrientes técnicos" (McDonough & Braungart, 2002). E assim proporcionar a implementação do conceito '*cradle to cradle*' (em português: do berço ao berço).

Ainda segundo os autores, os nutrientes biológicos correspondem aos materiais que podem ser reinseridos na natureza, enquanto os nutrientes técnicos são os materiais que devem permanecer dentro de ciclos industriais de ciclo fechado. E assim, evitar a subutilização e desperdício dos materiais na confecção de

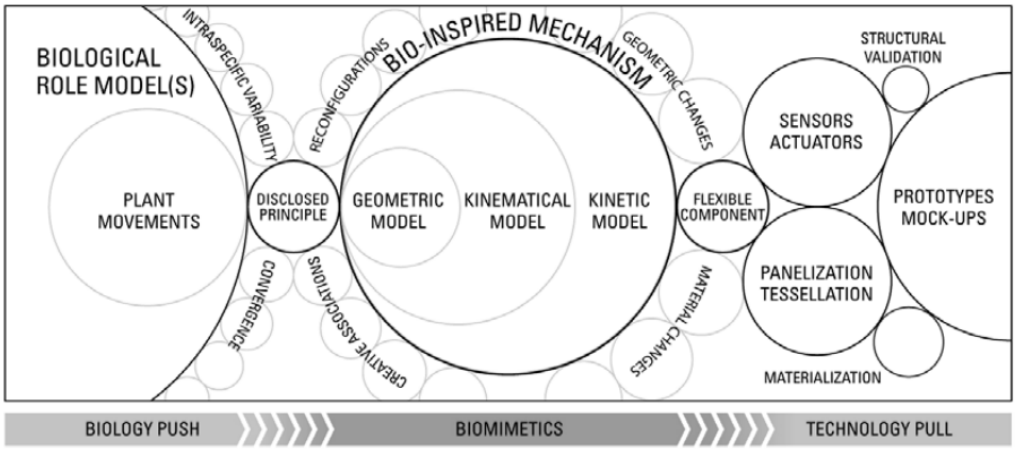
compósitos de baixa qualidade (como acontece com a maioria dos materiais recicláveis na atualidade) (McDonough & Braungart, 2002).

O próximo tópico abordará diferentes estratégias de deformação de materiais. Por conseguinte, serão explicitados treze projetos e suas respectivas características.

3.3.2 Diferentes estratégias para deformação de materiais

Schleicher et al. (2015) apresentam um quadro síntese que delineia, como os movimentos das plantas podem inspirar soluções tecnológicas, seja por desenvolvimento de componentes flexíveis, mudanças geométricas, pesquisa de materiais e/ou padrões de tesselação (Figura 56).

Figura 56. Movimentos das plantas podem inspirar soluções tecnológicas.



Fonte: Schleicher et al. (2015, p. 107).

Do ponto de vista de **classificação de material**, existem duas abordagens para se estabelecer a adaptabilidade. A primeira, compreende o **controle intrínseco** explora as propriedades inerentes do material que proporcionam a alteração do comportamento e utilizam baixa tecnologia (Böke et al., 2022; Kuru et al., 2019; Loonen et al., 2013). Esse tipo de controle é muitas vezes alcançado por meio materiais inteligentes e de mudança de forma (Ritter, 2007; Vazquez et al., 2019). Como vantagem apresentam reduzida vulnerabilidade a erros técnicos, em contrapartida; normalmente não dispõe da possibilidade ajuste pelo usuário (Böke et al., 2022).

A segunda abordagem é classificada como **controle extrínseco** por precisar de um impulso externo para acionar o sistema (Böke et al., 2022; Kuru et al., 2019; Loonen et al., 2013). Necessita de extensivamente de controle digital e tecnologias de automação. Os sistemas automatizados oferecem um elevado grau de flexibilidade

e possibilidades de intervenção no controle digital. Apresenta, no entanto, uma série de desvantagens relacionada à vida útil dos componentes eletrotécnicos e respectivas suscetibilidade a avarias e manutenção (Böke et al., 2022). Além disso, hegemonicamente dependem do fornecimento de energia eléctrica, apesar de contribuírem com a redução do consumo energético (Böke et al., 2022; Loonen et al., 2013).

Para V. Charpentier et al. (2017) existem diferentes estratégias para transformar uma pequena deformação em um grande deslocamento no material, por meio de bioinspiração no movimento das plantas, a saber:

- **ESTRATÉGIA GEOMÉTRICA** *(Geometric strategie)* – consiste na produção de geometrias que reagem eficientemente à solicitação, com 'atuação ideal' das estruturas morfológicas. Essas estruturas de 'atuação ideal' fornecem um deslocamento máximo como *output*, para um *input* de atuação mínima (como o mecanismo do guarda-chuva, por exemplo);

- **VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MATERIAIS** *(Variation of material properties)* – através de três estratégias:

  a) Variações contínuas das propriedades dos materiais – consiste na fabricação de estrutura a partir de um único elemento. Uma dobradiça ou mola de um produto, por exemplo, pode ser confeccionado variando-se localmente a espessura ou rigidez do material;

  b) Variações descontínuas das propriedades materiais – observadas principalmente em materiais constituídos por multicamadas heterogêneas. Por exemplo, o bimetal que possui duas camadas de metais constituintes e estruturalmente ligadas (V. Charpentier et al., 2017; DOSU Studio Architects, 2021). Quando submetido à variação de temperatura, evidencia expansão diferente entre as camadas e, consequentemente, causa a curvatura do material;

  c) Anisotropia do material – a anisotropia deriva de uma distribuição desigual do material nas células (Fiorito et al., 2016). Cada direção em um material tem suas próprias propriedades. Diferentes direções podem ser combinadas com propriedades estruturais para conferir diferentes deslocamentos, de modo a proporcionar estruturas leves e eficientes (V. Charpentier et al., 2017).

- **INCOMPRESSIBILIDADE DE FLUIDOS (ENCOLHIMENTO E EXPANSÃO)** *(Fluid incompressibility shrinking and swelling)* – "As estruturas hidráulicas

utilizam-se de fluidos não comprimíeis, enquanto estruturas pneumáticas usam compressão do ar para produzir um deslocamento[53]" (V. Charpentier et al., 2017, p. 20, tradução livre).

A utilização dos princípios fluídicos pode eliminar o uso de elementos mecânicos tradicionais (como: engrenagens e dobradiças); investigações sobre compósitos de hidrogel são relevantes na promoção de deslocamento (como exemplo, tem-se a impressão 4D[54]) (Gladman et al., 2016).

- **ARMAZENAMENTO DE ENERGIA** *(Energy storage)* – produção de deslocamento ou força de maior intensidade através da liberação de energia em um curto espaço de tempo. É comum haver o armazenamento de energia no processo de dispersão das sementes das plantas.

  Ainda segundo os autores, as **quatro estratégias de amplificação cinemática podem ser combinadas entre si para proporcionar a otimização de mecanismos e amplificação dos deslocamentos dos materiais.** Pois, os organismos vivos funcionam complexamente do particular (nível celular) até atingir a complexidade inter-relacionável do organismo com o ambiente que o circunscreve. O *Fluidic origami* (Li & Wang, 2015b, 2015a), por exemplo, combina estratégias geométricas à incompressibilidade de fluidos.

3.4 Projetos de Referência: Estudos de Caso

A análise de cinquenta e dois projetos de fachadas inspiradas na natureza, desenvolvidas entre 2009 e 2019, concluiu que **53,8% dos projetos publicados permanecem em uma fase conceitual do desenvolvimento** (Kuru et al., 2019). Os projetos possuem baixa incidência de análise de desempenho energético e ambiental, ainda segundo os autores.

Baseado nos parâmetros propostos por V. Charpentier et al. (2017) e Kuru et al. (2019), a Tabela 8 foi definida a fim de demonstrar caraterísticas de treze projetos

---

[53] *"Hydraulic structures use a fluid incompressibility, whereas pneumatic structures use air compressibility to produce a displacement"* (V. Charpentier et al., 2017, p. 20).

[54] A impressão 4D corresponde a impressão de objetos em 3D, com capacidade de transformação da forma e a propriedade material quando expostos a um estímulo pré-determinado (como: submersão em água, exposição ao calor, corrente, pressão, corrente, luz ultravioleta ou outra fonte de energia) (Campbell, Tibbits, & Garrett, 2014).

selecionados qualitativamente por apresentarem diferentes estratégias de deformação do material, através dos seguintes critérios de seleção:

- projetos publicados e disponíveis publicamente;
- conclusão nos últimos dez anos (2011-2021);
- cumprem a fase menos desenvolvida definida no âmbito dessa investigação como Modelo Preliminar (com representações digitais de como o mecanismo funciona e não apenas ilustrações esquemáticas conceituais);
- possuem diferentes estratégias de deformação de material sob abordagens biomiméticas, materiais de mudança de forma ou sensores/atuadores;
- proporcionam dados acessíveis sobre materiais.

A análise qualitativa das soluções foi atribuída em relação a cinco principais camadas de conhecimento, que são: **escala**, **adaptabilidade**, **biomimética**, **materiais** e **desempenho** (V. Charpentier et al., 2017; Kuru et al., 2019).

Tabela 8. Parâmetros de avaliação de projetos de fachada adaptativa ou cinética.

CAMADA	ÂMBITO	CÓDIGO	PARÂMETROS
ESCALA (Kuru et al., 2019)	**Escala Espacial**	CF	Componente de Fachada
		SF	Subcomponente de Fachada
	Estágio de Desenvolvimento	MP	Modelo Preliminar
		MS	Modelo de Simulação
		PP	Protótipo em Escala Piloto
		SR	Sistema em Escala 1:1
ADAPTABILIDADE (Kuru *et al.*, 2019)	**Regulação Ambiental**	AQ	Aquecimento
		LZ	Luz
		AR	Ar
		AG	Água
		DE	Demanda de Energia
	Função	SO	Sombreamento
		VT	Ventilação
		AQ/AR	Aquecimento/Arrefecimento
		QA	Qualidade do ar
		UM	Umidade
		EN	Energia

	Estímulo (Böke et al., 2022; Kuru et al., 2019; Loonen et al., 2013)	INT	Controle Intrínseco
		EXT	Controle Extrínseco
BIOMIMÉTICA	**Organismo de referência**	OR	Houve organismo de referência?
		NOME	Nome do organismo
	Nível de adaptação (Kuru et al. 2019; López et al., 2017)	AM	Adaptação Morfológica
		AF	Adaptação Fisiológica
		AC	Adaptação Comportamental
ESTRATÉGIAS DE MATERIAIS	**Diferentes estratégias de transformação** (V. Charpentier et al., 2017)	EG	Estratégias Geométricas
		VP	Variação da propriedade do material
		IF	Incompressibilidade de fluidos (encolhimento e expansão)
		AE	Armazenamento de Energia
	Material	ESCREVER	Campo para descrever o material
DESEMPENHO	**Objetivos de Desempenho**	CTE	Conforto Térmico
		CVI	Conforto Visual
		DEN	Demanda de Energia
		QAI	Qualidade do ar interna
		OUT	Outro
	Análises	DIG	Digital
		EXP	Experimental

Fonte: adaptado de Kuru et al. (2019).

A seguir, os dados da Tabela 8 serão devidamente discriminados:

[1] ESCALA – Escala espacial e Estágio de Desenvolvimento (Kuru et al., 2019).

- **Escala Espacial** pode ser classificada entre:

a. **(SF) Subcomponente de Fachada** – corresponde a um subcomponente da fachada ou provável fachada. Pode ser ofertado em menor escala ou ser um experimento conceitual (instalação).
b. **(CF) Componente de Fachada** – parte de uma fachada ou é colocado em conjunto formando a fachada;
c. **(F) Fachada**
d. **(E) Envelope**

- **Estágio de Desenvolvimento** busca esclarecer se o projeto foi desenvolvido digitalmente ou fisicamente. Pode ser classificado entre:
    a. (**MP) Modelo Preliminar** – modelo teórico, desenvolvido por computação digital, sem análise;
    b. **(MS) Modelo de Simulação** – projetos modelados e testados digitalmente com análise;
    c. **(PP) Protótipo em Escala Piloto** – possui protótipos físicos, testes físicos ou digitais;
    d. **(SR) Sistema em Escala 1:1** – sistema implementado em um pavilhão ou edifício, seja uma construção temporária ou permanente.

[2] ADAPTABILIDADE – Determina a capacidade de resposta aos fatores ambientais e seus estímulos:

Regulação Ambiental – fatores climáticos controlados ao produzir uma mudança. Por exemplo, um sistema de sombreamento que regula a luz e o calor, limita os ganhos solares e proporciona luz durante o dia. De acordo com Badarnah (2012) e Kuru et al. (2019), existem cinco aspectos ambientais que precisam ser geridos para concepção do envelope do edifício, nomeadamente:

a. **(AQ) Aquecimento** – proporciona o conforto térmico para os ocupantes (ganho e perda de calor);
b. **(LZ) Luz** – maximização da luz natural e proteção da radiação solar; busca proporcionar um sistema de sombreamento com um ganho de calor minimizado;
c. **(AR) Ar** – responsável por controlar a ventilação, a fim de proporcionar qualidade do ar aos ambientes internos e evitar a estagnação do ar;
d. **(AG) Água** – proteção às chuvas e gestão da umidade (regula a umidade, como o ganho de água pelo uso de água condensada);
e. **(DE) Demanda de Energia** – proporciona energia para o ambiente construído.

- **Função –** leva em consideração funções de controle ambiental, como: Sombreamento (SO), Ventilação (VT), Aquecimento/Resfriamento (AQ/RE); Qualidade do ar (QA), Umidade (UM) e Demanda de Energia (DE).

- **Estímulo –** Segundo Böke et al. (2022); Kuru et al. (2019) e Loonen et al. (2013) pode ser classificado entre:
    a. **(INT) Controle Intrínseco**: sistemas e materiais que se sistemas. Não utilizam dispositivos eletromecânicos para acionar o sistema.
    b. **(EXT) Controle Extrínseco** – composto por sensores, processadores e/ou atuadores. Podem utilizar dispositivos eletromecânicos para acionar o sistema.

[3] BIOMIMÉTICA – identifica o Organismo de Referência e o Nível de Adaptação.

- **(OR) – Organismo de Referência:** possui organismo biológico utilizado como referência para propor o projeto; Campo para descrever qual organismo foi utilizado como referência;

- **Nível de Adaptação –** são classificados em três categorias (Badarnah, 2012; Kuru et al., 2019; López et al., 2017), nomeadamente:
    a. **(AM) Adaptação Morfológica**
    b. **(AF) Adaptação Fisiológica**
    c. **(AC) Adaptação Comportamental**

[4] MATERIAIS – busca identificar diferentes estratégias para a transformação do material e descrição do material utilizado (V. Charpentier et al., 2017; Fiorito et al., 2016).

- **Diferentes Estratégias para a transformação do material**
    a. **(EG) – Estratégias Geométricas**
    b. **(VP) – Variação da Propriedade do Material**
    c. **(IF) – Incompressibilidade de fluidos**
    d. **(AE) – Armazenamento de Energia**

- **Materiais –** campo para descrever o material utilizado;

[5] DESEMPENHO – a categoria avalia: **objetivo de desempenho** e **análises**. Cada categoria possui diferentes indicadores, a saber:

- **Objetivo de Desempenho –** esclarece as funcionalidades que o sistema cumpre para aprimorar o desempenho da edificação.
    a. **(CTE) – Conforto Térmico**
    b. **(CVI) – Conforto Visual**
    c. **(DEN) – Demanda de Energia**
    d. **(QAI) – Qualidade do ar interna**
    e. **(OUT) – Outro:** Refere-se ao tipo de avaliação de desempenho que não está diretamente relacionado à adaptabilidade climática. A exemplo, análises mecânicas ou estruturais.

- **Análise –** determina a eficácia de um sistema para atingir os objetivos de desempenho através de processos digitais ou experimentais.
    a. **(DIG) – Digital: simulações por computador;**
    b. **(EXP) – Experimental: testes de laboratório ou no local;**

Por conseguinte, a Tabela 9 efetua análise comparativa entre treze projetos de fachadas, segundo parâmetros para análise especificados na Tabela 8.

Tabela 9. Análise comparativa entre projetos de fachada adaptativa ou cinética.

PROJETO		ESCALA		ADAPTABILIDADE			BIOMIMÉTICA			MATERIAL		DESEMPENHO		REFERÊNCIAS
CÓDIGO	**PROJETO**	**ESPACIAL ESCALA**	**ESTÁGIO DE DESENVOLV.**	**REGULAÇÃO AMBIENTAL**	**FUNÇÃO**	**ESTÍMULO**	**ORGANISMO**	**DESCRIÇÃO DO ORGANISMO**	**NÍVEL DE ADAPTAÇÃO**	**ESTRATÉGIAS DE DEFORMAÇÃO**	**MATERIAL**	**OBJETIVO DE DESEMPENHO**	**ANÁLISE**	**REFERENCES**
P00	***Adaptex***	CF	SR	AQ, LZ	SO	INT	-	-	-	EG	*Shape Memory Alloy* e tecido	CTE	EXP	(Böke et al., 2022)
P01	***Air Flower***	CF	PP	AQ, LZ	VE, AQ/AR, SO	INT	OR	PLANTA Crocus L	AM	EG	*Shape Memory Alloy*	CTE, CVI	EXP	(Lift Architects, n.d.)
P02	***Al-Bahr Towers***	F	SR	LZ, AQ	SO	EXT	OR	MÚLTIPLAS PLANTAS Cacto, Abacaxi, abertura e fechamento da flor	AM AC	EG	Estrutura em alumínio revestida por malha de fibra de vidro	OUT	DIG	(Karanouh & Kerber, 2015)
P03	***Bloom Pavilion***	CF	SR	AR, AQ	VE, AQ/AR, SO,	INT	-	-	-	EG, VP	Bimetal	CTE	EXP	(DOSU Studio Architects, 2021; Fox, 2016)
P04	***Breathing Skins***	CF	SR	LZ, AQ, AR	AQ/AR, SO, EN	EXT	OR	GENÉRICA Peles de organismos	AM	IF	Sistema de Fachada pneumática	CTE	DIG	(Becker & Huffer, 2015)

P05	***Flectofin™***	CF	PP	LZ	AQ/AR, SO	EXT	OR	PLANTA *Strelitzia reginae*	AM	EG, VP	*Fiber-glass reinforced*	CVI, OUT	EXP	(V. Charpentier et al., 2017; Lienhard, 2014; Lienhard et al., 2012)
P06	***Flectofold***	E	SR	LZ	AQ/AR, SO	EXT	OR	PLANTA *Aldrovanda vesiculosa*	AM	EG, VP, IF	Plástico Reforçado com Fibra. Cada módulo tem uma almofada pneumática.	CVI, OUT	DIG	(Knippers et al., 2016, 2018)
P07	***Homeostatic Facade***	CF	PP	LZ	SO, AQ/AR	EXT	OR	GENÉRICO Músculos e homeostase de sistemas biológicos	AC	IF	Elastómero enrolado sobre um núcleo de polímero flexível	CVI	EXP	(AskNature, 2016)
P08	***HygroSkin***	CF	SR	AG	AQ/AR, UM, VE	INT	OR	PLANTA cone de coníferas (*Pinophyta*)	AF	VP, IF	Madeira associada a compósitos sintéticos e programação computacional	CTE, OUT	EXP	(Menges & Reichert, 2015; Reichert et al., 2014)
P09	***Hydroce-ramic***	CF	PP	AG	AQ/AR, UM, EN	INT	-	-	-	IF	Hidrogel, tecido com canal de água e cerâmica	CTE	EXP	(Rathee et al., 2013)
P10	***Ocean Pavilion***	F	SR	LZ	VE, SO, AQ/AR	EXT	OR	GENÉRICA *Strelitzia reginae* deformação flexível das plantas	AC	VP, EG	*Glass Fiber Reinforced Polymer*	CTE, OUT	DIG, EXP	(Knippers et al., 2012)
P11	***Snapping Facades***	SF	MP	LZ	SO, AQ/AR	EXT	-	-	-	EG, AE	Feixes de poliestireno e membranas de poliéster dobráveis	DEN, OUT	DIG	(Song et al., 2018)
P12	***Spong 3D***	SF	PP	AQ	AQ/AR	EXT	OR	GENÉRICO Sistema Vascular	AM	EG, IF	PETG transparente	CTE	DIG / EXP	(Sarakinioti et al., 2017, 2018)

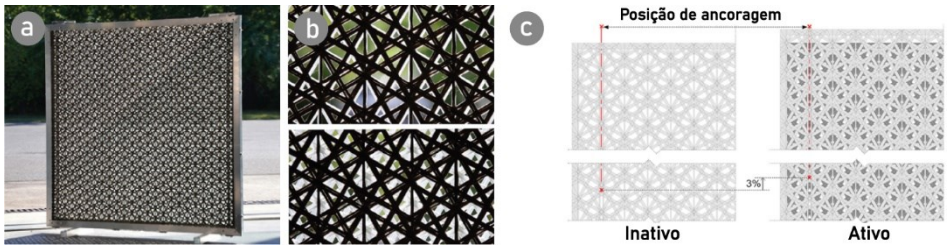
Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

3.4.1 Adaptex

Adaptex é uma solução de sombreamento têxtil que utiliza liga de memória de forma (em inglês *Shape Memory Alloy* [SMA]) como atuador (Böke et al., 2022). As SMAs compreendem tipologia de material inteligente (Ritter, 2007; Vazquez et al., 2019), e reagem às mudanças de temperatura por meio de deformação e/ou contração, a depender da configuração e geometria do material (Böke et al., 2022). Implementa sistema com controle intrínseco com o material inteligente para responder aos distintos condicionantes ambientais.

Dois conceitos foram estabelecidos: o ***ADAPTEX Mesh*** e ***ADAPTEX Wave***. Para ambas as propostas foram desenvolvidos protótipos em escala 1:1 na dimensão 1,35 x 2,80 m. O primeiro conceito compreende duas camadas de tecido que não estão na mesma posição. O SMA está integrado à camada posterior têxtil. No estado inativado, atinge-se o máximo fator de abertura de 63% (Böke et al., 2022). Quando ativada para a promoção do sombreamento, a deformação da SMA faz com que o painel posterior deslize para cima, de modo a proporcionar padrão de sobreposição que reduz a permeabilidade global em até 39% (Böke et al., 2022).

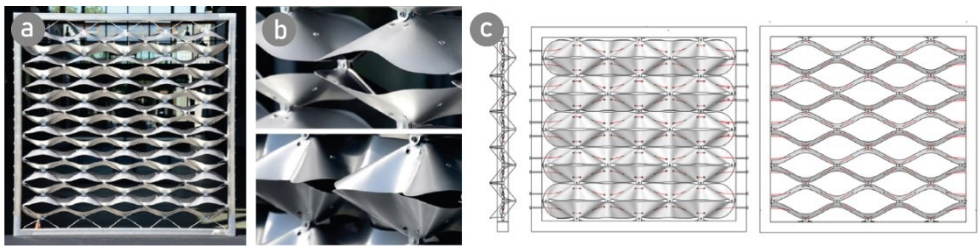
Figura 57. Adaptex Mesh: conceito de solução para proteção solar.



Fonte: Böke et al. (2022, p. 9).

O *ADAPTEX Wave* baseia-se numa deformação geométrica de bandas têxteis em forma de onda. Fios de SMA são entrelaçados ao longo do comprimento do tecido e induzem a deformação (Böke et al., 2022). Os estados de funcionamento permitem que o fator de abertura seja configurado em um intervalo de 70% durante a inativação e 5% quando ativado.

Figura 58. *Adaptex Wave*: conceito de solução para proteção solar.



Fonte: Böke et al. (2022, p. 9).

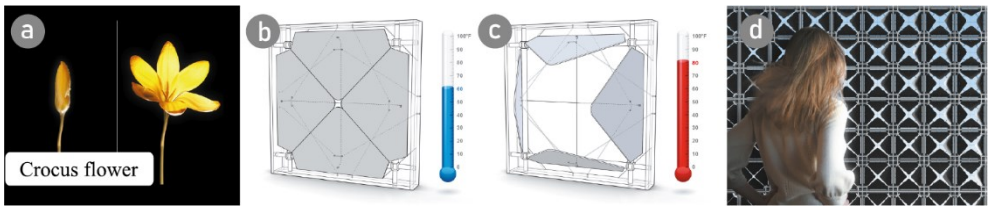
Ambos os conceitos de sombreamento solar foram projetados para funcionarem sem necessitarem de energia eléctrica, sendo apenas ativados pelas alterações de temperatura ambiental e exposição à radiação solar.

Os testes iniciais utilizaram corrente elétrica externa para acionar o SMA. Para avaliar o sistema Adpatex, desenvolveu-se sistema ciber-físico para monitorar o funcionamento passivo do sistema, que recolhe dados sobre as condições ambientais e sobre o comportamento do sistema em resposta às alterações climáticas. Tal sistema utiliza conceitos de internet das coisas e tecnologias de automatização (com rede de sensores que monitoramento: radiação solar, a temperatura ambiente, bem como as condições do vento). Como estratégia de deformação de material aplica a estratégia geométrica

3.4.2 Air Flow(er)

O ***Air Flow(er)*** é um **dispositivo de ventilação termicamente ativo**, que visa regular o fluxo de ar e as temperaturas interiores sem ter a necessidade da utilização de energia (Lift Architects, n.d.) (Figura 59). Inspira-se na flor Crocus, um **organismo com termonastia**, que apresenta sensibilidade à variação de temperatura (abertura para elevação de temperatura e fechamento para resfriamento).

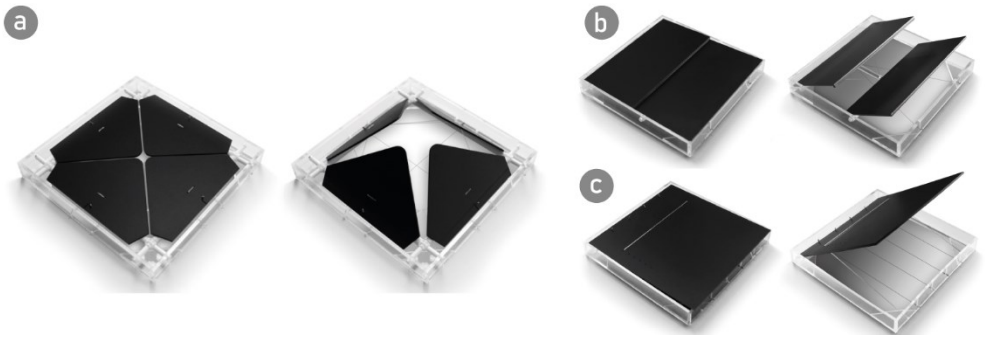
Figura 59. Air Flow(er).



Nota. Dispositivo que responde à mudança de temperatura. Solução bioinspirada no mecanismo da flor de Crocus. Fonte: Lift Architects (n.d.) e adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

Tal projeto utiliza SMA para responder à alteração de temperatura (Lift Architects, n.d.). À medida que o edifício aquece para além de 27°C, o sistema de painel se abre para permitir que o ar flua para um edifício, por meio da deformação do fio de SMA (Figura 60). Tal projeto utiliza estratégia de deformação de material VP associada à EG (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021; V. Charpentier et al., 2017).

Figura 60. Diferentes versões de protótipo da Air Flow(er).



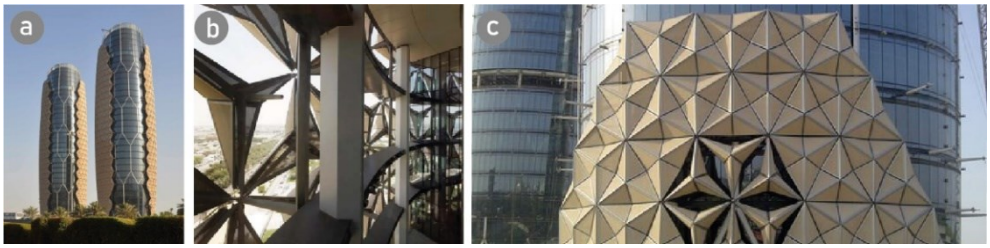
Fonte: adaptado de Lift Architects (n.d.).

Quando o espaço interior esfria além do seu limite de temperatura mais baixo (aproximadamente 16°C), os painéis tendem a se fechar para manter a temperatura regulada em níveis confortáveis, e os fios retornam à posição inicial. Segundo os autores, foram desenvolvidos três protótipos para abertura no teto, abertura de pele única tradicional e um sistema de fachada de pele dupla naturalmente ventilada. Todos os protótipos foram projetados para proporcionar a ventilação natural em edifícios e são independentes de energia.

3.4.3 Al-Bahr Towers

As ***Al-Bahr Towers*** (Figura 61) são um exemplo de arquitetura cinética. São reconhecidas internacionalmente e obtiveram o prêmio de melhor inovação em 2012 pelo *Council for Tall Buildings and Urban Habitat* (Karanouh & Kerber, 2015). Projetadas pela AHR (antiga Aedas – UK) em colaboração com a Arup, esses edifícios de 150 metros de altura abrigam a sede do Conselho de Investimento de Abu Dhabi, e foram concluídos em 2012.

Figura 61. Al-Bahr Towers.



Nota. a) torres; b) detalhe interno ao edifício do módulo fechado; c) detalhe com módulos fechados e abertos. Fonte: a; c) Cilento (2012); b) Karanouh & Kerber (2015, p. 217).

A forma das torres foi **orientada ao desempenho** e a **fachada dinâmica opera seguindo o movimento do Sol** (Karanouh & Kerber, 2015), sendo projetada para o contexto climático árido de Abu Dhabi, com temperatura a alcançar 49°C no verão. **Os painéis cinéticos foram alocados nas partes do edifício que exigiam maior necessidade de proteção solar** para evitar o ganho solar direto entre as 9h e 17h (Karanouh & Kerber, 2015).

Karanouh e Kerber (2015) afirmaram que o projeto em questão foi inspirado por uma combinação de elementos naturais e referências culturais. O movimento de abertura e fechamento de flores, em resposta às mudanças nas condições climáticas, foi uma inspiração. Também se inspiraram nas características do cacto para promover proteção às intempéries. Pois, os cactos se assemelham a guarda-chuvas. Outra referência utilizada foi o envelope hexagonal do abacaxi, que cobre uma superfície de forma eficiente. Além disso, o projeto foi inspirado no muxarabiê, uma aplicação geométrica comum na Arquitetura Islâmica.

Cada torre possui uma tela composta por 1.049 módulos, que se assemelham a origamis (situados a dois metros do exterior do edifício coberto por uma pele interna em vidro). Tal projeto apresenta estratégia de deformação geométrica (V. Charpentier et al., 2017). Os elementos cinéticos foram confeccionados em alumínio com revestimento em malha de fibra de vidro (Karanouh & Kerber, 2015). A estrutura de suporte no perímetro do edifício é de aço inoxidável. Cada dispositivo possui cerca de 4,2 m de altura e pode variar entre 3,6 m e 5,4 m de largura. O mecanismo é controlado por atuador e pistão centralmente posicionados. A maior unidade pesa 625 kg.

A fachada dinâmica computadorizada foi desenvolvida através de **métodos de programação /** *script,* **modelagem paramétrica** e **análise avançada de engenharia**, com Análise de Elementos Finitos e Dinâmica de Fluidos Computacional (Karanouh & Kerber, 2015). A análise de energia foi efetuada sem os módulos, a fim de avaliar o contexto para aprimorar a alocação, performance ambiental e permeabilidade visual.

O sistema de gestão da fachada permite a intervenção manual para emergência, manutenção ou demonstração (Karanouh & Kerber, 2015). O *software* possui sensores (luz, vento e chuva) para monitorar e gerir riscos em relação à: velocidade do vento, intensidade da luz, níveis de chuva, unidades defeituosas e as posições dobráveis dos módulos, segundo os autores. Cada unidade cinética pode ser controlada separadamente.

Quando o Sol nasce, os módulos cinéticos começam a se fechar. A sua abertura e o seu fechamento irão se alterar (verticalmente) com o percurso solar. À noite, os módulos estão dobrados de modo a ampliar a permeabilidade visual através da fachada. Karanouh e Kerber (2015) afirmaram que essa tela **reduz a necessidade do consumo de energia em até 50% nos ambientes de trabalho, em termos de requisitos de carga de iluminação e arrefecimento.**

3.4.4 Bloom Pavilion

A pele ativa ***Bloom Pavilion*** (Figura 62), foi desenvolvida em 2011, por Doris Kim Sung e pelo DOSU Studio Architects. Proporcionou **estrutura com consumo zero de energia, que responde ao rastreamento solar e ventilação natural, através do material bimetal**. As peças se curvam quando a temperatura ambiente externa sobe acima de 18 °C ou quando o Sol penetra na superfície (DOSU Studio Architects, 2021).

Figura 62. Instalação responsiva *Bloom Pavilion*.

Nota. Pavilhão desenvolvido com bimetal, em 2011, em Los Angeles. Fonte: adaptado de DOSU Studio Architects (2021).

Utilizou a ferramenta interativa tridimensional do CATIA®, Rhinoscript e Grasshopper®, análise solar e estrutural no projeto (Fox, 2016). A instalação paramétrica é composta por 414 painéis empilhados em forma de paraboloide hiperbólico (DOSU Studio Architects, 2021; Fox, 2016). Os painéis combinam uma superfície dupla de peças bimetálicas com uma estrutura para fixação em alumínio (DOSU Studio Architects, 2021).

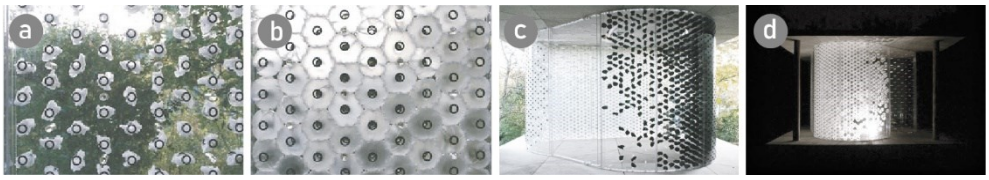
A estrutura final é leve e flexível. É constituída por 14.000 peças em bimetal, confeccionados por fabricação digital. O conjunto proporcionou a responsividade com relação à ventilação e à radiação solar, além de forma complexa, computacionalmente projetada.

O bimetal utilizado na instalação arquitetônica '*Bloom*' é um exemplo de variação descontínua de material, que explora a diferenciação térmica entre as camadas de metal, e permite grande deslocamento da estrutura original (V. Charpentier et al., 2017).

3.4.5 Breathing Skins

O projeto ***Breathing Skins*** (Figura 63) de Tobias Becker, lançado em 2015, utiliza a *biomimese* a partir das peles dos organismos para propor **sistema de fachada pneumática**. O sistema respira através de milhares de poros que ajustam a permeabilidade e **controlam iluminação e temperatura, interna e externa do ambiente** (Becker & Huffer, 2015).

Figura 63. *Breathing Skins*.



Nota. Protótipo de Sistema de fachada pneumática, inspirado na pele dos organismos. Músculos pneumáticos a) e c) sem ar, e b) e d) com ar. Fonte: Doroteo (2016) e adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

Consiste basicamente em duas superfícies de vidro envolvendo os 'músculos pneumáticos'. É necessária uma pequena variação de pressão e de energia para abrir cada músculo, entre os dois painéis de vidro. A constante mudança na abertura dos músculos proporciona **interação no ambiente interno e externo da edificação, e apelo estético**.

Uma possível correlação entre as estratégias de deformação de material, mencionadas por V. Charpentier et al. (2017) e o projeto em questão é a incompressibilidade de fluidos (encolhimento e expansão)(T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021). O projeto *Breathing Skins* ganhou diversos prêmios, comoo *Green Product Award 2016* e *2017*.

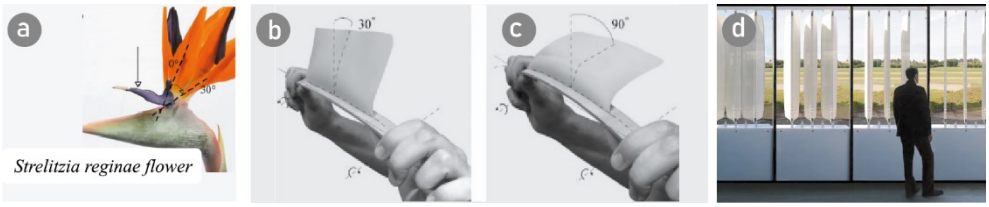
3.4.6 Flectofin™

Uma equipe transdisciplinar entre arquitetos, engenheiros e biólogos do *Institute of Building Structures and Structural Design [ITKE]*, da *University of Stuttgart*, analisou o **movimento nástico de polinização** da flor *Strelitzia reginae* (Lienhard et al., 2012) (Figura 20).

O projeto **Flectofin™** (Figura 64) consiste em um sistema de persiana sem dobradiças, que funciona por meio da propriedade elástica dos materiais, mediante a disposição adequada em diferentes direções das fibras (Lienhard, 2014; Lienhard et al., 2012). Utilizou o material *Fiber-glass reinforced* (em português 'Fibra de vidro reforçada) (Al-obaidi et al., 2017), que combina alta resistência das fibras de vidro com resina epóxi flexível, a fim de obter uma resistência estrutural às cargas do vento, concomitantemente uma baixa objeção à flexão (V. Charpentier et al., 2017).

Propriedades de alta resistência e baixa rigidez foram alcançadas a partir da combinação entre a quantidade de camadas de tecido liso e fino com a diminuição gradual das camadas de tecido, desde a espinha dorsal rígida até à extremidade da asa. Por não utilizar articulação, o sistema propõe solução **que reduz a quantidade de manutenção.**

Figura 64. Flectofin™



Nota. Sistema de persiana sem dobradiças, inspirado no mecanismo de polinização da flor *Strelitzia reginae*. Fonte: Lienhard et al. (2012) e adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

A **disposição anisotrópica da fibra do material** é essencial para controlar a deformação, e permitiu a **capacidade de deslocamento em até 90°** (perto da base da espinha dorsal) de **modo reversível.** Isso acontece por meio da indução de esforços para flexão, a partir do deslocamento de um suporte ou da alteração da temperatura na lâmina. Esse projeto utiliza abordagem de deformação de material VP associada à EG, por anisotropia do material (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021; V. Charpentier et al., 2017).

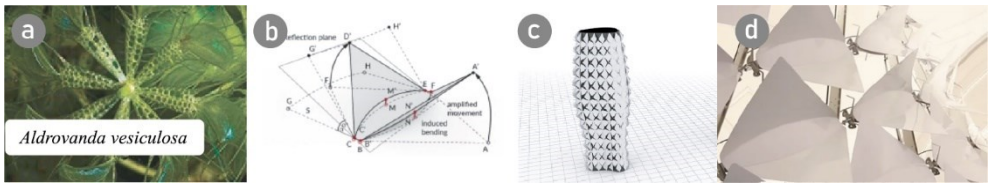
Além de ampla gama de deformações elásticas calibradas, capaz de proporcionar estruturas cinéticas e flexíveis, os módulos da persiana propostos podem

apresentar torção lateral, e permitir uma forma duplamente curvada durante o acionamento de um elemento (V. Charpentier et al., 2017).

3.4.7 Flectofold

O **dispositivo de sombreamento** de fachada cinética ***FlectoFold*** (Figura 65), baseia-se no **mecanismo cinético da planta carnívora subaquática** *Aldrovanda vesiculosa* (Knippers et al., 2016), que possui movimento por tigmonastia (T. Andrade et al., 2020).

Figura 65. *Flectofold.*



Nota. Dispositivo de sombreamento de fachada cinética que se baseia no mecanismo cinético da planta carnívora *Aldrovanda vesiculosa*. Fonte: Knippers et al. (2016) e adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

O *Flectofold* foi exibido como parte da *BauBionik Exhibition,* no *Natural History Museum, Stuttgart*, entre outubro de 2017 e maio de 2018, na Alemanha (Knippers et al., 2018). O protótipo revelou mecanismo para dobrar e desdobrar os painéis em *Fiber Reinforced Plastic* [FRP]. Cada módulo dispõe de uma **almofada pneumática** integrada e compreende uma área de aproximadamente 1 m^2. Uma vez pressurizada (0,04 – 0,09 Bar), a almofada induz a flexão elástica sobre o corpo de material laminado de FRP, e como resultado gera movimento e deformação.

O *Fiber Reinforced Plastic* apresenta diferentes deslocamentos (como, torção e enrolamento, bem como vários modos de curvatura). Para conceber estruturas leves e eficientes, a direção pretendida deverá ser combinada com as propriedades estruturais (por exemplo: resistência à fadiga, flexibilidade, rigidez e comportamento dinâmico) (V. Charpentier et al., 2017). Os módulos foram fixados em subestrutura de aço que integra os atuadores pneumáticos. O sistema de controle permitiu a condução dos módulos de forma individual ou sincronizada, com base na entrada ativa do utilizador ou em sequências pré-programadas.

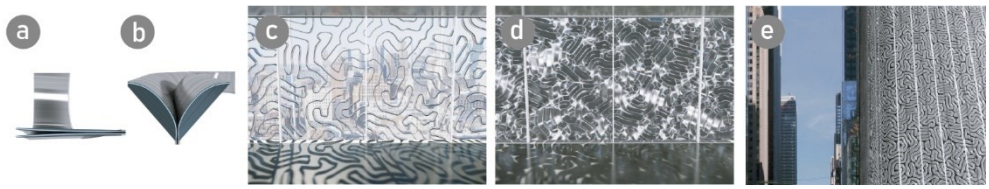
A investigação inclui a identificação de mecanismos compatíveis com biologia, abstração e aplicações técnicas usando ferramentas computacionais, como *Finite Element Analysis [FEA].* As **simulações do mecanismo de dobramento** (com atuação pneumática) forneceram informações sobre a relação entre propriedades geométricas (como raios de dobra em linha curva), avaliação de desempenho (como

força de atuação necessária e estabilidade estrutural) e determinação da *curved folding* a partir da análise científica do material que influenciou o posicionamento das fibras (um exemplo de anisotropia de material VP, associado à EG e IF devido ao sistema pneumático) (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021; V. Charpentier et al., 2017).

3.4.8 Homeostatic Facade System

A empresa de tecnologia para materiais arquitetônicos *Decernir Yeadon*, desenvolveu '***Homeostatic Facade System'***, que se inspirou nos músculos e na homeostase de sistemas biológicos, para propor fachadas de vidro duplo, com atuador que executa o **sistema semelhante ao muscular**, e regula o clima de um edifício respondendo automaticamente às condições ambientais (AskNature, 2016) (Figura 66).

Figura 66. *Homeostatic Facade System.*



Nota. a) elastômero; a; c) fechado; b; d) aberto; e) fachada da edificação. Fonte: Decker Yeadon LLC. (2014) e adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

O sistema é composto por uma fita, dentro da cavidade de uma fachada de vidro de dupla pele. As fitas, proporcionam uma aparência de janela com linhas ondulantes, feitas de elastômeros dielétricos (materiais poliméricos que podem ser polarizados através da aplicação de uma corrente eléctrica). Esses materiais são também flexíveis e consomem pouca energia.

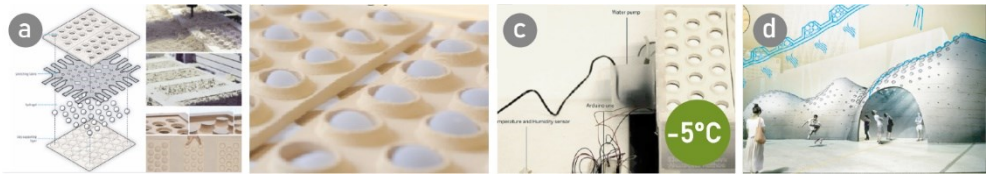
Um revestimento de prata no elastômero distribui uma carga elétrica em sua superfície, causando deformações. Quando a luz do Sol aquece o interior de um edifício durante parte do dia, o elastômero se expande, criando sombra no interior do edifício. Quando o interior esfria, ocorre a contração, permitindo que mais luz penetre no interior da edificação (AskNature, 2016).

3.4.9 Hydroceramic

O Projeto ***Hydroceramic*** (Figura 67) visa explorar o **sistema de resfriamento passivo** para o envelope do edifício de modo eficiente. Utiliza hidrogel como

material. O termo **hidrogel** refere-se a uma classe de substâncias que absorvem e retêm 500 vezes o peso do material em água (Materiability Research Group, n.d.)

Figura 67. Projeto Hydroceramic.



Fonte: Mitro (2014) e adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

A solução proposta consiste em um **sistema de evapotranspiração passivo**, que visa resfriar a temperatura interna de um espaço construído em cerca de 5°C, por meio da **transferência de umidade** para o ambiente. Quando o ambiente é frio, ocorre pouca evaporação. Mas quando o ambiente circundante é quente, o efeito de resfriamento é potencializado. Utilizou sensores para aferir a performance, contudo não utiliza energia para o seu funcionamento.

O projeto foi dividido em 3 partes diferentes: hidrogel, material de suporte (o tecido como canal hídrico) e a cerâmica (Figura 67**a**). Tal projeto contou com o desenvolvimento de material compósito, sensível ao calor e à água, que busca combinar a propriedade de evaporação dos hidrogéis com a massa térmica e a propriedade de controle de umidade da cerâmica e tecido de argila (Rathee et al., 2013). A correlação entre as estratégias de deformação de material e o *Hydroceramic* diz respeito à incompressibilidade de fluidos (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021; V. Charpentier et al., 2017).

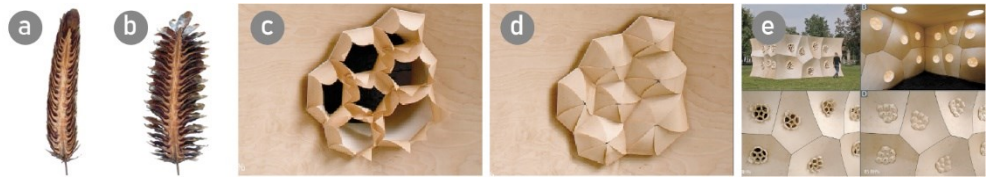
3.4.10 HygroSkin Meteorosensitive Pavilion

O projeto ***HygroSkin - Meteorosensitive Pavilion*** (Figura 68) corresponde a sistemas arquitetônicos autônomos que se adaptam às mudanças ambientais utilizando **propriedades higroscópicas** dos materiais (Menges & Reichert, 2015; Reichert et al., 2014). Segundo os autores, a higroscopia corresponde a capacidade de absorção de um material e liberar umidade para atmosfera a fim de manter um equilíbrio relativo no ambiente circundante. A solução utilizou a planta cone de coníferas (*Pinophyta*) como organismo de referência biomimético, que na presença de umidade altera o comportamento das brácteas de cone (fecham-se quando em contato com a água e abrem-se à medida que secam).

O componente direcional a nível celular da madeira influencia a **anisotropia do material**, sendo o princípio de atuação do material a utilização de duas camadas de

folheado de madeira com diferentes capacidades de encolhimento e expansão, de modo a permitir um movimento reversível sem a necessidade de qualquer acionamento eletromecânico. Tal material, é associado também ao compósito de fibra de vidro e à resina epóxi, de modo a proporcionar espessura e manter a qualidade de material constante.

Figura 68. Projeto HygroSkin.



Nota. a, b) cone de coníferas (*Pinophyta*), a) fechada e b) aberta; Módulos responsivos: c) abertos; d) fechados; e) Exposição temporária ao ar. Fonte: Reichert et al. (2014) e adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

O **projeto computacional foi utilizado para produzir material programável que responde a diferentes faixas de umidade**, com posterior execução via fabricação digital (Menges & Reichert, 2015; Reichert et al., 2014). Resultou em folheado programável associado a compósitos sintéticos (Reichert et al., 2014). Assim, o *Hygroskin* fecha sob altos níveis de umidade relativa, e reabre pela **influência entre a umidade e a temperatura do ar**. O resultado alcançado a partir da manipulação dos parâmetros de fabrico do compósito de folheado reativo, sendo possível calibrar o material para reagir em uma gama de umidade específica (Reichert et al., 2014). Utiliza estratégia de deformação de material por incompressibilidade de fluidos e variação na propriedade do material.

3.4.11 Ocean Pavilion

O ***Ocean Pavilion*** (Figura 69) compreende o pavilhão temático permanente para a EXPO 2012, em Yeosu – Coreia do Sul, concebido pela *SOMA Architecture*, em Viena (Knippers et al., 2012). O projeto consiste em sistema de fachada cinética inspirado nos princípios de **deformação flexível encontrados nos movimentos das plantas** (Knippers et al., 2012).

Figura 69. *Ocean Pavilion*.

Nota. Renderização externa com a) persianas fechadas e b) abertas; c) projeto executado em Yeosu, Coreia do Sul. Fonte: a – b) Renderização: ©isochrom; c) Foto por: ©Kim Yong-kwan.

Durante o processo de desenvolvimento das persianas operáveis, levou-se em consideração o clima da Coreia do Sul, o qual possui forte incidência de tufões. **Estudos de fadiga e de carga de vento** foram implementados, a fim de proporcionar estabilidade aerodinâmica, prever vida útil (estimada em vinte anos) e viabilizar a aplicação da fachada a correntes de vento 35 m/s. A fachada foi projetada para se fechar automaticamente com ventos superiores a 12 m/s.

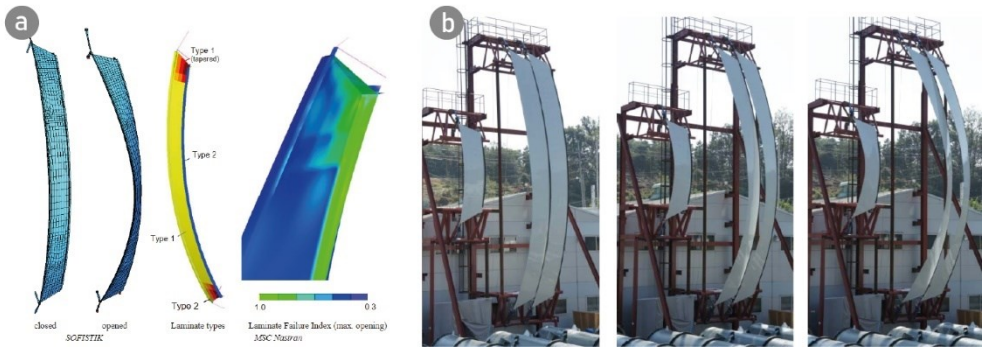
O *SOMA Architecture* concebeu **persianas operáveis reversivelmente** com o uso de *Glass Fiber Reinforced Polymer* [GFRP] (em português 'Polímero Reforçado com Fibra de Vidro') (Knippers et al., 2012). A geometria e o material das persianas conferem alta resistência à tração associada a baixa rigidez à flexão, permitindo grandes deformações elásticas (V. Charpentier et al., 2017). No que tange à estratégia de deformação de material (V. Charpentier et al., 2017), o projeto em questão utilizou associação entre a VP e EG.

A fachada tem 140 m de comprimento, com alturas que variam entre 3 e 13 m. Utiliza 108 persianas cinéticas em GFRP. As persianas são movimentadas por atuadores localizados na extremidade inferior e superior, que induzem forças de compressão e criam a complexa deformação elástica, capaz de rotacionar lateralmente as persianas (Knippers et al., 2012).

Análises estruturais basearam-se nos extremos das geometrias das persianas, através da análise por métodos de elementos finitos da mais longa (13,6m) e mais curta (6,0m) (Figura 70). A abertura de uma persiana de 13 m requer o movimento de 450 mm para um ângulo de abertura de 60°. A velocidade máxima de movimento do atuador é de cerca de 3,80 m/minuto. A equipe de desenvolvimento realizou

análises geométricas a fim de evitar colisões entre as persianas. Com os resultados, houve o ajuste das trajetórias de movimento e localizações dos rolamentos, ainda segundo os autores.

Figura 70. Persiana operável do *Ocean Pavilion*.



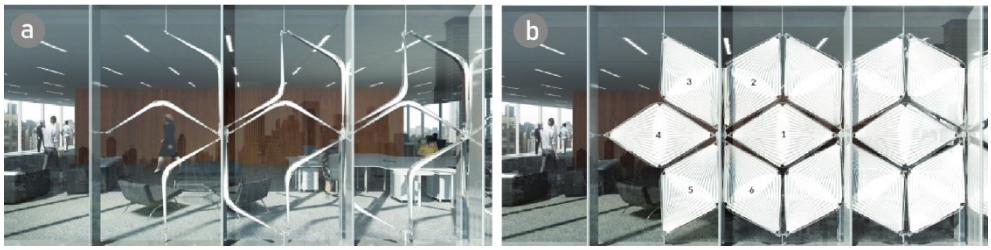
Nota. a) avaliação estrutural da persiana com comprimento máximo; b) teste de maquete de desempenho à escala real da menor e maior persiana. Fonte: Knippers et al. (2012, pp. 6, 8).

Por fim, as **persianas permitem diferentes modos de funcionamento conforme as necessidades dos utentes e cumprem função climática** (Knippers et al., 2012). Podem ser acionadas individualmente ou sincronizados, de modo a criar distintos padrões ao longo da fachada, conferindo mudança de forma contínua e com suaves movimentos.

3.4.12 Snapping Facade

O projeto ***Snapping Facade*** (Figura 71) busca promover **sombreamento dinâmico e performativo** para a construção. Não utiliza métodos de inspiração na natureza. Contudo, investiga **mecanismo de acionamento instantâneo através da deformação elástica**, sem que haja aplicação contínua de força para desencadear o movimento (Song et al., 2018). O mecanismo explora a energia de tensão armazenada nas estruturas através da instabilidade, que permite a liberação de quantidade significativa de energia de deformação elástica.

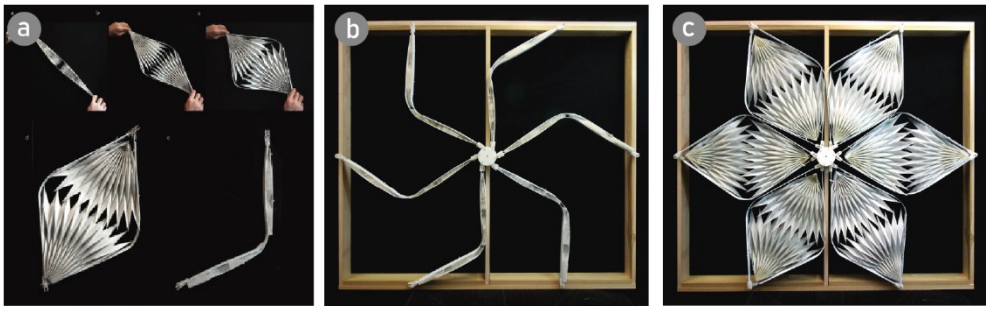
Figura 71. *Snapping Façade*.



Nota. Renderização dos módulos para a fachada. Fonte: adaptado de Song et al. (2018, p. 43).

Durante o desenvolvimento do projeto houve a **análise de elementos finitos** para as hastes modulares, para avaliação estrutural do mecanismo. Cada haste foi projetada com a maior dimensão de 63,5 cm. Pode-se ainda admitir versões com maiores escalas. Com a validação do conceito proposto desenvolveu-se protótipo utilizando **feixes de poliestireno com secções transversais variadas e membranas de poliéster dobráveis**, ainda segundo os autores.

Figura 72. Aproximação *Snapping Façade*.



Nota. a) membranas dobráveis em um módulo; b) protótipo aberto e c) fechado. Fonte: adaptado de Song et al. (2018, p. 56).

O **padrão dobrável** foi baseado no Miura-ori e desenvolvido para a solução potencial modular. Nesse sentido, a deformação do material usada foi a estratégia geométrica (V. Charpentier et al., 2017). Dois padrões foram inseridos dentro dos dispositivos de fixação. O acionamento do protótipo se fez manualmente, sem que houvesse a necessidade de dispositivo mecânico.

Segundo Song et al. (2018), futuras pesquisas buscarão explorar materiais e o benefício da instabilidade elástica para aprimorar o desempenho de dispositivos de sombreamento. A solução proposta revelou potencial do mecanismo de acionamento com baixo consumo de energia.

3.4.13 Spong 3D

O projeto de investigação *SPONG 3D* (Figura 73), por sua vez, desenvolveu sistema para fachada adaptativa impresso em 3D. Busca otimizar o desempenho térmico da construção em diferentes épocas do ano (Sarakinioti et al., 2017). Protótipos foram impressos em um único material (PETG transparente, que possui condutividade térmica relativamente baixa). As soluções integram propriedades isolantes com armazenamento de calor em uma geometria complexa (Sarakinioti et al., 2017, 2018).

O sistema proposto incorpora cavidades de ar para fornecer isolamento térmico e um líquido móvel (água mais aditivos) para fornecer armazenamento de calor. As cavidades de ar têm várias dimensões, enquanto o líquido flui por canais localizados ao longo das superfícies exteriores do sistema (Sarakinioti et al., 2017). A forma dos canais é bioinspirada nos vasos sanguíneos. Para controlar o movimento do líquido, há duas bombas invertidas nos painéis externos da fachada. Também foram realizadas simulações para compreender os efeitos térmicos do sistema em espaços interiores em diferentes climas.

Figura 73. Spong 3D

Fonte: adaptado de Sarakinioti et al. (2017, p. 60).

O presente projeto exibe estratégia geométrica e de incompressibilidade de fluidos como estratégias de deformação de material.

3.4.14 Considerações sobre os projetos

Nove dos treze projetos sob análise se **inspiraram em organismos da natureza**, entre reino vegetal [P01, P02, P04, P05, P08 e P10], e animal (pele e músculos) [P03,

P07 e P12]. Dos projetos bioinspirados, quatro utilizaram um único organismo como referência [P1, P04, P05 e P08], enquanto outros quatro utilizaram abordagens conceituais generalistas [P03, P07, P10, P12]. O P2 usou uma combinação de várias características de diferentes plantas e estruturas hexagonais das colmeias.

Dos treze, seis soluções utilizaram o **movimento nástico das plantas** como referências [P01, P02, P05, P06, P08 e P10] a fim de prover movimentos reversíveis, em resposta às condições ambientais, seja para: sombrear, iluminar e/ou ventilar. Majoritariamente as soluções abordaram mais de um parâmetro de controle ambiental, sendo a maioria das propostas voltadas para responder à luz, seguido do calor, água e ar.

Oito projetos utilizaram **controle extrínseco** para desencadear o estímulo ao movimento, ou seja, sistemas artificiais associados a sensores e atuadores [P02, P04, P05, P06, P07, P10, P11 e P12]. Compreendem a utilização de sistemas compostos por elastômeros [P07], atuadores pneumáticos [P04 e P06] e bomba de acionamento [P12], por exemplo. Quatro projetos usaram compósitos com fibra de vidro [P02, P05, P06 e P10].

As outras cinco soluções apresentam **controle intrínseco** (ou seja, sistemas que se autoajustam, sem a necessidade de sistema eletromecânico) [P00, P01, P03, P08 e P09]. Esses sistemas utilizam materiais "inteligentes" e responsivos com capacidade de resposta a estímulos ambientais inerente ao material. Em relação à variação de temperatura: P00 e P01 utilizaram o material inteligente **Liga de Memória de Forma** (*Shape Memory Alloy*) e P03 o **bimetal** (*Thermobimetal*). Já para o controle da umidade relativa, P08 utilizou **madeira associada a compósitos sintéticos e programação computacional**, P09 usou **compósitos com hidrogel**.

As soluções com controle intrínseco contribuem para minimizar os recursos energéticos e maximizar o desempenho funcional com a otimização geométrica. O Air Flow(er) [P01] combinou a propriedade dos materiais com estratégias de deformação dos materiais como a estratégia geométrica (uma solução idealizada por tensionamento de SMA e fios, permitindo os movimentos reversíveis dos painéis). Quanto à obtenção da geometria e do desempenho funcional, é o resultado da associação com o projeto computacional. O HygroSkin [P08], por sua vez, desenvolveu o algoritmo para compor a anisotropia do material responsivo à umidade relativa.

Com relação às **estratégias de deformação do material**, a estratégia geométrica corresponde a abordagem de maior exploração [P00, P01, P02, P03, P05, P06, P10, P11 e P12]. Seguida da incompressibilidade de fluidos [P04, P06, P07, P08, P09, P12], da variação da propriedade do material [P03, P05, P05, P08, P10] e, por fim,

armazenamento de energia [P11]. Soluções a partir de compósitos exploram o VP, sob abordagens de anisotropia material, em que a direção do material combinada com propriedades estruturais pode conferir diferentes deslocamentos [P05, P06, P08 e P10] (V. Charpentier et al. 2017). A incompreensibilidade de fluidos é explorada por atuadores pneumáticos [P04 e P06] e por concentrações hídricas [P08, P09 e P12]. Observa-se também a concomitância de mais de uma estratégia de deformação em um mesmo projeto.

3.5 Síntese do Capítulo

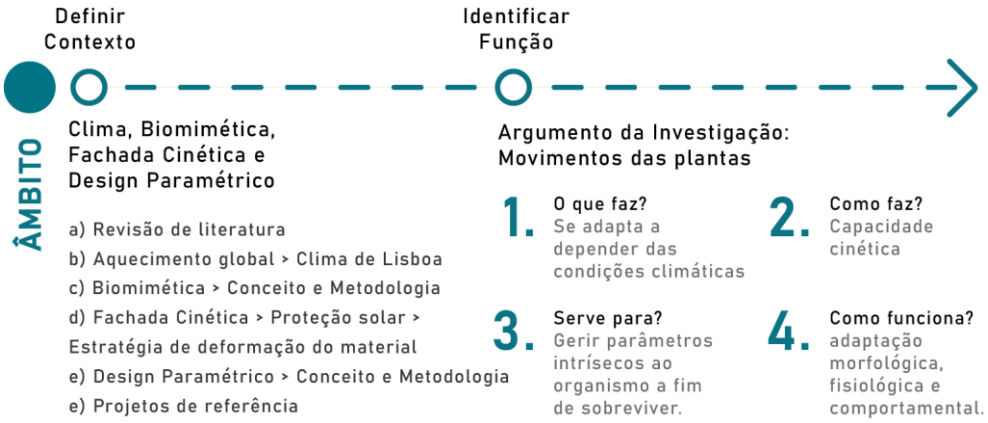
Em síntese, os **modelos de desenvolvimento de projetos computacionais** buscam definir o conhecimento sobre o objeto representado, seja por: modelar diretamente as formas físicas ou modelar o algoritmo (procedimentos de construção matemático-geométrica, que possibilita seleção de solução dentre: as inúmeras possibilidades geradas pelas modificações dos parâmetros ou pela influência das variáveis de desempenho).

O campo do desenvolvimento de projeto (de design ou de arquitetura) asseveram cada vez mais a necessidade de integrar ambientes de programação às ferramentas computacionais (Caetano, Leitão, et al., 2020), a fim de satisfazer as necessidades da prática do desenho.

Os modelos de simulação podem prever o comportamento do clima com base em dados históricos e informações prévias. No contexto de arquitetura e design, o uso de *softwares* e ferramentas para a simulação climática incluem a associação entre o *software* de modelagem 3D, o *Rhino*®, e os *plug-ins* Grasshopper® e as *Ladybug*® *tools*. Ao projetar uma fachada adaptável ou cinética, a simulação pode ajudar a entender como essas soluções podem melhorar a proteção solar do edifício em diferentes condições climáticas.

A fim de sintetizar o estado da arte até então desenvolvido, utilizou-se o método proposto por Arruda (2020) para identificar o **argumento da investigação** a partir da definição: “o que faz”; “como faz”, “serve para” e “como funciona” (Figura 74).

Figura 74. Âmbito da Investigação.



Fonte: Autora (2023).

Segundo o autor, o argumento da investigação não corresponde ao fenômeno da natureza a ser tratado, mas aborda sua função sob ótica que busca ampliar o conhecimento para favorecer a discussão e a compreensão em diversos níveis de complexidade. No caso da investigação em questão: o **movimento das plantas,** especificamente os **movimentos násticos**. Tal temática será abordada no próximo capítulo sobre o processo de descoberta do organismo de referência.

Em relação às **fachadas adaptativas** ou **cinéticas**, diferentes nomenclaturas abordam a temática. A análise de treze projetos adaptáveis foi apresentada, entre soluções que envolvem inspiração na natureza e capacidade cinética. A combinação de diferentes **estratégias de deformação de material** indicou ser possível ampliar o desempenho dos projetos.

Como direcionamento para o desenvolvimento, espera-se explorar futuramente estratégias de transformação de material e desenvolver solução cinética, que contribua para a sustentabilidade do ambiente construído. O próximo capítulo versará sobre o processo de descoberta do organismo de referência da presente pesquisa.

Foto: ©Tarciana Andrade.

4.

Descobrir

4.1 Nota Introdutória

O presente capítulo relatará as atividades e revisão de literatura inerentes à **FASE Descobrir**. Para tanto, está estruturado em três etapas, nomeadamente:

- **Descobrir organismos** – define recorte para movimentos das plantas, em particular os movimentos násticos; realiza revisão sistemática sobre os movimentos násticos; define critérios de seleção, e define organismo com o apoio de especialistas em biologia.

- **Observar a natureza** – realiza revisão de literatura e três estudos de observação com o organismo de referência, a gramínea *Ammophila arenaria*.

- **Abstrair** – sintetiza os níveis de adaptação do organismo que podem ser abstraídos, sob o ponto de vista fisiológico, comportamental e morfológico.

Pretende-se futuramente desenvolver abstrações sobre o organismo de referência, para conceber módulos para fachadas bioinspirados na *Ammophila arenaria*.

4.2 Descobrir Organismos

Para melhor compreender as distintas tipologias sobre movimento nástico e identificar plantas que as exibam, durante a **etapa 'descobrir organismos'** foi realizada revisão sistemática de literatura, coleta e registros de dados em planilha; definição de critérios de seleção; contato com especialistas e seleção do organismo de referência (Figura 75). As seções que se sucedem buscarão esclarecer tal processo.

Figura 75. Descobrir > ETAPA Descobrir Organismos.

Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021) e T. Andrade et al. (2022).

4.2.1 Tipologias de Movimento Násticos

4.2.1.1 Método para a Revisão Sistemática de Literatura

Uma **revisão sistemática de literatura** consiste em abordar uma questão claramente formulada, definindo um procedimento que utiliza "métodos sistêmicos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes, e coletar e analisar dados desses estudos incluídos na revisão" (Moher et al., 2015, p. 33).

Para o presente estudo definiu-se a seguinte questão: "**quais são os tipos de movimentos násticos e quais são as características dos organismos que apresentam tipos específicos de movimento que podem ser recriados no desenho de fachadas cinéticas e adaptáveis?**"

O método de *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis [PRISMA]* foi utilizado para conferir a revisão por buscar aprimorar a confiabilidade das investigações científicas e sintetizar os resultados da pesquisa (Snyder, 2019), de forma concisa e confiável.

A revisão de literatura incluiu estudos publicados entre 2008 e janeiro de 2020, a partir da base de dados *Scopus, Web of Science* e *Science Direct*. O termo generalista *"nastic"*, e diferentes tipologias tais como *"chemonasty", "haptonasty", "hydronasty", "geonasty", "gravinasty", "nyctinasty", "photonasty", "scotonasty", "seismonasty", "thermonasty"* e *"thigmonasty"* foram utilizados para identificar os artigos, em consonância com a pesquisa booleana. Utilizou-se o operador "OR", uma vez que o objetivo foi identificar estudos que continham em seu título, resumo ou palavras-chave uma das palavras definidas na *string*.

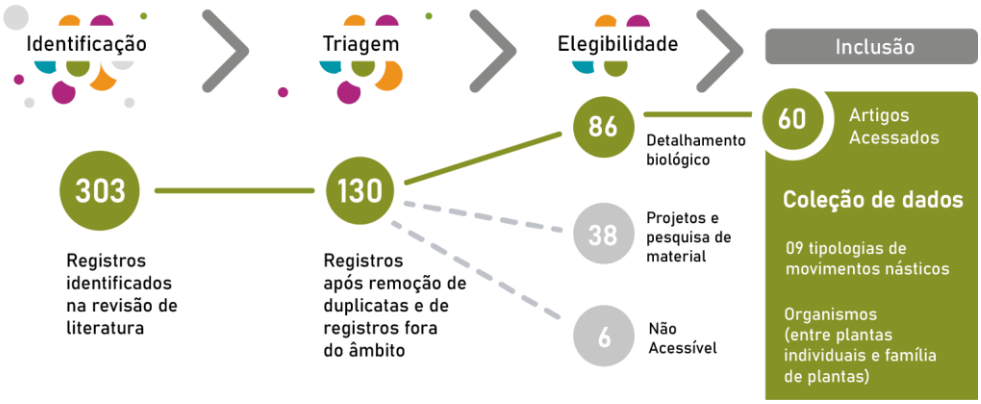
4.2.1.2 Discussão: Tipologias e Organismos

Durante a coleta de dados, foram identificados 303 relatos, os quais foram registrados e codificados em tabela do *Excel*® (T. Andrade et al., 2020).Foram definidos critérios de elegibilidade, nomeadamente: a) artigos que endereçaram estudos sobre movimentos násticos; e b) artigos revisados por pares ou documentos de conferência.

Após a eliminação de duplicados e a retirada de artigos fora do âmbito do presente estudo, chegou-se a 130 artigos, sendo: 86 sobre detalhamento biológico dos organismos; 38 sobre propostas de projetos e estudos de materiais; e 6 foram excluídos por não estarem acessíveis (Figura 76).

A presente revisão compreende a análise de 86 artigos. Foi desenvolvida a partir de uma pesquisa rápida dos termos "nast" e "mov", segundo a análise do título, resumo, palavras-chave e discussões, e uma síntese qualitativa de 60 artigos.

Figura 76. Descobrir > Revisão de literatura sistemática.

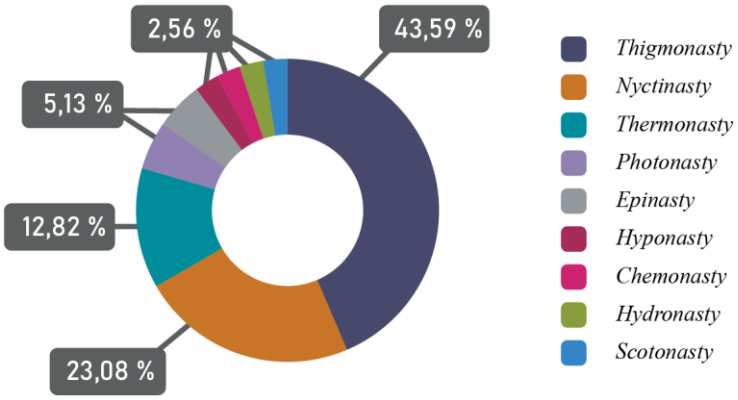


Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2020).

A revisão identificou nove diferentes tipologias, a partir da análise dos artigos específicos, que totalizam 60 artigos (consoante o Gráfico 6 e Tabela 10). Não foram identificados artigos recentes sobre: *haptonasty*, *geonasty* e *gravinasty*. Muito

embora, os termos *epinasty* e *hiponasty* não tenham sido incluídos como palavras-chave da revisão, tais termos foram identificadas durante análise dos artigos, e devidamente conceituados.

Gráfico 6. Descobrir > Tipos de movimentos násticos.



Nota. Movimentos násticos identificados na análise da revisão de literatura. Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2020).

A maior incidência de estudos sobre o movimento *thigmonasty* (em português, **tigmonastia**). A Tabela 10 indica a definição dos nove conceitos identificados durante a revisão (Muhammad et al., 2016; Park et al., 2019; Minorsky, 2019; Nakamura, et al., 2013; Rivière et al., 2017; Uehlein & Kaldenhoff, 2008; Kadioglu et al., 2012; Walter, 2008). A chave para revelar os mecanismos universais que regem as diversas tipologias de movimentos das plantas pode estar na compreensão dos mecanismos moleculares, bioquímicos, biomecânicos e eletrofísicos (Guo et al., 2015).

A recolha de dados incluiu o registro de **27 organismos** (entre: plantas individuais e famílias das plantas), que possuem diferentes tipos de movimentos násticos. A *Mimosa pudica* é o organismo que atrai mais atenção da pesquisa científica. Cerca de 34% dos artigos específicos registrados na revisão, buscavam compreender o funcionamento desse organismo, o qual permanece desconhecido (T. Andrade et al., 2020).

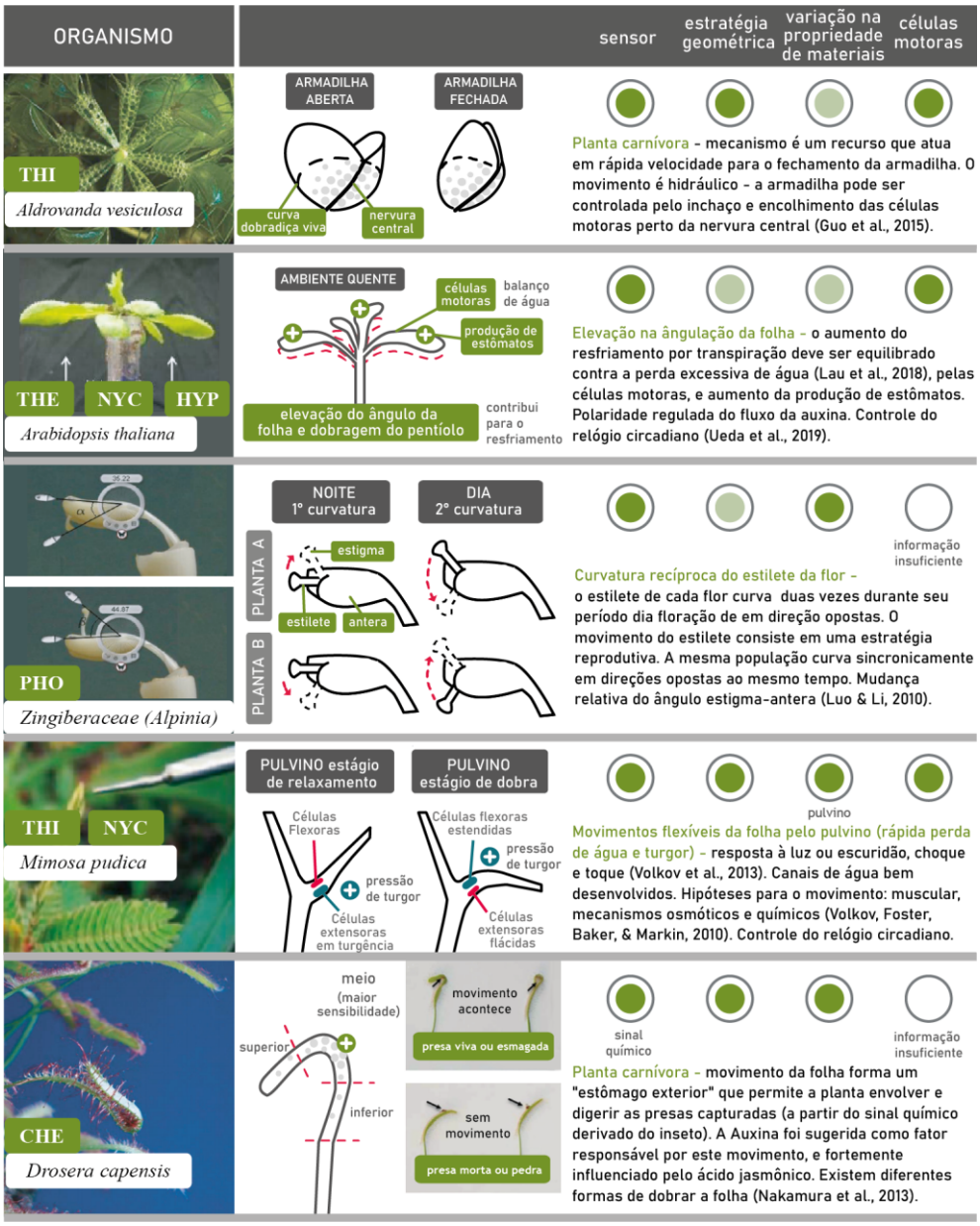
Para cada um dos organismos cadastrados na coleta de dados buscou-se identificar estratégias relevantes. A Figura 77 efetua síntese qualitativa da coleta que inclui exemplos de movimentos: *Thigmonasty, Nyctinasty, Thermonasty, Photonasty* e *Chemonasty* (Lau et al., 2018; Luo & Li, 2010; Ueda et al., 2019; Volkov et al., 2010, 2013).

Tabela 10. Descobrir > Conceitos de movimentos násticos.

TIPOLOGIA	CONCEITOS
THI *Thigmonasty*	Resposta ao contato de um objeto. Resposta lenta ou rápida (Seismonasty - resposta a estímulos mecânicos como choque, toque ou contato, como o fechamento abrupto da *Mimos pudica* em resposta a vibração) (Guo et al., 2015). Em português: Tigmonastia e Seismonastismo.
NYC *Nyctinasty*	Mudanças induzidas por transições da luz para a escuridão, que ocorrem entre o dia e a noite, lentamente. Acontece durante aproximadamente 24h – ritmo circadiano) (Muhammad, Hussain, Jantan, & Bukhari, 2016). Em português: Nictinastia.
THE *Thermonasty*	Movimento causado pela mudança de temperatura (acontece lentamente). Em português: Termonastia.
PHO *Photonasty*	Movimento induzido pela luz (acontece lentamente) (Park et al., 2019). Na maior parte das vezes a exposição à luz provoca abertura, e obscurecimento e sombreamento provoca fechamento das flores. Em português: Fotonastia
EPI *Epinasty*	Mudança de volume assimétrica - movimento impulsionado pela taxa mais alta de expansão celular no lado superior do organismo (adaxial) em comparação com o lado inferior (abaxial). Ocorre sem a presença de órgãos motores especializados (Uehlein & Kaldenhoff, 2008). Pode resultar na diferença microscópica das propriedades do tecido vegetal, como a extensibilidade da parede celular, por exemplo. Epinastias estão associadas ao florescimento (Rivière et al., 2017). Em português: Epinastia.
HYP *Hyponasty*	Mudança de volume assimétrica - movimento impulsionado pela taxa mais alta de expansão celular no lado inferior do organismo (abaxial) em comparação com o lado superior (adaxial). Ocorre sem a presença de órgãos motores especializados (Minorsky, 2019); responsável pelo movimento da folha devido ao crescimento diferencial pecíolo (Rivière, Derr e Douady, 2017). Em português: Hiponastia.
CHE *Chemonasty*	Resposta a produtos químicos ou nutrientes (Nakamura, Reichelt, Mayer, & Mithöfer, 2013). Exemplo: movimento iniciado por um sinal químico derivado de sensibilidade à substâncias orgânicas secretadas pela presa. Em português: Quimionastia.
HYD *Hydronasty*	Respostas adaptativas ao estresse hídrico nas plantas. Mecanismo hidronástico reduzem a intercepção de luz, transpiração e desidratação da folha (Kadioglu, Terzi, Saruhan, & Saglam, 2012). Em português: Hidronastia.
SCO *Scotonasty*	Movimento induzido por escuridão (Walter, 2008).

Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2020).

Figura 77. Descobrir > Organismos com movimento násticos.



Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2020).

Os **Anexos A** e **B** apresentam o registro dos organismos identificados e respectivas referências.

4.2.2 Critério de Seleção e Organismos Pré-selecionados

Para o processo de definição do organismo de referência para bioinspiração, dois **critérios de seleção** foram estabelecidos, a saber: a) **possuir movimento nástico**; e b) ser um **organismo acessível em Lisboa**, para permitir estudos de observação. Como visto, a revisão sistemática de literatura identificou e classificou nove diferentes tipos de movimentos násticos e recolheu dados de vinte e sete organismos que apresentavam movimento nástico (T. Andrade et al., 2020).

Realizou-se revisão de literatura sobre os organismos promissores e consulta ao **repositório online flora.on** da (Sociedade Portuguesa de Botânica (2022). Nesse repositório constam informações fotográficas, geográficas, morfológicas e ecológicas de 2.305 espécies de plantas vasculares autóctones ou naturalizadas, sobre a flora de Portugal (Continente, Açores e Madeira) (Sociedade Portuguesa de Botânica, 2022).

Vinculado ao processo de consulta, **biólogos profissionais apoiaram a pesquisa por organismo compatível com os critérios de seleção** supracitados. Para além dos organismos identificados, os biólogos sugeriram novas opções de plantas.

Três organismos foram selecionados por demonstrarem potencial, a saber: Rhododendron (organismos por termonastia, identificado através da revisão sistemática); e por sugestão dos biólogos dois organismos hidronásticos pertencentes a família de gramínea Poaceae, a saber: *Poa pratensis* e *Ammophila arenaria*.

Para o processo de **registro dos dados** utilizou-se a primeira fase do método de proposto por López et al. (2017) sobre a natureza, em que o clima é um fator de relevância para a adaptação dos organismos (ver seção 0). Tal método busca registrar os princípios das plantas que possam orientar a transferência de princípios biológicos para a arquitetura, sob abordagem visual pautada em três questões de referência: a) qual adaptação do organismo analisado? b) por que é que o organismo necessita dessa estratégia? c) como é que o organismo desenvolve essa estratégia?

O emprego de quadro visual proporciona síntese das informações, de modo a auxiliar na identificação das características morfológicos, fisiológicos e comportamentais dos organismos. A seguir serão abordados sumariamente os três organismos pré-selecionados e respectivos quadros.

4.2.2.1 Rhododendron

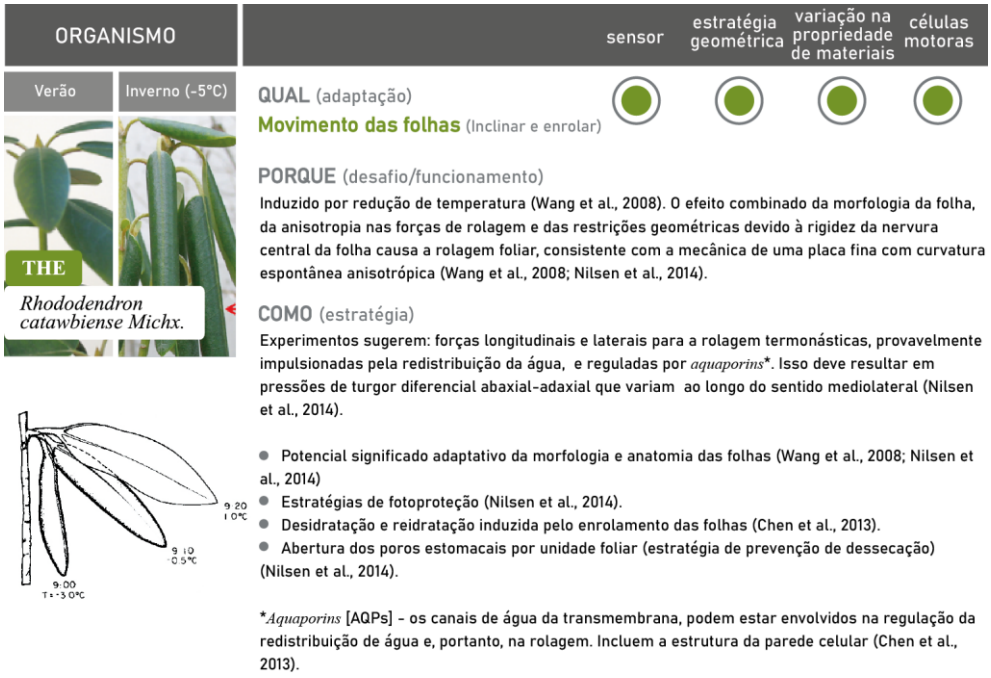
A resistência ao frio de algumas das espécies de Rhodondedron deve-se em parte aos movimentos de termonastias reversíveis das folhas, que ocorre tipicamente em temperaturas abaixo de zero, de modo a permitir a sobrevivência da planta durante o inverno, mesmo com a forte incidência de ventos e ameaças de acumulação de neve (Wang, Nilsen, & Upmanyu, 2020).

A termonastia foliar da Rhododendron funciona como indicador de temperatura da folha, em que quanto mais frio maior a extensão da:

- **queda das folhas**, que se inclinam longitudinalmente nos caules das folhas (pecíolo);
- curvatura das margens foliares ao redor da costela central ou **veia principal da folha** (*midrib*, em inglês), que dão a aparência de enrolamento das folhas (Wang et al., 2020).

Por esse motivo que as Rhododendrons são comumente referidas como **termômetros da natureza** (Frick-Ruppert, 2010; Wang et al., 2020), já que apresentam respostas comportamentais perceptíveis ao olho humano, para além das respostas fisiológicas e das alterações anatômicas (Figura 78).

Figura 78. Descobrir > Quadro de registro sobre a Rhododendron.

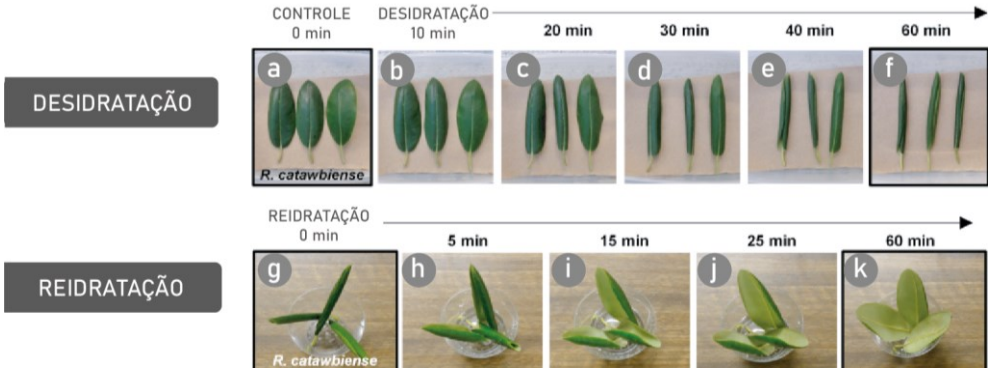


Nota. Movimentos foliar por termonastia: a) folha no verão e b) no inverno (temperatura ambiente de -5 °C). Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2020). Foto: Nilsen (1990, pp. 30 – 35); Wang et al. (2009).

Investigações indicam que o movimento foliar acontece para promover proteção de: processos fisiológicos críticos (como a fotossíntese); e danos causados pelo efeito sinérgico entre temperaturas frias e alta luz (situação comum às condições de inverno em florestas temperadas) (Nilsen et al., 2014). As folhas caídas e enroladas diminuem a exposição da área foliar à luz solar, e assim, a adaptação evita danificações, em temperaturas abaixo de zero, já que o mecanismo fotossintético da folha é mais suscetível a danos causados pela luz do que pela elevação de temperatura (Frick-Ruppert, 2010).

O entendimento do mecanismo da Rhododendron ainda é inconclusivo. Investigações recentes sobre a dissecação da *R. maximum*, desenvolvidos por Wang et al. (2020), revelam que os **movimentos foliares estão relacionados com a expansão diferencial de espessura abaxial-adaxial, devido a gradientes de turgidez, necessária para o rolamento das folhas, que está distribuída transversalmente, ao *midrib*, em anisotropia. E que há estreita correlação entre a redistribuição hídrica do pecíolo com o rolamento das folhas** (Chen et al., 2013; Wang et al., 2020).

Figura 79. Descobrir > Termonastia da *R. catawbiense Michx*.



Nota. a) desidratação; b) redução induzida pelo enrolamento das folhas. Curvatura incipiente foi observada dentro de 20 minutos de desidratação (Fig. 2c). A curvatura aumentou com stresse prolongado (Fig. 2c-f). *R. catawbiense* começou a desenrolar dentro de 5 minutos de reidratação (Fig. 2h), e totalmente desenrolado após aproximadamente uma hora (Fig. 2k). Fonte: adaptado Chen et al. (2013).

Não são todas as espécies de Rhododendron que exibem movimentos foliares. Por exemplo, *Rhododendron ponticum L.* (nativa da Ásia central) não possuem termonastia foliar (Chen et al., 2013; Wang et al., 2008), enquanto a *Rhododendron catawbiense Michx* e *Rhododendron maximum* (nativas do leste dos Estados Unidos) exibem a termonastia (Nilsen et al., 2014).

4.2.2.2 Poa pratensis

A *Poa pratensis* é uma espécie de **grama perene da família** *Poaceae*. Nativa da Europa e da Ásia, sendo encontrada no Canadá e nos EUA, como também na África do Sul, Nova Zelândia, ilhas do Oceano Índico (Invasive Species Compendium, 2019). Ocorre naturalmente no Norte de Portugal Continental e na Ilha da Madeira (Sociedade Portuguesa de Botânica, 2022).

A *Poa pratensis* pode atingir 10 a 90 cm de altura. As folhas são lineares com até 20 cm de altura e 3-5 mm de largura, lisas ou levemente ásperas, e exibem as pontas em forma de barco (Invasive Species Compendium, 2019) (Figura 80).

Figura 80. Descobrir > *Poa pratensis*.

Nota. a) flor; b) folha; c) ponta da folha em forma de barco; d) micrografia da seção transversal da folha (com 5 µm) em luz brilhante. Fonte: Casler & Undersander (2019).d.); b – c) Casler & Undersander (2019); d) Szewczyk et al., (2015).

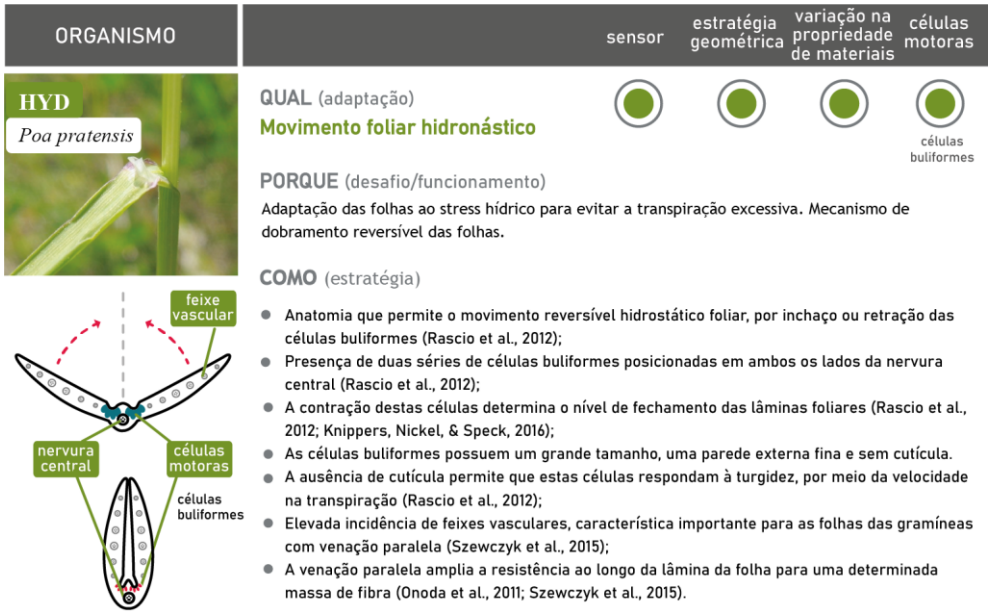
Do ponto de vista de Collins et al. (2017), essa erva perene é **bem adaptada a estações frias**, como também a uma vasta gama de solos, mas persiste melhor em solos bem drenados. **Tem baixa tolerância à seca**, mas se recupera bem da mesma. Tolera as inundações e é resistente ao inverno. A produtividade dessa gramínea é maior durante a primavera e o outono. Essas plantas ficam adormecidas durante os meses quentes e secos do verão (Casler & Undersander, 2019).

A *Poa pratensis* é valorizada economicamente como campos de pastagem e grama para campos de golfe por dispor de uma **boa tolerância ao desgaste** (capacidade da planta de suportar forças que esmagam folhas, caules e raízes) (Szewczyk et al., 2015). Pode ser considerada como erva invasora em ecossistemas naturais de pastagens, por reduzir a biodiversidade nativa (Invasive Species Compendium, 2019).

As **folhas apresentam duas séries de células buliformes posicionadas em ambos os lados da costela principal. A contração dessas células determina o nível de fechamento das lâminas foliares** (Rascio et al., 2012)(Figura 81). O movimento de abertura e fechamento acontece como um livro (Oliver Betz et al., 2016; Rascio et al., 2012). "Em condições de stresse hídrico, a ausência de cutícula nas células buliformes adaxiais permite que haja a perda de turgidez, devido à alta velocidade

de transpiração, levando ao fechamento da lâmina foliar sob a pressão das células ainda túrgidas do seu lado abaxial"[55] (Rascio et al., 2012, p. 376, tradução livre).

Figura 81. Descobrir > Quadro de registro sobre a *Poa pratensis*.



Fonte: Autora (2023). Foto: ©Fabelfroh.

Assim, quando a planta está bem hidratada, as células buliformes situadas ao lado da nervura central estarão túrgidas, e por consequência as folhas encontram-se abertas. E quando estiver em condição de stresse hídrico, as células buliformes estarão desidratadas, e folhas tenderão ao fechamento foliar em condições de stresse hídrico, e reabertura em condições climáticas favoráveis (Oliver Betz et al., 2016) (Figura 81).

Estudo anatômico e morfológico, desenvolvido por (Szewczyk et al., 2015), com 37 gramíneas, contemplou a análise de seis subespécies da *Poa pratensis* e identificou **um alto índice médio de número de feixes vasculares. Os feixes vasculares e veias podem ser 20-30 vezes mais resistentes do que outros tecidos de folhas, sendo particularmente importante para as folhas de grama com venação paralela** (Onoda et al., 2011).

[55] *"In condizioni di stress idrico la mancanza di cuticola fa si che queste cellule adassiali perdano rapidamente turgore per l'elevata velocità di traspirazione, portato alla chiusura della lamina fogliare sotto la spinta delle cellule ancora turgide del suo lato abassiale"* (Rascio et al., 2012, p. 376).

4.2.2.3 Ammophila arenaria

Organismo com **hidronastia** ou **hidronastismo** que dispõe de fechamento foliar em condições de stresse hídrico e salino; e reabertura em condições climáticas favoráveis (Chergui et al., 2017; Grigore et al., 2014; Huiskes, 1979) (Figura 82).

Figura 82. Descobrir > Quadro de registro: *Ammophila arenaria*.

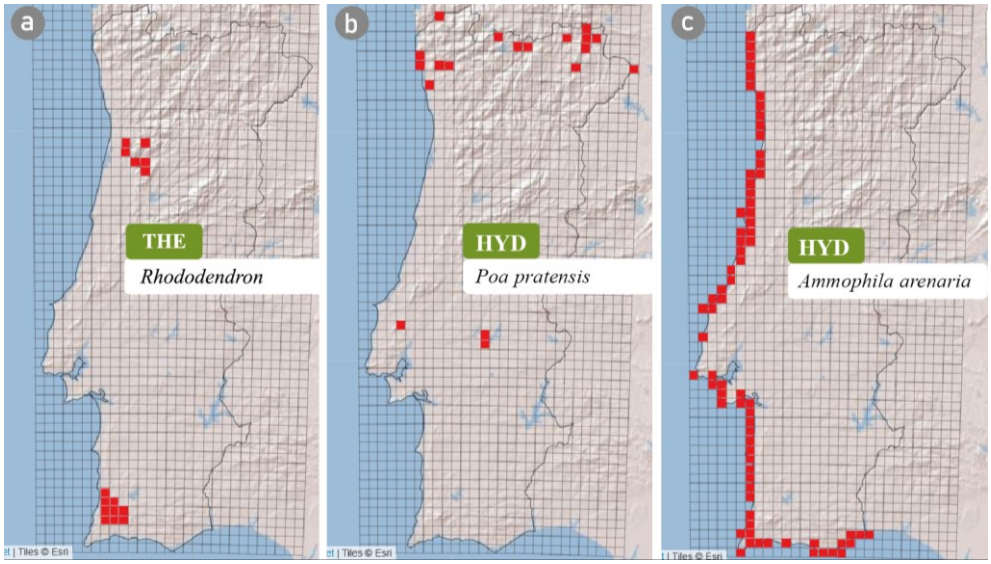
Fonte: Autora (2023). Foto: Sociedade Portuguesa de Botânica (2022); Storey (2002).

4.2.3 Definição do Organismo de referência

Segundo dados que constam no repositório da Sociedade Portuguesa de Botânica (2022), a Figura 83 atestam a ocorrência dos organismos pré-selecionados no território de Portugal Continental.

Com relação a *Rhododendron poticum* encontram-se 107 registros, em apenas duas populações disjuntas na Serra do Caramulo e Serra de Monchique (Sociedade Portuguesa de Botânica, 2022). A incidência da *Poa pratensis* é verificada hegemonicamente no Norte do país, com o total de 26 apontamentos. Ambos os organismos, Rhododendron e *Poa pratensis*, são de difícil acesso em Lisboa. Há 404 registros da gramínea *Ammophila arenaria* em Portugal, ao longo da costa litorânea (Sociedade Portuguesa de Botânica, 2022).

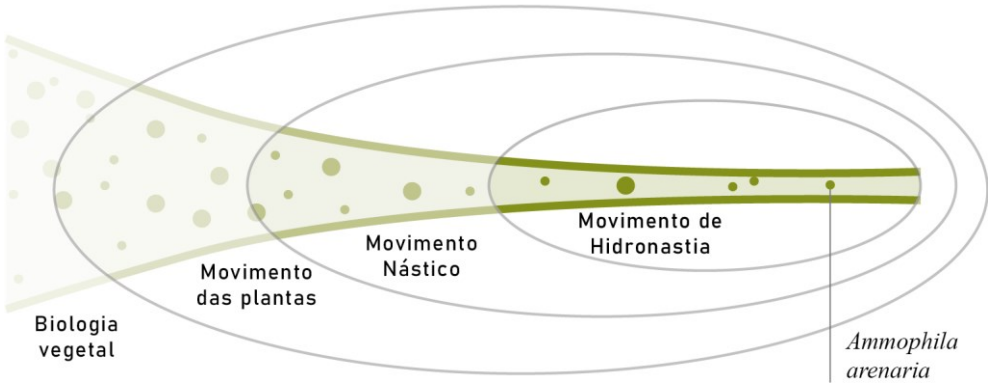
Figura 83. Descobrir > Organismos em Portugal Continental.



Nota. Gráficos: (Sociedade Portuguesa de Botânica, 2022). Fonte: Autora (2023).

Nesse sentido, a *Ammophila arenaria* foi selecionada como organismo de referência da presente investigação, por cumprir os dois critérios de seleção previamente estabelecidos: movimento reversível da folha (Chergui et al., 2017; Huiskes, 1979) classificado como movimento nástico por hidronastia (Figura 84).

Figura 84. Descobrir > Organismo de referência.



Fonte: Autora (2023).

Além disso, ao se comparar a *Ammophila arenaria* à gramínea *Poa pratensis*, percebe-se que ambos os organismos são da família *Poaceae*, exibem hidronastia e células buliformes como células motoras. A *Poa pratensis* possui tais células em ambos os lados da nervura central foliar (Betz et al., 2016; Rascio et al., 2012) que proporciona o movimento de abertura e fechamento como um livro (Betz et al., 2016; Rascio et al., 2012). A *Ammophila arenaria*, por sua vez, possui as células motoras na base das criptas estomáticas, ao longo das nervuras da folha. Assim, analogias sobre o

segundo organismo necessitaria provavelmente de menor profundidade que a *Poa pratensis*, para conferir a amplitude de movimento.

O objeto de estudo da presente investigação será a folha da *Ammophila arenaria*, a qual foi identificada mediante contato com especialistas (biólogos profissionais), revisão de literatura e pesquisa de observação (melhor detalhada posteriormente). O contato com especialistas, em consonância com o contínuo processo de revisão de literatura, foi essencial para a definição da *A. arenaria* como organismo de referência.

4.3 Observar a Natureza

O processo de '**observar a natureza**' compreende: revisão de literatura sobre a *Ammophila arenaria* e desenvolvimento de três estudos de sobre o organismo.

Figura 85. Descobrir > ETAPA Observar a natureza.

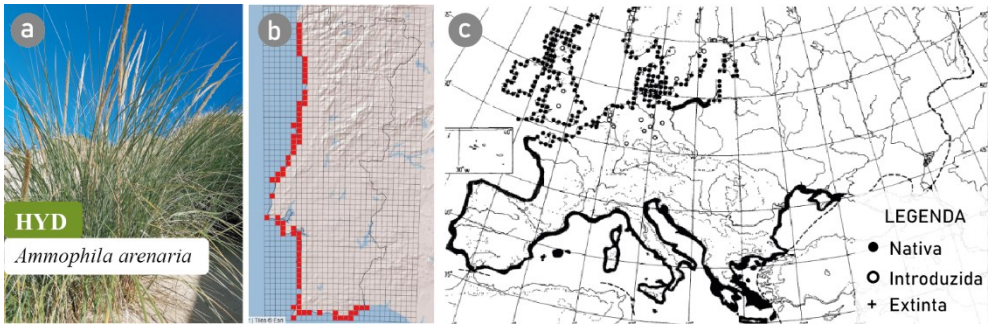
Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021) e T. Andrade et al. (2022).

Parte do processo de observação da natureza foi publicado em T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

4.3.1 Revisão de literatura sobre a *Ammophila arenaria*

Ammophila arenaria é o nome científico do *marram grass*. A sua profusão ao longo da costa da Europa Ocidental (Figura 86) e Norte de África é notável. Pode ser considerada como uma espécie invasora em muitas regiões, de modo a afetar negativamente a biodiversidade. No entanto é relevante por sua capacidade fixação das dunas (Huiskes, 1979; Rodríguez-Echeverría et al., 2008), de modo a evitar a erosão costeira.

Figura 86. Observar > Distribuição da *Ammophila arenaria*.

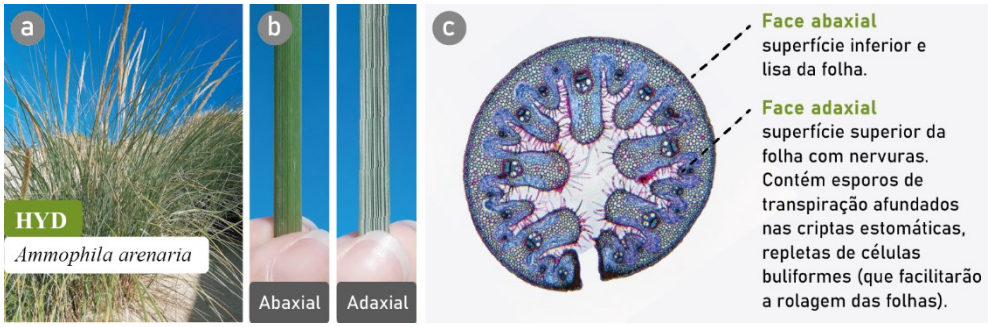


Nota. a) planta; b) incidência em Portugal e c) na Europa. Fonte: a) Autora (2023); b) Sociedade Portuguesa de Botânica (2022); c) adaptado de Huiskes (1979).

A *marram grass* é uma angiosperma (plantas com flores), pertencente à família das *Poaceae*. É uma erva perene, rizomatosa e forma tufos densos (Huiskes, 1979). As folhas são pontiagudas, rígidas e desenroladas com cerca de 6 mm de largura (Gadgil, 2006), e entre 60 e 90 cm de altura (Huiskes, 1979). Em condições de baixa umidade ambiental, as folhas de *Ammophila arenaria* encontram-se bem enroladas (Huiskes, 1979).

A epiderme inferior da folha ou a face abaxial é lisa e cinzenta-esverdeada. A epiderme superior ou a face adaxial é nervurada e densamente coberta por minúsculos pelos (tricomas) (Gadgil, 2006; Huiskes, 1979) (Figura 87).

Figura 87. Observar > Características da *Ammophila arenaria*.



Nota. a) planta; b) face abaxial e adaxial; c) micrografia da seção transversal da folha. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021) e Gadgil (2006). Foto: a – b) Autora (2023); c) Talpa (2016).

Em Portugal, *Ammophila arenaria* subsp. *Arundinacea* é encontrada em toda a faixa costeira continental, conhecida como **estorno** (Sociedade Portuguesa de Botânica, 2022). Os caules das populações portuguesas são eretos e robustos, atingem entre 50 e 120 cm de altura. As folhas da planta possuem 2 a 6 mm de largura (Costa & Cunha, 2019).

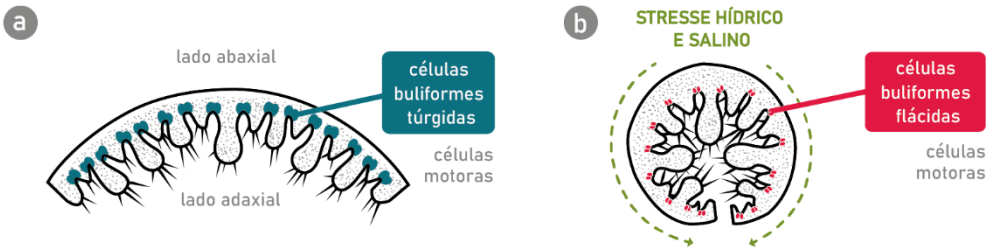
A anatomia da folha *A. arenaria* permite a adaptação ao **stresse hídrico e salino** (Chergui et al., 2017), o que desencadeia o **movimento reversível das folhas**. O seu funcionamento reflete perfeitamente tais adaptações como o **mecanismo de rolagem foliar**.

Esse mecanismo corresponde à tipologia de um movimento nástico – o **movimento de hidronastia – que reduz a transpiração, a desidratação das folhas, e a intercepção de luz** (Kadioglu et al., 2012). O movimento proporciona **ajuste osmótico e proteção contra os efeitos da radiação excessiva** (Chergui et al., 2017). Organismos da família *Poaceae* (gramíneas) normalmente ostentam esse tipo de movimento (Rascio et al., 2012).

A presença de **células buliformes** é fundamental para facilitar a dobragem e o enrolamento das folhas (Chergui et al., 2017; Grigore et al., 2014). Estão na face adaxial de *A. arenaria*, na base das **criptas estomáticas – que são 'vales' entre as costelas da superfície superior da epiderme, que percorrem toda a extensão foliar** (Chergui et al., 2017).

As células buliformes são grandes, têm uma parede exterior fina, e não apresentam cutícula (Grigore et al., 2014). A ausência de cutículas permite a essas **células respondam à turgescência** e acelerem a transpiração. As **células buliformes atuam como um motor** (Grigore et al., 2014), retraem o volume da célula devido à perda de água, fazendo com que a folha role ou dobre (Chergui et al., 2017; Grigore et al., 2014). Em condições úmidas, as células são turgescentes, de modo a proporcionar que as folhas se desenrolarem (Chergui et al., 2017) (Figura 88). A posição das células buliformes na epiderme determina o padrão de fechamento das folhas (Grigore et al., 2014).

Figura 88. Observar > Mecanismo da *Ammophila arenaria*.



Nota. Ilustração esquemática da secção transversal da folha da *marram grass* a) aberta e b) fechada. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

O movimento induzido pelas células buliformes **reduz a transpiração e diminui a superfície foliar** (Grigore et al., 2014) e contém o vapor de água transpirado (Chergui et al., 2017) – prevenindo a perda de umidade para o ambiente. Devido a

uma diminuição da área superficial, o enrolamento das folhas também reduz o impacto abrasivo dos grãos de areia nos tecidos foliares (Chergui et al., 2017).

Os **estômatos** são poros necessários para a troca gasosa das plantas. Quando o mecanismo de enrolamento das folhas ocorre, os estômatos fecham reduzindo a transpiração (Rascio et al., 2012). O **lado adaxial é nervurado e densamente coberto por pequenos pelos que protegem o estômato**. Contribuem para reduzir as trocas gasosas na planta e expandir o percurso de difusão de vapor de água (Huiskes, 1979).

A face abaxial é desprovida de estomas (Chergui et al., 2017), o que contribui para reduzir a transpiração, combinada com o espessamento da cutícula. Essa cutícula é espessa e clara. Aumenta o coeficiente de reflexão da planta, protegendo-a da radiação (Chergui et al., 2017). A cutícula é também hidrofóbica, uma vez que proporciona um revestimento ceroso que previne a perda de água (Bhushan, 2009).

Do ponto de vista anatômico, Chergui et al. (2017) identificaram a adaptação das folhas de *Ammophila arenaria* ao stresse hídrico e salino como sendo bastante sofisticada, e o seu funcionamento reflete perfeitamente tais adaptações, através do **mecanismo de rolamento foliar para conservação da água e proteção dos efeitos de radiação.**

4.3.2 Estudos de Observações

O método de **pesquisa de observação** "[...] **requer um olhar atento e registro sistemático de fenômenos** – incluindo pessoas, artefatos, ambientes, eventos, comportamentos e interações[56]" (Martin & Hanington, 2012, p. 120, tradução livre, grifo nosso). É caracterizado pelo grau de formalidade no processo de observação e registro (esboços, fotografias e/ou vídeos). Pode seguir um processo semiestruturado ou possuir rigor de análise qualitativa.

Foram realizados **três estudos de observação**. As duas primeiras sessões realizaram a coleta de amostras foliares na Praia do Guincho, Cascais, em Lisboa - PT (38°43'48,0"N 9°28'25,0"W), com: medição da largura da folha (por meio do paquímetro), registro fotográfico e dos dados climáticas, a cada 30 minutos.

O primeiro estudo explorou o fechamento de amostras foliares por desidratação. O segundo analisou o movimento reversível da folha através da desidratação e

[56] *"[...] requires attentive looking and systematic recording of phenomena—including people, artifacts, environments, events, behaviors and interactions"* (Martin & Hanington, 2012, p. 120).

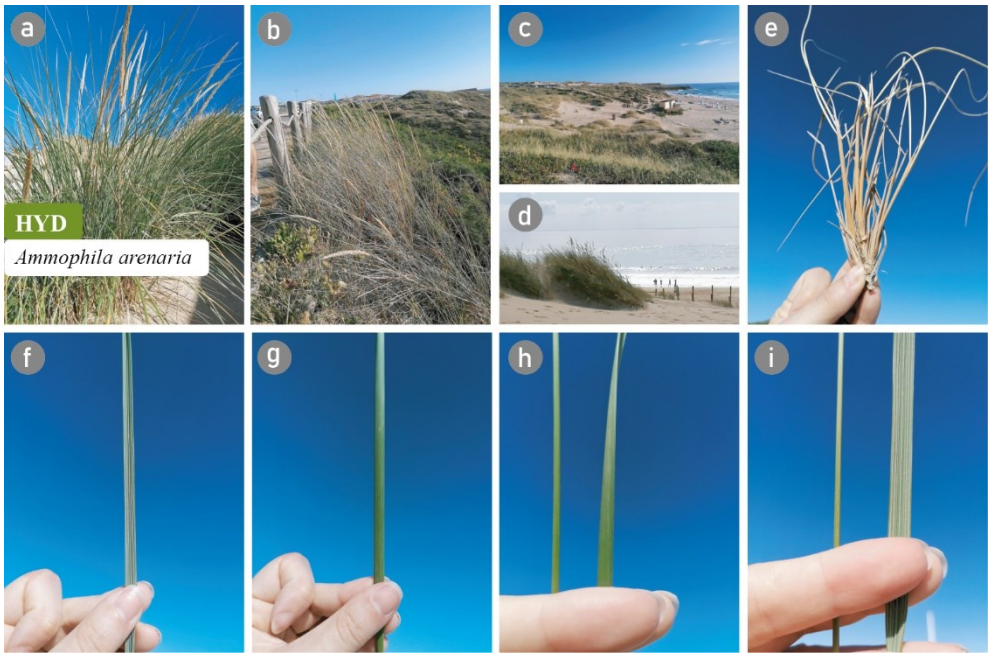
reidratação. Já o terceiro buscou analisar a morfologia de secções transversais da *A. arenaria*. Os estudos serão descriminados posteriormente.

4.3.2.1 Estudo de Observação I

O primeiro experimento, foi realizado entre o dia 13 e 14 de junho de 2020. Observou-se quanto tempo era necessário para amostras foliares coletadas se fecharem completamente. Uma primeira coleta de amostras, foi realizada no dia 13 de junho, às 16h. Cerca de duas horas e trinta minutos depois, percebeu-se que todas as amostras estavam enroladas (Figura 89).

A fim de observar o comportamento por hidronastia, às 18:30h do referido dia, uma nova coleta de amostras foi realizada. Por volta das 20:30h, as folhas estavam, completamente fechadas novamente. Em seguida, as folhas foram submetidas a hidratação em água potável por dezesseis horas.

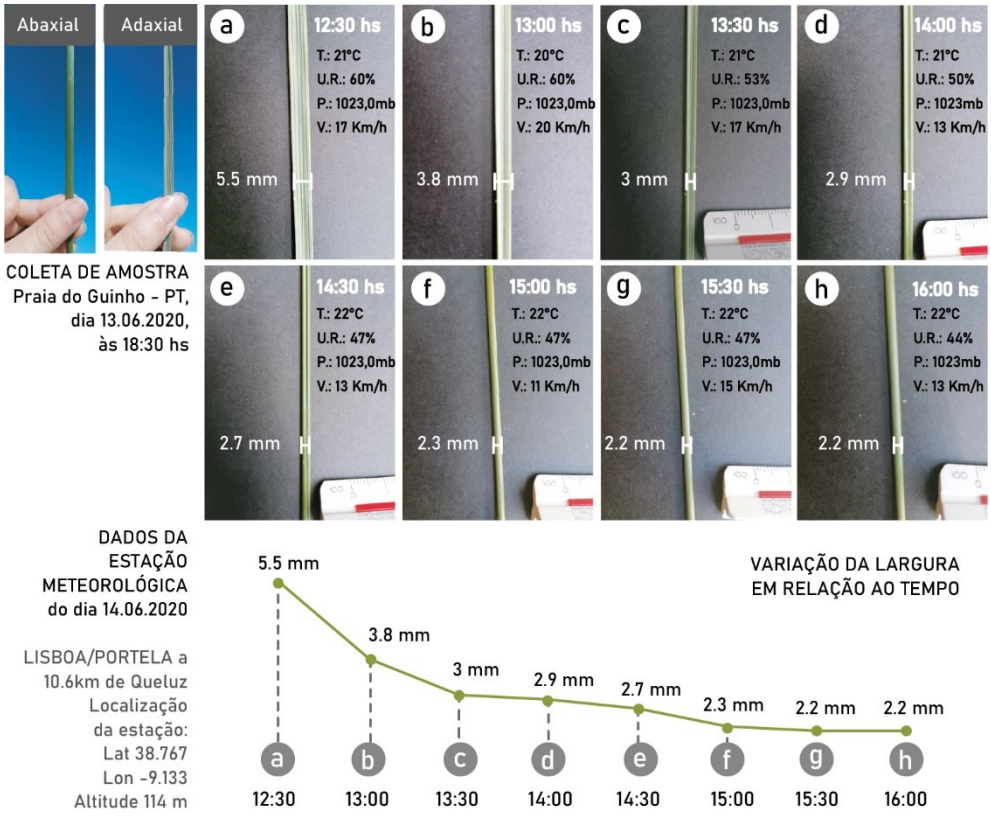
Figura 89. Observar > Registro fotográfico da *Ammophila arenaria*.



Nota. Registro fotográfico da *Ammophila arenaria* na Praia do Guincho, Cascais, em Lisboa – PT, no dia 13 de junho de 2020; a – d) *A. arenaria*; e) forma geral; f) face adaxial; g) face abaxial; h – i) comparação entre a folha completamente enrolada (retirada com 2:30 horas de antecedência) e uma folha desenrolada (amostra retirada no momento do registro da imagem). Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

No dia 14 de junho de 2020, a amostra foliar que apresentava maior largura (5,5 mm) foi selecionada para estudo de observação por desidratação, a cada trinta minutos (Figura 90). Imagens e dados climáticos foram registrados.

Figura 90. Observar > Observação I: por desidratação.



Nota. Registro fotográfico e dados das condições climáticas no dia 14 de junho de 2020, sobre o processo de desidratação de amostra da *Ammophila arenaria*, a cada 30 minutos. Cada imagem indica: horário do registro; largura da folha (por meio do paquímetro); T. – temperatura ambiente; U.R – Umidade relativa; P. – Pressão atmosférica; V. – Vento. Por fim, revela gráfico de variação da largura da folha em relação ao tempo de desidratação. Fonte: Autora, (2023).

A folha sob análise, levou três horas para fechar completamente. Em seguida passou a ser reidratada, durante sete horas para reabertura.

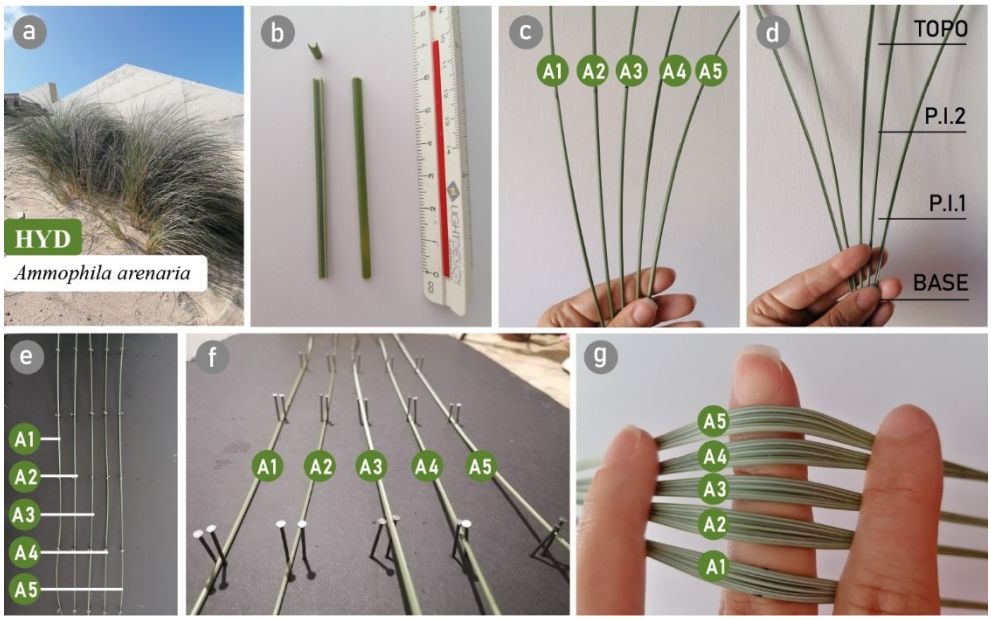
4.3.2.2 Estudo de Observação II

O segundo estudo de observação objetiva observar o movimento reversível da folha de *marram grass* através da desidratação e reidratação. O processo de observação decorreu entre o dia 28 e 30 de setembro de 2020. Amostras foliares foram coletadas no mesmo local do primeiro estudo de observação. Dado o período de coleta do ano (setembro de 2020), as folhas apresentaram menores largura do que no primeiro estudo (junho de 2020).

A primeira etapa consistiu na **preparação das amostras** (Figura 91). Cinco amostras foram selecionadas, e suas bases foram posicionadas em água potável para hidratação por vinte horas. No dia 29 de setembro de 2020, às 9:30h, as **dimensões das amostras foram registradas** através da medição da altura, com posterior

marcação de quatro distintos pontos para cada amostra, a saber: a) Base; b) Ponto Intermediário 1 [P.I. 1]; c) Ponto Intermediário 2 [P.I. 2]; e Topo (altura menos 10 cm, para evitar a incidência de pontas secas).

Figura 91. Observar a natureza > Observação II: preparação das amostras.



Nota. a) registro fotográfico da *A. arenaria* na Praia do Guincho, Cascais, em Lisboa-PT, no dia 27 de setembro de 2020; b) referência das dimensões da folha de *marram grass* pelo escalímetro; c) cinco amostras para o experimento [A + número de identificação da amostra]; d) identificação dos pontos de medição; e -f) posicionamento das amostras em plataforma que permite fixação flexível; g) face adaxial, que possui nervuras que percorrem todo o comprimento da folha, densamente coberta por minúsculos pelos. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

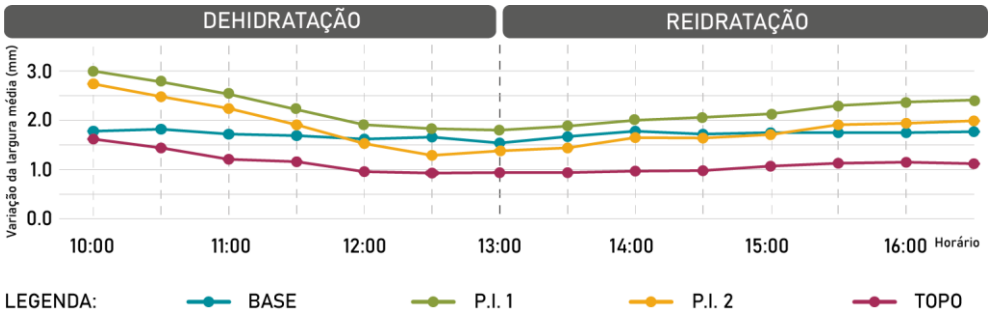
O **Ciclo de Desidratação** decorreu entre as 10:00 h e 13:00 h. As amostras foram posicionadas em plataforma horizontal para permitir fixação flexível. A cada trinta minutos, as larguras referentes aos pontos previamente marcados foram medidas com o auxílio de paquímetro, para cada amostra. Os dados foram registrados em planilha *Excel*®. Após o primeiro ciclo, as bases das amostras foram alocadas em água potável durante trinta minutos.

O **Ciclo de Reidratação** iniciou às 13:30h, com medição das larguras também a cada trinta minutos. Imediatamente após o registro das larguras, cada amostra voltava a ser inserida em meio aquoso. O processo aconteceu sistematicamente até as 16:30 h. Nova medição foi realizada vinte e quatro horas após o início do experimento. O Gráfico 7 evidencia a variação média da largura foliar para cada ponto de medição. As curvas referentes aos P.I. 1 e P.I. 2 são similares. As dimensões da base e do topo revelam variações de abertura reduzidas.

O processo de desidratação aconteceu em três horas. A reidratação apresentou um maior tempo de resposta que a desidratação. Vale salientar, no entanto, que as

mostras sob análise não estavam em seu habitat natural. A medição realizada vinte quatro horas após o início da observação, verificou que as folhas estavam abertas em níveis aproximados da medição inicial do experimento.

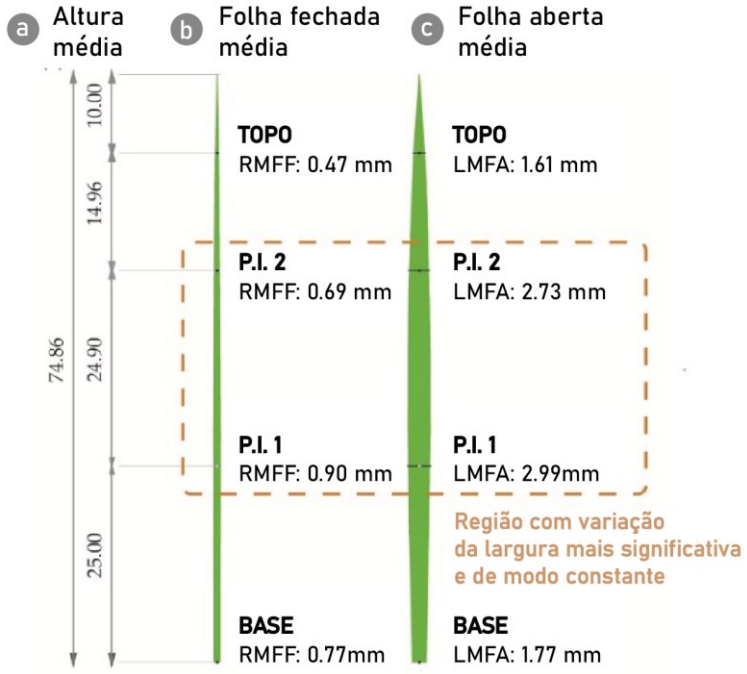
Gráfico 7. Observar > Observação II: Variação média da largura das folhas.



Nota. Entre as 10:00 h às 13:00 h fechamento por desidratação; 13:01 às 16:30 abertura por reidratação. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

A Figura 92 evidencia as médias das cinco amostras selecionadas referente à (ao): a) altura média; b) Raio Médio da Folha Fechada [RMFF]; c) Largura Média de Folha Aberta [LMFA].

Figura 92. Observar > Observação II: médias das cinco amostras.



Nota. P.I. 1: Ponto Intermediário 1; P.I. 2: Ponto Intermediário 2; RMFF: Raio Médio da Folha Fechada; LMFA: Largura Média de Folha Aberta. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

Percebe-se que a variação da largura foliar apresenta maior intensidade nos pontos intermediários do que nas extremidades. Por fim, o estudo de observação em questão ratificou o comportamento do movimento das folhas da *Ammophila arenaria*, constatado preliminarmente por revisão de literatura, e comprovou que o **movimento foliar é reversível**.

4.3.2.3 Estudo de Observação III

O estudo de observação III foi realizado através da **análise da morfologia das secções transversais da** *Ammophila arenaria*, de imagens disponibilizadas no site *Science Photo Library*[57] (fonte de imagens e vídeos de ciência e medicina). A fim de proteger a **propriedade intelectual** e o direito de imagem, a síntese da análise das secções: creditará os devidos autores, indicará os códigos das imagens disponibilizados no site, e por fim, as secções serão exibidas, com efeito sombreamento no *Illustrator*.

A análise objetiva definir padrão proporcional a localização das células buliformes nas criptas estomáticas. Para tanto, os seguintes **critérios de seleção** de imagens foram estabelecidos: a) legibilidade da secção transversal; b) as imagens de secções a serem analisadas deveriam enquadrar totalmente a secção foliar; c) as secções deveriam ser diferentes; e d) o nível de abertura/fechamento das secções deveria ser similar.

A **coleta de dados** identificou nove secções. Dessas, cinco foram selecionadas para compor o *corpus* de análise, por quê: quatro imagens foram excluídas por serem a mesma secção com diferente coloração e/ou rotação da imagem. Durante a **análise os dados**, percebeu-se que uma das secções apresentava um nível de fechamento diferente das outras secções, que influenciaria nas dimensões e proporções morfológicas. Por esse motivo, o *corpus* foi fechado na análise de quatro secções.

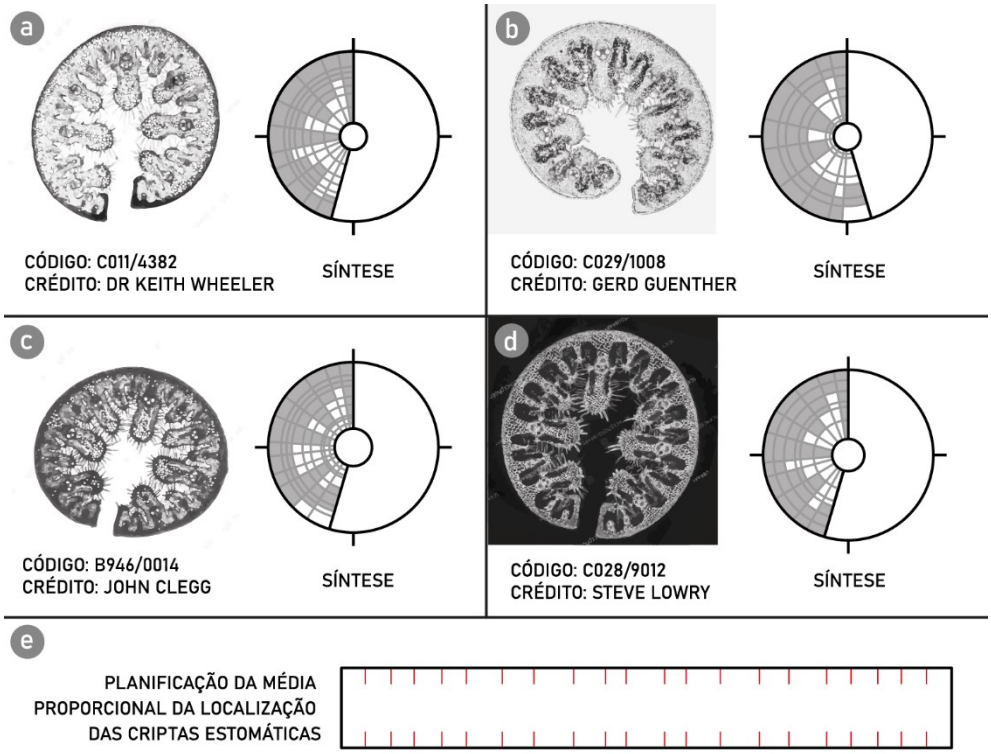
Para o processo de **análise das secções transversais** propriamente, posicionou-se uma circunferência de 10 cm de comprimento na imagem sob análise, com raio devidamente identificado. À medida que a circunferência e raio foram rotacionados, buscou-se marcar os pontos mais profundos das criptas estomáticas.

A análise foi efetuada para dois quadrantes da secção transversal de cada imagem (quadrante 1: $\pi/2$ a π rad; quadrante 2: π a $3\,\pi/2$ rad). Posteriormente, preencheu-se os vazios conforme a morfologia da secção, produzindo o diagrama esquemático

[57] https://www.sciencephoto.com. Acesso em 16 de dezembro de 2020.

(Figura 93). Percebe-se semelhança principalmente entre a síntese da Figura 93**c** e Figura 93**d**.

Figura 93. Observar > Observação III: análise das secções transversais.



Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

Os pontos identificados foram planificados em uma linha de 5 cm, no *software Rhino 6.0*®. Em seguida produziu-se a média entre as dimensões dos pontos das criptas estomáticas referentes às quatro secções. Por fim, espelharam-se as proporções produzindo uma faixa com 10 cm. Tal proporção é designada por **padrão AA 020**, que compreende a proporção identificada na análise das secções da *Ammophila arenaria* (Figura 93**e**), ou seja, vinte marcações ao longo da largura.

Constatou-se ainda que a curvatura da *A. arenaria* acontece a partir de um eixo central (veia principal). Ambos os lados, direito e o esquerdo, curvam-se em direção ao fechamento da forma como uma circunferência (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Cruz, 2021). Tal comportamento responsivo confere reversivelmente a redução (Grigore et al., 2014) e ampliação da superfície foliar. As extremidades da secção transversal são paralelas, a fim de proporcionar o fechamento da folha.

4.4 Abstrair

No campo da biomimética e biônica, a abstração corresponde processo indutivo em que se tira uma conclusão geral com base na observação de um objeto específico (ISO 18458:2015, 2015). Portanto, o que vale para os sistemas naturais deve revelar correspondência em sistemas artificiais, seja através da morfologia, fisiologia ou comportamento do organismo. "**O essencial é entender, captar o princípio para o qual uma determinada coisa acontece na natureza, e daí aplicar para um novo conhecimento**" ou objeto de estudo (Arruda, 2018, p. 5, grifo nosso).

A Figura 94 evidencia os principais níveis de adaptação da *Ammophila arenaria*, conforme primeira fase do método de López et al. (2017) (item 0). As estratégias seguem classificadas dentre os três diferentes níveis de adaptação supracitados (item 2.2.4).

Figura 94. Abstrair > Quadro de registro das estratégias da *Ammophila arenaria*.

Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021) e T. Andrade et al. (2022).

4.5 Síntese do Capítulo

A revisão de literatura evidenciou **estreita relação do movimento nástico com a assimetria do órgão da planta** (Rivière et al., 2017), que resulta principalmente pela **alteração de turgor entre os lados abaxial-adaxial**, e abertura de certos canais de íons (V. Charpentier et al., 2017; Uehlein & Kaldenhoff, 2008). Esses órgãos são sensíveis às condições do meio ambiente. Nove tipologias de movimento nástico foram identificadas (ver item 4.2.1) e 27 organismos (entre: plantas individuais e famílias das plantas) que apresentam esses tipos de movimento (**Anexo A** e **B**).

Houve colaboração com profissionais em biologia para identificar e selecionar o organismo de referência da presente investigação, a gramínea *Ammophila arenaria*. Esse organismo **exibe sofisticado movimento reversível foliar** (Chergui et al., 2017), por **hidronastia** (Kadioglu et al., 2012). E reage a condições adversas de stresse hídrico e salino (Chergui et al., 2017). Possui **células buliformes que atuam como células motoras** (Grigore et al., 2014) e **determinam o padrão** de abertura e fechamento da planta (Rascio et al., 2012). Tais células estão localizadas na base das **criptas estomáticas** (Chergui et al., 2017) que formam nervuras em toda a extensão longitudinal do lado adaxial da folha (Gadgil, 2006).

Ao compararmos a *Ammophila arenaria* com à gramínea *Poa pratensis* (que possuem semelhante tipologia de movimento e a presença das células buliformes) averiguou-se que a primeira necessita de menor profundidade para conferir a amplitude de movimento. O padrão de abertura e fechamento da *Poa pratensis* acontece como um livro, enquanto o da *A. arenaria* como uma circunferência. Isso explica-se pela própria morfologia das plantas. O organismo de referência, por exemplo, revela-se **repleto de nervuras ao longo de toda a extensão foliar, que reduzem a profundidade da folha. O movimento reversível, por sua vez, proporciona redução e ampliação da superfície foliar**, e está diretamente relacionado à morfologia e anatomia da planta. Tais reentrâncias podem ser visualizadas na secção transversal da mesma (Figura 87).

Futuros trabalhos buscarão relacionar o conhecimento biológico com a análise de materiais para conferir capacidade cinética aos módulos de fachada, que sejam adaptáveis às mudanças climáticas.

5. Conceituar

5.1 Nota Introdutória

Conceitualização é uma fase crítica de processo de desenvolvimento de projeto, onde a multidisciplinaridade converge para algo tangível. E é aqui que o design[58] se diferencia de outras disciplinas ao permitir a integração, seja a nível estético, prático e/ou simbólico.

Durante a **FASE Conceituar** tenciona-se continuar a realizar atividades referentes ao segundo objetivo específico para definir o modelo conceitual de desenvolvimento. O módulo cinético deverá reagir a diferentes condições climáticas por bioinspiração, e independente de energia elétrica e sistema mecânico. Para tanto, esse capítulo está estruturado em cinco etapas, nomeadamente:

- *Brainstorming*
- Requisitos de desenvolvimento
- Bimetal: caracterização técnica e aplicação na arquitetura
- Experimentação com o bimetal
- Biomódulo Bimetal

A seguir, as etapas serão devidamente detalhadas. À medida que for necessário, será realizado revisão de literatura.

[58] Entende-se o termo design extensível ao desenvolvimento de projeto, em áreas correlatas, como design de produto e arquitetura, que integram o nível prático, estético e simbólico.

5.2 *Brainstorming*

Para contribuir com o processo de concepção de conceitos realizou-se a etapa *Brainstorming* em quatro partes (Figura 95):

Figura 95. Conceituar > ETAPA *Brainstorming*.

Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2022).

- **Caixa morfológica** – associar a criação de esboços aos parâmetros de referência para a concepção de ideias;

- **Sessão de cocriação com equipe multidisciplinar** – *focus group* para coleta de dados (Martin & Hanington, 2012), segundo método de *Design Sprint* (Google, n.d.). Posteriormente, efetuou-se análise dos dados por meio de análise temática (Braun & Clarke, 2013);

- **Análise dos dados** da sessão de cocriação;

- **Caixa morfológica** – associar a criação de esboços aos parâmetros de referência para a concepção de ideias.

5.2.1 Caixa Morfológica e Esboços

Para o processo de geração de soluções conceituais utilizou-se o **método caixa morfológica**, também denominado por *Zwick Box* (Bomfim, 1995) (Figura 96). Tal método originou-se a partir de pesquisa realizada por Zwick, em 1948, e tem por objetivo definir previamente distintas opções e associá-las a fim de colaborar para a concepção de novas alternativas (Bomfim, 1995). Ainda segundo o autor, para criar a caixa morfológica é preciso:

- Definir subgrupos de fatores ou funções;
- Conceber distintas opções para cada subgrupo identificado;
- Dispor os subgrupos e as alternativas em uma matriz;
- Por meio de linhas, combinar as opções entre as alternativas dos subgrupos.

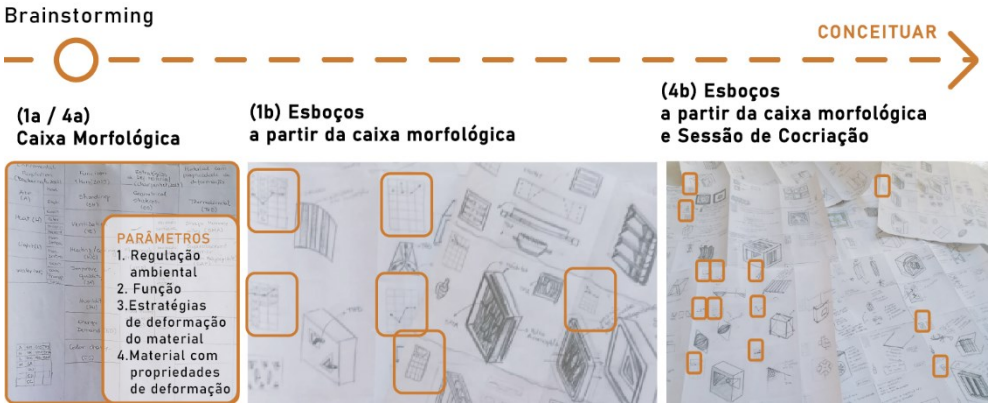
Assim, a matriz desenvolvida para a presente pesquisa definiu quatro subgrupos, a saber:

- **Regulamentação ambiental** (ar, luz, calor, água e energia);

- **Função** (sombreamento, ventilação, aquecimento/resfriamento, melhoria da qualidade do ar, umidade e demanda de energia);

- **Estratégias de deformação de material** (estratégias geométricas, variação das propriedades dos materiais, incompressibilidade de fluidos e armazenamento de energia);
- **Materiais com propriedade de deformação** (como: materiais de memória de forma, bimetal e hidrogel).

Figura 96. *Brainstorming* > Caixa morfológica e Esboços.



Fonte: adaptado de T. Andrade et al. (2022).

Os parâmetros dos subgrupos foram detalhados na seção 3.3.2 e na publicação (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021). Os subgrupos foram associados durante o desenvolvimento sistematizado dos esboços. Utilizou-se folha A4 dividida em oito partes para registrar as ideias. Uma ideia poderia contemplar uma ou mais subdivisões do papel, sendo livre a forma de registro (rápido esboço e/ou escrita). No canto superior esquerdo do papel, desenhava-se uma síntese da matriz. Posteriormente, os diferentes parâmetros da matriz eram ligados a fim de clarificar a ideia visualmente. Esse processo foi executado antes e depois da realização da sessão de cocriação. A Figura 96 exibem esboços com a caixa morfológica.

5.2.2 Sessão de Cocriação Multidisciplinar

A **Sessão de Cocriação Multidisciplinar [SC] foi desenvolvida a fim de propiciar bioinspiração sobre a** *Ammophila arenaria* e **repensar a aplicação do cobogó para o contexto climático de Lisboa**. O presente conteúdo sobre a sessão de cocriação foi publicado no artigo T. Andrade, Arruda, et al. (2021). Para esclarecer o processo sobre a SC, convém explicar sucintamente o que é o cobogó, a ser explicitado no próximo subtópico.

5.2.2.1 Elemento construtivo Cobogó

O **Cobogó** é um elemento vazado – símbolo da arquitetura moderna brasileira – que teve o seu processo de produção patenteado em 1929 em Recife-PE, no Brasil (Vieira et al., 2013) (Figura 97 e Figura 98).

Figura 97. Caixa D'água de Olinda (1935), em Olinda-PE. Projeto de Luiz Nunes.

Nota. Primeira edificação de expressão a utilizar os cobogós no Brasil. Foto: ©Josivan Rodrigues.

As nomenclaturas **Cobogó** ou **Combogó** decorrem do acrônimo do sobrenome dos criadores da patente pernambucana: o português Amadeu Oliveira **Co**imbra; o alemão Ernest August **Bo**eckman, e o brasileiro Antonio de **Gó**es (Vieira et al., 2013). A presente investigação utiliza a primeira designação. Tal elemento possui influência nos *muxarabiês* provenientes da Arquitetura Islâmica, que chegaram ao

Brasil através do processo de colonização portuguesa (Paulert, 2012; Vieira et al., 2013).

A funcionalidade do Cobogó é **ventilar, iluminar, filtrar a incidência da luz solar e promover a privacidade** dos espaços internos (Camacho et al., 2018).

Figura 98. Elemento construtivo: cobogó em Recife-PE, Brasil.

Foto: ©Josivan Rodrigues.

Artefatos semelhantes ao cobogó são encontrados em várias partes do mundo sob diferentes patentes de processos de confecção e nomenclaturas (Marshall & Ward, 2019).

Figura 99. Elementos construtivos como cobogó em diferentes partes do mundo.

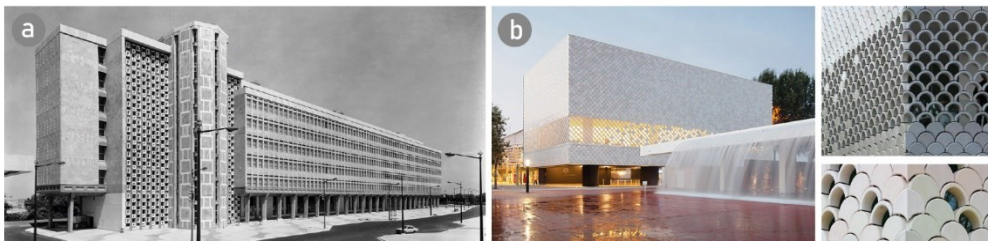
Nota. a) Conjunto residencial do Pedregulho (1947/52), projeto de Affonso Reidy Rio de Janeiro-BR; b) *Breeze Block* proposto por Frank Lloyd na Casa G. M. Millard (1923), na Califórnia-EUA; c) obras escultóricas de Erwin Hauer da Série Continua (1950). Diferem-se dos cobogós tradicionais brasileiros sobretudo com relação à formação de painéis infinitos; d) Projeto Silk Wall (2010) na China. O projeto com estratégia paramétrica foi viabilizado por meio de habilidades construtivas básicas, para compensar a baixa disponibilidade de mão de obra qualificada. Fonte: a) Fonte: Bonduki (1999 como citado em Paulert, 2012, p.77); b) Malhão e Bruneck (2011); c) Hauer (2018); d) Archi-Union Architects (2014). Foto: ©Shen Zhonghai.

Em Portugal, o cobogó é conhecido como grelha. A aplicação desse elemento na arquitetura portuguesa, ocorreu por influência da arquitetura moderna brasileira de três formas distintas, segundo Fernandes (2013). A primeira **corresponde à aplicação dos elementos vazados com aspectos funcionais semelhantes ao do Brasil**, seja pelos arquitetos portugueses, radicados na África (devido à similaridade climática) ou no próprio território português (Fernandes, 2013). A segunda maneira, evidencia o emprego das grelhas nos edifícios de administração ou escritórios como **filtros luminosos para os espaços principais** (Fernandes, 2013) (Figura 100**a**).

E a terceira forma a aplicação dos cobogós nas habitações coletivas (Figura 101) que demonstram:

> [...] em termos funcionais parecem ter ganho novas razões de ser em Portugal, como **esconder de forma mais digna os espaços menos dignos** [zonas de serviço, cozinha e lavanderia] [...]. [...] para maximizar a sua função foram desenhadas com inclinação para **facilitar a entrada do Sol** (Fernandes, 2013, p. 168).

Figura 100. Aplicação de grelhas em Portugal.



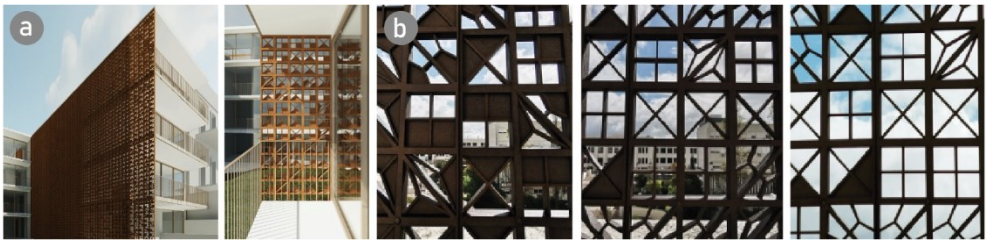
Nota. a) Fachada principal do Palácio da Justiça de Lisboa (1962), idealizado por Januário Godinho, em coautoria com João Andresen. Aplicação dos cobogós em consonância com o vidro; b) Edifício Mar – expansão do Oceanário (2011). Autoria de Pedro Campos Costa. Fonte: a) Leite, (2012); b) Malhão e Bruneck (2011); b) Oceanário de Lisboa (2015).

Figura 101. Conjunto Habitacional na Av. EUA (1947 – 1955), em Lisboa.

Nota. Projeto de autoria de Pedro Cid, Manuel Laginha e Vasconcelos Esteves. a) fachada vertical com grelhas de betão; b) ritmo criado pelas grelhas nas lavanderias e acesso verticais; c) detalhe das grelhas. Fonte: adaptado de Fernandes (2013).

Por fim, o projeto ***Project: Cobogó Façade Panels Prototype*** (Figura 102), de autoria de Caetano, Leitão, et al. (2020), compreende o desenvolvimento de *Algorithm Design* para a otimização de desempenho de cobogós.~

Figura 102. Algoritmo *Project: Cobogó Façade Panels Prototype.*



Nota. Algoritmo para proporcionar diferentes padrões, controle de porosidade atrelado a otimização de desempenho. Fonte: Caetano et al. (2020).

No início da investigação, o cobogó fazia parte da pesquisa como objeto de estudo. Gradativamente o mesmo perdeu relevância. E a abordagem biomimética ganhou força para a aplicação de solução cinética e bioinspirada nas fachadas. Contudo, é inegável que tal elemento fez parte do processo de problematização da SC, e contempla o processo de inspiração da pesquisa. Por esse motivo, tendo em conta o clima de Lisboa, desenvolveu-se o estudo de observação em Benfica, Lisboa, no qual foram identificados quatro usos dos cobogós ou grelhas conforme Figura 103.

Figura 103. Estudo de observação sobre diferentes usos de cobogó.

Nota. a) cumpre os aspectos funcionais do cobogó e livres de obstrução; b) grelha associado ao vidro (fixo ou móvel); c) com obstrução por uma série de objetos por trás que dificultam a circulação de ar e iluminação; d) preenchimento dos módulos com betão, de modo a impedir os aspectos funcionais dos elementos. Fonte: Autora (2023).

A partir desse conhecimento sobre o Cobogó, será dado prosseguimento ao processo de desenvolvimento da Sessão de Cocriação, explicitado nos subtópicos seguintes.

5.2.2.2 Procedimentos metodológicos

Utilizou-se o método qualitativo *Focus Group* [FG] (Martin & Hanington, 2012) para coleta de dados. Em português é designado por grupo focal. Segundo Martin e Hanington (2012), o objetivo do FG é realizar discussões direcionadas, coletar opiniões, sentimentos e atitudes, sobre um dado tema.

A amostra não é probabilística. Nove participantes foram cuidadosamente recrutados para a realização da SC virtual com equipa multidisciplinar. Esses contemplavam diferentes domínios do conhecimento, como profissionais de arquitetura, design, biologia e ciência da computação (Tabela 11). No dia da realização da SC, o Designer C não pôde estar presente para a SC por motivo de força maior. Dos oito participantes, cinco eram do gênero masculino e três do feminino.

Considerando a intenção de repensar o cobogó, para o contexto climático de Lisboa, foram selecionados majoritariamente indivíduos com experiência de residir, por mais de um ano, em clima diferente do nordeste brasileiro. Ou seja, países com incidência de temperaturas mais frias, como Portugal e Alemanha. Sendo assim, sete dos oito participantes apresentam experiência em morar em clima igual ou mais rigoroso que Portugal.

Tabela 11. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Participantes multidisciplinares.

ARQUITETA A	ARQUITETA D	DESIGNER C
Doutoranda pela FAUL Gênero: Feminino Nacionalidade: portuguesa Reside há mais de um ano no Brasil-CE	Arquiteto Urbanista e UNG. Mestrando em *Stuttgart* Gênero: Feminino Nacionalidade: brasileira Reside há mais de um ano na Alemanha	Desenho Industrial na UFPE Gênero: Masculino Nacionalidade: brasileira Nunca residiu fora de PE. Não pôde participar do workshop.
ARQUITETO B	**DESIGNER A**	**BIÓLOGA A**
Arquiteto pela UFPE Gênero: Masculino Nacionalidade: brasileira Reside há três meses na Alemanha	Doutorando em Design na Universidade Federal de Pernambuco (PPGD/UFPE). Gênero: Masculino Nacionalidade brasileira Reside há mais de um ano em Portugal	Doutor em Ciência da Computação pelo Centro de Informática (CIn), UFPE Gênero: Masculino Nacionalidade: brasileira Residiu quatro meses no Canadá
ARQUITETO C	**DESIGNER B**	**TECNÓLOGO A**
Doutor em Urbanismo e Engenharia Arquitetônica + Tecnologia na TU Delft, Holanda, em 2012. Gênero: Masculino Nacionalidade: portuguesa Reside em Portugal e residiu mais de um ano na Holanda	Doutor em *Ricerca in Disegno Industriale* – Ph.D. pela Universidade Politécnico de Milão (2002) Gênero: Masculino Nacionalidade brasileira Residiu mais de um ano na Itália e reside em Portugal	Doutora em Ciências Biológicas, UFPE. Gênero: Feminino Nacionalidade: brasileira Sempre residiu no Brasil

Fonte: adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

Para cocriar conceitos, de modo rápido e eficaz, e com economia dos recursos financeiros utilizou-se o método desenvolvido pelo Google, o '*Design Sprint: Sketch Methods*' (Google, n.d.). Esse método usa: problemas comparáveis, tomada de notas, *Crazy 8's*, compartilhamento de ideias e esboço de solução (Google, n.d.). A SC aconteceu em três partes, nomeadamente:

- **PARTE 1:** Aquecimento – problematização, análise de ideias similares e tendências sobre fachada que se adaptam a diferentes condições climáticas, sem o uso de eletricidade;

- **PARTE 2:** Definição do organismo de referência e geração de ideias;

- **PARTE 3:** Cocriação.

A sessão de cocriação foi realizada no dia 19 de agosto de 2020, entre às 17 e 20 horas, horário de Lisboa (UTC/GMT +01:00). O FG decorreu durante duas horas e quarenta e oito minutos, com videoconferência pela plataforma *Zoom*. Para a criação de mural e para o desenvolvimento de trabalho colaborativo utilizou-se plataforma *Padlet* e grupo no *WhatsApp*, com a intenção de agilizar o compartilhamento de projetos de referência e dos esboços.

A sessão iniciou com a apresentação de todos os integrantes, dos objetivos da investigação, e esclarecimento do FG. Os participantes foram informados sobre os objetivos estritamente acadêmicos do estudo, que, em linhas gerais, trata do desenvolvimento de elemento para fachada inspirado no movimento da planta e cobogó. Cada integrante se apresentou, e autorizou a gravação do vídeo para fins de investigação científica.

Durante todas as etapas de desenvolvimento, os participantes foram instruídos a compartilhar ideias, tomar notas dos conceitos que chamem a atenção e realizar esboços. Estimulou-se a ainda a interação interpessoal e a liberdade de expressão mediante a realização de atividades individuais e em grupos de no máximo três pessoas. Todo o processo metodológico foi descrito por T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

Sob uma **estratégia de sala de aula invertida**, na semana anterior a realização do FG, divulgou-se mural na plataforma do *Padlet*, com projetos de referência sobre fachadas adaptáveis e responsivas, e informações sobre a gramínea *Ammophila arenaria*. Os participantes foram convidados a alimentar o mural com referências, comentários e informações. Essa dinâmica ocorreu para que os participantes obtivessem conhecimento prévio sobre os objetivos da SC a ser desenvolvida.

A parte 1 da SC buscou refletir sobre a **problemática da pesquisa, o elemento construtivo cobogó, e exemplos de fachadas adaptáveis e responsivas**. Abordou-se o contexto climático de Lisboa-PT. Exibiram-se soluções de fachada que não utilizam eletricidade. Posteriormente, os participantes foram convidados a realizar individualmente o primeiro desafio conforme Tabela 12. Em seguida, houve o compartilhamento dos achados com todos os participantes.

Tabela 12. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Aquecimento.

DESAFIO 1: Procurar individualmente ideias/soluções de fachada que se adaptam a diferentes condições climáticas, sem o uso de eletricidade.		
DESCRIÇÃO	**TEMPO**	**ATIVIDADE**
Apresentação da problemática da investigação, do objeto de estudo: cobogó. Demonstração sucinta de soluções de fachada que não utilizam eletricidade, seja pelo uso de materiais responsivos ou de materiais inteligentes	10 min	Investigador
Realização do DESAFIO 1. Registro das referências dadas no painel do *Padlet*.	12 min	Individual
Compartilhamento de ideias com todos os integrantes do FG: cada integrante teve três minutos para compartilhar as referências com os participantes.	24 min	Compartilhar

Fonte: adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

O painel da Figura 104 sintetiza projetos e referências científicas identificados pelos participantes. Pois, o processo de desenvolvimento de design envolve aprender com o passado (Cross, 1982). As referências foram agrupadas em quatro distintos *clusters:* fachadas adaptáveis e cinéticas; fachadas responsivas sem energia; materiais e estratégias geométricas.

Figura 104. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Painel de Referência.

Fonte: Autora (2023).

Pesquisas científicas sobre fachadas adaptáveis foram disseminadas. Muitas das soluções continham dispositivos eletromecânicos para acionar o funcionamento e exploravam controle de temperatura ou umidade. Em relação às fachadas responsivas foram exemplificadas soluções de ar-condicionado sem a utilização de eletricidade; estruturas complexas impressas em 3D para filtrar o ar ou fachada líquida entre vidros para proporcionar o controle térmico (Sarakinioti et al., 2017); cortinas e fachadas verdes; compósitos a base de madeiras que respondem à umidade, e são bioinspirados (Menges, 2012a; Reichert et al., 2014); fachadas que utilizam painéis com algas marinhas como biorreator (EcoLogicStudio, 2019); geometrias orgânicas que contribuem para a limpeza do ar, entre outros. Os padrões auxéticos foram explorados como estratégias geométricas de desenvolvimento. Exemplificaram a liga memória de forma como material que atuar como sensores e atuadores, independentemente da eletricidade; ou ainda, projetos com vidros com propriedades inteligentes.

A segunda parte contempla a **definição do organismo de referência e geração de ideias**. Apresentou-se o organismo de referência para os participantes. Definiu-se o segundo desafio: "**Como criar cobogó que controla a ventilação por inspiração na** *Ammophila arenaria* **sem o uso da eletricidade?'.** Para essa parte, utilizou-se o **método *CRAZY 8's*** para estimular a criação de oito ideias diferentes em oito minutos (Google, n.d.). Instruiu-se os participantes a registrarem os conceitos em papel A4, dobrado em oito partes. Procurou-se ratificar que o papel poderia conter esboços e/ou palavras escritas, pois o que importa é comunicar ideias. Em seguida, as ideias foram compartilhadas entre os integrantes da SC. Estimulou-se a anotação dos conceitos promissores durante a explanação dos participantes (Tabela 13).

Tabela 13. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Geração de ideias.

DESAFIO 2: Como criar cobogó que controla a ventilação por inspiração na *Ammophila arenaria* sem o uso da eletricidade?		
DESCRIÇÃO	**TEMPO**	**ATIVIDADE**
Apresentação dos movimentos násticos e do organismo de referência à gramínea *Ammophila arenaria*.	5 min	Investigador
CRAZY 8's – Esboçar oito ideias distintas, em oito minutos. Posteriormente compartilhar fotos dos esboços no grupo de *WhatsApp*.	8 min	Individual
Compartilhamento de ideias com todos os integrantes do FG: cada integrante teve cinco minutos para partilhar as referências com os participantes.	40 min	Compartilhar

Fonte: adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

A terceira parte, corresponde ao **processo de cocriação** propriamente dito. Dividiram-se os participantes entre duplas e trios, conforme suas competências. Infelizmente a Arquiteta D não pôde participar por razão pessoal (Tabela 14). O mesmo desafio da etapa anterior foi utilizado como referência para a etapa de cocriação. Salientou-se que os esboços podem incluir as ideias de outras pessoas, sendo possível combinar conceitos ou gerar novas ideias.

Tabela 14. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Equipes para cocriação.

EQUIPE A	EQUIPE B	EQUIPE C
Arquiteta A	Arquiteto B	Arquiteto C
Designer A	Designer B	Tecnólogo A
Bióloga A	~~Arquiteta D~~	

Nota. A arquiteta D está sublinhada por não puder participar dessa etapa. Fonte: a adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

Como saída da etapa em questão, solicitou-se a cada equipe a definição de um a três ideias por meio de apresentação de: a) conceito; b) solução, e c) o que a solução resolve (Tabela 15). Para viabilizar o trabalho em equipe criamos salas virtuais no *Zoom* para cada dupla e trio. Um mentor externo foi mantido como apoio por grupo para acompanhar as discussões, tomar notas e efetuar a gravação de cada sala.

Tabela 15. *Brainstorming* > Sessão de Cocriação: Cocriação.

DESAFIO 3: Como criar cobogó que controla a ventilação por inspiração na *Ammophila arenaria* sem o uso da eletricidade?		
DESCRIÇÃO	**TEMPO**	**ATIVIDADE**
Cocriação – Escolher em equipe uma à três ideias, e esboçar possíveis soluções. Discutir e registrar informações em papel A4.	25 min	Cocriação
Compartilhamento de ideias com todos os integrantes do FG: cada integrante terá oito minutos para compartilhar as referências com os participantes.	24 min	Duplas/Trio

Fonte: adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

5.2.3 Análise dos dados

O **método qualitativo Análise Temática [AT]** foi utilizado para a análise dos dados registrados. Segundo Braun e Clarke (2013), a AT visa identificar temas e padrões de significado em um conjunto de dados em relação a uma questão de investigação. Para nortear o presente estudo, definiu-se a seguinte questão:

Como propor um cobogó adaptável a diferentes climas, por meio da analogia com a *Ammophila arenaria*?

Em seguida, analisou-se os dados, segundo Braun & Clarke (2013), a partir da:

- Transcrição do vídeo;
- Leitura e familiarização (com tomada de nota de itens de potencial interesse);
- Codificação da base de dados;
- Identificação de temas;
- Escrita da análise.

Cinco temas principais foram identificados (Tabela 16).

Tabela 16. *Brainstorming* > Análise dos dados: temas, subtemas e estratégias.

TEMAS	CONCEITOS / ESTRATÉGIAS
1. Desafio do projeto	- Clima de Portugal - O elemento responsivo deve responder a qual ou quais parâmetros climáticos? - Investigar sobre o comportamento de responsivos a fim de obter o controle sobre seu comportamento e processo de fabricação
2. Parâmetros climáticos para controle na Fachada	Temperatura / Ventilação / Umidade / Iluminação / Incidência solar (sombreamento) / Amplitude térmica / Ganho e perda de calor.
3. Abstração do organismo biológico *Ammophila arenaria*	- Analogia com movimento de abertura e fechamento - Inspiração na secção transversal - Geometria longilínea da folha - Sulcos que percorrem todo o comprimento da folha - Minúsculos pelos que protegem os estômatos (poros epidérmicos necessários para as trocas gasosas das plantas)

Fonte: adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

O primeiro tema, designado por **'Desafio do Projeto'**, abordou a problemática de projetar solução responsiva para o contexto climático de Lisboa, que possui elevada variação na amplitude térmica. Em um único dia é possível averiguar a variação de 20°C, com altas taxas de velocidades do vento.

> **ARQUITETA A:** "Em Portugal tu tens que responder a tanta coisa. [...] O nosso clima tem muitas, muitas variações para ter só uma solução. A

solução tem que ser muito versátil para conseguir dar resposta ao nosso clima."

Contemplou ainda o processo de identificação das propriedades de material com autoativação, para promover o controle do comportamento do módulo cinético e seu respectivo processo de fabricação.

O segundo tema, designado por **'Parâmetros climáticos para controle da fachada'** refletiu sobre os parâmetros climáticos que deveriam nortear a adaptabilidade do elemento responsivo. E sobre como tal elemento ajustará a relação entre diferentes parâmetros do clima para o controle de fachadas. Durante o primeiro desafio da SC, cerca de 63% dos participantes abordaram a umidade em seus depoimentos; seguido da ventilação; temperatura, incidência solar (cada um com 38%); e amplitude térmica (com 25%).

Já na etapa de cocriação, percebeu-se o destaque dos conceitos para o controle de temperatura em detrimento do da umidade. Há ainda, a preocupação em proteger a edificação da ventilação durante o clima frio, que pode ser solucionado com o controle pelo usuário. A seguir, são listados os parâmetros identificados na análise temática por ordem de intensidade, a saber: temperatura, ventilação, umidade, iluminação, incidência solar (sombreamento), e ganho/perda de calor.

O terceiro tema **'Abstração do organismo biológico:** *Ammophila arenaria*' evidenciou diferentes estratégias do organismo (Tabela 16). O movimento de abertura e fechamento foliar surgiu como principal referência, com cerca de 75% de incidência durante a análise temática. A inspiração na morfologia da secção transversal demonstrou 50% do interesse. Seguido de 38% da geometria longilínea; 13% na inspiração dos sulcos que percorrem todo a extensão da folha, que garantem a osmorregulação e controle do movimento da lâmina foliar (Chergui et al., 2017). E por fim, 13% fizeram referência aos minúsculos pelos que protegem os estômatos (poros epidérmicos necessários para as trocas gasosas das plantas). As soluções propostas, durante a etapa de cocriação, contemplaram apenas a analogia com o movimento de abertura e fechamento da planta de referência.

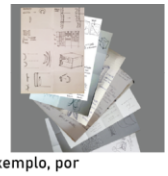
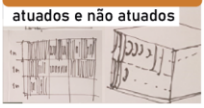
O quarto tema **'Oportunidades conceituais'** corresponde à síntese dos dados coletados durante a segunda e terceira parte da SC, o qual foi dividido entre: a) conceitos; b) macroestratégias para o desenvolvimento e c) estratégias paramétricas. A Tabela 17 realça síntese qualitativa dos conceitos e materiais abordados.

Inicialmente, os materiais e conceitos abordavam o parâmetro para controle de umidade (como hidrogel, cortina líquida, cobogó imerso em hidrogel, ou ainda

material com inteligência para hidratação). Menção à liga de memória de forma surge durante a primeira e terceira parte da SC. Ideias para pesquisa sobre material de base biológica, como estudo sobre o tecido vegetal: vivo, morto, ou o desenvolvimento de compósito entre as duas tipologias. A seguir, transcrevemos trechos dos discursos:

> **BIÓLOGA A:** "O fungo, ele é constituído por quitina, que é um carboidrato [...]. Carboidrato pode ser facilmente hidratado. [...]. Poderia utilizar esse carboidrato em associação às cianobactérias (que fazem a fotossíntese, e emitem gases, como o metano para gerar energia)".
>
> **DESIGNER B: "**Acho muito interessante essa questão das algas [cianobactérias] também", por exemplo, "Se tivesse um janelão, uma janela que fosse uma camada dupla de vidro com esse hidrogel e algumas algas dentro, que num período de maior umidade ela se proliferasse".

Tabela 17. *Brainstorming* > Análise dos dados: Oportunidades conceituais.

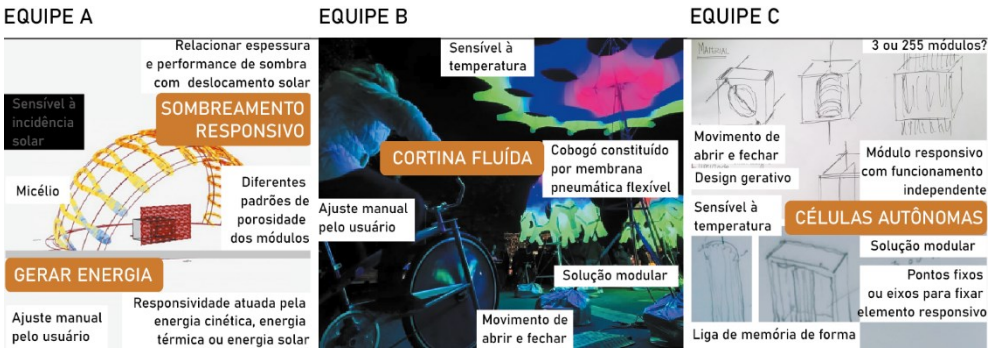
TEMAS	CONCEITOS / ESTRATÉGIAS
FLAGELOS ATUADOS verticais / horizontais / trama 	**4 - Oportunidades Conceituais**  **4.1 Conceitos** **A - Flagelos atuados, em distintas direções** Horizontal, vertical e em trama (como material com inteligência responsiva, por exemplo, por hidratação) / Quantidade de flagelos (maior quantidade de flagelos pode proporcionar que o conjunto destes criem microfissuras, e ampliam a área de abertura para responder às condições ambientais) / Cobogó em forma do tecido vegetal, com prolongamentos, para facilitar a abertura e o fechamento do cobogó (como: estrutura esfíncter; cobogó carnívoro) / Flagelo com vazamentos internos / Tentáculos e flagelos que pode ser modularizados / Pretzel e as formas como eles se dobram e se misturem e se emaranham.
MOVIMENTO abrir e fechar 	**B - Movimento de abertura e fechamento** Telha móvel / Membrana que se deforma como a folha da A. arenaria a depender da quantidade de umidade ou temperatura, e veda o cobogó / Inspiração na modularidade do cobogó / Geometria para abrir e fechar (Hélice rotatória (ventilação) / associar o voronoi com placa que possa abrir e fechar) / Instalação dos módulos a partir de cabos de suporte ou pontos fixos para fixar os elementos responsivos (Ex: vertical e transversal)).
MÓDULOS LONGILÍNEOS atuados e não atuados 	**C - Módulos longilíneos com comportamento** Intercalamento entre os módulos / Módulos menores e alongados na posição vertical, horizontal ou sb volumetria complexa de fachada / Composição de módulos atuados e não atuados / Jogo entre Côncavo e Convexo dos elementos modulares em direções intercaladas.
CORTINA LÍQUIDA 	**D - Reação química para adaptar a diferentes condições climáticas** Elemento interno ao cobogó e flexível para controle - Estrutura pneumática. Exemplo: Cortina fluída - movimento de líquido ou gasoso no interior do elemento para arrefecer o ambiente / Cobogó imerso de hidrogel - aumento e diminuição da parte vazada).
COBOGÓ AMEBA não tem forma, mas ele se adapta ao momento	**F - Cobogó ameba** Inspiração na secção transversal da A. arenaria. O módulo não tem forma, mas ele se adapta ao momento, ao envoltório. Construir respeitando a forma do tecido vegetal / Cobogó em forma do tecido vegetal circular com sulcos, que propiciam uma melhor retenção de água.
	E - Diferentes padrões de abertura dos módulos, para otimizar sombreamento, pela análise do deslocamento solar / desenvolvimento de algoritmo paramétrico e material de tecido vegetal morto (micélio) ou vivo (cianobactérias).
	F - Responsivo pela energia cinética, energia térmica ou energia solar Movimento cria energia para acionar os mecanismos. Mecanismo atuador ventoinha (Eixo de rotação / hélice ou geometria para proporcionar ventilação). Energia Solar / Energia térmica ou placa fotovoltáica (placas nano fotovoltaicos entre o vidro) / Movimento cinético (movimento acende a luz, sem eletricidade) / Elemento responsivo que gera energia para a construção.
SUPORTE módulos responsivos 	**G - Outros:** Cobogó como elemento estrutural para construção civil / Descascar banana - como se os flagelos abrissem e fechassem o prédio ou cobogó. Sistema para fixar módulos responsivo (pontos fixos ou eixos), na horizontal, vertical ou sob volumetria construtiva complexa (Ex.: fixar nas extremidades, de cabos de aços).
	4.2 Macro estratégias para o desenvolvimento - Modularidade (elementos unitários padrão); - Células autônomas (elementos responsivos que respondem individualmente as condições do clima; - Considerar também o controle manual pelo usuário (Passivo) para ajustar às condições climáticas - Reduzir a escala das soluções, para otimizar a resposta cinética e controle; - Solução com a estação fria e a estação quente - compatibilizar com o vidro; - Espessura grossa da parede.
	4.3 Estratégia paramétrica - Design gerativo - definição de parâmetros; restrições (como eixos, ou pontos fixos) e definição algorítmica.

5 - Materiais com comportamento e responsivos	**5.1 Materiais com comportamento** **A - Resposta à Umidade -** Hidrogel / Reações químicas, alguma inteligência, como hidratação / Madeira responsiva com padrões de corte (cortado pela impressora a laser), para interagir com a umidade / Estrutura hidrostática; **B - Resposta à Temperatura -** Materiais com memória de forma (Liga de memória de forma) - controle do comportamento com acurácia e precisão / Estrutura pneumática; **C- Armazenamento de Energia** - Magnetismo **5.2 Material Responsivo** **A - Tecido vegetal vivo -** Como: cianobactérias (ambiente úmido aumento de proliferação de cianobactérias em meio aquoso); Fungo (carboidrato constituinte do fungo, pode ser facilmente hidratado / Compósito de fungo com as cianobactérias; **B - Tecido vegetal morto -** Como: Flagelos a partir de fibras de folhas / Micélio / fibra de bambu (sustentável, ele cresce rápido e resistente. Pesquisar responsividade com umidade); Extrair proteínas vegetais para fazer um cimento.

Fonte: adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

A Figura 105 evidencia os conceitos promovidos pelas equipes durante a terceira parte da Sessão de Cocriação.

Figura 105. *Brainstorming* > Análise dos dados: síntese dos conceitos.



Fonte: adaptado de T. Andrade, Arruda, et al. (2021).

A Equipe A trabalhou com dois conceitos. O primeiro sobre '**responsividade autuada pela energia cinética, energia térmica ou energia solar**', e com ajuste de ventilação manual pelo usuário. O segundo conceito corresponde ao desenvolvimento de **'sistema estático com sombreamento responsivo'**, por meio de algoritmo paramétrico para controlar a incidência solar e otimizar o sombreamento.

> **EQUIPE A:** "Esses módulos poderiam trabalhar de forma estática, mas o que seria levado em conta é a translação do sol, e da geração de sombra, se fossem uns cobogós com estrutura de voronoi, com diferentes aberturas e fechamentos".

Não houve a definição de material. A equipe cogitou o uso de tecido vivo como: compósito a partir das cianobactérias entre o vidro (que se proliferam segundo à umidade) ou o tecido vegetal morto, a exemplo o *mycelium* (estrutura radicular de cogumelos – rede de raízes – que à medida que crescem colaboram para a limpeza do ar).

A Equipe B utilizou conceito de membrana pneumática flexível, intitulado por: **'Cortina fluída – crescimento pneumático'**. O funcionamento dessa solução baseia-se na "interação térmica, entre o gás interno e a sua morfologia, que irá se expandir ou se retrair" (EQUIPE B). Permite modularidade a partir da conexão entre padrões (elementos unitários): "padrões e módulos que são conectados para gerar formas e superfícies (EQUIPE B); e busca considerar a interação com o usuário, como apresentado no projeto *Canopy1*, da *Pneuhaus*, em que pessoas armam membranas ao pedalarem as bicicletas.

A Equipe C propôs células autônomas, pontos fixos e a modularidade do cobogó. Conforme participantes, as **'Células Autônomas'** compreendem o desenvolvimento de módulos responsivos, que se adaptam individualmente à variação de temperatura, através da abertura e fechamento, e com funcionamento independente entre as células. Os pontos ou eixos fixos (na vertical ou transversal) consistem em estratégias para fixar as células em envoltório modular inspirado no padrão tradicional do cobogó.

A quantidade de células autônomas e a escala variam a depender do material e processo construtivo, podendo ser três ou trezentos e quatorze elementos. A maior quantidade de células pode proporcionar que o conjunto destes criem microfissuras, e ampliem a área de abertura para responder às condições ambientais. Pensaram em utilizar a liga de memória de forma a fim de proporcionar acurácia e precisão no controle do movimento.

Houve ainda defesa para a concepção de algoritmo gerativo, por meio da definição dos parâmetros climáticos para controle das células autônomas; definição de restrições e do algoritmo propriamente dito, para então gerar uma ampla gama de soluções.

4.5.1.1 Resultados da Sessão de Cocriação

A Sessão de Cocriação, virtual ou presencial, demanda planejamento com vantagens e desvantagens em ambas as abordagens. A SC realizada virtualmente permitiu a participação de integrantes sediados em três distintos países: Brasil, Portugal e Alemanha. Destaca-se a relevância na inserção de integrantes com

diferentes experiências climáticas, sendo possível questionar os parâmetros de referência para o contexto climático de Lisboa.

A etapa inicial identificou ênfase para a umidade, que foi progressivamente perdendo importância em relação à **temperatura e incidência solar**, evidentes nos conceitos finais da etapa 3. O **conceito de modularidade (elementos unitários padrão) surge como principal referência à tipologia cobogó**.

Com relação ao organismo de referência, a *Ammophila arenaria*, durante a Etapa 2 da SC, os participantes relataram diferentes níveis de adaptação em alusão à morfologia, fisiologia e comportamento do organismo. Contudo, os conceitos da etapa final abordaram apenas o **movimento de abertura e fechamento foliar**, característica do organismo de referência que chama atenção.

Por fim, a **atenção à escala das soluções cinéticas** deve ser levada em consideração como direcionamento, pois **módulos menores permitem aprimorar o controle da resposta aos condicionantes ambientais**. A SC norteará aspectos conceituais para desenvolvimento de soluções futuramente ao módulo cinético para a fachada.

Com relação às ferramentas virtuais utilizadas, o uso de plataformas intuitivas e já conhecidas pelos participantes, como também a exploração de sala de aula invertida, e de equipe de mentores para auxiliar no processo de registro, proporcionou dinamicidade à sessão. A SC exige controle do tempo para um desenvolvimento eficaz e eficiente, entretanto precisa ser flexibilizado para permitir o arremate das ideias. Como direcionamento, para futuras aplicações da SC, defende-se a ampliação da dinâmica em trinta minutos, a fim de ampliar o tempo de partilha entre os integrantes.

A formação de salas virtuais no *Zoom* para os grupos compartilharem conhecimento foram importantes. Resultou em ricas trocas de conhecimento e conceitos projetuais para referência. O desenvolvimento do painel de referência no *Padlet*, com múltiplos participantes, revelou vantagem no processo intuitivo para inserção das referências e desvantagem no processo de partilha, pois alguns participantes tiveram dificuldade de localizar referências na hora do compartilhamento. A partilha dos esboços pelo grupo do *WhatsApp* facilitou o acesso às ideias aos participantes.

Considera-se que a realização da SC superou as expectativas. Recomenda-se ainda, equalizar a quantidade de participantes por área de competência, a fim de equilibrar as diferentes áreas de conhecimento. Sendo assim, para futuras abordagens, sugere-se pelo menos dois profissionais de cada área do conhecimento. A seguir, serão definidos os requisitos de desenvolvimento para a investigação.

5.3 Requisitos de Desenvolvimento

O modelo para desenvolvimento de projetos, descrito por Bomfim (1995), identifica cinco fatores determinantes para o desenvolvimento, a saber: o sujeito criador (designer); o sujeito consumidor (usuário); o sujeito produtor (indústria); o produto e a sociedade como instituição (leis, normas que regem os interesses sociais).

O sujeito criador busca o equilíbrio entre as demandas/expectativas dos demais fatores para a confecção do produto, a fim de embasar o desenvolvimento do projeto com seus requisitos e restrições. Nesse sentido, a presente sessão irá descrever os requisitos de desenvolvimento tendo em vista o desenvolvimento da investigação.

O **parâmetro de proteção solar** foi selecionado como referência conceitual para o controle térmico de fachada no **Concelho de Lisboa por sombreamento** (T. Andrade, Arruda, et al., 2021), a partir da análise das premissas bioclimáticas (H. Gonçalves e Graça, 2004) e **análise dos resultados da Sessão de Cocriação**. Durante a SC, a busca pela proteção solar ganhou força em detrimento do controle da ventilação natural e da umidade. O controle de ventilação, por sua vez, poderá ser efetuado pelo usuário.

Concomitantemente, a problemática da investigação evidenciou **propenso cenário de aquecimento para a cidade de Lisboa** (Lopes et al., 2020; Nematchoua et al., 2022; A. Oliveira et al., 2021; Reis et al., 2022). Como visto anteriormente, as projeções futuras indicam a elevação significativa da temperatura do ar, bem como a quantidade, duração e severidade de episódios de onda de calor nessa localidade (Reis et al., 2022).

De acordo com Kirimtat et al. (2016), dispositivos para sombreamento de edifícios são cruciais em climas com verão quente, para proteger janelas da radiação solar, enquanto permitem a máxima radiação solar no inverno. Por essa razão, soluções de sombreamento baseadas no desempenho e ferramentas de simulação são frequentemente usadas para projetar o sombreamento das construções.

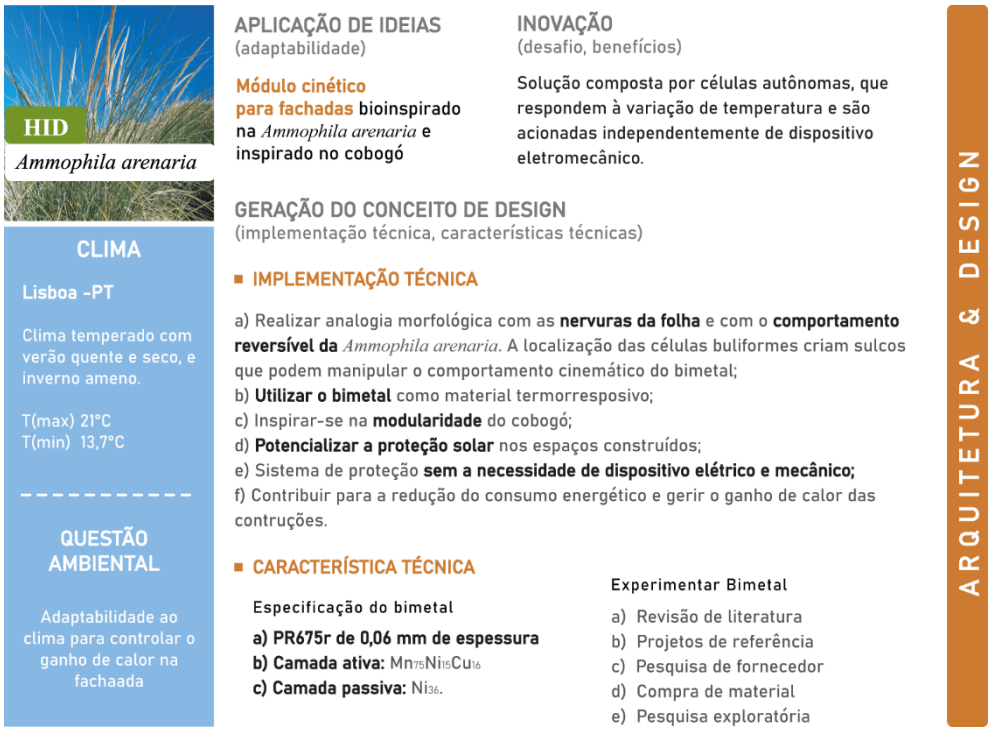
Almeja-se desenvolver solução modular em referência às **nervuras da morfologia e ao movimento reversível da folha de** *Ammophila arenaria*, que proporcionam a redução e ampliação da área foliar, baixa necessidade de profundidade e a modularidade do cobogó.

Em referência às folhas de *Ammophila arenaria*, os materiais de mudança de forma (Vazquez et al., 2019) surgiram como opção de material para a investigação, para **proporcionar capacidade cinética a módulos para fachadas.** Pretende-se abstrair o conhecimento prévio sobre o organismo de referência para transferir as

propriedades do organismo para aplicações humanas. Pois, a biomimética compreende a transferência de estratégias da natureza para tecnologia e inovação (Badarnah, 2012).

A Figura 106 sintetiza os principais requisitos do projeto conforme estudos prévios. Utilizada como referência a segunda etapa do método de registro proposto por López et al. (2017).

Figura 106. *Brainstorming* > Requisitos de Desenvolvimento: Quadro de registro.



Fonte: Autora (2023).

O material inteligente **bimetal** (DOSU Studio Architects, 2021; Kanthal, 2008; Sack-Nielsen, 2017; Sung, 2016) foi selecionado como material de referência para o desenvolvimento por:

- **Apresentar movimento cinético semelhante ao organismo de referência** – a folha da *Ammophila arenaria* se fecha quando exposta a condições ambientais adversas e reabre à medida que estas condições são amenizadas. O movimento de abertura e fechamento desse organismo é semelhante ao comportamento do bimetal, que se se curva quando aquecido (Sung, 2016).

- **Viabilidade de experimentação devido às restrições de circulação pela pandemia COVID-19**. Mediante revisão de literatura, solicitou-se pedido especial do bimetal, em diminutas espessuras (0,0025", aproximadamente 0,06

mm), a fim de proporcionar liberdade de experimentação e ampla resposta à variação de temperatura e radiação solar. Tal decisão possibilitou a utilização de materiais de escritório (como tesoura e estilete) para experimentação do material *in loco*. Permitiu ainda independência dos laboratórios de fabricação digital para experimentação durante a pandemia.

5.4 Bimetal: caracterização técnica e aplicação na arquitetura

5.4.1 Do que se trata o bimetal?

A associação de materiais inteligentes às geometrias inteligentes, e às tecnologias computacionais e de fabricação podem proporcionar soluções que respondem às condições ambientais, sem a necessidade de energia ou controles (Sung, 2016). O material inteligente bimetal (em inglês: *thermobimetal* e *thermostatic bimetal* (Ritter, 2007)) possui uma **variação descontínua da propriedade do material**, capaz de transformar uma pequena deformação em um grande deslocamento no material (V. Charpentier et al., 2017).

O bimetal tende a se curvar quando aquecido, sendo o "gatilho" para a resposta cinética o aumento de temperatura na superfície (Sack-Nielsen, 2017). A explicação para tal comportamento está em sua composição, que consiste em pelo menos duas camadas de metal com **diferentes coeficientes de expansão térmica** (Ritter, 2007; Sung, 2016; Vazquez et al., 2019). A variação de temperatura fará com que o componente ativo se expanda mais do que o passivo, causando a curvatura.

A **camada ativa apresenta o maior coeficiente de expansão** (Foged & Pasold, 2010; Ritter, 2007) e normalmente consiste em uma liga contendo níquel, ferro, manganês ou cromo em diferentes quantidades (Kanthal, 2008). **A de menor coeficiente é designada por camada passiva** (Foged & Pasold, 2010; Ritter, 2007), ou *invar* (Sung, 2016). A passiva é frequentemente composta de uma liga de ferro-níquel contendo 36% de níquel (Kanthal, 2008). Na ausência de forças externas, o bimetal tipicamente tomará a forma de um arco (Kanthal, 2008) (Figura 107).

Figura 107. Experimentar > Comportamento e constituição do bimetal.

Nota. a) Camadas que constituem o bimetal; b) Cada camada possui diferentes coeficientes de expansão térmica; c) tais camadas estão permanentemente ligadas uma à outra. Como a camada passiva limita a camada ativa, o composto bimetálico proporciona curvatura quando aquecido. Fonte: adaptado de Sack-Nielsen (2017) e de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

Uma camada intermediária de cobre (a terceira camada) pode ser adicionada para ampliar a condutividade térmica, e desempenho do material, a fim de reduzir o tempo de resposta do material ao calor (Sack-Nielsen, 2017). O bimetal pode ter a composição e dimensões adaptadas a depender das necessidades para a sua aplicação (Sung, 2016).

O nível de curvatura do bimetal é diretamente proporcional à diferença entre o coeficiente de expansão térmico e a mudança de temperatura na superfície do material, e inversamente proporcional à espessura das camadas combinadas (Engineered Material Solutions, n.d.). A razão entre os módulos de elasticidade das duas camadas e a razão de suas espessuras também influenciam no grau de curvatura (Engineered Material Solutions, n.d.). Por fim, a **inter-relação entre diferentes variáveis como temperatura do ar circundante, espessura do material, dimensão e forma das peças, como também, posição de fixação** podem influenciar o nível de curvatura do bimetal (Dietz, 1949; Sung, 2016).

O bimetal é utilizado desde a Revolução Industrial, para funções de compensação de temperatura e em termômetros (Sack-Nielsen, 2017). A produção desse material passou a ser produzida em larga escala após a Segunda Guerra Mundial. Na atualidade são inúmeras as aplicações com o bimetal. É possível encontrar esse material em qualquer lugar, como: fogões elétricos, ferros de passar roupa, secadores de cabelo e sistemas para proteção de circuitos elétricos. Assim como, em termostatos para radiadores (Sack-Nielsen, 2017) e controle elétrico de sistemas mecatrônicos (Ritter, 2007).

5.4.2 O uso do bimetal na arquitetura

Projetos cinemáticos em arquitetura buscam aliar propriedades anisotrópicas de materiais a soluções de fachada (Sack-Nielsen, 2017) a fim de ampliar a gama dos movimentos possíveis através da variação da direção do material. A exemplo, o *HygroScope* (Menges, 2012a; Menges & Reichert, 2015; Reichert et al., 2014) e o *Ocean Pavilion* (Knippers et al., 2012) (ver item 3.4).

Na opinião de Sack-Nielsen (2017), o **bimetal exibe propriedade isotrópica** (comportamento igual e previsível, seja para a largura como para a altura do material). Ou seja, o material expande-se e contrai-se às influências térmicas de forma igual e previsível, na direção x/y-planar (Sack-Nielsen, 2017). Tal comportamento restringe a gama de movimentos possíveis e pode ser um entrave para projetos de arquitetura. Apesar disso, **existe uma série de vantagens ao associar as características inerentes do bimetal em projetos arquitetônicos, como: previsibilidade, precisão, redução do consumo energético, bem como, a oclusão do ruído mecânico e diminuição da necessidade de manutenção** (Foged & Pasold, 2010). O material também tem **comportamento reversível** de modo a promover a proteção solar de janelas em momentos de elevado ganho de calor.

O bimetal funciona como se incorporasse sensores e atuadores às suas propriedades. Ao contrário dos sistemas mecânicos, tal integração contribui para redução de erros de tradução do fluxo de informação do projeto, ao mesmo tempo, permite a influência do projetista no desenvolvimento de geometrias que otimizem a desempenho funcional do material.

Nos últimos vinte anos, o bimetal vem ganhando relevância para a arquitetura (Vazquez et al., 2019). As investigações da professora Doris Kim Sung, no Texas – EUA, destacam-se como pesquisa mais avançada com esse material para a arquitetura (Vazquez et al., 2019). Sung demonstra estudos sobre como a forma geométrica pode alterar o comportamento, sendo a solução formal resultado do desempenho funcional (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021; Sung, 2016). Também evidencia que os projetos arquitetônicos com bimetal reduzem o consumo energético dos espaços construídos (DOSU Studio Architects, 2021; TBM Designs, 2020).

O grupo de pesquisa de Sung atua há mais de uma década com investigações sobre o bimetal, com o propósito de desenvolver soluções sensíveis à mudança ambiental, como uma pele humana – sem o uso de energia e controles. A professora Sung publica os projetos e experimentações no *website* do DOSU Studio Architects (2021) e classifica os experimentos com bimetal em seis tipologias, nomeadamente:

- ***Self-Shading***: sistema inteligente que utiliza a energia solar para bloquear o Sol, evitando assim o ganho de calor. Funciona independentemente de dispositivos eletromecânicos;

- ***Self-Ventilating:*** projetos que utilizam a temperatura do ar ambiente para operar a fim de liberar o ar quente. Uma vez resfriado, o sistema retorna a sua posição inicial;

- ***Self-Structuring:*** versões mais espessas de bimetal podem ser aquecidas a temperaturas mais altas (acima de 121˚C) para deformar na condição ideal para instalação em espaços apertados. Uma vez resfriada, a peça pode fornecer uma superfície pré-tensionada, resultando em uma superfície forte, leve e porosa;

- ***Self-Assembling:*** utiliza o bimetal para facilitar a construção sem ferramentas. Em alguns casos, em sistemas não reversíveis;

- ***Self-Energizing:*** utiliza energia solar para refletir, gerar calor em uma chaminé e fornecer troca de ar, a fim de ventilar o espaço;

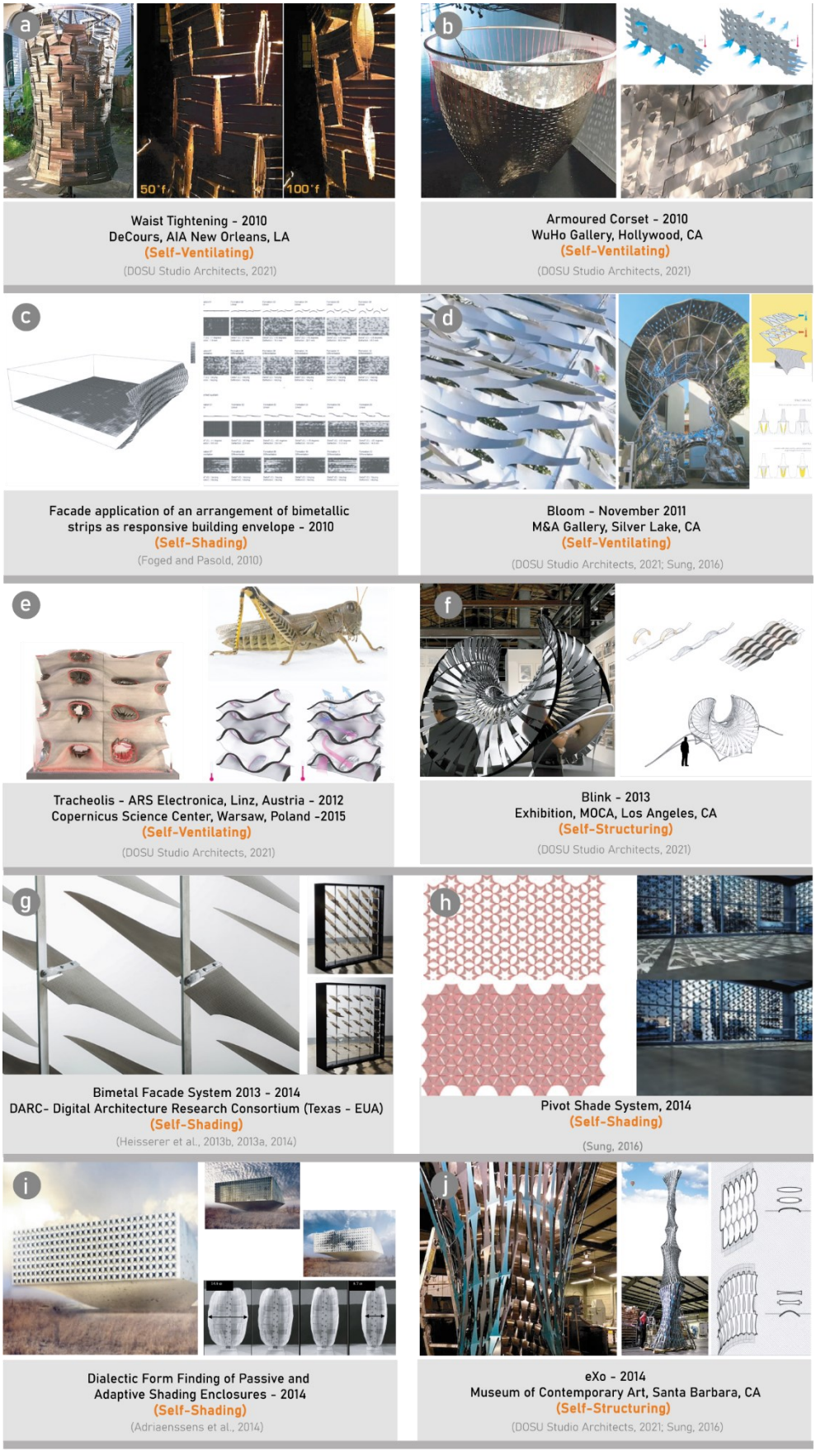
- ***Self-Propelling:*** experiências no campo da robótica para fazer coisas girar, andar, rolar, pular, deslizar e agitar. Tais experimentos usam energia solar para impulsionar o movimento e não precisam de controles de computador ou inteligência artificial para funcionar.

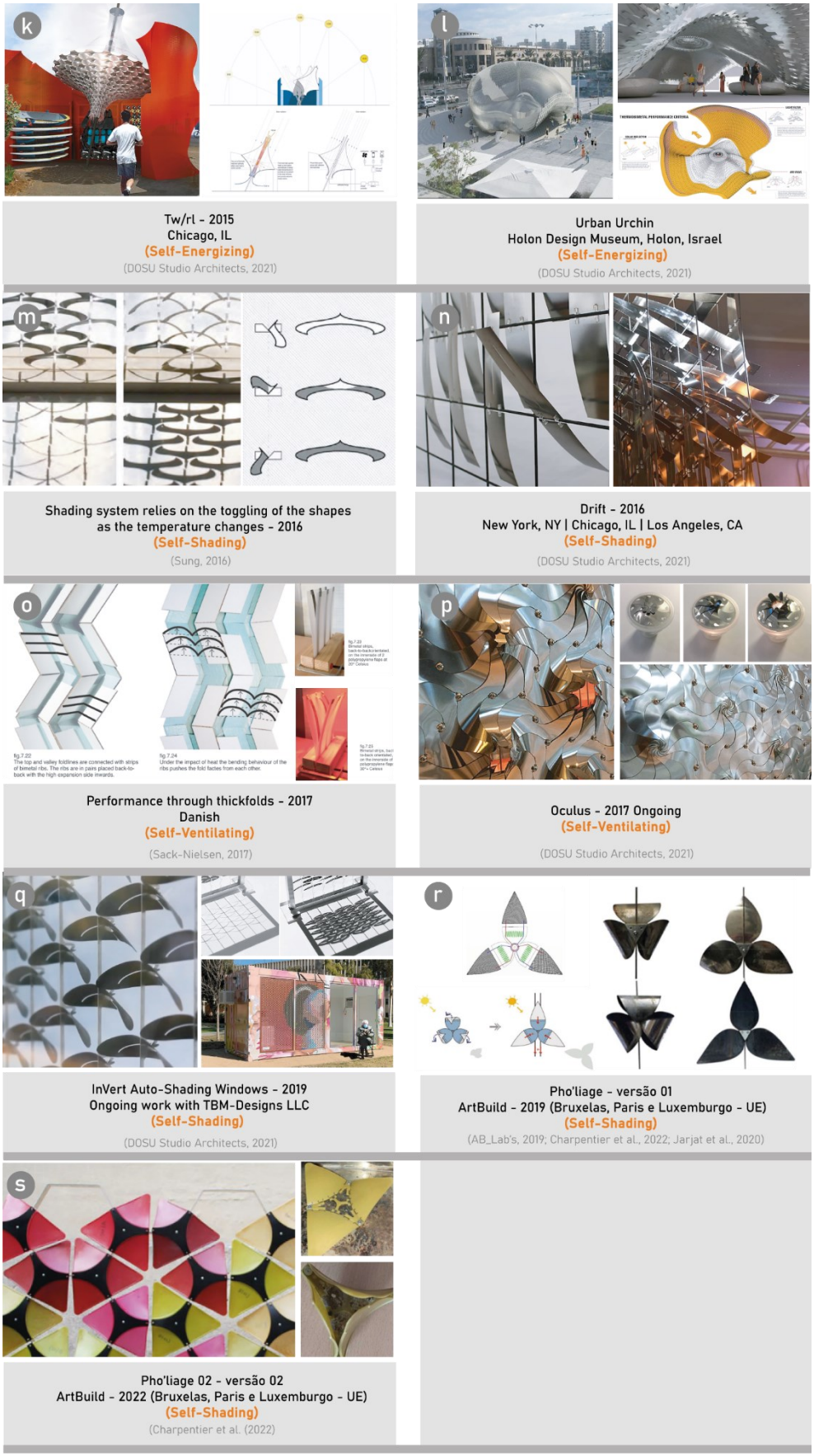
Tendo em conta as seis tipologias sugeridas por DOSU Studio Architects (2021), a Figura 108 evidenciou dezenove projetos de fachadas em bimetal, publicadas entre 2010 e 2022, para revelar desenvolvimentos com esse material na arquitetura.

Dezesseis projetos utilizaram o bimetal como matéria-prima principal para concepção de módulos para fachadas (Figura 108**a – d, f – n, p – r**). Enquanto outros aliam diferentes materiais à solução, de modo a utilizar o bimetal como sensor e atuador do sistema (Figura 108**e, o, s**). Essas são duas diferentes abordagens de desenvolvimento, que permitem alargar o potencial de utilização do material, através da associação dos requisitos de desempenho da fachada à criatividade.

A tipologia *self-shading* (**autossombreamento**, em português) corresponde ao recorte de desenvolvimento da presente pesquisa. Das dezenove propostas de desenvolvimento, dez exploraram a categoria para proteção solar por autossombreamento dos módulos (Figura 108**c**, **g**, **h**, **i**, **m**, **n**, **p, q**, **r**, **s**). Desses, foram selecionados quatro para aprofundar o detalhamento e desenvolver análise comparativa, a qual será abordada na próxima seção.

Figura 108. Experimentar > Referência: Projetos de arquitetura com bimetal.





Nota. As imagens seguem por ordem cronológica de publicação e possuem classificação quanto às tipologias supracitadas. Fonte: Autora (2023).

5.4.3 Análise Comparativa entre propostas por *Self-Shading*

A fim de melhor compreender propostas por autossombreamento selecionou-se quatro soluções previamente identificadas para conferir análise comparativa. Como critério para a seleção definiu-se que o projeto necessariamente deveria: a) ser classificado como *self-shading*; b) possuir execução de protótipo físico; e c) ser um projeto relevante para a investigação em questão. Assim, os projetos a seguir foram selecionados por:

- Versão que alia a função de **sombreamento à promoção de permeabilidade visual** em relação ao ambiente circundante: versão do *Bimetal Facade System*;

- Apresentar **solução com patente, premiada e produto comercial:** *InVert Auto-Shading Windows®;*

- Protótipo utiliza **bimetal associado à célula fotovoltaica** para converter o excesso de energia solar em energia renovável: versão 01 do *Pho'liage®;*

- O **bimetal com função de atuador**, atuando conjuntamente com biopolímero (material responsável por promover o sombreamento): versão 02 do *Pho'liage®*.

A seguir, serão detalhados sinteticamente os projetos supracitados.

5.4.3.1 Bimetal Facade System

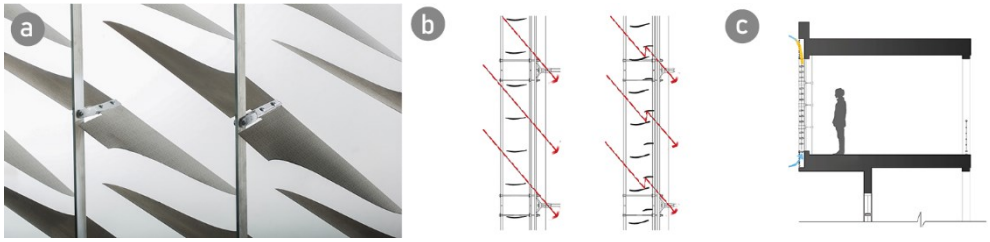
A solução ***Bimetal Facade System*** (Figura 109) buscou promover o **equilíbrio entre os parâmetros contraditórios de desempenho da fachada: permeabilidade visual e desempenho solar** ao longo do dia ou ano (Heisserer et al., 2014). Versão de protótipo utiliza aletas bimetálicas, com 0,2286 mm de espessura, fixas entre uma conexão impressa em 3D e hastes verticais em alumínio (Heisserer et al., 2013b).

Figura 109. Experimentar > Referência: *Bimetal Facade System*

Nota. a, c, d) diferentes posições das aletas através da alteração de temperatura; b) sistema de fixação. Fonte: adaptado de Heisserer et al. (2013b, 2013a, 2014).

Os elementos modulares são posicionados rotacionados, e alocados entre sistema de janelas de vidro triplo, que permite troca de ar com o ambiente externo (Figura 110).

Figura 110. Experimentar > Referência: Detalhes do *Bimetal Facade System*.



Nota. a) aletas na temperatura ambiente; b) sistema de deflexão das aletas; c) sistema de ventilação.
Fonte: adaptado de Heisserer et al. (2013b, 2013a, 2014).

As aletas bimetálicas permanecem paralelas e sem curvatura à temperatura ambiente. Quando aquecidas curvam em formato de "S", e tendem a se posicionarem mais horizontalmente. Ao conter as aletas entre vidros ampliaram fatores térmicos para ativar o sistema.

5.4.3.2 Invert Auto-Shading Windows

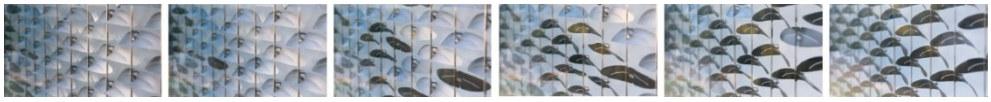
DOSU Studio Architects (2021) e TBM Designs (2020) desenvolveram o ***InVert Auto-Shading Windows***® (Figura 111), uma fachada responsiva, que opera sem a necessidade de sistema eletromecânico e de modo reversível.

Figura 111. Experimentar > Referência: Projeto *InVert Auto-Shading Windows*®.

Fonte: adaptado de DOSU Studio Architects (2021) e T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

A tecnologia patenteada do *InVert*® é constituído a partir do corte de pequenas peças em bimetal, que são posteriormente montadas em uma matriz, entre dois vidros. Quando as peças são posicionadas sob a influência da variação da incidência solar, sofrem uma rotação de 180˚. O módulo em bimetal curva-se, alterando o ponto de equilíbrio, de modo a permitir a rotação reversível (Figura 112).

Figura 112. Experimentar > Referência: Influência da variação da incidência solar.



Fonte: adaptado de DOSU Studio Architects (2021) e T. Andrade, Beirão, Arruda, e Eysen (2021).

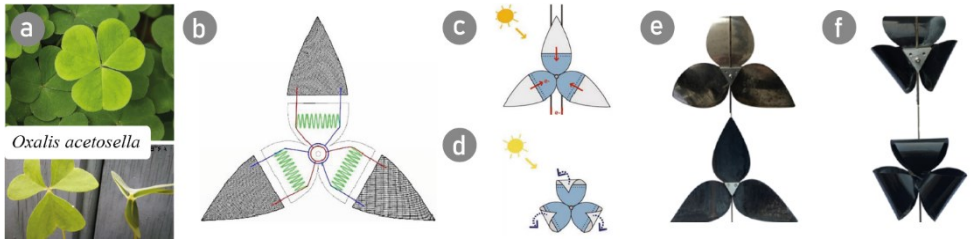
Tal sistema opera como um **sistema de obturador orgânico**, que contribui para a redução do ganho de calor, economia de energia (DOSU Studio Architects, 2021), **redução da necessidade de ar-condicionado artificial em até 25% e redução da emissão de CO_2** (TBM Designs, 2020).

O *InVert*® é um exemplo de estratégia geométrica associado a variação na propriedade do material, que explora a diferenciação térmica entre as camadas de metal, de modo a permitir deslocamentos e deformações da estrutura original para proporcionar sombreamento ao ambiente construído (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Eysen, 2021; V. Charpentier et al., 2017).

5.4.3.3 Pho'liage® – Versão 01

A primeira versão do projeto ***Pho'liage***® (Figura 113) foi bioinspirada no movimento das folhas da *Oxalis acetosella*. Tal movimento corresponde a tipologia de movimento nictinastia. Ou seja, tipologia de movimento nástico que compreende a lenta transição entre a luz e a escuridão, que acontece entre o dia e a noite (T. Andrade et al., 2020; Muhammad et al., 2016) (mais detalhes item 4.2.1).

Figura 113. Experimentar > Referência: *Pho'liage*® – versão 01.



Nota. a) organismo de bioinspiração; b) células fotovoltaicas monocristalinas na parte branca; em cinza, o bimetal; c, e) aberto; d, f) fechado; f) com pintura preta anticorrosão. Fonte: adaptado de AB_Lab's (2019); L. Charpentier et al. (2022); Jarjat et al. (2020).

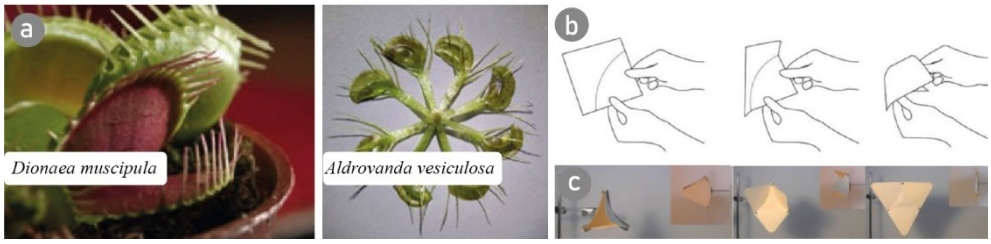
A solução em si é composta por três módulos e células fotovoltaicas monocristalinas (integradas à solução) (Jarjat et al., 2020). Estimativas de preço por unidade de flor foi de cinquenta e cinco euros (L. Charpentier et al., 2022). As células fotovoltaicas transformam o excedente de energia solar em energia renovável (Jarjat et al., 2020). Durante o verão, os módulos protegem a fachada do superaquecimento. Já no inverno, contribuem para a redução de energia de aquecimento.

O grupo de pesquisa do *Pho'liage®* realizou teste anticorrosão, por meio de pintura de *mock-ups* e respectiva exposição ao ar livre dos mesmos durante trinta e seis meses. O objetivo do teste foi otimizar o desempenho de curvatura das pétalas. A pintura para revestimentos decorativos sem Cr-8VI foi utilizada na cor escura e com acabamento mate. Pois, tencionava-se que os módulos absorvessem eficazmente o calor do Sol e pudessem influenciar na agilidade da reação do bimetal. Os autores, afirmaram que a flexibilidade do bimetal em relação ao desempenho global dos módulos não foi comprometida com a aplicação do revestimento.

5.4.3.4 Pho'liage® – Versão 02

A segunda versão do projeto *Pho'liage®* primou pela redução dos custos dos módulos ao deixar de utilizar as células fotovoltaicas e reduzir a quantidade de bimetal. A peça em bimetal exibe dobra de linhas curvas bioinspiradas na folha da *Dionaea muscipula* e da *Aldrovanda vesiculosa* (Figura 114).

Figura 114. Experimentar > Referência: *Pho'liage®* – versão 02 – inspiração.

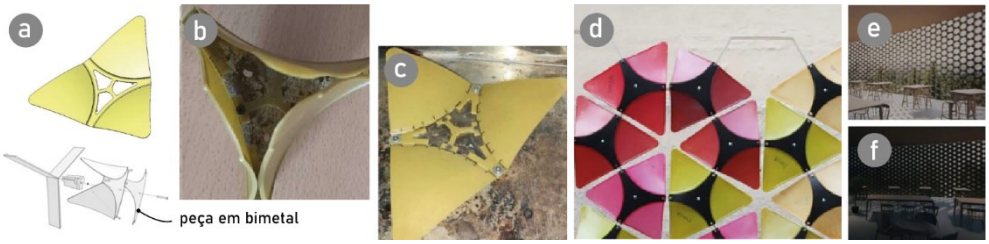


Nota. a) organismos de inspiração; b) processo de abstração com a dobra da curva dos organismos; c) teste experimental com papel. Fonte. adaptado de L. Charpentier et al. (2022).

A solução corresponde a um dispositivo de sombreamento adaptativo desenvolvido por meio de biomimética e de processos de simulação a fim de otimizar o conforto térmico e contribuir para a redução do consumo de energia (L. Charpentier et al., 2022) (Figura 115).

O bimetal é fixo centralmente no módulo triangular em biopolímero – um elastômero termoplástico (L. Charpentier et al., 2022). A **peça bimetálica funciona como atuador ao Sol**, enquanto o biopolímero fornece a função de sombreamento. Os módulos responsivos são fixos em estruturas hexagonais em alumínio.

Figura 115. Experimentar > Referência: *Pho'liage®* – versão 02.



Nota. a) em amarelo peça em biopolímero; em cinza, visão explodida do módulo cinético com destaque para a peça em bimetal que funciona como atuador dos módulos; b – c) protótipo fechado e aberto; d) conjunto fixo em estruturas hexagonais em alumínio; renderização do ambiente com módulos e) fechados e f) abertos. Fonte. adaptado de L. Charpentier et al. (2022).

A Tabela 18 efetua síntese comparativa dos projetos supracitados.

Tabela 18. Experimentar > Análise comparativa entre projetos com bimetal.

CARACT.	BIMETAL FACADE SYSTEM	INVERT AUTO-SHADING	PHO'LIAGE® Versão 01	PHO'LIAGE® Versão 02
Grupo de pesquisa ou Estúdio de Arquitetura	DARC – *Digital Architecture Research Consortium* (Texas – EUA)	*DOSU Studio Architects and TBM-Designs LLC* (Texas – EUA)	ArtBuild (Bruxelas, Paris, e Luxemburgo – UE)	ArtBuild (Bruxelas, Paris, e Luxemburgo – UE)
Ano	2013 – 2014	2019	2019	2022
Bioinspiração	-	-	•••	•••
Self-shading	•••	•••	•••	•••
Permeabilidade Visual	•••	••	••	••
Solução Modular	•••	•••	•••	•••
Número de partes em bimetal	2	1	3	1
Espessura do Bimetal	0,2286 mm	0,06858 mm	-	-
Sistema entre vidros	•••	•••	•••	•••
Presença de células fotovoltaicas	-	-	•••	-
Patente	-	•••	••	-
Premiação	••	•••	-	-
Produto comercial	-	•••	-	-
REFERÊNCIAS	(Heisserer et al., 2013b, 2013a, 2014)	(DOSU Studio Architects, 2021; TBM Designs, 2020)	(AB_Lab's, 2019; L. Charpentier et al., 2022; Jarjat et al., 2020)	(L. Charpentier et al., 2022)

Nota. Para cada critério sob análise foram atribuídos: "•", "••" ou "•••" que define uma hierarquia de interesse. O maior quantitativo de pontos significa que houve maior atenção ao critério evidenciado

no projeto em questão. O "-" significa a não ocorrência do critério. Caract. = Características. Fonte: Autora (2023).

5.4.3.5 Referências de Pesquisas Exploratória com o Bimetal

A abordagem de pesquisa exploratória torna-se essencial para o desenvolvimento com o bimetal. **O comportamento desse material pode ser otimizado, aprimorado ou até mesmo cancelado, a depender da sua forma** (Sung, 2016). Muito embora o trabalho Sung seja vasto, há diminuta disponibilização científica acessível sobre o processo de experimentação. Um dos trabalhos mais evidentes utilizou o bimetal PR675r (0,0025" de espessura, aproximadamente 0,06 mm) (Sung, 2016). A camada de alta expansão composta por $Mn_{75}Ni_{15}Cu_{16}$ e a camada de baixa expansão por Ni_{36}.

O pesquisador Sack-Nielsen (2017) desenvolveu uma descrição detalhada da configuração do ensaio em uma série de testes com amostras do mesmo tamanho (122 x 29 mm). Os experimentos visavam investigar diferentes padrões de corte, realizados com a cortadora de jato de água do tipo *CMS Technocut Idroline*, e o comportamento cinemático das amostras sob a incidência de lâmpada infravermelha 150W 240V. A especificação técnica do bimetal para tais experimentos foi: TBM180/05, fabricado pela empresa *Auerhammer Metallwerk GmbH* em *Aue*, na Alemanha. A camada ativa é composta por $MnCu_{18}Ni_{10}$, com cobre como camada intermediária (para aumentar a condutividade térmica), e a camada passiva por $FeNi_{36}$. Sack-Nielsen utilizou material de 0,1 mm de espessura, comumente disponível no mercado. Assim, observa-se que os projetos em bimetal para a arquitetura utilizam **espessura reduzida do material**.

Os testes propostos por Sack-Nielsen (2017) atestaram que o material apresenta tanto uma reação imediata como capacidade de resposta das amostras bimetálicas ao impacto térmico da lâmpada infravermelha. O movimento inverso ocorreu quando a fonte de calor foi desligada, e todas as amostras voltaram gradualmente a posição original, exceto a amostra cortada em espiral.

Os experimentos evidenciaram que os padrões da linha de corte longitudinal podem levar a curvaturas substancialmente mais altas. Os padrões na direção transversal se comportaram de forma bastante neutra e com uma deflexão limitada a um nível inferior ao longitudinal. Padrões geométricos mais complexos resultaram em um comportamento de deflexão ainda menor (tais como padrões de corte auxéticos).

5.5 Experimentação com o Bimetal

5.5.1 Objetivos dos experimentos

Como visto anteriormente, o comportamento padrão do bimetal na ausência de forças externas e diante da elevação de temperatura consiste em curvar-se tipicamente como um arco (Kanthal, 2008). Quando o material está fixo centralmente há uma tendência para o fechamento da forma, com progressiva reabertura à medida que o material se arrefece. Tal comportamento é semelhante ao comportamento adaptativo da *Ammophila arenaria*, em que a folha se fecha quando exposta à condicionantes ambientais adversos, e se reabre à medida que tais condicionantes são amenizados.

Pretende-se desenvolver dispositivo de sombreamento por bioinspiração, que proporcione proteção contra o ganho solar durante o verão e maximize a radiação solar no inverno. Para tanto, objetiva-se:

- **Compreender o funcionamento do material**, que possui um comportamento dinâmico, em relação à variação de temperatura;

- **Adaptar o comportamento cinético do bimetal para fechar quando aquecido e abrir quando resfriado**, através de processo de abstração morfológico com as reentrâncias da folha da *Ammophila arenaria*.

Ao se obter uma compreensão e rigoroso controle sobre o comportamento do material, planeja-se desenvolver módulos cinéticos para fachadas cinéticas, que respondam a distintas condições climáticas.

5.5.2 Especificação do material

Habitualmente o bimetal é fornecido em chapa ou banda (rolo de chapa). Todos os experimentos da investigação em questão utilizaram banda **bimetálica PR675r** (100 mm de largura por **0,025" de espessura**). Para conferir espessura solicitada, que corresponde a 0,06 mm, foi realizado pedido especial e aquisição de banda com 1kg (aproximadamente 20,45 m de comprimento).

A mínima espessura de pronta entrega é de 0,1 mm. A especificação da espessura requisitada teve por finalidade maximizar a resposta do material ao ganho de calor

ambiental e viabilizar experimentos durante a pandemia. Tal espessura também foi explorada por Sung (2016).

Em realização a composição do material, a **camada de baixa expansão térmica foi composta por Ni_{36} e a de alta expansão por $Mn_{75}Ni_{15}Cu_{10}$.** O preço da bobina de 20.45m foi de $ 122,37. O código de produção do material é o 5J11, confeccionado pela indústria *Huona (Shanghai) New Material Co. Ltd. / China* (ficha técnica no material no **Apêndice A** e fatura no **Apêndice B**).

5.5.3 Procedimentos Metodológicos

A experimentação de materiais possui **natureza de pesquisa aplicada**, sob abordagem qualitativa ao problema, classificada como **método científico hipotético-dedutivo**, descrito na seção 'Metodologia da Investigação' (item 1.7).

Utiliza a tipologia de pesquisa exploratória **estudo de manipulação experimental**, cujo objetivo consiste em manipular variáveis independentes, a fim de localizar variáveis dependentes que estejam potencialmente associadas as independentes. Os procedimentos de coleta de dados podem variar e técnicas de observação podem ser desenvolvidas durante a realização da pesquisa (Marconi & Lakatos, 2003).

Do ponto de vista da pesquisa exploratória, as **amostras em bimetal correspondem a variáveis independentes do estudo** (Marconi & Lakatos, 2003). Manipulou-se a confecção das amostras para descobrir seus efeitos durante as análises, por meio de abordagens manuais e de fabricação digital.

A seguir serão esclarecidas as **definições consensuais que contemplam o processo metodológico da investigação com o bimetal**, nomeadamente:

- **Premissa para corte do material** – em relação à sua largura, a fim de otimizar a deflexão (Kanthal, 2008).

- **Bioinspiração** – em abstração às nervuras e ao movimento reversível da folha da *Ammophila arenaria*, objetiva-se investigar a **influência dos vincos no bimetal**;

- **Codificação das amostras** – Para esclarecer dados sobre a posição dos vincos, os próximos experimentos utilizarão o processo para a codificação das amostras a seguir:

a. *PARTE A* – Amostra de Controle (Código AC); e posição dos vincos: equidistantes (Código EQ); intercalado (Código IN) ou inspirado na localização das células da planta *A. arenaria* (Código AA);

b. **PARTE B** – espacejamento entre os vincos de: sem vincos (Código 000), 10 mm (Código 010), 5 mm (Código 005), 3,5 mm (Código 003), ou inspirado na *A. arenaria* (Código 020, conforme padrão identificado no item 4.3.2.3);

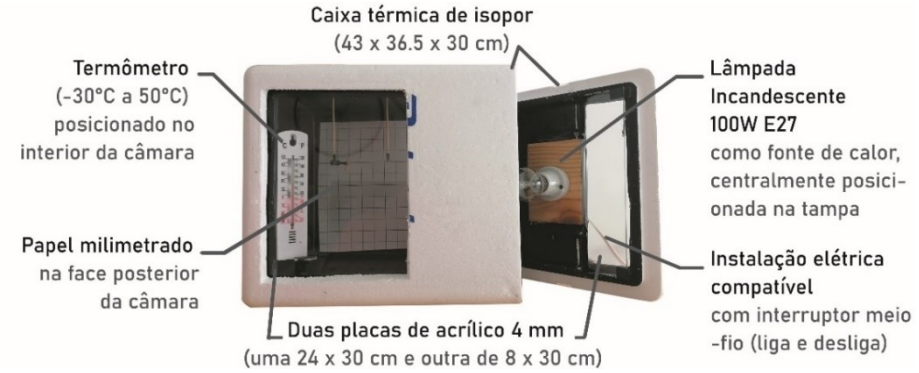
c. PARTE C – ângulo dos vincos: 30° (Código 30), 45° (Código 45) ou 90° (Código 90); sem vincos (Código 00);

d. *PARTE D* – índice numérico para mesma tipologia.

Exemplo: *EQ* **010** 30 *01*
Lê-se: vincos equidistantes em 10 mm, com ângulo de 30°
e referência numérica para este código 01.

- **Teste Térmico [TT] com a câmara quente** – a câmara desenvolvida para simular ambiente **hermeticamente fechado, com variação de temperatura até 50°C** (Figura 116). Consiste em caixa térmica com: lâmpada incandescente 100W, termômetro interno; janela frontal e lateral em acrílico transparente; e tampa lateral (para manuseio das amostras). A câmara permitiu fixação rápida e fácil de diferentes amostras, em ambiente com fonte de calor e isento de fluxo de ar;

Figura 116. Experimentar > Câmara quente para Teste Térmico.



Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

- **Averiguação exploratória da temperatura** – foram utilizados soprador e secador térmico, equipamento de infravermelho (*Philips Infraphil* 150W), e a

própria incidência solar. Para registrar a temperatura do material utilizou-se também o detector térmico por infravermelho (-50 a 380°C) (item 5.6.2.2.2 ao item 5.6.2.2.5) e termômetro por sonda (item 0).

- **Coleta e registro dos dados** – o **processo de registro e avaliação do funcionamento termorresponsivo do bimetal** ocorreu através da disponibilização das amostras a diferentes circunstâncias climáticas do experimento em Lisboa. Para tanto, foi necessário definir infraestrutura e processo para a implementação dos experimentos.

  Como **variáveis dependentes** definiu-se a) a **temperatura do ambiente** e b) o **tempo em que aconteceu a aferição da temperatura do ambiente**. Para os estudos entre o item 5.6.2.2.2 e o item 5.6.2.2.5 identificou-se também a variável **temperatura do material da amostra** com detector térmico por infravermelho. O estudo no clima de Lisboa contou com a aferição da temperatura de cada amostra com termômetro por sonda (item 0).

  As variáveis (dependentes e independentes) foram rigorosamente controladas com registro dos dados em planilhas. O **processo de registro de vídeos na câmara quente** aconteceu através do posicionamento de amostras no interior da câmara, coleta de temperatura, fixação de telefone celular em frente à janela frontal para registro de vídeo. Uma vez iniciado o experimento, coletaram-se os dados climáticos de Lisboa: temperatura ambiente, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento. Tais dados foram coletados no site *freemeteo* (https://freemeteo.com.pt/). À medida que o experimento decorreu, as variáveis dependentes foram registradas em planilha, e tomaram-se notas sobre a deformação do material;

- **Análise dos dados coletados** – foram desenvolvidas **imagens síntese qualitativas** do experimento que indicaram a variação do comportamento do material sob diferentes temperaturas. Tais sínteses são montagens confeccionadas a partir dos *frames* dos vídeos registrados ao longo dos experimentos. A síntese apresenta ainda o tempo médio de exposição na câmara para as amostras atingirem uma dada temperatura, assim como a temperatura da câmara quente;

  Serão detalhados os **Experimentos Exploratórios Manuais** e os por **Fabricação Digital**. Ambos os estudos foram efetuados para confecção de vincos e conhecimento do material. Será abordado o conceito do

'**Biomódulo Bimetal**' (o módulo cinético para fachadas inspirado *Ammophila arenaria*) e experimentos que irão nortear a confecção da solução.

Nesse sentido, os experimentos com o bimetal buscam obter uma compreensão detalhada sobre o material, a fim de descobrir requisitos e restrições únicos. Pode-se alcançar tal feito por meio de **'mexer com o material'**, sob processo exploratório de criação e avaliação (Karana et al., 2015). E assim obter ***insights* para futuras abordagens**. Os *insights*, podem surgir a qualquer momento, desde que possua a mente preparada, sendo necessário intensa dedicação, em uma proporção de 1% de inspiração para 99% de transpiração (Cross, 2011).

5.5.4 Experimentos Exploratórios Iniciais

A diminuta espessura do material permitiu livre experimentação para corte, dobra e vinco do material com material de escritório (uso de tesoura, régua e estilete). A facilidade de manipular o material foi essencial para viabilizar a pesquisa aplicada durante a vigência da pandemia COVID-19.

Para o desenvolvimento dos **vincos manuais**, foram confeccionados modelos CAD em *software Rhino 7.0*®; com posterior impressão em papel e fixação dos desenhos no bimetal com cola bastão. Em seguida, efetuou-se a marcação dos vincos com a utilização de régua e estilete.

Vincos foram aplicados manualmente na camada ativa e passiva do bimetal, em relação à largura do material (Kanthal, 2008). Os testes exploratórios iniciais, com o uso do soprador térmico, demonstraram que as amostras com os vincos na camada passiva, sujeitas ao aquecimento, intensificam o comportamento do material para a mesma direção de curvatura do bimetal e proporcionam o fechamento. Enquanto **as amostras com vincos na camada ativa podem desencadear a inversão de sentido do movimento. Ou seja, podem proporcionar a abertura das amostras ao serem aquecidas**. Por esse motivo, os testes posteriores irão explorar **vincos na camada ativa do material.**

À medida que os padrões de vincos são marcados manualmente na camada ativa do material, as amostras tenderam a se tornar mais retilíneas ou mesmo reverter o ângulo inicial do material em direção aos quadrantes negativos (ou seja, o lado ativo do bimetal). Consequentemente, o efeito das dobras altera os ângulos iniciais do material, com a deformação voltada para a camada ativa, ao invés da passiva. Quatro experimentos exploratórios relacionados a confecção de vincos foram

desenvolvidos, a fim de expandir os limites cinéticos do bimetal, a partir dos vincos na camada ativa do material. São eles:

- **Experimento de Base**
- **Experimento Variantes**
- **Experimento com Versões Longitudinais**
- **Experimento com Vincos em Diferentes Ângulos**

Um último estudo sobre **livre experimentação** desenvolve testes entre o papel e o bimetal, com e sem vinco, para compreender o material e desenvolver ideias para o projeto. Assim, estudos foram desenvolvidos sobre o uso do bimetal como atuador do sistema, geometrias e oportunidades conceituais para o desenvolvimento. A seguir, serão detalhados os quatro experimentos iniciais. O último sobre a livre experimentação encontra-se no **Anexo C**.

5.5.4.1 Experimento de Base

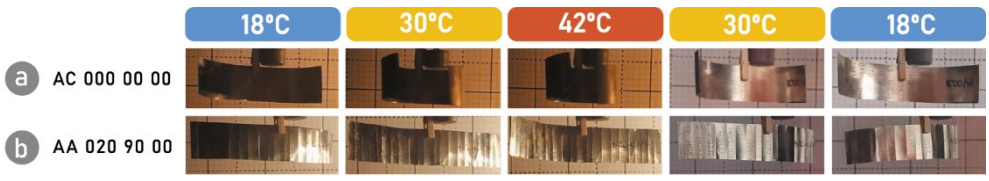
Para o '**Experimento de Base**', foram confeccionadas duas amostras em bimetal na proporção (100 x 20 mm), que utilizaram padrões diferentes de vincos:

- **Amostra AC 000 00 00** – amostra de controle sem intervenção;

- **Padrão AA 020 90 00 –** compreende a proporção identificada na análise das secções transversais de folhas da *Ammophila arenaria*, que conta com 20 marcações para vincos (maiores esclarecimentos item 4.3.2.3)**.**

As amostras foram fixas no interior da câmara quente pelo eixo central (em referência ao objeto de estudo). A Figura 117 compara o comportamento das amostras com a variação de temperatura até 42°C.

Figura 117. Experimentar > Experimento Base.



Nota. Experimento manual 01: amostras de 100 x 20 mm submetidas a diferentes temperaturas na câmara quente. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

Esse experimento contrapôs o comportamento da amostra sem intervenção dos vincos com amostras com intervenção. O processo de fechamento e abertura ocorreu reversivelmente como uma resposta imediata ao impacto térmico sobre a

superfície do bimetal. Observou-se que ao aplicar uma variação constante de temperatura, a curvatura do material ocorre de modo gradual. Se a variação for abrupta, o movimento do material responderá com maior velocidade.

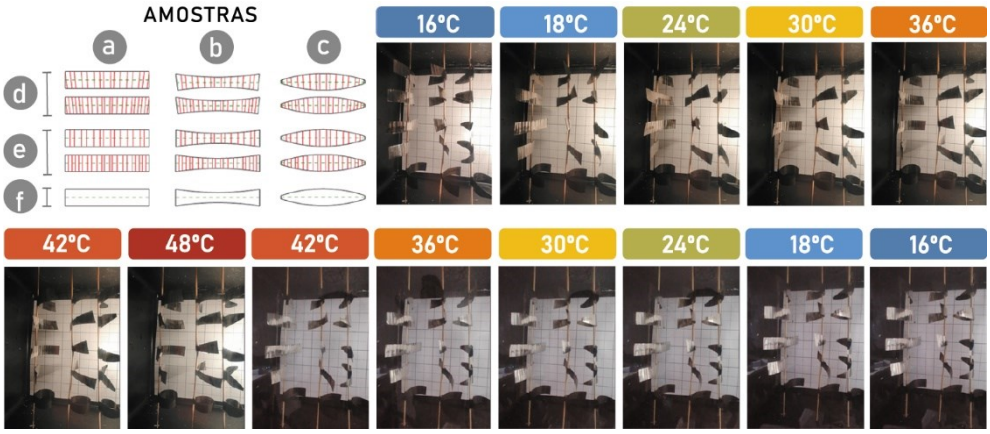
A amostra AC 000 00 00 constatou que a elevação de temperatura da câmara induz o fechamento da faixa bimetálica sem intervenção de vincos. Sob efeito de calor, as extremidades da amostra apresentam desvio em direção à camada passiva. À medida que as condições foram atenuadas, o material tendeu a reabrir de modo reversível e previsível (Figura 117**a**).

A amostra AA 020 90 00 evidenciou que os vincos na camada ativa criaram resistência ao movimento natural do material e influenciaram o comportamento do material (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Cruz, 2021) (Figura 117**b**). Nesse sentido, os **vincos sob a camada ativa conferem uma oportunidade de desenvolvimento para alterar o comportamento cinemático do bimetal.**

5.5.4.2 Experimento Variantes

O '**Experimento Variantes**' compreendeu a observação da reação de diferentes versões de amostras simultaneamente ao teste térmico (Figura 118). As amostras tinham a dimensão de referência (100 x 20 mm). A amostra da Figura 118**f** consiste na amostra de controle. O estudo contempla amostras com diferentes formas (Figura 118**a – c**); e distintas inclinações dos vincos (perpendiculares à largura (Figura 118**e**) e com diferentes graus de angulação (Figura 118**d**)).

Figura 118. Experimentar > Experimento Variantes.



Nota. Experimento manual 02: amostras em bimetal de 100 x 20 mm fixas em um suporte de madeira (a – c) e sujeitas a diferentes temperaturas; (d – f) diferentes tipos de amostras: d) vinco oblíquo; e) vinco perpendicular; f) amostra de controle. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

Os padrões inclinados com diferentes graus foram definidos através do estabelecimento de pontos nos maiores lados da amostra de 100 x 20 mm, em referência ao padrão inspirado na *Ammophila arenaria* (padrão AA 020). Em seguida para um dos maiores lados da amostra, selecionaram-se os pontos e reduziu-se o fator de escala unidirecional, a partir do ponto médio do lado. Os pontos equivalentes para ambos os maiores lados foram ligados posteriormente.

Assim, foram geradas duas versões de padrões inclinados. Esses padrões foram aplicados em diferentes formatos, dentro das dimensões máximas das amostras. Em seguida, as amostras foram fixas pelo seu centro em suporte de madeira, e posicionadas no interior da câmara. A Figura 118 compara o comportamento das amostras com a variação de temperatura até 48°C na câmara quente. Duas observações diferentes na câmara foram realizadas, através da rotação dos eixos de fixação em 180°. Observou-se que as amostras localizadas na parte superior exibem maior variação no comportamento do que as da parte inferior. Isso ocorreu devido a diferenças na densidade do ar dentro da câmara por convecção. A Figura 118 evidencia estudo em que as amostras de controle estavam situadas na parte inferior da câmara. As amostras de controle (Figura 118**f**) são naturalmente curvadas, o calor acentuou o movimento em direção à camada passiva – já inclinada à curvatura e em direção aos quadrantes positivos do movimento.

Quando as amostras com vinco foram expostas a temperaturas mais elevadas, sobressaiu-se uma maior dinamicidade ao seu comportamento. As extremidades dos bimetais transitavam do quadrante negativo (em direção à camada ativa) para os positivos (em direção à camada passiva, à medida se resfriavam).

Observou-se que as amostras com 20 mm de altura tenderam a ter sua **resistência ultrapassada** a partir de 24°C (Figura 118). Isso significa que as amostras com vincos voltaram à direção original da deformação bimetal, em direção à camada passiva, e passaram a se fechar ao serem aquecidas. Sendo assim, o experimento a seguir explorará amostras com maiores alturas a fim de **investigar se é possível restringir o movimento das extremidades das amostras para apenas um dos lados, a fim de proporcionar a abertura quando aquecido.**

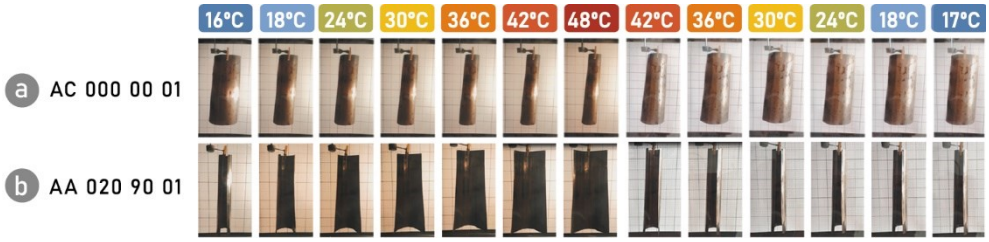
Ademais, percebeu-se que o uso de processo subtrativo para a marcação dos vincos conferiu enfraquecimento do material. Pois, algumas amostras sujeitas a alteração da temperatura da câmara apresentaram ruptura do material após ciclos de aquecimento. Por esse motivo, o estilete só foi utilizado para marcar o papel sobre o bimetal, com leves passagens do instrumento.

5.5.4.3 Experimento com Versões Longitudinais

O terceiro experimento manual corresponde ao '**Experimento com Versões Longitudinais**' (Figura 119), o qual contou com a confecção de duas amostras em bimetal com altura de 15 cm, sendo:

- **AC 000 00 01** – amostra de controle;
- **AA 020 90 01** – bimetal com vincos na camada ativa, padrão inspirado na *A. arenaria*;

Figura 119. Experimentar > Experimento com Versões Longitudinais.



Nota. Experimento manual 03: comportamento das amostras com 100 x 150 mm de altura no teste térmico até 48˚C; a) amostra de controle e b) com vincos. Fonte: adaptado de T. Andrade, Beirão, Arruda, e Cruz (2021).

Mais uma vez, a amostra de controle evidenciou que a elevação de temperatura do ambiente induz o fechamento (Figura 119**a**). Quando ocorreu a atenuação da temperatura, a amostra tendeu a reabrir de modo reversível e previsível. A amostra com vincos (Figura 119**b**), por sua vez, constatou que os **vincos criaram resistência ao movimento natural do material e influenciaram o comportamento para abertura quando aquecido e fechamento ao se resfriar** (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Cruz, 2021). Em outras palavras, conferiu comportamento inverso ao da amostra de controle. Identificou-se ainda que **ao se ampliar a altura da amostra é possível restringir a amplitude do movimento apenas para o lado, em favor da camada ativa.** Dessa forma, é possível desenvolver, com o bimetal sob análise, módulos em que abrem com o calor ao invés de fechar.

Não se recomenda a utilização de pequenas alturas para as amostras (10 mm, por exemplo), pois o efeito do movimento repetitivo em ambas as direções – do lado ativo para o lado passivo do bimetal, e do lado passivo para o ativo – pode causar danos. Idealmente, **deve-se utilizar os vincos para restringir o alcance do movimento apenas para a camada ativa.** Não foram identificados danos nas amostras com altura de 15 cm.

Verificou-se ainda que a resposta cinética ao impacto térmico sobre a superfície do bimetal é imediata nos três experimentos sistematizados. Na Figura 119**b**, pode-se

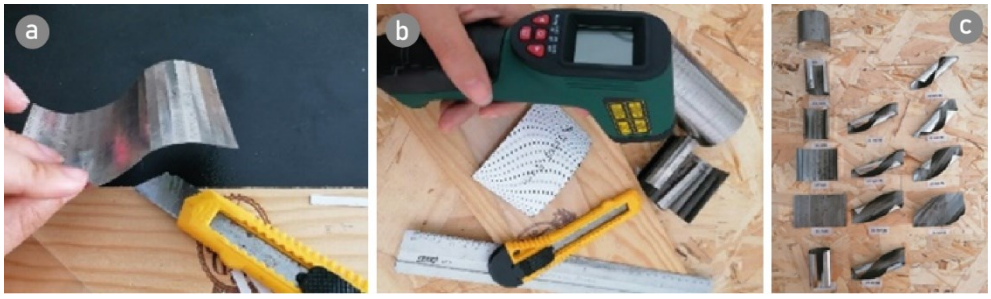
identificar o momento em que a câmara quente é aberta, pois a amostra mostrou um movimento de fechamento rápido ao resfriar de 48 °C para 42 °C. Desse modo, demonstrou-se a **sensibilidade do material às variações de temperatura**. A seguir, será detalhado o experimento com vincos em diferentes ângulos.

5.5.4.4 Experimento Diferentes Ângulos

Para o '**Experimento com Vincos em Diferentes Ângulos'** [EVDA] objetiva-se avaliar o movimento de amostras com vincos posicionados em relação à largura do material. Para tanto, foram confeccionadas manualmente dezesseis amostras de 100 x 60 mm, com vincos posicionados em 90°, 30° e 45°.

Dessas dezesseis, as amostras EQ 005 30 00 e AA 020 45 00 foram excluídas devido ao excessivo fechamento com a aplicação dos vincos. Pois, os estudos exploratórios prévios indicaram que seriam difíceis de conferir a abertura, mesmo frente a elevação de temperatura. Quatorze amostras foram elegíveis para observação do comportamento no teste térmico (Figura 120). Os dados das variáveis dependentes foram coletados e registrados, e relacionados a cada variável independente (maiores detalhes em processos metodológicos, seção 5.5.3).

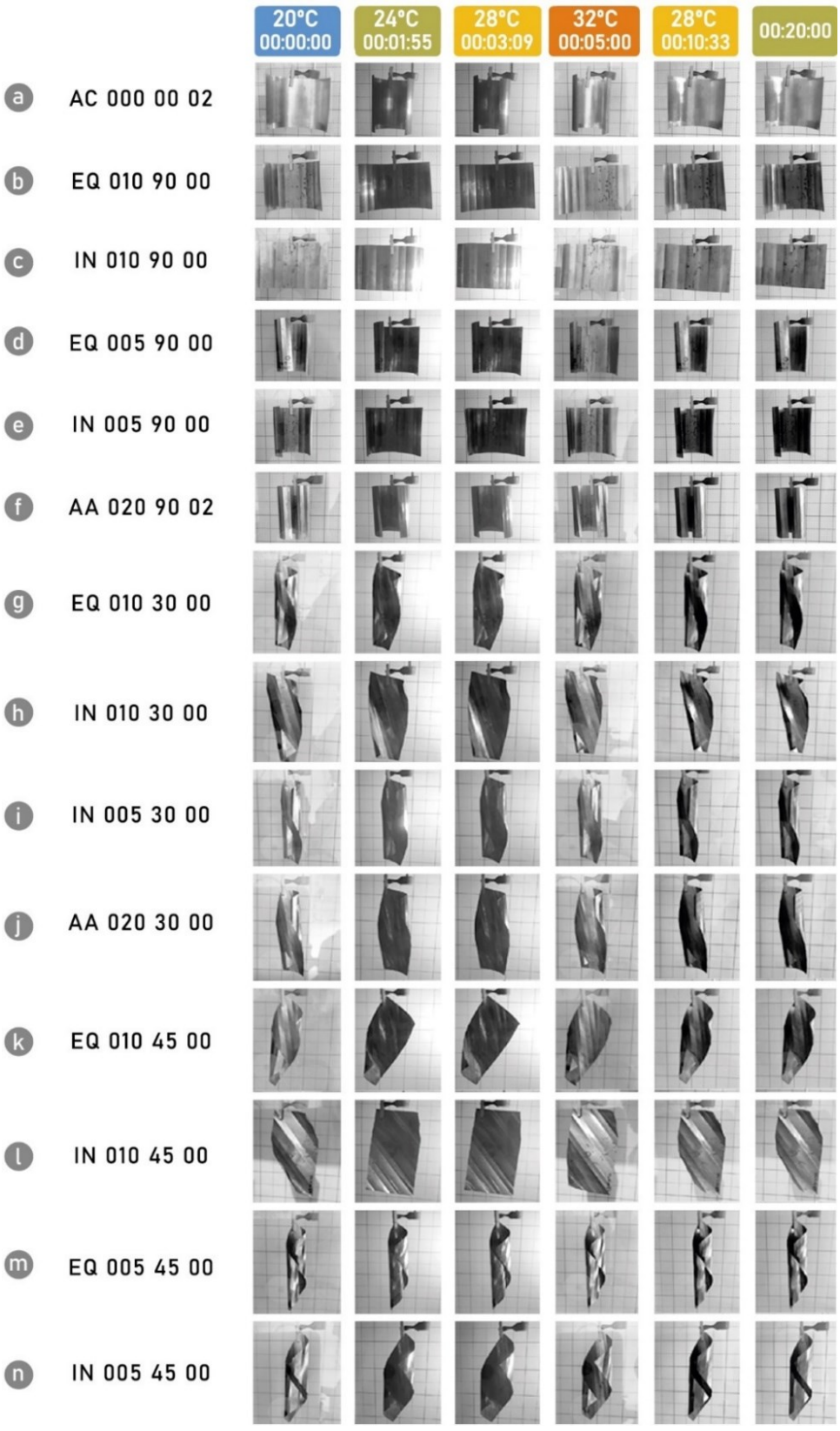
Figura 120. Experimentar > Processo de confecção de amostras.



Nota. a – b) confecção das amostras; c) amostras para o experimento com ângulos. Fonte: Autora (2023).

As amostras foram sujeitas à variação de temperatura entre 20°C e 32°C, para se replicar condições ambientais que se pretende controlar. E assim, permitir ganhos térmicos quando a temperatura anda abaixo do intervalo, e perdas térmicas para temperatura que andam acima. Utilizou-se a câmara quente para o teste térmico em quatro etapas, a saber: a) aquecimento do material até cinco minutos; b) desligamento da câmara ao alcançar 32°C; c) abertura da tampa da câmara ao atingir dez minutos; e d) registro dos dados até 20 minutos.

Figura 121. Experimentar > Síntese qualitativa: Diferentes ângulos de vincos.



Nota. Experimento manual 04: Cabeçalho da imagem com temperatura do ambiente da câmara e o tempo médio de exposição para as amostras atingirem uma dada temperatura. Fonte: Autora (2023).

Tabela 19. Experimentar > Análise qualitativa: diferentes ângulos de vincos.

COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS			ANÁLISE
EQ 010 90 00 Figura 121**b**	e	**IN 010 90 00** Figura 119**c**	Elevados espaços entre vincos proporcionam diminuta resistência ao movimento natural do bimetal e o não fechamento da forma.
EQ 005 90 00 Figura 119**d**	e	**IN 005 90 00** Figura 119**e**	Menor espacejamento produziu maior fechamento e estruturação. Para 10 cm de largura de bimetal, indicamos espacejamento menor que 5 mm.
EQ 005 90 00 Figura 119**d**	>	**EQ 005 45 00** Figura 119**m**	Ângulos de 30° e 45° proporcionaram movimentos restritos às extremidades da amostra, que estão diagonalmente opostas. Vincos em 90°, perpendiculares à largura, podem potencializar o movimento.
IN 005 90 00 Figura 119**e**	>	**IN 005 30 00** Figura 119**l** **IN 005 45 00** Figura 119**n**	
IN 005 90 00 Figura 119**e**	>	**EQ 005 90 00** Figura 119**d**	Amostras com padrão IN apresentaram melhor relação: amplitude de movimento x fechamento e estruturação da forma
IN 005 45 00 Figura 119**n**	>	**EQ 005 45 00** Figura 119**m**	
IN 005 90 00 Figura 119**e**		**AA 020 90 00** Figura 119**f**	Abertura AA ligeiramente inferior à IN. Mas com performance favorável.
EQ 005 45 00 Figura 119**m**	Ângulo 45° proporcionou elevada aproximação entre os vincos e dificultou o movimento. Assim, a redução em excesso do espacejamento pode proporcionar a negação do movimento.		

Nota. Experimento manual 04. Fonte: Autora (2023).

Após o desligamento da câmara, o material retornou à posição inicial. Contudo, a redução da temperatura da câmara acontece em torno de quinze minutos. A temperatura do material foi aferida com o uso do detector térmico por infravermelho (-50 a 380°C), e registrada em planilha. Optou-se por não evidenciar nessa síntese a temperatura do material, para ampliar a legibilidade das amostras. Estudos posteriores irão evidenciar essa variável dependente.

A síntese qualitativa demonstra a termorresponsividade da(s): amostra de controle (Figura 121**a**); amostras com vincos equidistantes (Figura 121**b, d, g, k, m**); amostras com vincos intercalados (Figura 121**c, e, i, l**, **n**), e amostras com padrão bioinspirado AA 020 (Figura 121**f, j**). A Tabela 19 expõe análise qualitativa sobre as amostras observadas em teste térmico.

A análise revelou que os vincos perpendiculares à largura, com padrão intercalado e menor espacejamento potencializam o desempenho cinético. A exemplo, a amostra IN 005 90 00 (Figura 121**e**). Isso se deve pela própria característica isotrópica do material. Existe margem para trabalhar com menores espaços entre vincos para o bimetal sob análise, a fim de aprimorar a capacidade cinética,

estruturação do bimetal e fechamento da forma. Futuros estudos irão explorar o espacejamento intercalado com 3,5 mm.

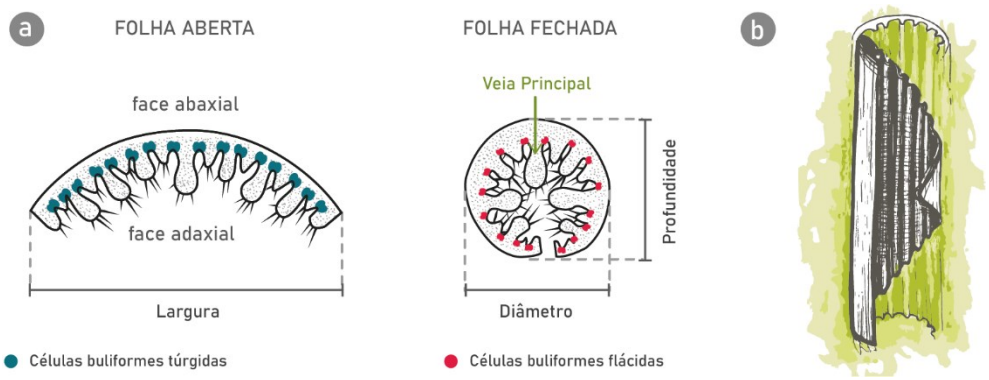
5.6 Modelo Conceitual: Biomódulo Bimetal

A presente pesquisa procura inspirar-se na **relevância das nervuras da** *Ammophila arenaria*, **para conferir deformação plástica necessária que controle a amplitude de movimento foliar reversível. Ou seja, controle a deformação elástica do material.**

O comportamento responsivo da planta confere o controle da superfície foliar, seja para redução como ampliação, sendo necessário diminuta profundidade para proporcionar o movimento (Figura 94). A curvatura da planta, por sua vez, acontece a partir da veia principal (o eixo central). Ambos os lados, direito e o esquerdo, curvam-se em direção ao fechamento da forma como uma circunferência (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Cruz, 2021) (Figura 122**a**).

O conceito para o **Biomódulo Bimetal** surge como **abstração a morfologia** da *Ammophila arenaria*, por meio de uma secção triangular repleta de reentrâncias (os vincos) (Figura 122**b**). A secção é formada por dois cortes transversais à folha da planta. Ambos os cortes são simétricos à largura da folha da gramínea.

Figura 122. Solucionar > ETAPA Definir Modelo Conceitual.



Nota. a - b) Morfologia da *Ammophila arenaria*: nervuras, eixo central e movimento foliar reversível; b) conceito do biomódulo bimetal. Fonte: Autora (2023).

A forma triangular do módulo cinético será o norte da investigação, a fim de se desenvolver em profundidade testes exploratórios com o material. O algoritmo paramétrico a ser desenvolvido futuramente permitirá variações formais para o biomódulo.

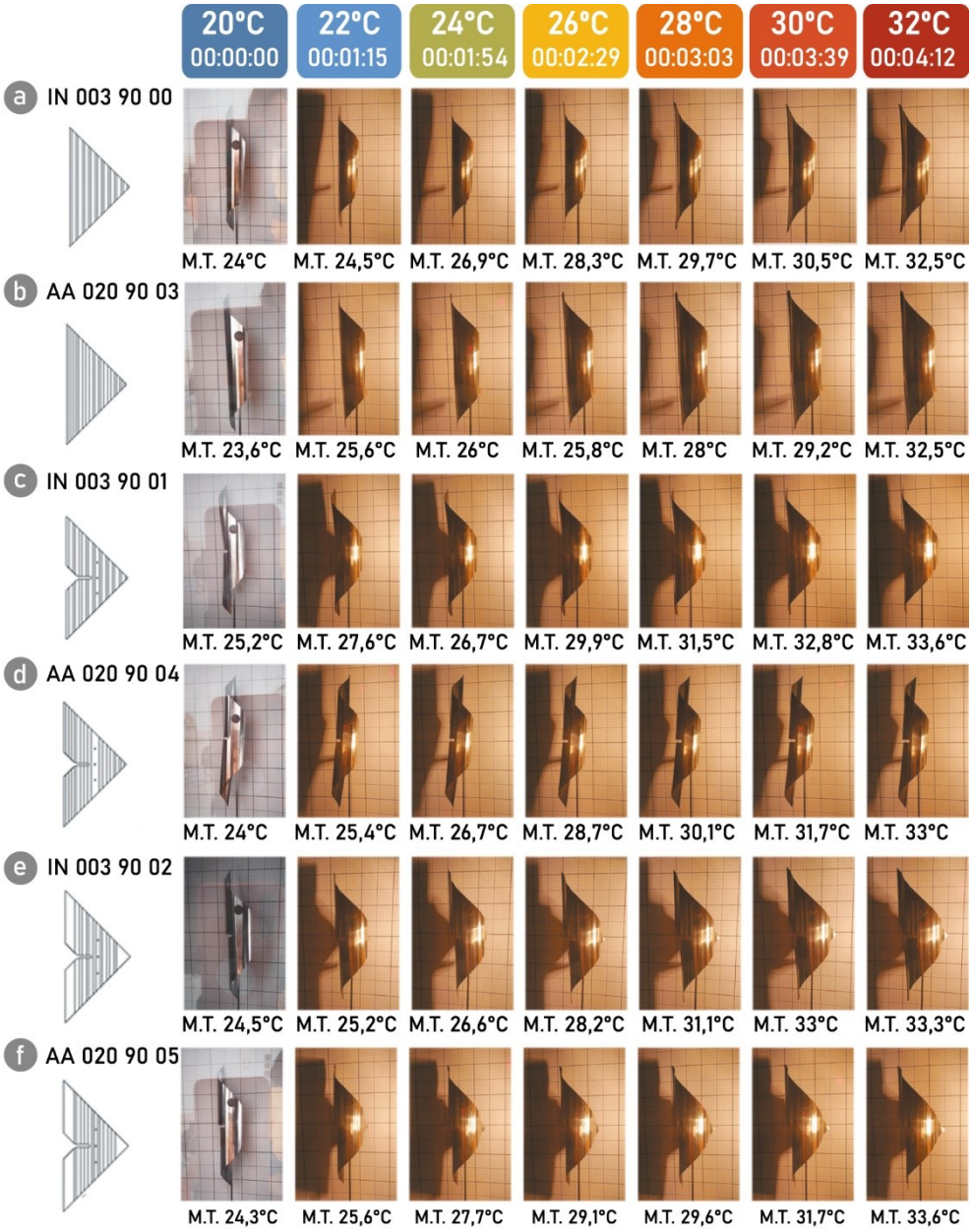
Duas abordagens experimentais foram adotadas para a concepção dos biomódulos bimetais. A primeira utiliza a confecção de **vincos manuais [VM].** Com o conhecimento apreendido, uma série de experimentos foram efetuados para confeccionar **vincos por estampagem [VE].** Esses últimos objetivam conceber matriz positiva e negativa para a estampagem do *thermobimetal* e avaliar a resposta térmica das amostras que apresentem resultados promissores. A seguir serão esclarecidos os estudos que buscam conceber protótipos dos biomódulos bimetais.

5.6.1 Biomódulo com Vincos Manuais

Peças triangulares em bimetal foram cortadas com tesoura na escala 1:1 (10 x 20 cm). Os VM foram produzidos perpendicularmente à largura, com padrão intercalado em 3,5/7mm e padrão AA 020 inspirado na *Ammophila arenaria*. Optou-se por desenvolver o padrão 3,5/7mm ao invés do 5/10mm, porque havia margem para redução da distância entre os espaços intercalados (ver item 5.5.4.4).

As amostras foram concebidas por processo exploratório com consequente avaliação por amostra. Ou seja, a cada confecção de duas amostras, realizava-se o TT e produzia-se a síntese qualitativa (Figura 123). Com o conhecimento adquirido, as variáveis independentes das amostras eram alteradas (como: corte central na amostra e ausência de vincos nas extremidades do triângulo). Esse experimento conta com a produção de seis amostras, avaliadas na câmara quente (entre 20°C e 32°C, durante cinco minutos). A temperatura do material foi identificada com o detector térmico por infravermelho.

Figura 123. Experimentar > Teste térmico: módulo triangular com vincos manuais.

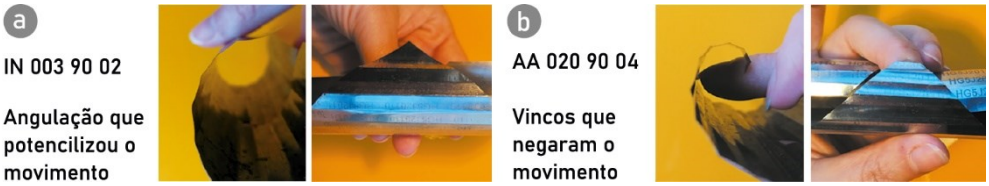


Nota. Experimento manual 05: amostras com vincos intercalados de 3,5 / 7mm. Tipos de amostra: a, b) apenas vincos; c, d) vincos e corte central; e, f) vincos, corte central e ausência de vincos nas extremidades. Legenda: no cabeçalho (temperatura na câmara e tempo médio). No inferior das imagens a temperatura do material (*Material Temperature* [M.T.]). Fonte: Autora (2023).

A **disposição de vincos no bimetal produz estruturação do módulo cinético**. Existe um tênue limite entre a angulação do vinco e a tendência ao movimento durante o TT (Figura 123). **Se o vinco estiver demasiadamente marcado poderá haver baixo nível ou até a negação do movimento**. Por exemplo: a amostra AA 020 90 04 (Figura 123**d**; Figura 124**b**) exibe o menor desempenho de movimento dentre as amostras manuais analisadas. Enquanto a IN 003 90 02 (Figura 123**e**; Figura 124**a**)

potencializa a abertura ao ser aquecido. Tais amostras serão as referências para as análises posteriores.

Figura 124. Experimentar > Nível de marcação dos vincos.



Nota. Experimento manual 05. A depender do nível de marcação, os vincos podem potencializar o efeito de movimento ou até negá-lo Fonte: Autora (2023).

Para além do acentuado grau de marcação, a amostra AA 020 90 04 possui vincos nas extremidades que dificultaram a abertura do material (Figura 123**d**; Figura 124**b**). Isso também pode ser observado, ao se comparar o nível de abertura das amostras com vinco nas extremidades (Figura 123**a** à Figura 123**d**) em relação às sem (Figura 123**e**; Figura 123**f**). Ou seja, a **ausência de vincos nas extremidades das amostras bimetálicas contribui para ampliar a abertura do material quando sujeito ao aquecimento.** Pois, a área nas extremidades sem vinco proporciona força antagônica à resistência dos vincos. Assim, quando o módulo está sujeito à variação crescente de temperatura é possível ampliar o desempenho do movimento de abertura.

A partir do processo exploratório com os módulos, percebeu-se que a **localização do eixo de fixação é crucial para o efeito visual de movimento**, visto que influencia diretamente no equilíbrio de movimento do módulo triangular. Do contrário, o maior lado apresentaria maior desempenho de movimento. Sendo assim, após os testes efetuados, definiu-se que eixo de fixação deverá situar-se na mediatriz entre: a) a linha que compreende os pontos médios dos menores lados do triângulo, e b) a linha paralela que passa através do centroide do triângulo.

Deve-se evitar a marcação excessiva dos vincos, sobretudo nas extremidades. Devido à irregularidade do processo manual, não houve conclusão para o efeito do corte central nas amostras. O efeito desses cortes será analisado nos estudos sobre confecção de vincos por estampagem por meio da fabricação digital. Ademais, considera-se que os vincos manuais permitem rapidez e versatilidade na confecção de amostras, sobretudo como processo exploratório. Contudo, será sempre problemático e incerto obter resultados regulares devido à dificuldade em estabelecer vincos com mesmos parâmetros. Por conseguinte, os próximos estudos utilizarão processos de fabricação digital para estampagem dos vincos.

5.6.2 Biomódulo com Vincos o uso de Fabricação Digital

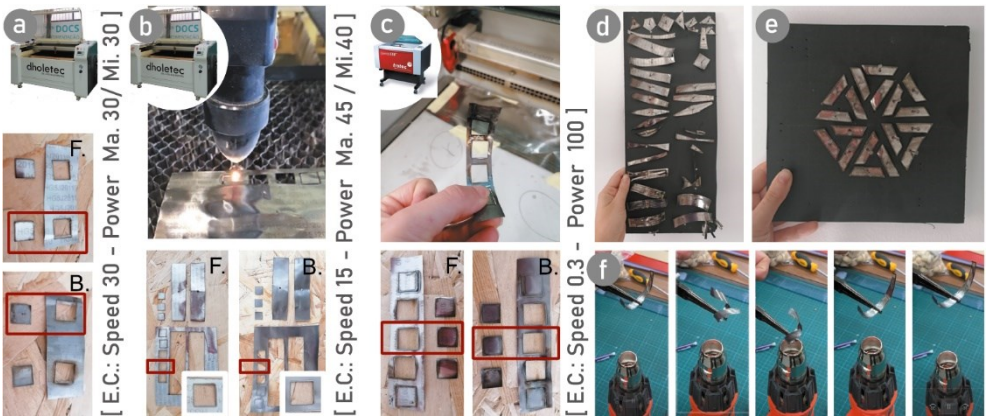
A investigação em questão utilizou o processo subtrativo através do equipamento de cortadora a laser CO_2 para estudar o corte do bimetal e a gravação de vincos com a cortadora a laser fibra com cabeça galvanométrica. O processo aditivo por impressão 3D foi utilizado para produzir matrizes positivo e negativo para realizar a estampagem. Nesse sentido, o próximo ponto irá detalhar os processos subtrativos.

5.6.2.1 Fabricação subtrativa com a cortadora a laser para corte do bimetal

O primeiro estudo de fabricação subtrativa consistiu em testar a **viabilidade do corte do bimetal de 0,06 mm de espessura, com o equipamento de corte a laser**. Houve resistência inicial dos ambientes de experimentação para o corte no metal, devido a instruções técnicas dos equipamentos, que indicam o uso das máquinas apenas para a gravação em metal.

Contudo, o bimetal sob análise, tem baixo índice de reflexão e diminuta espessura. Consultou-se técnico responsável pelos equipamentos a laser da empresa Trotec, do Nordeste brasileiro, que indicou ser possível o corte no bimetal em questão. Em seguida, procurou-se três instituições com equipamentos de **corte a laser e gravação CO_2** para testar os processos subtrativos no bimetal (Figura 125), a saber: a) o **Fablab Sintra**; b) a empresa de prestação de serviço **Dholetec**; e c) ***Vitruvius Fablab***, do ISCTE – Instituto Universitário de Lisboa. Desse modo, conseguiu-se testar e identificar a viabilidade do corte nas três instituições supracitadas.

Figura 125. Experimentar > Teste com a cortadora a laser CO_2.



Nota. a) Dholetec DT 1300 (laser CO_2 com 150W de potência) do Fablab Sintra; b) Dholetec DT 1300 da empresa Dholetec; c) Trotec Speedy 300 (no Vitruvius Fablab); d) Corte de peças com diferentes formas e diferentes direções de material; e) teste exploratório com soprador térmico. Legendas: E.C. (Configuração do equipamento); Ma. (Máximo); Mi. (Mínimo); F. (Frente); B. (Verso). Fonte: Autora (2023).

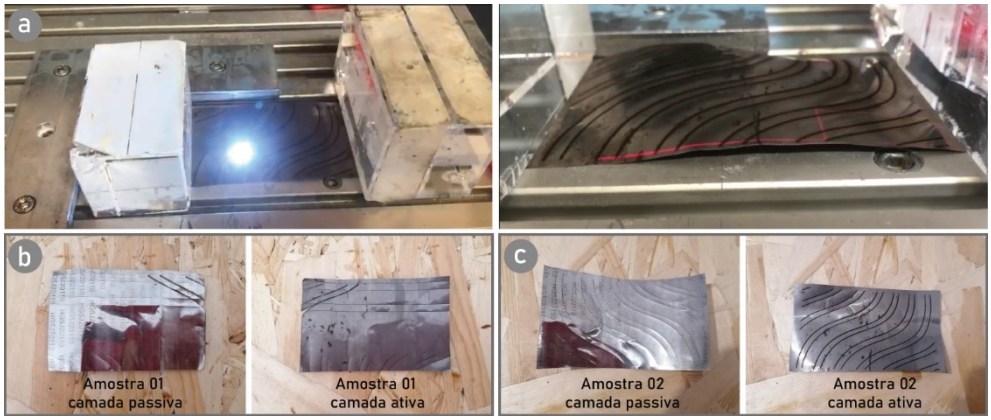
Há combustão nas extremidades das peças cortadas a laser. Observou-se que o tipo de material posicionado abaixo do bimetal, durante o processo de corte, influencia o resultado da combustão. A empresa Dholetec utilizou uma grade de suporte metálico. O Vitruvius Fablab usou placa de alumínio. E o Fablab Sintra usou uma placa de MDF. O melhor resultado obtido foi o da empresa Dholetec, seguida pela Vitruvius Fablab. Ambas utilizaram suporte metálico.

Constatou-se que o processo de corte a laser é viável nas cortadoras a laser CO_2 sob análise. Contudo, é necessário manter uma área livre entre as peças (sangria) e monitorar durante os cortes para evitar que as peças cortadas se prendam no cabeçote do equipamento. Porque à medida que o corte acontece, as peças soltas tendem a se curvar. Utilizou-se fita-cola para estabilizar as peças cortadas. Posteriormente, utilizou-se o soprador térmico para observar a alteração do comportamento do material sob efeito da variação de temperatura ao nível exploratório (Figura 125**f**).

Um segundo estudo de viabilidade foi desenvolvido a fim de **explorar o desenvolvimento de vincos por gravação com bimetal, com o uso de equipamento de corte a laser**. Por ser um processo subtrativo, imaginou-se que o bimetal seria fragilizado (como foi constatado com o uso do estilete). Mas, para efeito de processo exploratório, decidiu-se efetuar o teste.

O teste de gravação de vincos com a cortadoras a laser CO_2 não foi possível pois há necessidade de espalhar no metal um reagente. Mediante a indisponibilidade desse insumo e em parceria com a **empresa Portlaser**, em Barcelos-PT, foi efetuado teste de gravação em duas amostras (100 x 60 mm) com a **cortadora a laser fibra com cabeça galvanométrica** (Figura 126).

Figura 126. Experimentar > Gravação com a laser.



Nota. a) gravação com cortadora a laser com cabeça galvanométrica; b) amostra 01; c) amostra 02 com gravação de curvas orgânicas. Fonte: Autora (2023).

A amostra 01 proferiu gravações iniciais, enquanto a amostra 02 explorou a gravação de curvas orgânicas. Muito embora seja possível efetuar a gravação, os testes voltaram a apontar dificuldade para a estabilização do material. Tal dificuldade também foi identificada sob o processo de corte a laser CO_2, sendo resolvida com o uso de fita-cola.

Contudo, quando as amostras foram sujeitas de modo exploratório à alteração de temperatura, as gravações não proporcionaram alteração no comportamento do material para além do comportamento natural do material. E por se tratar de gravações resultantes de processos subtrativos de material, acredita-se que poderia haver a fragilização da matéria-prima. Por hora, não se recomenda a gravação por corte a laser, sendo necessário estudo aprofundado para analisar a viabilidade de tal feito. Para a presente investigação, optou-se por desenvolver:

- Corte de peças para confecção dos biomódulos por fabricação subtrativa com a cortadora a laser CO_2;

- Estudos exploratórios sobre vincos em bimetal, com matrizes impressas em 3D (discriminados posteriormente).

O processo de desenvolvimento das matrizes para estampagem será descrito nas próximas seções.

5.6.2.2 Fabricação aditiva para impressão em 3D de matrizes

A **deformação plástica do metal** é um processo de fabrico que permite o aumento da produtividade e a redução do custo de produção. Pode originar modificações significativas na forma geométrica do metal, como também preservar as espessuras (em termos médios) (Rodrigues & Martins, 2005, 2010). A **estampagem é uma tipologia desse processo e deve acontecer sem ultrapassar o nível de deformação máximo que o material pode sofrer para não haver estricção ou fratura** (Rodrigues & Martins, 2005, 2010).

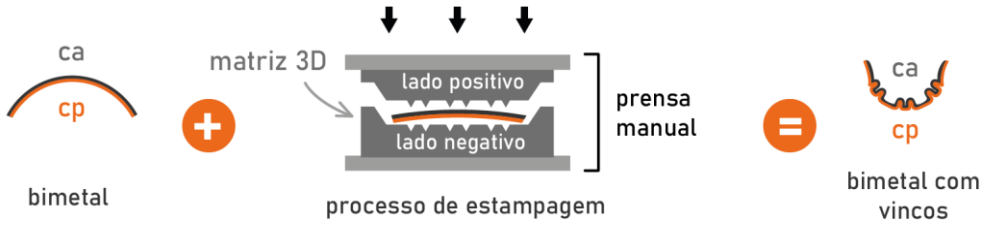
A presente investigação pauta os estudos na **deformação plástica de chapa por expansão**, a qual fundamenta-se na estampagem de peças complexas com pouca profundidade que acontecem geralmente com uma única operação de estampagem (Rodrigues & Martins, 2010). Tal processo ocorre recorrentemente na indústria de automóveis com a produção de portas, painéis e tampas de bagageiro, por exemplo.

Ao estampar o bimetal objetiva-se viabilizar estruturação e fechamento da geometria para proporcionar módulo cinético por *self-shading*. Para tanto, precisa-

se conferir deformação plástica no bimetal capaz de assegurar vincos irreversíveis, após remoção da tensão no material, sem a ocorrência de ruptura.

O bimetal deve ser prensado com a camada passiva do material voltada para o lado negativo da matriz. Caso contrário, resultará no maior fechamento da forma quando o material for exposto à variação de temperatura, ao invés da abertura. Essa definição é uma premissa para o desenvolvimento. A curvatura resultante do bimetal estampado se inverte no sentido da camada ativa (Figura 127).

Figura 127. Experimentar > Processo de definição de vinco por estampagem.



Nota. Desenvolvimento de com matriz impressa em 3D. Legenda: ca (camada ativa); cp (campada passiva). Fonte: Autora (2023).

Serão realizados **uma série de testes exploratórios para identificar parâmetros que influenciam na confecção de matrizes para a estampagem do bimetal sob análise**. Tenciona-se averiguar se as descobertas por processos manuais condizem, com efeito sob o bimetal com o uso de matrizes por fabricação aditiva.

Os experimentos com matrizes impressas em 3D aconteceram em parceria com Centro de Oficina da FAUL e em estreita colaboração com Ricardo Isidro. Utilizou-se o *software SolidWorks*® e *Rhino 7.0*® para modelagem digital das matrizes, que foram posteriormente impressas em 3D. Resultados satisfatórios foram obtidos com o filamento para a impressão 3D PLA de 1,75 mm com precisão dimensional de +/- 0,03 mm. No total foram desenvolvidos cinco experimentos com matrizes por fabricação aditiva, nomeadamente:

- **Parâmetros para definição de vincos**
- **Matrizes 1:1 para confecção do biomódulo bimetal**
- **Experimento Tolerância**
- **Experimento Concavidade**
- **Matriz final 1:1 para confecção do biomódulo bimetal**

Cada um dos estudos será descriminado posteriormente

5.6.2.2.1 Parâmetros para definição de vincos

Para o **estudo exploratório sobre parâmetros das matrizes** foram desenvolvidas sete matrizes prismáticas (4 x 3 x 1,5 cm) que variavam entre:

- **Ângulo dos dentes na versão negativa** [**A**] (30°; 45° e 35°); e folga de um grau para cada lado do dente na versão positiva;

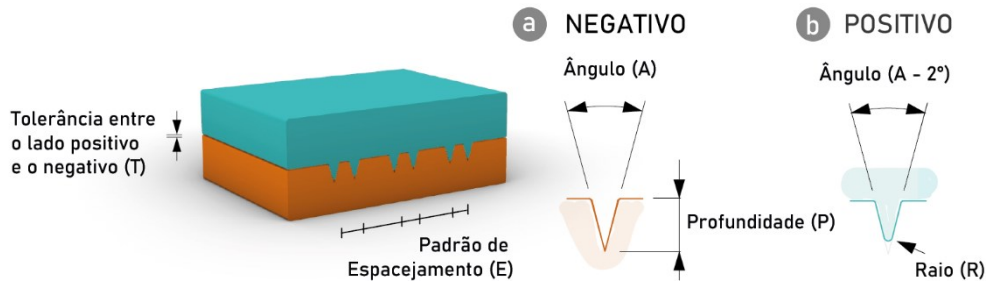
- **Profundidade do vinco** [**P**] (1; 1,5; 2 ou 3 mm). As matrizes poderiam ainda utilizar a profundidade: uniforme ou variável;

- **Raio do dente** [**R**]: 0,2 mm ou sem raio. Nos casos de não ocorrência de raio, há uma ligeira suavização na extremidade do dente, decorrente do processo de impressão 3D, que pode suavizar as quinas vivas;

- **Padrão de espacejamento entre os vincos** [**E**]: (3,5/7 mm; 3,25/6,5 mm ou inspirado na *A. arenaria*);

- **Tolerância** [**T**] – folga entre lado positivo e negativo (0,061mm; 0,122 mm).

Figura 128. Experimentar > Parâmetros para definição de vincos.

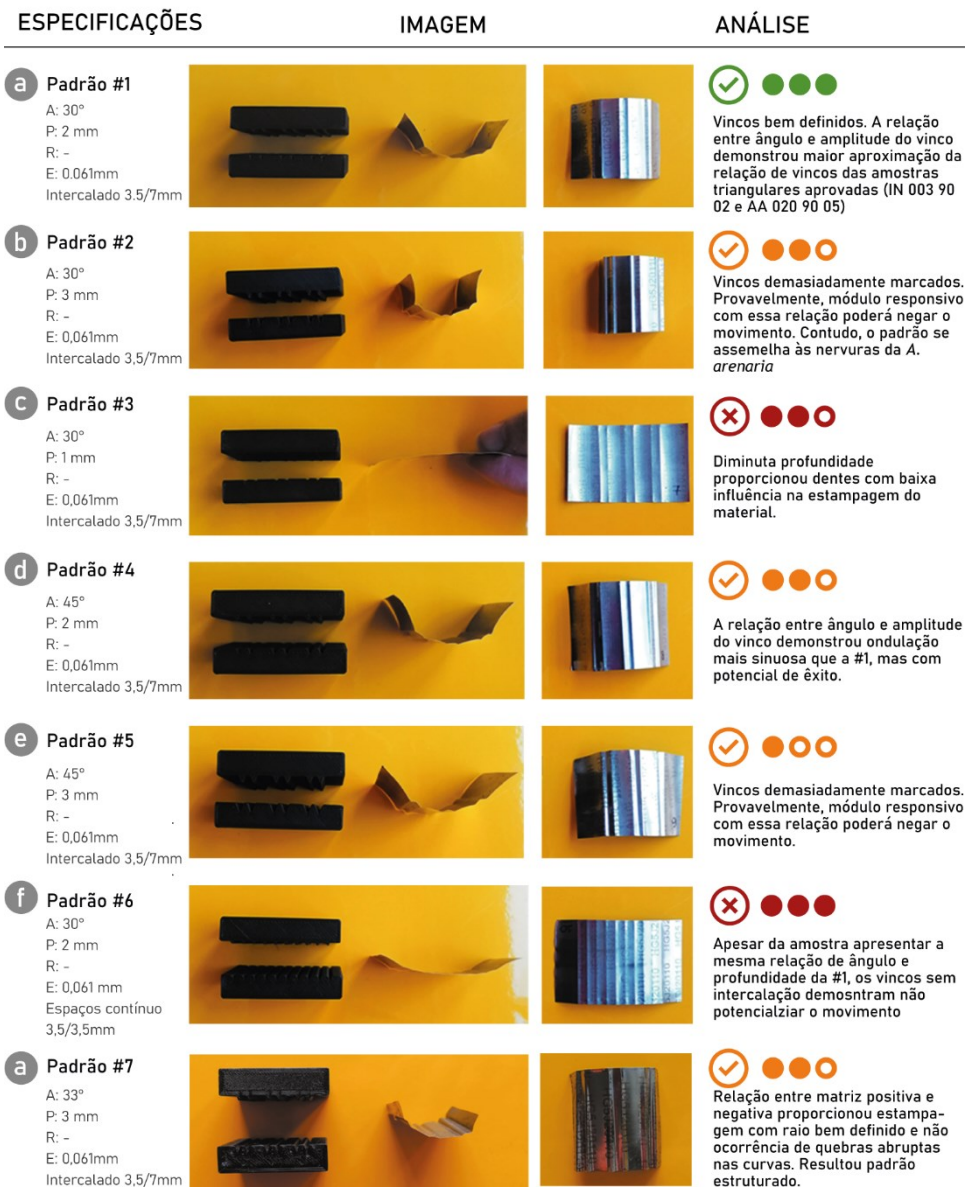


Nota. Experimento por fabricação digital 01. Fonte: Autora (2023).

As amostras em bimetal foram prensadas com o torno de bancada. Constatou-se que os parâmetros influenciam os resultados dos vincos por estampagem (Figura 129). Para a análise do resultado dos padrões, comparou-se qualitativamente a vista de topo das amostras de bimetal, com a vista de topo das amostras dos biomódulos com VM (amostras da Figura 124).

Observou-se que a profundidade de 1 mm não exibe resultado satisfatório, com grandes transformações no material. A de 2 mm resulta em marcação de vincos mais semelhante aos dos experimentos manuais. E os de 3 mm evidenciam maior estruturação da geometria. Os parâmetros serviram de base para o desenvolvimento de testes com as matrizes do biomódulo 1:1.

Figura 129. Experimentar > Teste de parâmetros: matrizes impressas em 3D.



Nota. Experimento por fabricação digital 01: foi utilizada uma classificação de um a três pontos à direita das imagens para avaliar a marcação de vincos das amostras estampadas. Fonte: Autora (2023).

5.6.2.2.2 Matrizes 1:1 para confecção do Biomódulo Bimetal

Para produzir o biomódulo por meio de fabricação digital, primeiramente peças triangulares em bimetal foram confeccionadas em escala 1:1 (9,3 x 18,6 cm), por corte a laser CO_2 (Figura 130). Posteriormente, iniciou-se os **estudos sobre matrizes planas e impressas em 3D**. As matrizes não utilizaram definição de raio para o dente visto que já existe uma suavização na extremidade, decorrente do processo de impressão 3D.

Figura 130. Experimentar > Peças cortadas na cortadora a laser CO_2.

Fonte: Autores, 2023.

As matrizes foram confeccionadas para avaliar a relação vinco e fechamento do material após a estampagem. Os biomódulos foram estampados mediante uso de prensa manual. As amostras foram fixas às matrizes com o auxílio de dois parafusos. A Figura 131 e Tabela 20 demonstram quatro matrizes e respectivos resultados após estampagem.

Figura 131. Experimentar > Matrizes e amostras bimetálicas estampadas.

Nota. Experimento por fabricação digital 02: [M + #n] = matriz + número atribuído para indicar a versão da matriz. Utilizou-se uma classificação de um a seis pontos no topo das imagens para avaliar o nível de fechamento das amostras estampadas. Fonte: Autora (2023).

Tabela 20. Experimentar > Especificações das matrizes e resultados.

MATRIZ	ESPECIFICAÇÕES	RESULTADOS
M1	**A:** 30° **P:** 2 (Uniforme) **E:** 3,5/7 **R:** - **T**: 0,061 (Variável)	As quatro amostras receberam diferentes níveis de pressão. Os vincos resultantes atestaram arestas evidentes e parecidas com a referência IN 003 90 02. Necessita fechar mais o módulo resultante.
M2	**A**: 30° **P**: 1,5, 2, e 3 (Variável) **E:** 3.25/6.25 **R**: - **T**: 0,061 (Variável)	Utilizou-se profundidade variável para confecção dos dentes na mesma Matriz 2. Contudo, os dentes que possuem maior altura, quando tocam a matriz negativa, proporcionaram uma curvatura no material de modo a afastá-lo da matriz de estampagem. Isso dificultou que os dentes com menor profundidade marcassem os vincos. Tal resultado está evidente nas amostras que possuem ausência de vincos com menor profundidade e hiper marcação dos dentes com maior. Não se recomenda a utilização de profundidade variável com diferenças entre as profundidades maiores que 0,5 mm. Percebeu-se que frente a reduzida espessura do material, diferenças milimétricas são demasiadamente elevadas e capazes de alterar substancialmente os resultados. Os próximos experimentos não utilizarão versões de profundidade variável para uma mesma matriz. Houve fratura do material, mediante elevada pressão. Redução de espacejamento proporcionou diminuto espaço para furos de fixação.
M3	**A:** 35° **P:** 3 (Uniforme) **E:** 3.5/7 **R:** - **T:** 0.122 (Variável)	Melhor fechamento da forma, e utilizou o dobro da tolerância. O resultado ainda não corresponde à versão manual de referência IN 003 90 02. Elevada pressão proporcionou fratura do bimetal mediante estampagem. Os dentes da matriz devem cobrir todo o bimetal, devendo ainda haver folga entre o bimetal e as paredes da matriz. Para além disso, os módulos devem estar fixos centralmente por parafusos, para evitar o movimento do material no interior da matriz. Versão de bimetal prensado pela M3 recebeu pintura em *spray* para metal para iniciar estudo sobre acabamento dos biomódulos. A pintura deve ser efetuada após estampagem das peças.
M4	**A:** 35° **P:** 3 (Uniforme) **E:** *A. arenaria* **R**: - **T**: 0,061 (Variável)	Retrocesso no fechamento da forma. Possivelmente, a versão espacejamento inspirada na *A. arenaria* e aplicada ao módulo triangular (escala 1:1) influenciou na planificação da forma.

Nota. Experimento por fabricação digital 02: P (profundidade), E (Espacejamento), T (tolerância) e R (Raio). Unidade de medida em mm. Fonte: Autora (2023).

Uma mínima pressão foi suficiente para efetuar a estampagem, dada à diminuta espessura do bimetal. Se for utilizada elevada pressão, corre-se o risco de tensionar o material para além do limite de deformação plástica, e assim provocar fratura do material (Figura 131, M2 e M3). Elevados níveis de pressão conferem pouca diferença no fechamento da forma resultante. O que de fato ocorrerá é a compressão do material contra as paredes da matriz.

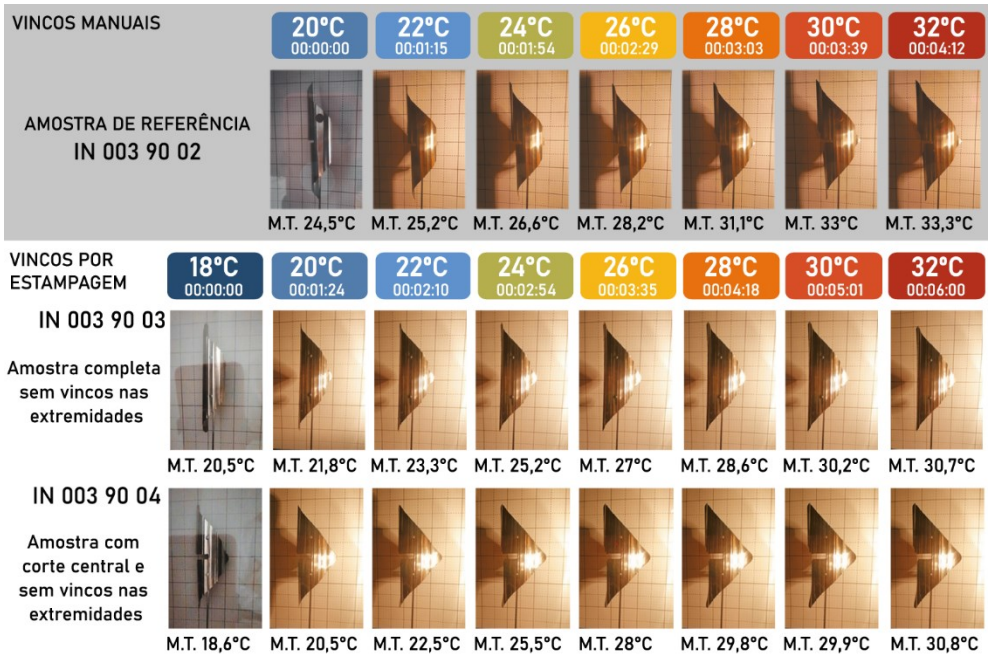
Quando se compara as amostras resultantes das estampagens com as amostras manuais de referência, a M3 exibe melhor comportamento de fechamento da geometria e foi a única versão de matriz que utilizou tolerância diferente. Nesse

sentido, é preciso aprimorar a relação entre os parâmetros de definição dos vincos (como **A**, **P**, **E**, e **T**, ver item 0) a fim de maximizar o fechamento da geometria e evitar a ultrapassagem do nível de deformação máxima do material.

Com relação aos vincos, quando estão mais próximos do eixo de fixação tendem a ser suavizados. Os das extremidades são mais marcados. Esses últimos podem ser críticos se o dobramento proporcionar excessiva resistência chegando a negar o movimento. A excessiva quantidade de vincos pode ainda causar o efeito de planificação da peça em bimetal, foi o que aconteceu com o padrão inspirado na planta na versão da matriz em escala 1:1. Por esse motivo, os próximos estudos irão explorar o padrão 3,5 / 7 mm, intercalado.

Para compreender o comportamento termorresponsivo dos vincos no bimetal, por fabricação aditiva, realizou-se o **teste térmico com amostras estampadas pela M3** (versão completa e com corte central) (Figura 132). Os cortes centrais reduzem a tensão residual resultante do processo de estampagem, e previnem a ocorrência de estricção ou fratura do material (Rodrigues & Martins, 2010). Tais cortes dividiram a área do maior lado do triângulo em duas subáreas.

Figura 132. Experimentar > Teste térmico: amostra manual x amostras da M3.



Nota. Experimento por fabricação digital 02. Fonte: Autora (2023).

Para os testes térmicos, utilizou-se o intervalo de temperatura de 18˚C a 32˚C. Esse intervalo compreende temperaturas que promovem o conforto. Objetiva-se proporcionar módulos cinéticos que permitam que a luz solar penetre no ambiente construído, com temperaturas abaixo de 18˚C e seja bloqueada acima de 28˚C.

O teste térmico evidenciou que os **vincos por matriz impressa em 3D também influenciam na criação de resistência ao movimento natural do material e conferem maior regularidade às amostras**. A posição da matriz na prensa manual deve ser central ao eixo que exerce a força.

As próximas seções buscaram aperfeiçoar a relação entre os parâmetros para definição de vincos (os parâmetros: **A**, **P**, **E** e **T**). Concomitantemente, o limite de folga entre a amostra de bimetal e as paredes da matriz que envolvem a amostra foram ampliados para 2,5 mm. Salienta-se que o **fator escala influencia o resultado do bimetal** a ser prensado, ao se comparar as diferenças dos vincos entre amostras prismáticas e as versões em escala 1:1. Assim, os próximos experimentos a serem realizados com versões prismáticas utilizaram a largura máxima do biomódulo bimetal como referência.

5.6.2.2.3 Experimento Tolerância

Durante as análises dos experimentos até então desenvolvidos surgiram questionamentos sobre:

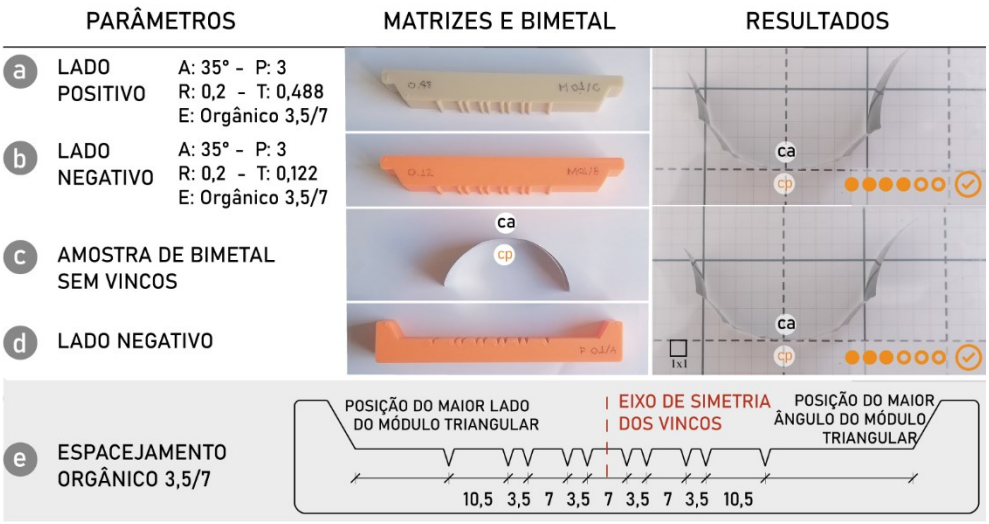
- A Tolerância [**T**] entre a matriz positiva e negativa influencia no fechamento do módulo responsivo resultante?

- Será possível aprimorar o fechamento do biomódulo ao utilizar a curvatura natural do bimetal como parâmetro para a concepção da matriz de estampagem?

Nesse sentido, **dois estudos exploratórios foram desenvolvidos**. O primeiro sobre tolerância e o segundo sobre concavidade de Secções de Matrizes [**SMs**]. Ambos estudos compreendem confecção de matrizes para a largura máxima das peças em bimetal em escala 1:1. As estampagens foram realizadas com faixas bimetálicas de 9,6 x 1,0 cm através do auxílio de torno de bancada.

Para o **Experimento Tolerância**, as **SM**s foram produzidas de modo que a versão negativa admitisse o encaixe de opção de 0,122 mm e de 0,488 mm (Figura 133). Esse teste seguiu a mesma lógica de tolerância desenvolvida até então com as matrizes, que previa folga de um grau para cada lado do dente na versão negativa. Para a tolerância entre versão positiva e negativa utilizou-se 0,122 ou 0,488 mm. Isso conferiu uma tolerância variável entre as matrizes.

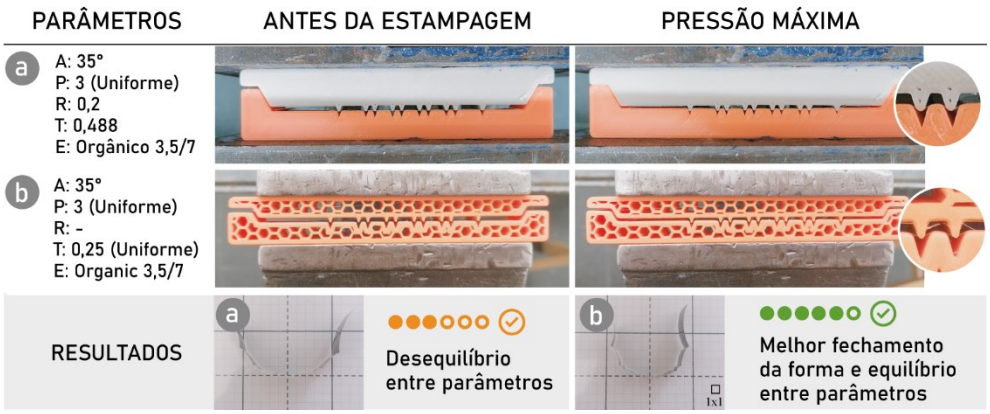
Figura 133. Experimentar > Experimento Tolerância.



Nota. Experimento por fabricação digital 03. Uma classificação de um a seis pontos foi utilizada para avaliar o nível de fechamento das amostras estampadas. Fonte: Autora (2023).

O resultado do experimento revelou que a estampagem com a versão de tolerância 0,488 mm apresentou fechamento ligeiramente superior à versão de 0,122 mm. Ou seja, a ampliação da tolerância influenciou no fechamento da geometria. Contudo, durante o processo de estampagem, observou-se o encaixe da **SM** pela vista lateral. Percebeu-se a **relação crítica de encaixe entre o positivo e negativo**, a qual carece de aprimoramento para redução do risco de ruptura do material (Figura 134**a**, ao lado da pressão máxima).

Figura 134. Experimentar > Experimento Tolerância.



Nota. Avaliação do equilíbrio entre parâmetros. P, T e E em mm. Experimento por fabricação digital 03: comparação entre a secção matriz plana do estudo sobre tolerância com 0,488 mm e a versão plana do estudo sobre concavidade. Uma classificação de um a seis pontos foi utilizada para avaliar o nível de fechamento das amostras estampadas. Fonte: Autora (2023).

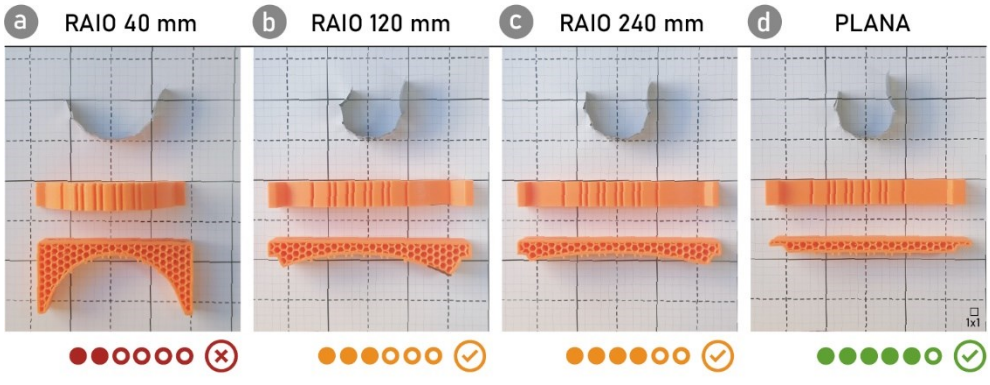
Assim, o estudo sobre concavidade explorou uma diferente lógica para o emprego da tolerância. Realizou-se um *offset* contínuo e uniforme de 0,25 mm, a partir da matriz negativa, para conferir a tolerância entre as matrizes. A Figura 134 compara versões planas de **SM**s entre estudo de tolerância e de concavidade. A Figura 134**b** revela maior equilíbrio entre os parâmetros de vinco, e consequentemente melhor fechamento da amostra. Esses serão os parâmetros utilizados nas próximas matrizes.

5.6.2.2.4 Experimento Concavidade

Para o **Experimento Concavidade**, convém antes de tudo que haja uma explicação sobre o processo construtivo das matrizes. O objetivo era conferir para todas as versões de **SM**s, a mesma posição do eixo de fixação do módulo cinético. Para tanto, efetuou-se a sobreposição do eixo de fixação no quadrante π/2 do círculo que gerará a concavidade da matriz. Foram criados diferentes raios de concavidade. Como o eixo de fixação não se situa exatamente no meio da peça bimetálica, tal fato desencadeou relações assimétricas para as matrizes. A assimetria pode ser verificada no lado direito das versões laterais das **SM**s, que compreendem as maiores alturas das matrizes.

Foram desenvolvidas quatro versões de secções de matrizes, com os seguintes raios: 40 mm (corresponde a curvatura similar à da faixa bimetálica de 100 mm em estado natural); 120 mm; 240 mm; e versão plana (Figura 135). Faixas bimetálicas de 9,6 x 1,0 cm foram prensadas no torno de banca.

Figura 135. Experimentar > Experimento Concavidade.



Nota. Experimento por fabricação digital 04: estudo sobre concavidade para definição de matrizes com diferentes versões de raios. Uma classificação de um a seis pontos foi utilizada para avaliar o nível de fechamento das amostras estampadas. Fonte: Autora (2023).

A estampagem da faixa bimetálica com a versão de raio 40 mm (Figura 135**a**), que buscou aliar a curvatura do material à concavidade na matriz de estampagem, conferiu o menor fechamento das amostras testadas. Já a versão com raio de 120

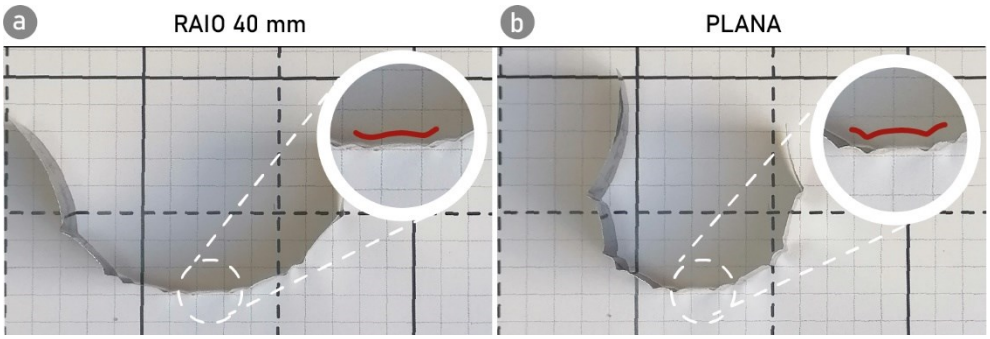
mm (Figura 135**b**) apresentou elevado nível de fechamento, contudo houve a ocorrência de marcação em excesso no lado esquerdo do bimetal. Como visto anteriormente, a demasiada marcação das extremidades é crítica para promoção ou negação do movimento. Esse desequilíbrio certamente influenciaria negativamente o desempenho do módulo decorrente dessa matriz.

A **versão plana conferiu o melhor resultado por demonstrar maior equilíbrio de pressão entre os vincos** (Figura 135**d**). Expôs marcação de vincos mais uniformes e melhor fechamento da forma. Não obstante, essa versão é a que mais contraria a curvatura natural do bimetal. Acredita-se que tal resultado tenha relação com a maior uniformidade da força ao longo de todos os vincos que a versão plana desempenha.

Com relação aos vincos gerados no experimento concavidade, percebeu-se que os vincos nas extremidades são mais fortemente marcados que os centrais. Os experimentos indicam que os vincos mais próximos ao eixo de fixação são cruciais para o fechamento da forma. Há dificuldade de marcar os vincos nessa região, visto que os dentes da área central criam mais resistência à estampagem do que os das extremidades.

As amostras que obtiveram maior fechamento, tenderam a criar maior curvatura entre os vincos, do que as de menor. A Figura 136 compara a curvatura referente a amostra do raio com 40 mm e a versão plana. Essas amostras correspondem respectivamente ao mínimo e máximo fechamento após estampagem.

Figura 136. Experimentar > Curvatura do bimetal central: aproximação.



Nota. Experimento por fabricação digital 04. Fonte: Autora (2023).

No mais, a versão plana cumpre com os requisitos para o desenvolvimento, e o ajuste dos parâmetros supracitados (de ângulo, profundidade de vinco, tolerância da matriz e padrão de espacejamento entre os vincos) conferiram melhoria do fechamento das faixas bimetálicas. O próximo estudo irá aplicar tal conhecimento para a confecção do biomódulo bimetal em escala 1:1.

5.6.2.2.5 Matrizes 1:1 para confecção do Biomódulo Bimetal final

Uma nova versão de matriz, a Matriz 5 [M5] foi confeccionada com os mesmos parâmetros utilizados na SM plana do estudo concavidade (explicitados na Figura 134**b**). O detalhamento técnico da matriz se encontra entre o **Anexo D** e **Anexo G**.

Amostras em bimetal na dimensão de 9,3 x 18,6 cm foram fixas com parafusos na matriz. Utilizou-se a prensa manual para estampar as peças, sendo a matriz posicionada sempre na mesma localização da prensa (Figura 137). O número de rotações da válvula de controle da prensa foi contabilizado, em três voltas, a fim de exercer níveis de força aproximados para o processo de estampagem por controle manual.

Figura 137. Solucionar > Prototipagem: Matriz 05 para estampagem.

Nota. Experimento por fabricação digital 05. Fonte: Autora (2023).

Não foram identificadas fraturas do bimetal, pois não se exerceu elevada pressão para definição dos vincos. O fator escala influenciou no resultado do bimetal estampado. Não obstante, o nível de fechamento das amostras em escala 1:1 foi inferior à curvatura da faixa bimetálica da Figura 135**d**.

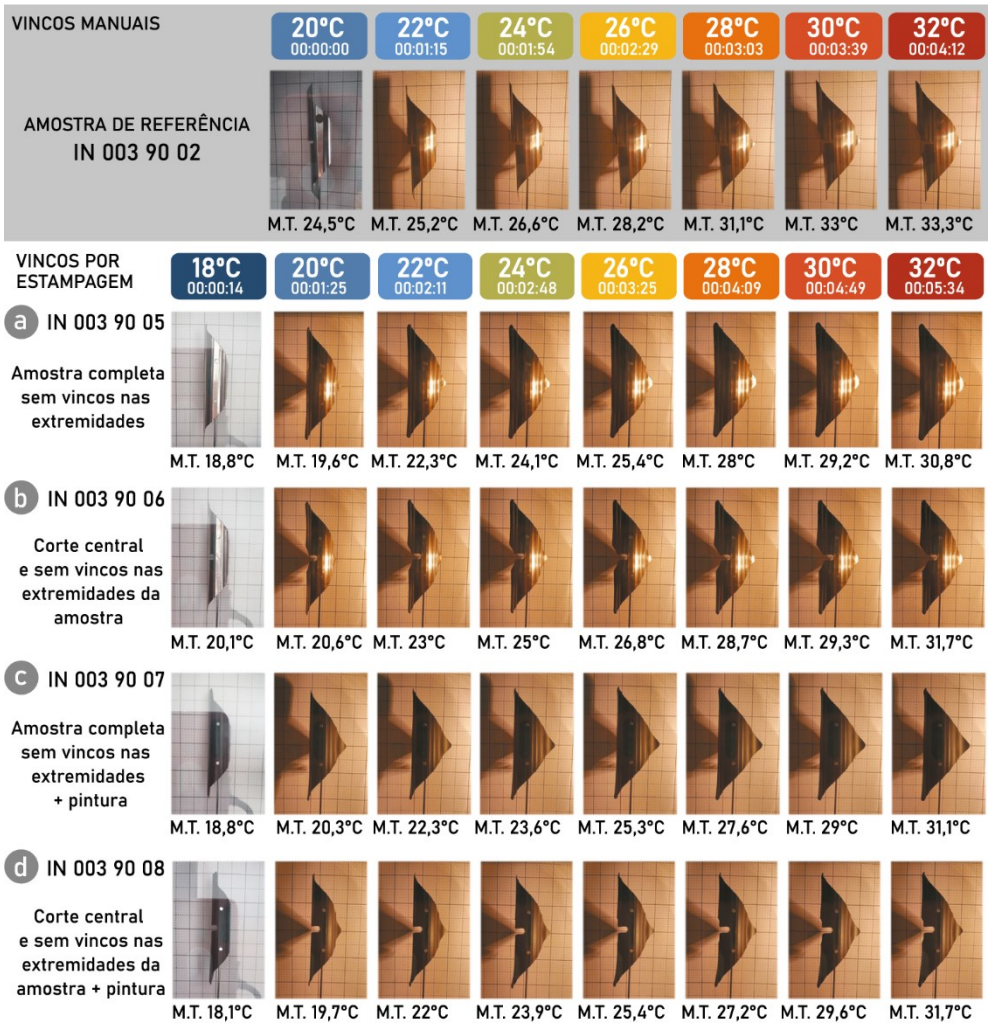
Os resultados das amostras da Matriz 5 foram aprovados por apresentar melhor equilíbrio entre os parâmetros, dentre as matrizes previamente confeccionadas. Para potencializar o fechamento das amostras utilizou-se processo de conformação posterior com o auxílio de cilindro metálico. Esse processo aconteceu manualmente por meio de pressionamento da área do bimetal, entre os seis vincos mais próximos do eixo de fixação, e o cilindro. Os seis vincos supracitados são cruciais para o fechamento, e possuem maior resistência à estampagem do que os das extremidades.

Posteriormente, duas amostras prensadas (uma sem e outra com corte central) foram selecionadas para processo de pintura, que consistiu em três camadas de

tinta *spray* preta para metal com acabamento mate[59]. O *spray* é indicado para superfícies sob influência de altas temperaturas e para anticorrosão.

O teste térmico foi realizado para quatro amostras resultantes, entre 18°C e 32°C, durante cinco minutos para cada amostra. As características das amostras estão descritas na Figura 138.

Figura 138. Solucionar > Teste térmico da Matriz 5.



Nota. Experimento por fabricação digital 05. Fonte: Autora (2023).

Após o TT, pode-se afirmar que a **M5** conferiu melhor relação entre parâmetros e o desempenho de movimento. A cobertura de tinta retardou ligeiramente o comportamento do material. Futuros testes buscarão analisar a influência da

[59] *Spray* na marca *Luxens*, indicado para pintura/esmalte de superfícies que lidam com altas temperaturas (como churrasqueiras e lareiras). Pode ser aplicado sobre ferrugens.

pintura preta com a exposição da amostra à radiação solar. A Figura 138**c** foi a versão com maior amplitude de movimento.

No que tange à **influência dos cortes centrais** em relação ao movimento dos módulos, constatou-se que houve retardamento do movimento das amostras com corte. Os cortes podem permitir pequenas alterações para ampliar a versatilidade formal do biomódulo bimetal, contribuem para evitar tensões e repuxo do bimetal com o processo de estampagem. A depender da magnitude dos cortes podem influenciar de forma significativa na responsividade dos biomódulos. Pode-se observar ainda que a Figura 138**d** exibiu no lado esquerdo diminuta negação de movimento, em relação às demais amostras que tiveram comportamentos térmicos responsivos equilibrados.

Figura 139. Solucionar > Nível de marcação dos vincos.

Nota. Experimento por fabricação digital 05: a) vincos manuais; b) vinco por estampagem. Fonte: Autora (2023).

No mais, quando se comparam as amostras resultantes dos vincos manuais com as por estampagem (Figura 139), identifica-se que os vincos manuais formam evidentes arestas ao longo da extensão longitudinal do bimetal, com angulação na vista de topo. Enquanto os **vincos por estampagem podem proporcionar maior estruturação do material e efeito de ondulação. Tal efeito se assemelha aos sulcos das criptas estomáticas que acompanham todo lado adaxial da folha da gramínea**, uma referência à morfologia da *Ammophila arenaria*.

A Figura 140 e Figura 141 exibem diferentes vistas de **protótipos de Biomódulos Bimetais**, adequados a testes de aplicação em construções.

Figura 140. Solucionar > Prototipação: Biomódulo Bimetal sem corte central.

Nota. Dimensões e vistas do protótipo do Biomódulo Bimetal com corte na escala 1:1. Dimensão 9,3 x 18,6 cm antes do processo de estampagem. Fonte: Autora (2023).

Figura 141. Solucionar > Prototipação: Biomódulo Bimetal com corte central.

Nota. Dimensões e vistas do protótipo do Biomódulo Bimetal com corte na escala 1:1. Dimensão 9,3 x 18,6 cm antes do processo de estampagem. Fonte: Autora (2023).

Em relação ao **custo dos módulos**, tendo em conta que uma bobina de 20,45 m foi de $122,37, o custo da matéria-prima por unidade modular ficou por $0,591. Seria possível confeccionar 206 unidades com o material adquirido. Um elemento construtivo para fachada com 1 x 1 x 0,08 m, deve conter setenta e duas unidades de biomódulos. O custo referente a matéria-prima do conjunto dos biomódulos seria de $42,55.

Esses módulos cinéticos podem ser aplicados em ambiente exposto ao Sol, após uma camada de vidro, ou ainda entre os vidros. Estima-se que seja possível potencializar a responsividade dos módulos à variação de temperatura se forem inseridos em invólucro que restrinja a passagem do ar. O próximo capítulo explorará abordagem experimental para exposição dos biomódulos em ambiente aberto e fechado, em Lisboa.

5.7 Síntese do Capítulo

No âmbito do presente capítulo, foi realizada a etapa de ***Brainstorming*** com o desenvolvimento de caixa morfológica e esboços, sessão de cocriação e análise dos dados. Durante a **Sessão de Cocriação** buscou-se repensar a aplicação do cobogó, para o contexto climático de Lisboa, mediante processo de abstração sobre a *Ammophila arenaria*. O **movimento de abertura e fechamento foliar** foi a estratégia do organismo de referência que chamou mais atenção. E a **modularidade** surgiu como principal referência à tipologia do cobogó (cujo elemento possui função de ventilar, iluminar, promover a proteção solar e privacidade).

Por conseguinte, foram definidos os **requisitos de desenvolvimento** para a **proposição de módulos cinéticos em referência à morfologia das nervuras e ao movimento reversível do organismo de referência**, que proporcionam a redução e ampliação da área foliar com baixa necessidade de profundidade. Através do material inteligente, o **bimetal**, que se curva ao ser aquecido, tencionou-se conceber **células autônomas por bioinspiração, que respondam à variação de temperatura, e sejam acionados independentemente de dispositivos elétrico e mecânicos**.

Em referência à morfologia da *Ammophila arenaria*, identificaram-se os vincos **na camada ativa do bimetal** como uma oportunidade para controlar a capacidade cinética do bimetal. Ao se posicionar os vincos na superfície ativa do material, as nervuras alteram a posição inicial da amostra e proporcionam resistência ao movimento natural do material (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Cruz, 2021). O bimetal continua a tentar exercer o movimento em direção ao fechamento do material. Contudo, se a **relação entre a forma da amostra e a variação de temperatura** não for capaz de ultrapassar a resistência dos vincos, o comportamento do bimetal se restringirá a proporcionar a abertura do material, diante do aquecimento e fechamento quando o material se arrefecer.

O **domínio dessa relação permitirá controlar o comportamento do bimetal.** Nesse sentindo, a **experimentação com o bimetal** buscou obter tal controle. Para tanto, testes exploratórios com a faixa bimetálica de 0,06 mm de espessura foram desenvolvidos e são conclusivos para o material sob análise. No total foram realizados cinco testes sistematizados sobre vincos manuais e mais cinco sobre vincos por fabricação digital, os quais foram demonstrados no presente capítulo. Além desses, inúmeros estudos foram efetuados com a intenção de compreender o material sob análise e desenvolver o conceito do projeto. Alguns desses seguem descritos no **Anexo C**.

Por fim, **modelo conceitual** foi desenvolvido para o **módulo cinético por *self-shading* inspirado na morfologia da** *Ammophila arenaria*. Posteriormente, protótipos foram testados termicamente. Para a prototipagem dos biomódulos aprovados, utilizou-se: corte a laser da peça em bimetal, impressão 3D das matrizes planas para estampar os vincos intercalados de 3,5/7 mm, com subsequente aprimoramento do fechamento das amostras.

As experiências revelaram que **é possível controlar o comportamento dos Biomódulos Bimetais**, **que tendem a fechar à temperatura ambiente de cerca de 18°C e a abrir a temperaturas próximas dos 32°C.** Sublinha-se que existe sempre uma linha tênue entre a melhoria do comportamento do material e a prevenção da sua ocorrência. Rigor é, portanto, uma característica fundamental para controlar a fabricação e assegurar um comportamento uniforme.

Procurou-se identificar atributos e parâmetros que podem ser replicados em outras versões formais de módulos. Defende-se que não existe um parâmetro isolado e determinante, mas a confluência inter-relacional entre parâmetros e características distintas, tais como: a) padrão de vincos intercalados 3,5/7 mm, associado à negação de vincos nas extremidades; b) tolerância contínua e uniforme de 0,25 mm na matriz de estampagem plana, com um intervalo de 2,5 mm entre as paredes do bimetal e da matriz; c) influência direta da escala do módulo no resultado da estampagem; e) ângulo de 35°; f) ausência de raio do dente, e g) profundidade de vinco de 3 mm.

Recomenda-se a utilização desses parâmetros como referência em estudos posteriores que possam explorar a versatilidade formal dos módulos cinéticos através da aplicação de vincos. O próximo capítulo tenciona integrar o conhecimento organismo de referência e do material para o desenvolvimento do algoritmo paramétrico e de simulação do biomódulo bimetal.

6. Solucionar

6.1 Nota Introdutória

O presente capítulo irá demonstrar as definições algorítmicas para o biomódulo bimetal. Houve um árduo trabalho de tornar compreensível as representações computacionais através do conhecimento do design, a fim de tornar acessível à compreensão dos sistemas ou estruturas em desenvolvimento.

O sistema de codificação buscou contribuir para a capacidade do projetista de captar, armazenar, manipular, gerir e refletir sobre a natureza da informação. A princípio será esclarecido o sistema de codificação com a intenção de clarificar as relações de dependência e codependência entre os componentes dos algoritmos. Em seguida, serão definidos os ambientes de teste.

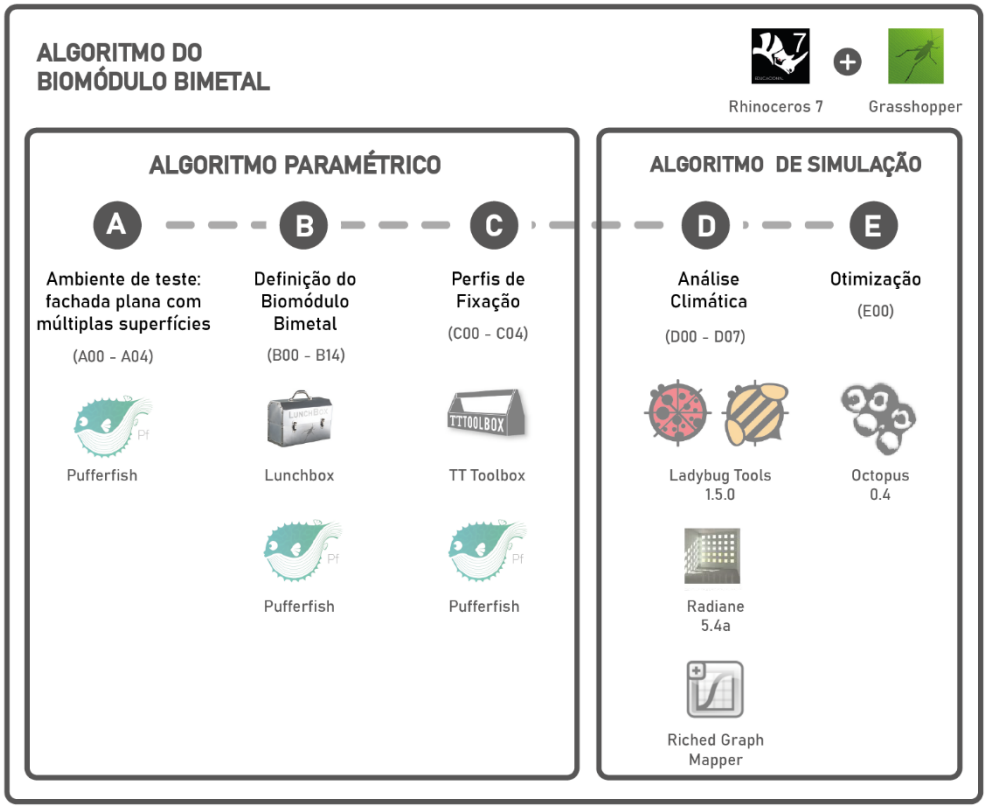
Posteriormente, será detalhada a definição paramétrica, a qual deverá permitir: o controle de dimensões, posições na fachada e diferentes padrões dos biomódulos; as definições para os vincos e para os perfis de fixação. Deverá ainda estabelecer relações computacionais iniciais para proporcionar a amplitude de movimento dos elementos modulares. Espera-se desse modo demonstrar a versatilidade paramétrica para formação do biomódulo bimetal, que manterá características com a topologia inicial do desenvolvimento.

6.2 Sistema de Codificação do Algoritmo

Optou-se por utilizar o *software Rhinoceros 7.0 Educacional*® (versão 7.31.23166.15001) e *Grasshopper*® (versão 1.0.0007) por possibilitarem o desenvolvimento algorítmico por meio de um rico ecossistema de *plug-ins*. E assim, permitir a realização de simulações climáticas. O algoritmo foi concebido a partir de *clusters*, codificados de A a D seguido de título de identificação (Figura 142).

A definição paramétrica está entre os *clusters* entre A e C. A de simulação aborda o *cluster* D (seção 7.3). O *cluster* E refere-se ao processo de otimização (seção 0). Em cada *cluster* podem existir diferentes subclassificações. Por exemplo, o *cluster* B – Definição do biomódulo bimetal apresenta *subclusters* entre B00 e B14. A Figura 142 também detalha *software* e *plug-ins* utilizados por *cluster*.

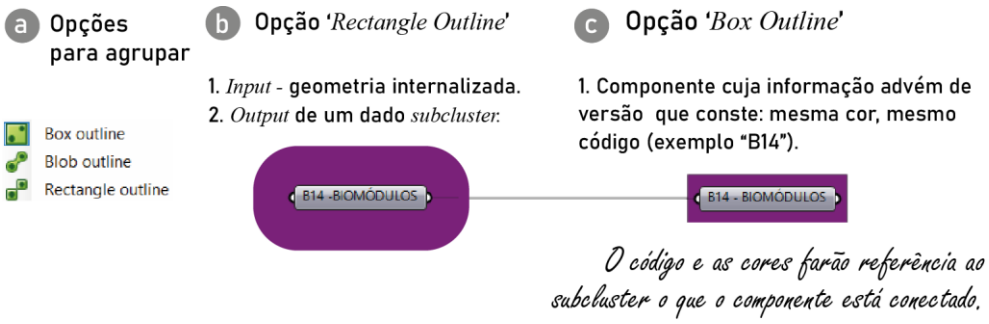
Figura 142. Solucionar > *Clusters* da definição algorítmica.



Fonte: Autora (2023).

As distintas alternativas de agrupamento do *Grasshopper*® conferem distintas espessuras a um grupo. A opção '*Rectangle Outline*' possui maior espessura com extremidades arredondadas, e identifica uma dada geometria internalizada ao algoritmo, ou ainda o *output* de um dado *subcluster*. A opção '*Box Outline*', por sua vez, tem menor espessura e demonstra que a informação do componente advém de grupo que conste semelhante cor e código (Figura 143).

Figura 143. Solucionar > Sistema de identificação no Algoritmo Computacional.



Fonte: Autora (2023).

A codificação para a nomenclatura dos *outputs* dos *clusters* acontecem do seguinte modo: letra referente ao *cluster* + dois dígitos numéricos que identificam o *subcluster* + título do que se trata (exemplo: B14 – BIOMÓDULOS). Ratifica-se que ao longo de todo o algoritmo, a nomenclatura associada a cor e espessura do grupo revela conexão entre os componentes, que possuam as ligações visuais (linhas de conexão) que estão majoritariamente ocultas.

Os **quadros *Inputs*** reúnem os **parâmetros customizáveis** que estão conectados a um ou a um conjunto de *subclusters*. Em geral, estão posicionados ao lado esquerdo do código que influenciam, na cor cinza escura. Para codificação recebem a letra "I" + dois dígitos numéricos referente a numeração do quadro de parâmetros + mais o nome do parâmetro (exemplo: I00 – QTD. DE COLUNAS).

Em síntese, a codificação com título de identificação e as cores farão referência ao *subcluster* para o qual o componente está conectado, assim como a espessura do agrupamento irá variar conforme a natureza da informação. O **sistema de identificação utilizado minimiza a quantidade de ligações visuais entre os componentes**, de modo a facilitar a compreensão. É possível expor os *subclusters* sem perder as ligações entre as distintas partes, pois a maior parte das ligações foram ocultadas.

6.3 Definição do Ambiente de Teste

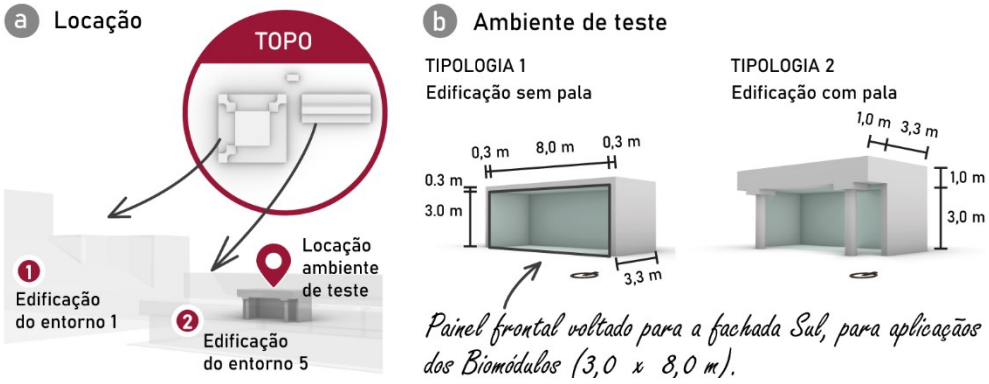
Para concepção algorítmica definiu-se a **locação do ambiente de teste na fachada do edifício quatro da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa**, em 38° 42' 46" N e 9° 11' 37" W. No entorno constam duas edificações: o edifício 1 (que contempla o auditório conhecido por cubo) e o edifício 5 (instituído para alocar as atividades de pós-graduação) (Figura 144).

Figura 144. Solucionar > Locação do Ambiente de Teste.

Fonte: Autora (2023).

O algoritmo foi estruturado para contemplar duas tipologias de ambiente de teste. A tipologia 1 corresponde à **edificação sem pala** (8,6 x 3,3 x 3,3 m) e a tipologia 2 a uma **construção com pala** (8,6 x 4,3 x 4 m). A versão sem pala representa o contexto extremo de incidência solar, enquanto a com pala é uma referência à construção encontrada na FAUL (Figura 145).

Figura 145. Solucionar > Ambiente de teste.



Nota. As edificações do entorno correspondem ao edifício 1 e edifício 5 existentes na FAUL. Fonte: Autora (2023).

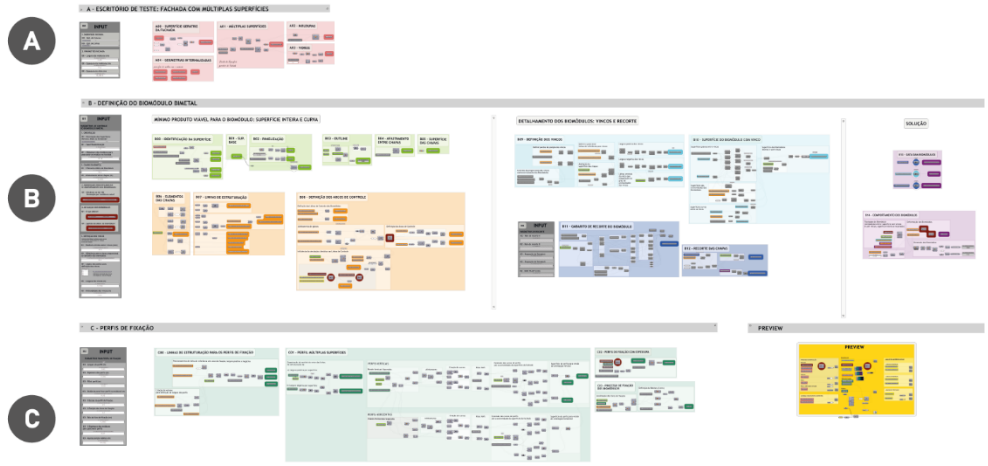
As geometrias do ambiente de teste foram modeladas tridimensionalmente no *Rhino 7.0*®, assim como as edificações do entorno. Posteriormente foram internalizadas à definição algorítmica. Serão parâmetros estáticos de suporte ao painel frontal voltado à fachada sul.

O painel frontal possui as dimensões de 3,0 x 8,0 m. Esse espaço será utilizado para a aplicação dos biomódulos entre duas camadas de vidro translúcido. O algoritmo paramétrico permitirá efetuar diferentes subdivisões do painel. Mas o princípio será atribuir distância útil ao posicionamento dos biomódulos.

6.4 Definição Algoritmo Paramétrico

As bases para a concepção algorítmica dos biomódulos foram definidas entre os *clusters* de A a C. A Figura 146 exibe uma visão geral da definição algorítmica. À medida que os *clusters* forem sendo apresentados, serão utilizadas imagens sínteses para esclarecer a lógica do algoritmo.

Figura 146. FASE Solucionar > Algoritmo Paramétrico: visão geral.

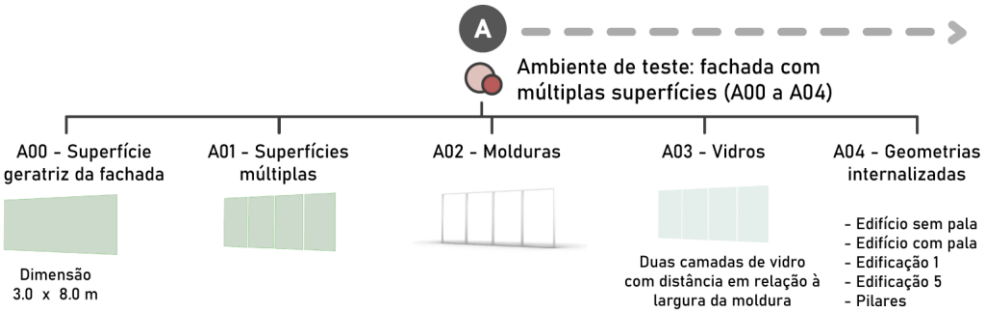


Fonte: Autora (2023).

6.4.1 *Cluster* A: Ambiente de teste e fachada com múltiplas superfícies

O *Cluster* A compreende as definições para o ambiente de teste e subdivisão da fachada em múltiplas superfícies. Existem *subclusters* entre A00 a A04 que definirão diferentes características para fachadas (Figura 147).

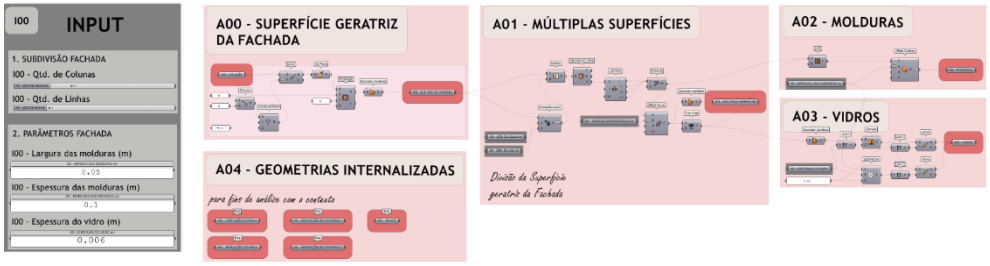
Figura 147. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* A – imagem síntese.



Fonte: Autora (2023).

No que tange ao quadro de '*Inputs* I00' referentes ao *Cluster A*, a primeira opção controla a '**I00 – Quantidade de Colunas**' e '**I00 – Quantidade de Linhas**', que definirão múltiplos painéis na fachada. As distintas superfícies irão propiciar a criação de **molduras com duas camadas de vidro**. Tanto a espessura da moldura e do vidro, quanto a largura da moldura, podem ser modificadas. O afastamento entre os vidros está diretamente relacionado à espessura da moldura. Os biomódulos e perfis de fixação estarão sediados entre as camadas de vidros. A Figura 148 explicita o código no *Grasshopper*®.

Figura 148. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* A – *Subclusters* A00 a A04



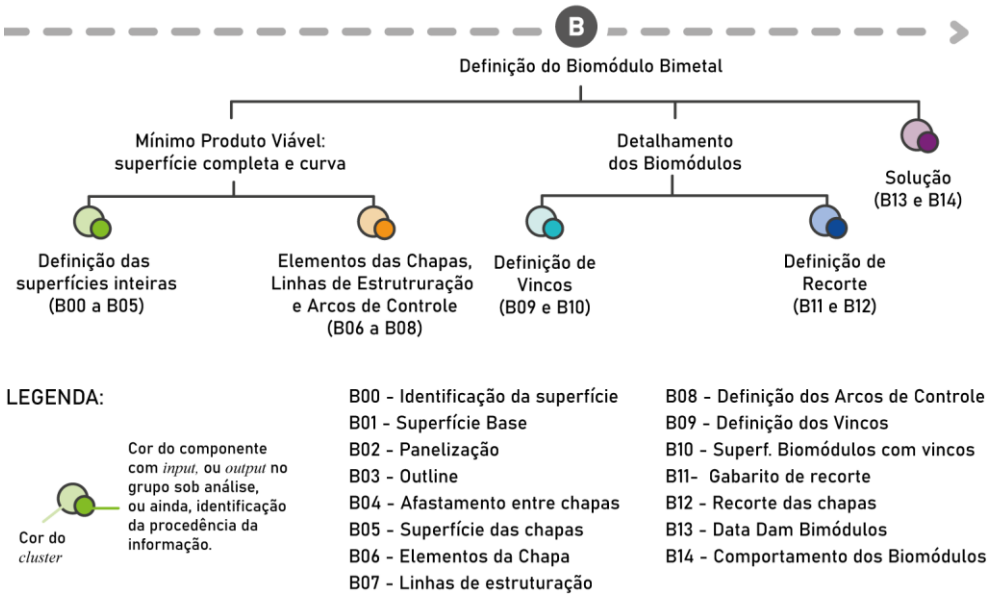
Fonte: Autora (2023).

Ademais, no *subcluster* geometrias internalizadas constam: a edificação com e sem pala, os pilares referentes a construção com pala, e os dois edifícios do entorno do ambiente de teste. Muito embora as geometrias apareçam nessa etapa, a opção para a sua utilização no algoritmo acontecerá em etapas posteriores, as quais serão esclarecidas futuramente.

6.4.2 *Cluster* B: Definição do Biomódulo Bimetal

Uma visão geral do *cluster* B pode ser observada na Figura 149.

Figura 149. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – visão geral.



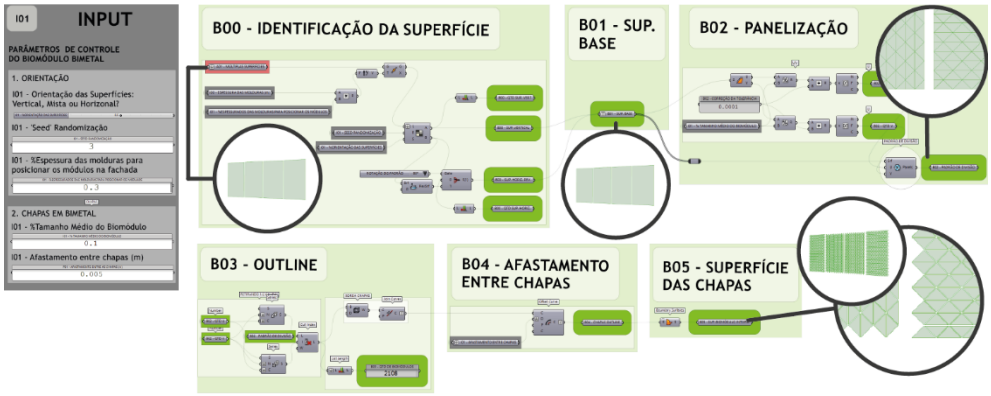
Nota. Os *subclusters* estão enumerados e classificados na parte inferior da imagem. Fonte: Autora (2023).

6.4.2.1 Mínimo Produto Viável para confecção dos Biomódulos

O mínimo produto viável para confecção dos biomódulos é efetuado mediante a concepção de superfícies triangulares sob influência climática (tesselação inicial). Não há variação geométrica para além do triângulo nessa versão. Ou seja, não são confeccionados vincos e recortes. Tal abordagem é recomendada para agilizar o processamento das simulações, pois opera com menor: quantidade de informações, complexidade formal e iterações algorítmicas.

Os *subclusters* de B00 – B05 irão definir as superfícies inteiras a partir de processo de tesselação com o *plug-in* ***LunchBox*** (componente – *Triangles Panels B*) (Figura 150). Os triângulos com menor área que estão alocados entre duas extremidades opostas da fachada são excluídos. Tais geometrias estão ausentes por exibirem lógica dos índices distinta dos triângulos com maiores áreas. Do contrário, haveria a necessidade de considerável ampliação nas definições do código.

Figura 150. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B –*Subclusters* B00 a B05.



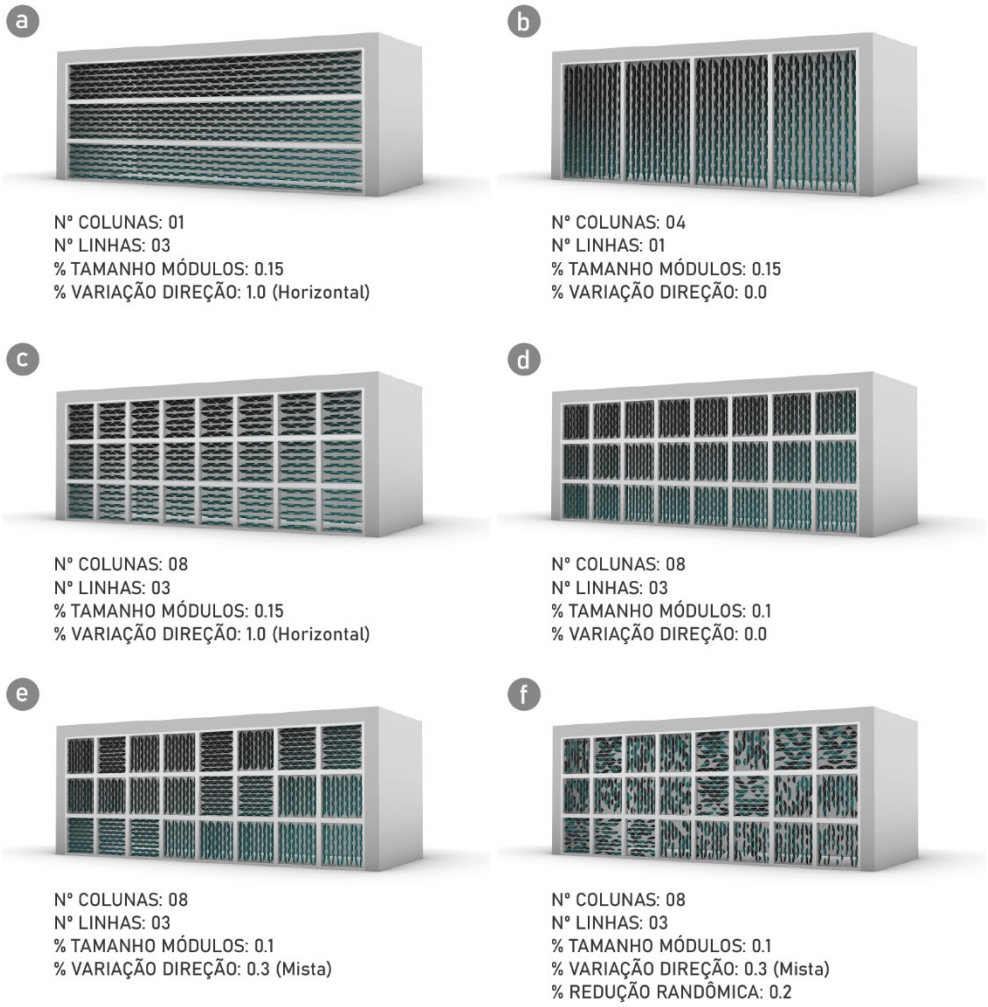
Fonte: Autora (2023).

Parte do quadro com os '*Input* I01' é exibida na Figura 150. A versão completa do quadro contém os *inputs* customizáveis que irão influenciar todo o *cluster* B, e serão revelados à medida que se destrinchar o algoritmo. O primeiro parâmetro customizável refere-se ao parâmetro '**I01 – Orientação das superfícies**' que corresponde à porcentagem de variação da direção para aplicações dos biomódulos, sendo possível variar entre posição: vertical, mista ou horizontal. A opção mista (cujo *slider* correspondente a um número não inteiro) irá atuar de modo aleatório sob a influência do parâmetro '**I01 – *Seed* Aleatoriedade**'.

Outro *input* para controle corresponde a '**I01 – %Espessura das molduras para posicionar os módulos na fachada'** entre os vidros. Tal modificação é realizada pela multiplicação do índice percentual em relação à espessura da moldura. A **alteração da dimensão** dos biomódulos, por sua vez, é efetuada através da multiplicação de índice percentual correspondente (Figura 151) pelo parâmetro '**I01 – %Tamanho Médio dos Biomódulos'**. Outro parâmetro ajusta o **afastamento entre o contorno da tesselação e a chapa de bimetal** ('**I01 – Afastamento entre chapas**'). O afastamento entre as chapas é relevante para evitar a convergência entre as extremidades dos módulos, e consequentemente a geração de atrito entre as superfícies.

Na Figura 151 utilizou-se biomódulos com largura máxima de 10 cm devido: a largura da faixa bimetálica adquirida e para **proporcionar redução da escala dos biomódulos** a fim de acondicioná-los entre os vidros.

Figura 151. Solucionar > Parâmetros customizáveis: fachadas planas.



Fonte: Autora (2023).

Os desenvolvimentos posteriores utilizarão a **porcentagem para o tamanho dos biomódulos em 0,1, que perfaz biomódulos com dimensões de: 9,4 x 18,8 cm. Tais módulos possuem espessura de 0,06 mm, são aplicados entre dois vidros de 0,6 cm. As molduras em perfis de alumínio de 8 cm de largura. A distância entre vidros é de 5,4 cm** para a configuração em questão.

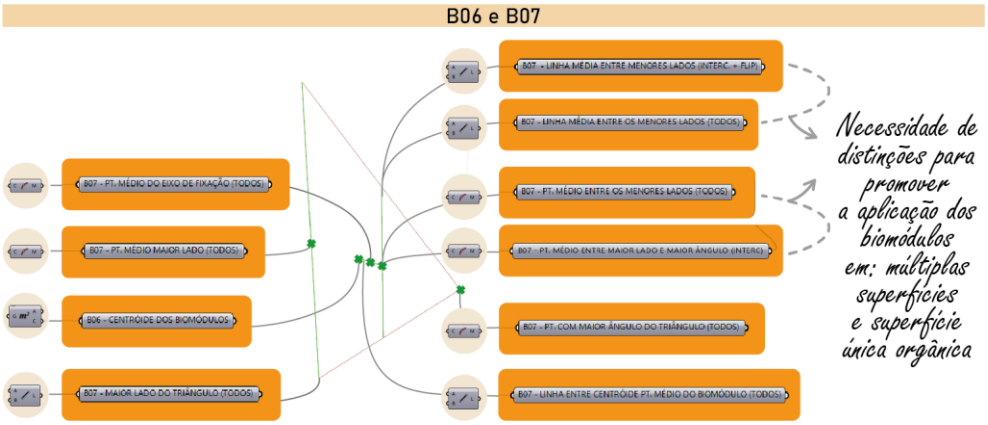
A Figura 151 exibe diferentes configurações paramétricas dos biomódulos. Muito embora na Figura 151**f** apareça também a opção percentual de redução aleatória (a sua opção de controle encontra-se no *subcluster D02*, explicitado no item 7.3). Para fins de demonstração inicial, optou-se por apresentar a opção em questão, de modo a sintetizar os parâmetros customizáveis supracitados.

Os códigos B06 e B07 evidenciam os elementos das chapas a partir de **pontos e linhas de estruturação**, que irão influenciar o comportamento dos biomódulos e a concepção dos perfis de fixação (Figura 152). A intenção de tal configuração foi

extrapolar a concepção algorítmica para além das fachadas planas com múltiplas superfícies, de modo a permitir a aplicação em superfícies orgânicas com quatro pontos de base. Nesse sentido, houve a necessidade de implementar versões distintas de pontos e linhas para inverter o sentido (*Flip*) e/ou intercalar as linhas de estruturação. Para a explicação do algoritmo, será utilizada a definição do ambiente de teste (ver item 6.2).

Para fins didáticos, optou-se por demonstrar a confecção de apenas um módulo nas imagens. No entanto, esclarece que a abordagem algorítmica adotada é sistêmica para a tesselação da superfície como um todo. Deve-se ainda ter atenção às cores dos *subclusters* e ao sistema de codificação para maior compreensão do algoritmo paramétrico. De acordo com Karanouh & Kerber (2015, p. 185) o "uso de diagramas para traduzir as regras algorítmicas subjacentes em instruções para o projeto permite que soluções complexas e inovadoras sejam realizadas de forma mais eficaz"[60].

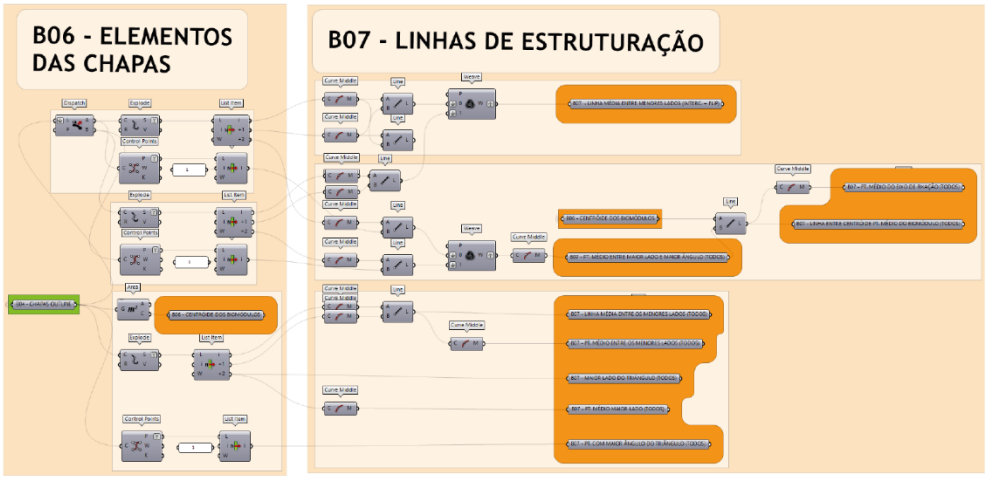
Figura 152. Solucionar > Síntese dos parâmetros de *output*: *subclusters* B06 e B07.



Fonte: Autora (2023).

[60] *The use of diagrammatic grammar to translate underlying algorithmic rules into instructions for design allows complex, innovative solutions to be realized more effectively* (Karanouh & Kerber, 2015, p.185).

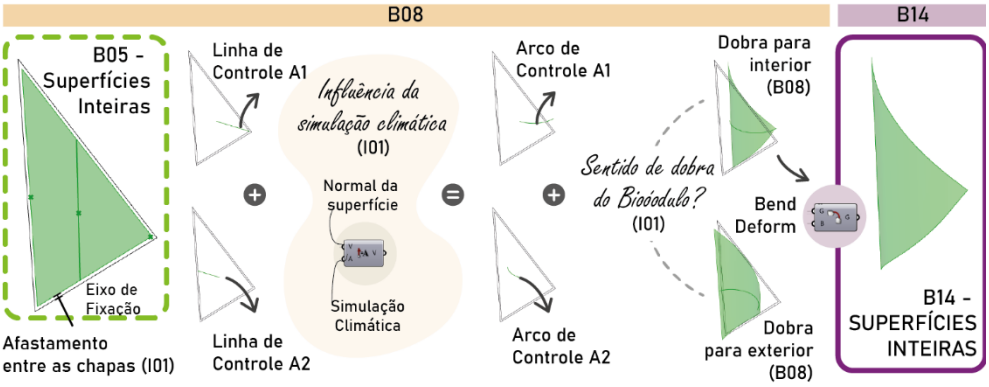
Figura 153. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – Código *Subclusters* B06 e B07.



Fonte: Autora (2023).

A Figura 154 explicita lógica algorítmica que contempla os *subclusters* entre B06 e B08. A **linha de controle 1** é definida entre o ponto médio do eixo de fixação e o ponto com maior ângulo do triângulo. Já a **linha de controle 2** perpassa pelo ponto médio do eixo de fixação e o ponto médio do maior lado triângulo. **Por meio da inter-relação entre o vetor da normal da superfície e os dados referentes à influência climática se determina a amplitude de movimento das linhas de controle.** As linhas deformam-se como arcos de controle.

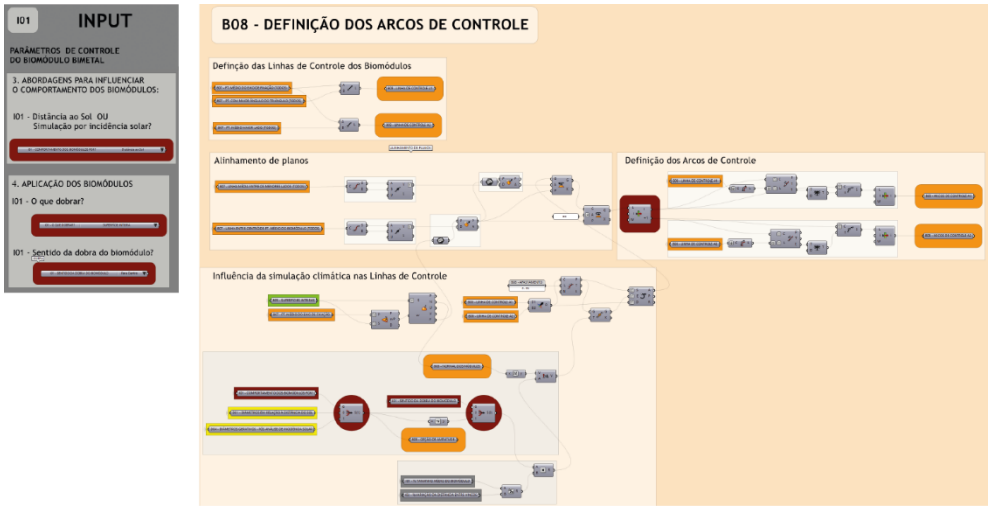
Figura 154. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – Lógica para Superfícies Inteiras.



Fonte: Autora (2023).

O quadro *Input I01* apresenta várias opções de filtro para a concepção dos biomódulos (Figura 155).

Figura 155. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B08.



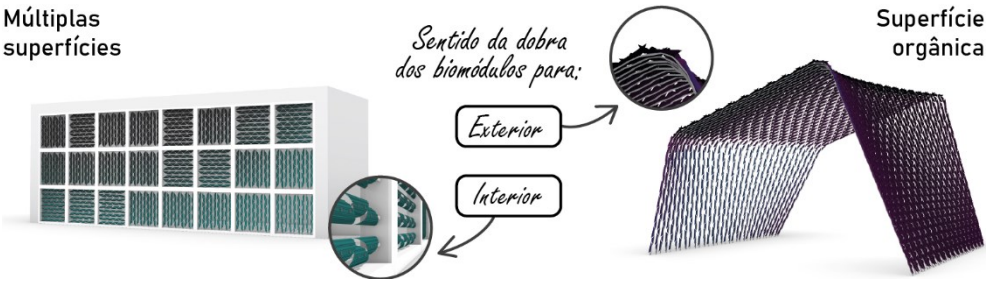
Fonte: Autora (2023).

O primeiro filtro se refere a duas distintas **abordagens para influenciar no comportamento das linhas de controle dos biomódulos** via simulação climática. São elas: a) distância dos biomódulos ao Sol ou b) incidência solar. Maiores esclarecimentos sobre ambas as opções serão detalhados na seção referente ao *Cluster* D (seção 7.3).

O segundo filtro, '**I01 – o que dobrar?**' permite o dobramento das superfícies estáticas resultantes do processamento algorítmico. O processo de curvatura da superfície acontece no *subcluster* B14, através do componente *Bend Deform*. Múltiplas opções de superfície são disponíveis nesse filtro. Na ocasião, a Figura 154 contemplou a opção mais simples, a de superfícies inteiras. As demais serão explicadas posteriormente.

O terceiro filtro contempla processo para a escolha do '**I01 – sentido da dobra do biomódulo?**'. Essa seleção é fulcral sobretudo quando os biomódulos são aplicados em superfícies orgânicas, pois evita a sobreposição dos biomódulos em curvas fechadas. A Figura 156 compara a aplicação dos biomódulos em ambiente com múltiplas superfícies que admite o sentido da dobra para o interior ou exterior. No caso das superfícies orgânicas recomenda-se a disposição dos módulos para a parte externa.

Figura 156. Solucionar > Sentido em que os biomódulos deverão dobrar.



Fonte: Autora (2023).

Em síntese, o **mínimo produto viável para o desenvolvimento dos biomódulos compreende a criação de superfícies inteiras, que serão influenciadas pela simulação do comportamento dos biomódulos pela distância ao Sol ou pela incidência solar na fachada**.

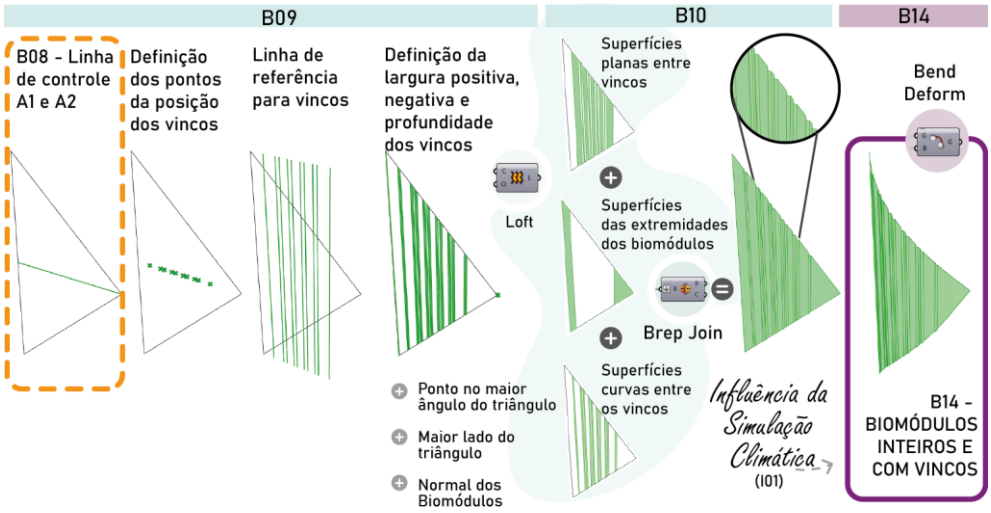
6.4.2.2 Detalhamento dos Biomódulos

A versatilidade de formação dos biomódulos é obtida através das iterações algorítmicas entre os *subclusters* B09 a B12, que compreendem os processos para o detalhamento dos biomódulos. O quadro de *Input* 02 está dividido em duas partes, uma para cada *subcluster*.

A princípio, serão esclarecidas as convenções sobre a geração dos vincos, e em seguida as em relação à criação de recorte da forma triangular inicial. A Figura 157 define a lógica de concepção, enquanto a Figura 158 apresenta o código propriamente dito.

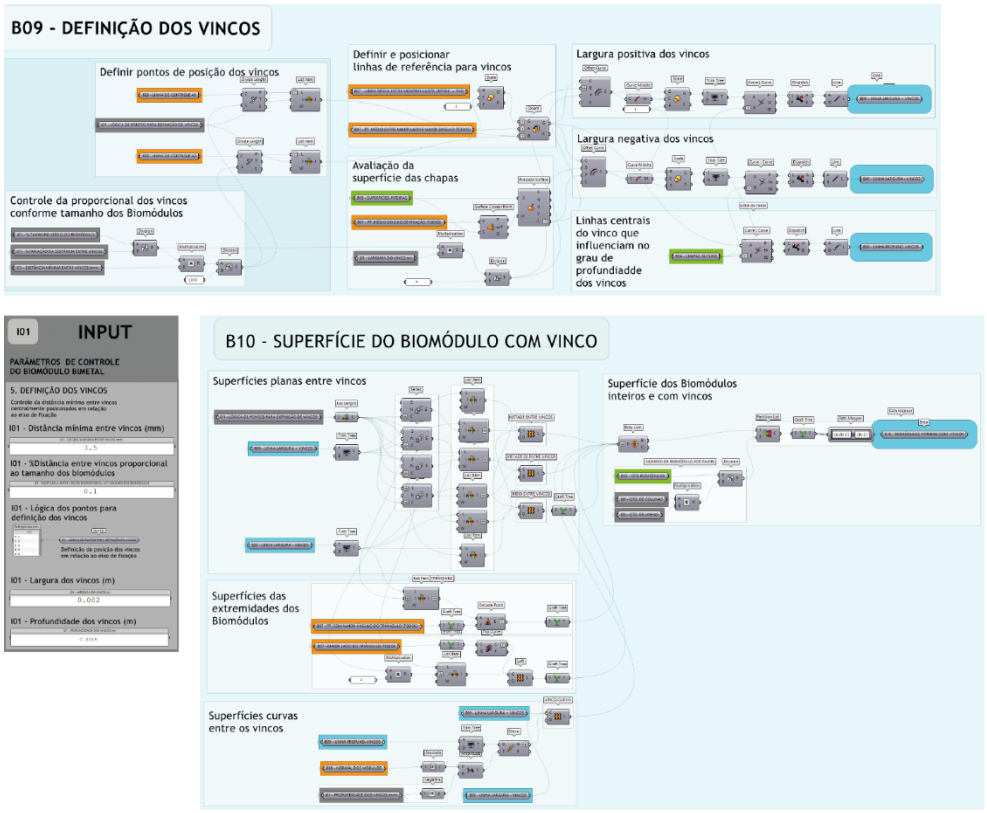
O algoritmo B09 define a **lógica dos vincos**, a qual se inicia através da definição da distância mínima entre os vincos e criação de múltiplos pontos ao longo das linhas de controle. Definiu-se uma relação proporcional entre o parâmetro percentual de controle do tamanho dos biomódulos e a variação percentual da distância entre os vincos para influenciar no espacejamento entre os vincos (*Inputs* I02) (Figura 157 e Figura 158). Desse modo, é possível manter **proporcionalidade em relação à distância entre os vincos conforme se altera a escala dos módulos.**

Figura 157. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – 'Biomódulos inteiros com vincos'.



Fonte: Autora (2023).

Figura 158. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B09 e B10.



Nota. A imagem exibe a primeira parte do quadro de *Input* 02, que se refere aos *subclusters* sob análise. Fonte: Autora (2023).

Com os pontos definidos, aplica-se a seleção da posição dos pontos a partir da **identificação dos índices dos referidos pontos**. Essa lógica selecionará a posição de

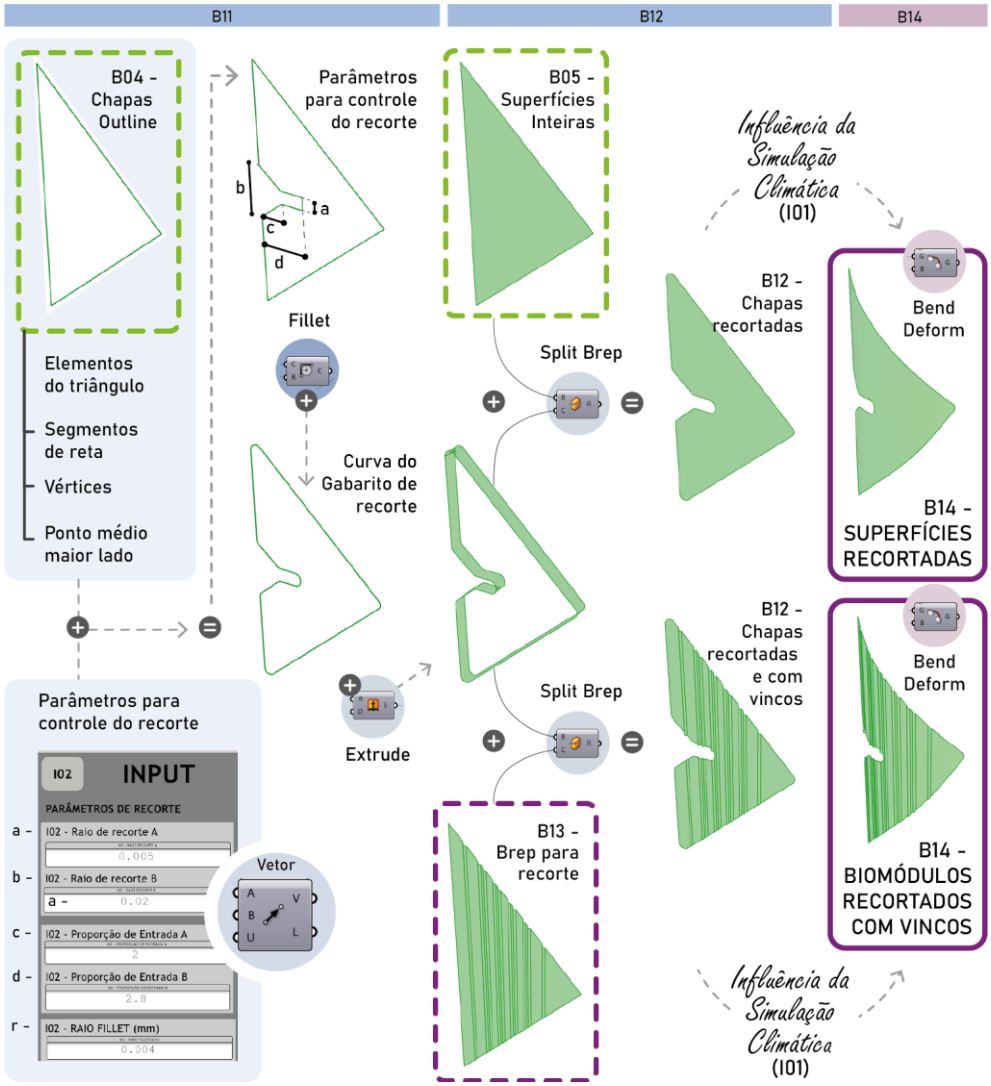
vincos para ambas as linhas de controle, de modo a proporcionar **posição de vincos simétricos em relação ao eixo de fixação**.

Seguidamente, **linhas de referência** são alocadas nos pontos de posição dos vincos. Essas linhas são paralelas ao maior lado do triângulo. A correlação entre a avaliação das superfícies inteiras, o ponto médio do eixo de fixação e o parâmetro referente à largura dos vincos, proporcionará a criação de segmentos de retas posicionados no lado direito das linhas de referência (largura positiva) e no lado esquerdo (largura negativa). O parâmetro **profundidade dos vincos** irá influenciar as linhas de referência e conferir a profundidade para os vincos.

O algoritmo referente ao *subcluster* B10 proporciona a criação de superfícies com o auxílio do componente *Loft* entre as distintas partes constituintes. São geradas superfícies planas entre vincos, superfícies nas extremidades dos biomódulos e superfícies curvas entre vincos. A união das superfícies através do componente *Brep Join* proporciona uma única superfície para cada unidade modular inicial. O processo de curvatura da superfície acontecerá sob a mesma abordagem do *subcluster* B14. Contudo, a opção de seleção no filtro sobre 'I01 – o que dobrar?' corresponde aos **biomódulos inteiros com vincos** (Figura 157).

O processo para a definição dos recortes dos biomódulos foi idealizado nos *subclusters* B11 e B12 (Figura 159 e Figura 160). No *subcluster* B11 são definidos quatro parâmetros vetoriais que contribuem para proporcionar **versatilidade e personalização das curvas para o gabarito de recorte dos biomódulos**, a partir da geometria inicial triangular. Por meio da aplicação de raio, com o componente *Fillet*, é possível arredondar as extremidades das curvas dos biomódulos recortados (*Input* I02).

Figura 159. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – 'Superfícies recortadas' e 'Biomódulos recortados com vincos'.



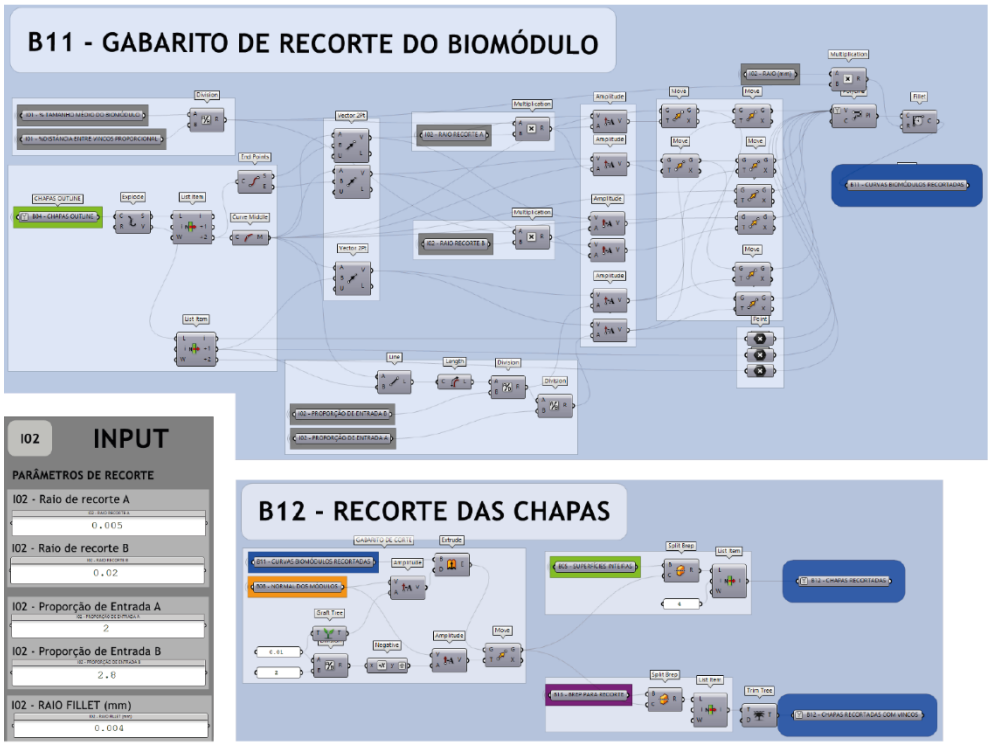
Fonte: Autora (2023).

Vale salientar, que uma relação entre o parâmetro percentual de controle do tamanho dos biomódulos e a variação percentual da distância entre os vincos é aplicada nos parâmetros de recorte e raio do *Fillet* (*Input* I02). Desse modo, é possível **definir a curva do gabarito com relação proporcional, que mantém a congruência dimensional entre os parâmetros conforme a variação da escala dos módulos.**

As curvas recortadas são posteriormente extrudadas sob a influência da normal dos módulos. A intersecção entre as superfícies extrudadas e as superfícies inteiras (provenientes do *subcluster* B05) irão produzir as **chapas recortadas**, sem a intervenção dos vincos. O componente *Split Brep* foi utilizado para efetuar a intersecção booleana entre as geometrias. De modo análogo, se realiza a intersecção entre as superfícies extrudadas com recortes e as superfícies inteiras

com vincos, e são produzidas as **chapas recortadas com vincos**. A Figura 160 apresenta imagem referente ao algoritmo que contempla os *subclusters* B11 e B12.

Figura 160. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B11 e B12.

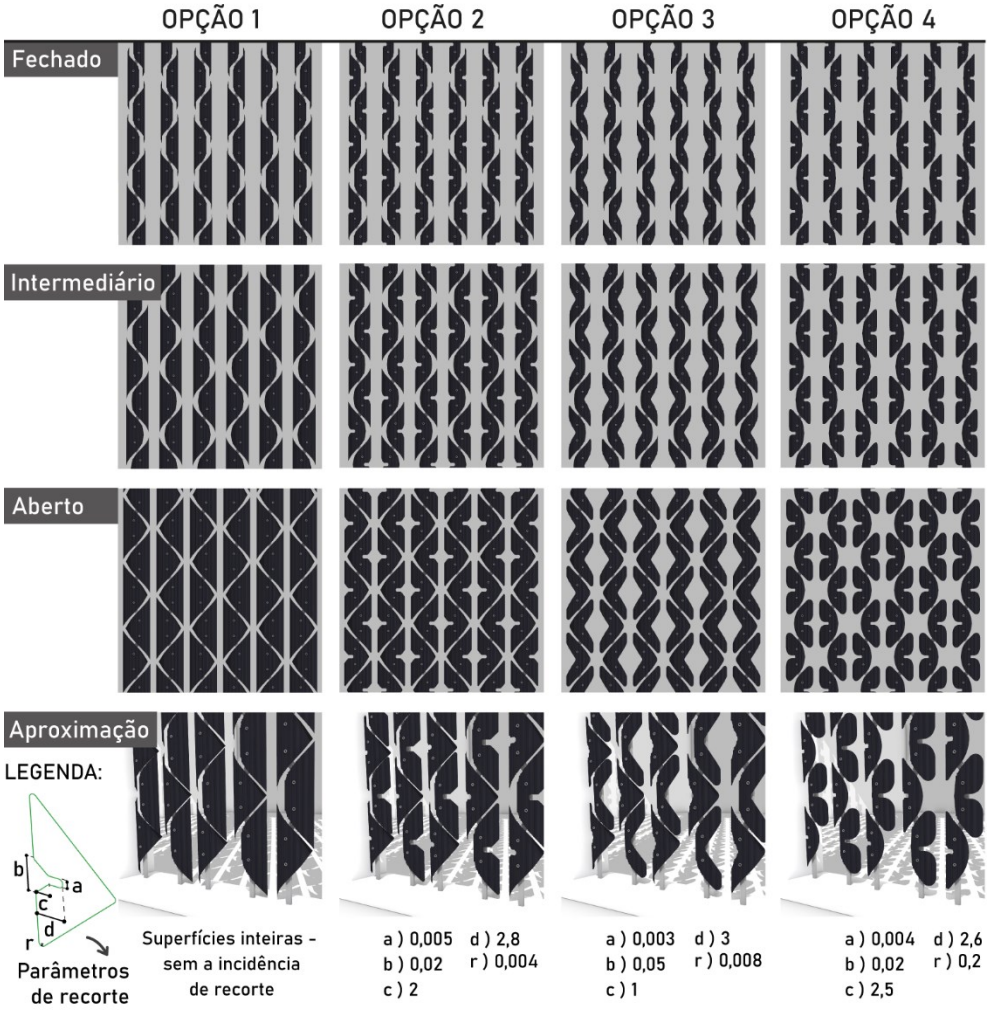


Fonte: Autora (2023).

A modificação paramétrica entre os parâmetros vetoriais de recorte e a opção de raio permitem a concepção de uma **ampla de soluções de formação para os biomódulos, que mantém uma relação topológica com a tesselação inicial** (componente do *LunchBox – Triangles Panels B*).

A abordagem dos recortes proporciona metodologia customizável, capaz de produzir uma família de biomódulos (Figura 161). As distinções entre as diferentes tipologias ficam evidentes sobretudo quanto os biomódulos estão completamente abertos. Contudo, como se trata de módulos para promoção da proteção solar, quão maior forem os níveis de recortes, menor será a eficiência dos módulos.

Figura 161. Solucionar > Algoritmo: Família paramétrica de Biomódulos.



Nota. Exemplificação da influência do controle paramétrico para os recortes. Fonte: Autora (2023).

Os cortes centrais são indicados por reduzir a tensão residual resultante do processo de estampagem (como visto no item 5.6.2.2.2) e assim prevenir a ocorrência de estricção ou fratura do material (J. Rodrigues & Martins, 2010). Ainda existe o risco de proporcionar alturas reduzidas dos módulos, de modo a não restringir o movimento do bimetal com vincos apenas para o lado da camada ativa (maiores detalhes no item 0).

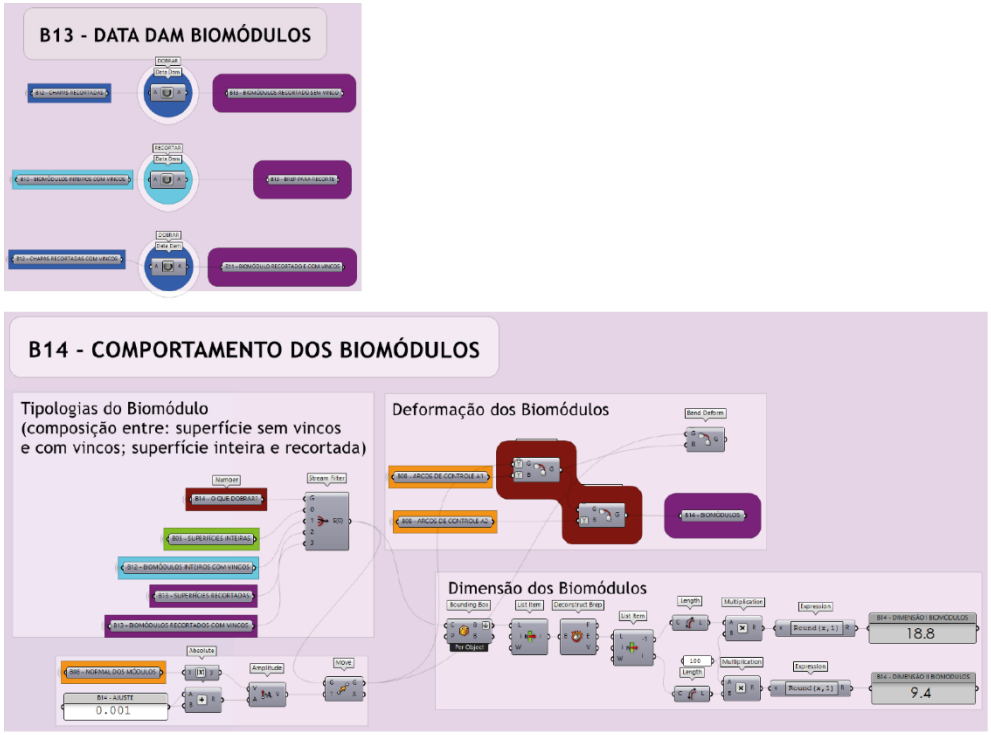
Em uma frase: enquanto o **detalhamento dos vincos amplia a fidelidade conceitual do algoritmo, os recortes proporcionam versatilidade e personalização dos módulos.** Para fins do desenvolvimento do algoritmo, optou-se por aplicar a mesma opção de módulos à fachada.

Mediante a associação da análise de incidência solar é possível influenciar a amplitude do comportamento de cada biomódulo (maiores detalhes no item 7.3, referente ao *Cluster* D).

6.4.2.3 Solução

Os algoritmos que sumarizam as soluções dos biomódulos contemplam os *subclusters* B13 e B14 (Figura 162). O primeiro B13 – *Data Dam*, conforme a designação menciona, reúne componentes '*Data Dam*' que impedem temporariamente o fluxo de dados. Somente quando o *Data Dam* for acionado, as novas definições sobre os detalhamentos biomódulos serão processadas. Assim, é possível adiar processamentos computacionais referentes aos detalhamentos. Pois a definição de recortes opera a partir processos boolianos que demandam maiores níveis de processamento. Vale salientar que a utilização de pequenas dimensões para os módulos proporciona operações milimétricos para os detalhamentos. Os vincos resultam da união de múltiplas superfícies e os recortes da operação booliana. Ambas as situações ampliam a necessidade de processamento computacional.

Figura 162. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* B – *Subclusters* B13 e B14.



Fonte: Autora (2023).

O *subcluster B14* se conecta propriamente ao filtro sobre '**I01 – O que dobrar?**', que dispõem das múltiplas opções de escolha de superfícies estáticas, as quais foram supracitadas anteriormente e correspondem ao:

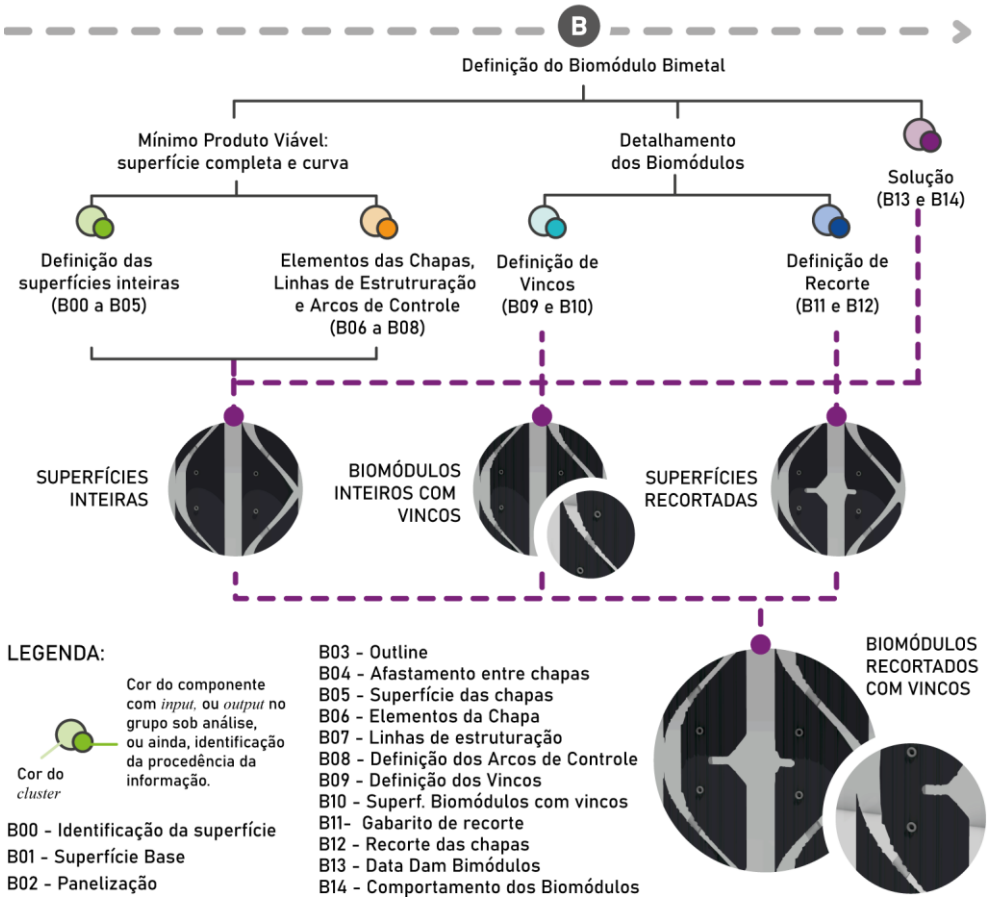
- B05 – Superfícies Inteiras;
- B12 – Biomódulos inteiros com vincos;
- B13 – Superfícies Recortadas;

- B13 – Biomódulos recortados e com vincos.

Para deformar as superfícies estáticas, utilizou-se o componente *Bend Deform*. Tal componente requer como *input* geometrias a serem deformadas e a definição do arco para haver a deformação. A definição sobre 'O que dobrar?' alimenta a informação sobre a geometria, enquanto os respectivos arcos de controle são utilizados no outro *input* para conferir a amplitude de movimento de cada biomódulo. Desse modo, são geradas quatro opções distintas de superfícies que revelam o comportamento dos biomódulos segundo as simulações climáticas.

Por fim, ratifica-se que as superfícies inteiras compreendem o mínimo produto viável do algoritmo com menor nível de complexidade geométrica e mais ágil processamento das simulações. As demais opções permitem gerar ampla gama de soluções de biomódulos e elevam o seu nível de detalhamento. A Figura 163 apresenta síntese dos principais *outputs* de biomódulos referentes ao *Cluster* B.

Figura 163. Solucionar > Algoritmo: Principais *outputs* do *Cluster* B.



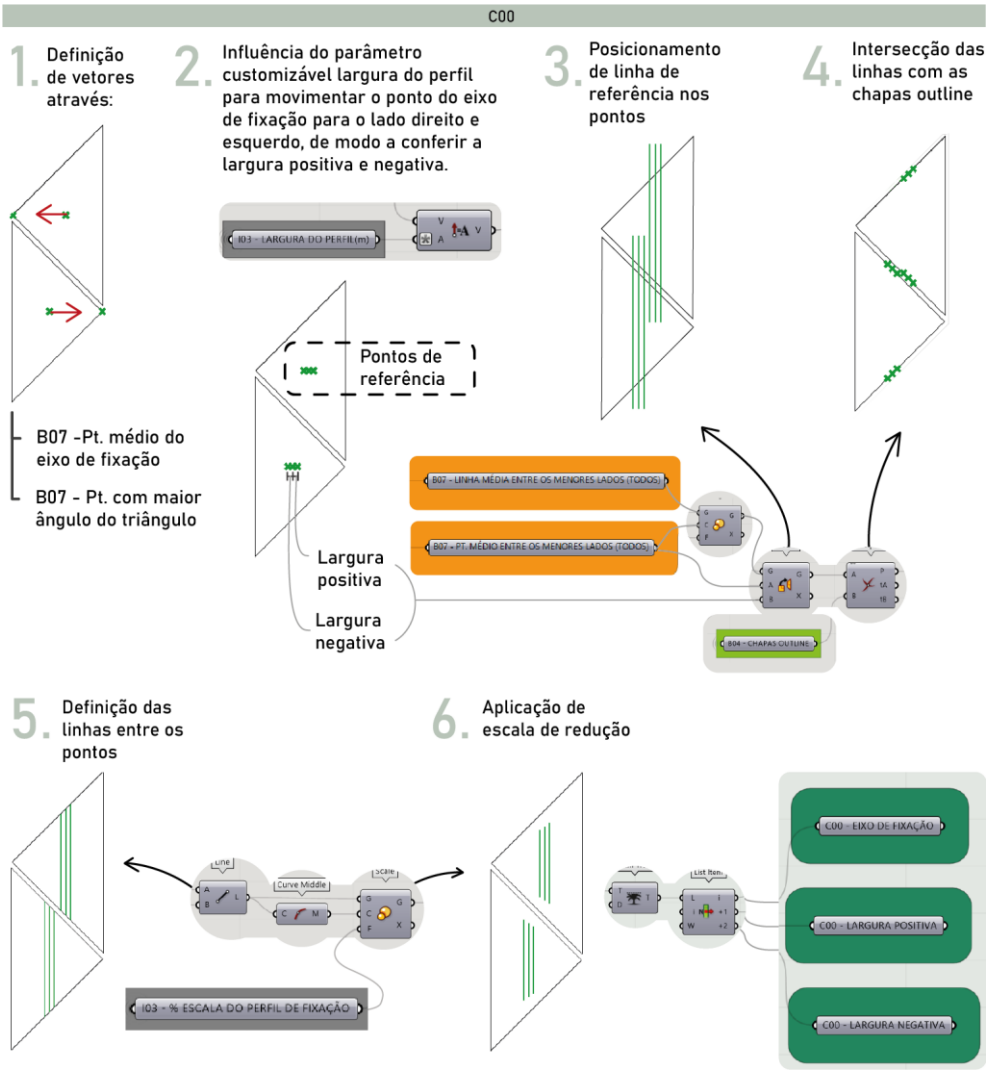
Fonte: Autora (2023).

6.4.3 *Cluster* C: Definição para os Perfis de Fixação

A lógica algorítmica para a definição de perfis de fixação para múltiplas superfícies difere-se da superfície única e orgânica, devido à opção da primeira que permite a inversão de orientação dos painéis (entre vertical, horizontal e mista). Tal opção irá influenciar a inversão de sentido das linhas de fixação, de modo que houve a necessidade de códigos para ambas as versões. Por esse motivo, optou-se por desenvolver em profundidade o algoritmo para as múltiplas superfícies.

O *Cluster* C confere o algoritmo para os perfis de fixação das múltiplas superfícies, com quatro *subclusters*, entre C00 e C03. Tenciona-se desenvolver algoritmo que permita fixar os biomódulos entre vidros.

Figura 164. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – Lógica para o *Subcluster* C00.

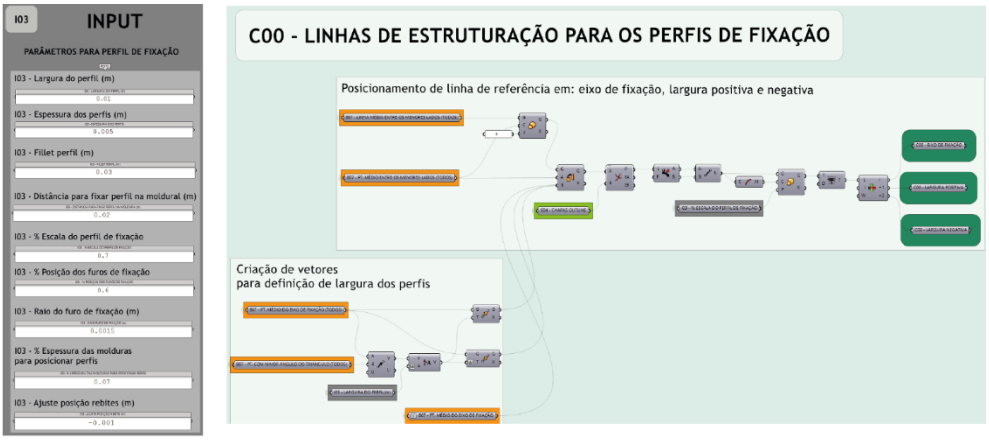


Fonte: Autora (2023).

No *subcluster* C00 são definidas as **linhas de estruturação dos perfis** (Figura 164). Inicia-se com a identificação de vetores em função do ponto médio do eixo de fixação e o ponto com o maior ângulo do triângulo. Através do parâmetro editável que controla a **'I03 – Largura do Perfil'**, a posição do ponto médio do eixo de fixação é alterada simetricamente, de modo a conferir a largura positiva e a negativa dos perfis. Posteriormente, são posicionadas linhas nos pontos supracitados (largura negativa, ponto médio do eixo e largura negativa). A intersecção entre as linhas e a chapa *outline* triangular formará pontos. Entre esses serão definidas linhas que poderão sofrer a influência de **'I03 – %Escala de perfil de fixação'** possibilita reduzir a extensão longitudinal das linhas.

Como *output* desse *subcluster* têm-se as linhas referentes ao eixo de fixação, a largura positiva e a negativa. No mais, vale salientar que as linhas pertencentes ao módulo com maior ângulo à direita não são colineares com as do módulo com maior ângulo à esquerda, devido à influência do parâmetro 'I01 – Afastamento entre chapas'. A Figura 165 explicita o código referente ao *subcluster* C00. O quadro de *Input* 03 influencia todo o *Cluster* C.

Figura 165. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – *Subcluster* C00.



Fonte: Autora (2023).

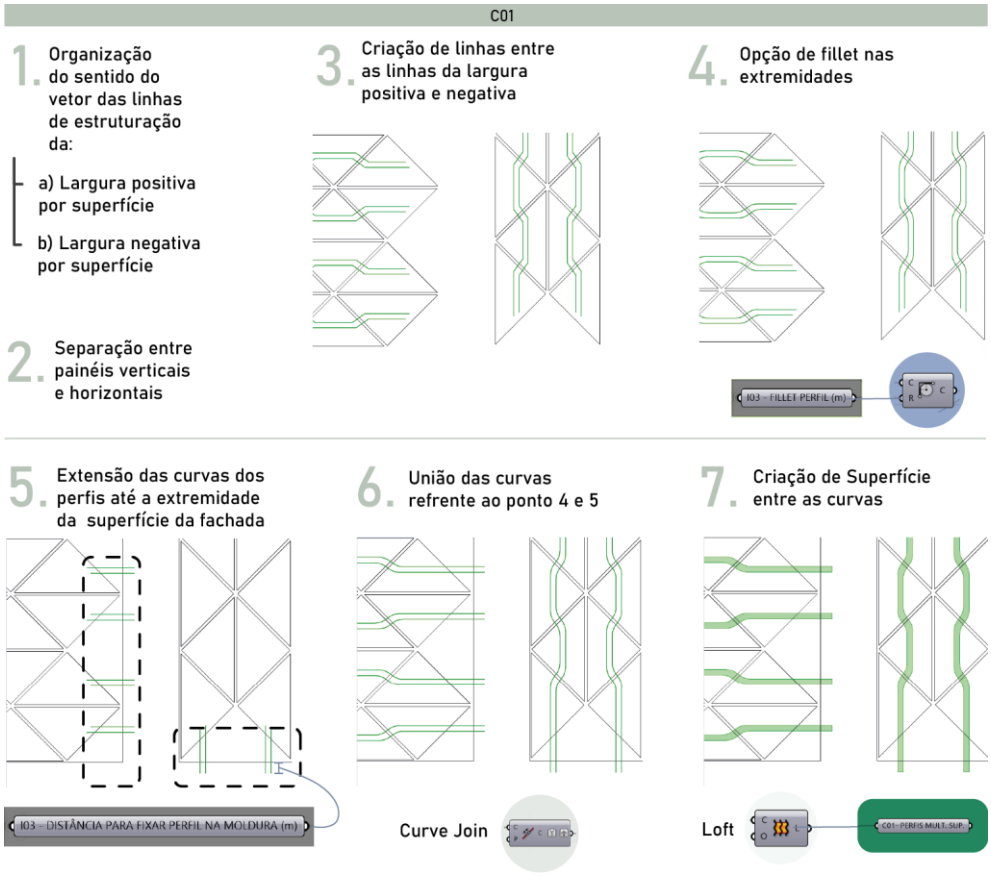
O *subcluster* C01 objetiva formar as superfícies dos perfis através da ligação entre a extremidade da linha de estruturação de um biomódulo com a consecutiva do outro biomódulo, que esteja sediado na mesma direção de orientação do painel sob análise (Figura 165).

Inicialmente foi preciso organizar a orientação das linhas de estruturação. Houve a necessidade de operar com a *Data Tree* do *Grasshopper*®, que consiste em estruturar hierarquicamente o armazenamento de dados em listas que se inter-relacionam (Mobe Lab, 2015) e operam na ordenação no conjunto de dados em sublistas. Foram utilizados componentes para subdividir listas (*Partition List* e

Dispatch), reduzir a complexidade da *data tree* (*Trim Tree*) e inversão de sentido das geometrias (*Flip Curve*), entre outros.

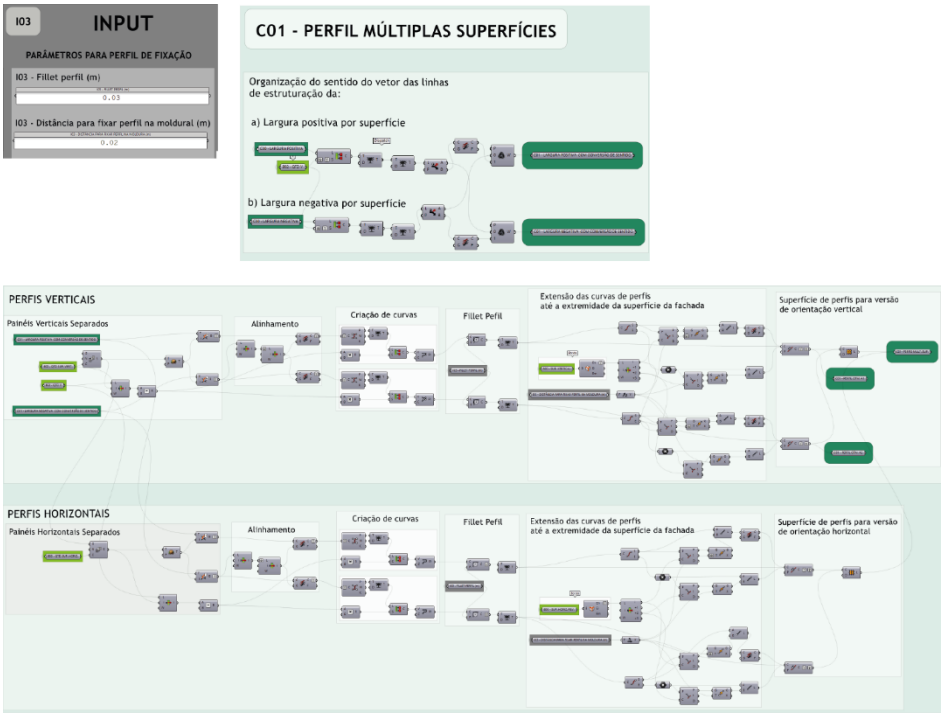
Posteriormente separou-se o código para os perfis referentes aos painéis verticais e horizontais. E seguiram-se os passos descriminados na Figura 166 e Figura 167, até possibilitar o *output* das superfícies dos perfis.

Figura 166. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – Lógica para o *Subcluster* C01.



Fonte: Autora (2023).

Figura 167. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – *Subcluster* C01.



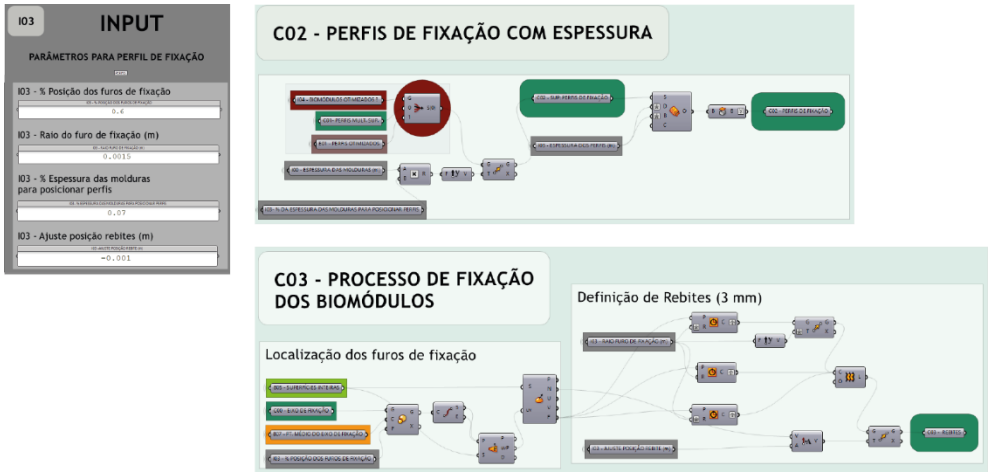
Fonte: Autora (2023).

O parâmetro '**I03 – Distância para fixar perfil na moldura**', permite extrapolar os limites das múltiplas superfícies a fim de permitir encaixe dos perfis com solda embutida nas molduras. Na ocasião foi utilizado 2 cm.

A Figura 168 irá revelar o código referente ao C02 e C03. O *Subcluster* C02 determina a **espessura dos perfis**. Há um filtro para escolha entre perfil relacionados ao processo de otimização ou não. No momento, será utilizada a primeira opção 'C01 – Perfis múltiplas superfícies', que não utiliza o processo de otimização, e aplica os perfis ao longo de todos os painéis da fachada do ambiente de teste. O parâmetro '**I03 – %Espessura das molduras para posicionar perfis**' irá influenciar na localização dos perfis entre os vidros.

O *Subcluster* C03 expõe o processo de definição de rebites para fixar os biomódulos nos perfis. Através do parâmetro '**I03 – %Posição dos furos de fixação**' é possível controlar a localização dos dois furos para a fixação dos rebites ao longo da linha de estruturação (aproximando-os ou afastando-os).

Figura 168. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* C – *Subcluster* C02 e C03.

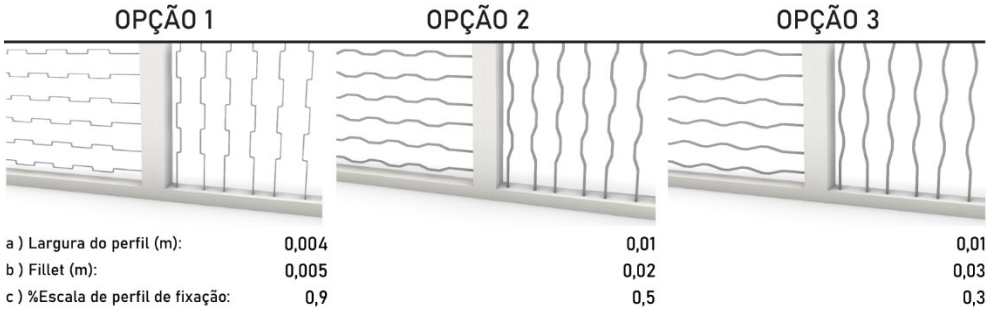


Fonte: Autora (2023).

O raio dos furos é alterado pelo '**I03 – Raio de furo de fixação (m)**', e a dimensão dos rebites é proporcional ao raio. Há ainda o '**I03 – Ajuste da posição de rebites (m)**' que permite a aproximação ou afastamento dos mesmos das superfícies dos biomódulos. O controle dos parâmetros supracitados explora diferentes resultados paramétricos de perfis (Figura 169).

Os perfis para fixação foram desenvolvidos para serem produzidos por corte de chapas de alumínio. Na ocasião foram utilizados perfis com 0,5 cm de espessura.

Figura 169. Solucionar > Algoritmo: Configurações paramétricas para os perfis.



Fonte: Autora (2023).

6.5 Síntese do Capítulo

O presente capítulo abordou a concepção algorítmica para os Biomódulos Bimetais. Um mínimo produto viável para confecção desses elementos foi desenvolvido por meio da concepção de tesselação triangular sob influência climática. As superfícies obtidas podem ser alteradas parametricamente pelo controle de parâmetros sobre: dimensão das esquadrias e dos biomódulos; orientação da disposição dos biomódulos (vertical ou horizontal); sentido de dobramento dos elementos (permitir a aplicação para além das superfícies planas, como, por exemplo, superfícies orgânicas com quatro pontos de base); e disposição dos módulos aleatoriamente na fachada.

A versatilidade de formação dos biomódulos pode ser efetuada mediante iterações algorítmicas que proporcionam o detalhamento, seja a partir da formação de vincos ou de recortes nas superfícies triangulares. Os vincos ampliam a fidelidade conceitual do algoritmo. E os recortes proporcionam versatilidade e personalização para os biomódulos, que mantém relação topológica com a tesselação inicial.

Salienta-se, no entanto, a relevância de avaliação crítica e por simulação dos efeitos dos recortes para o desempenho de proteção solar dos biomódulos nas fachadas. Assim, as simulações do próximo capítulo utilizarão como referência à versão dos biomódulos sem recortes a fim de maximizar os níveis de proteção e proporcionar a comparação entre as análises.

Ademais, o próximo capítulo analisará a influência da temperatura de Lisboa no comportamento dos biomódulos; detalhará o algoritmo de simulação e avaliará o comportamento dos biomódulos por simulação de incidência solar.

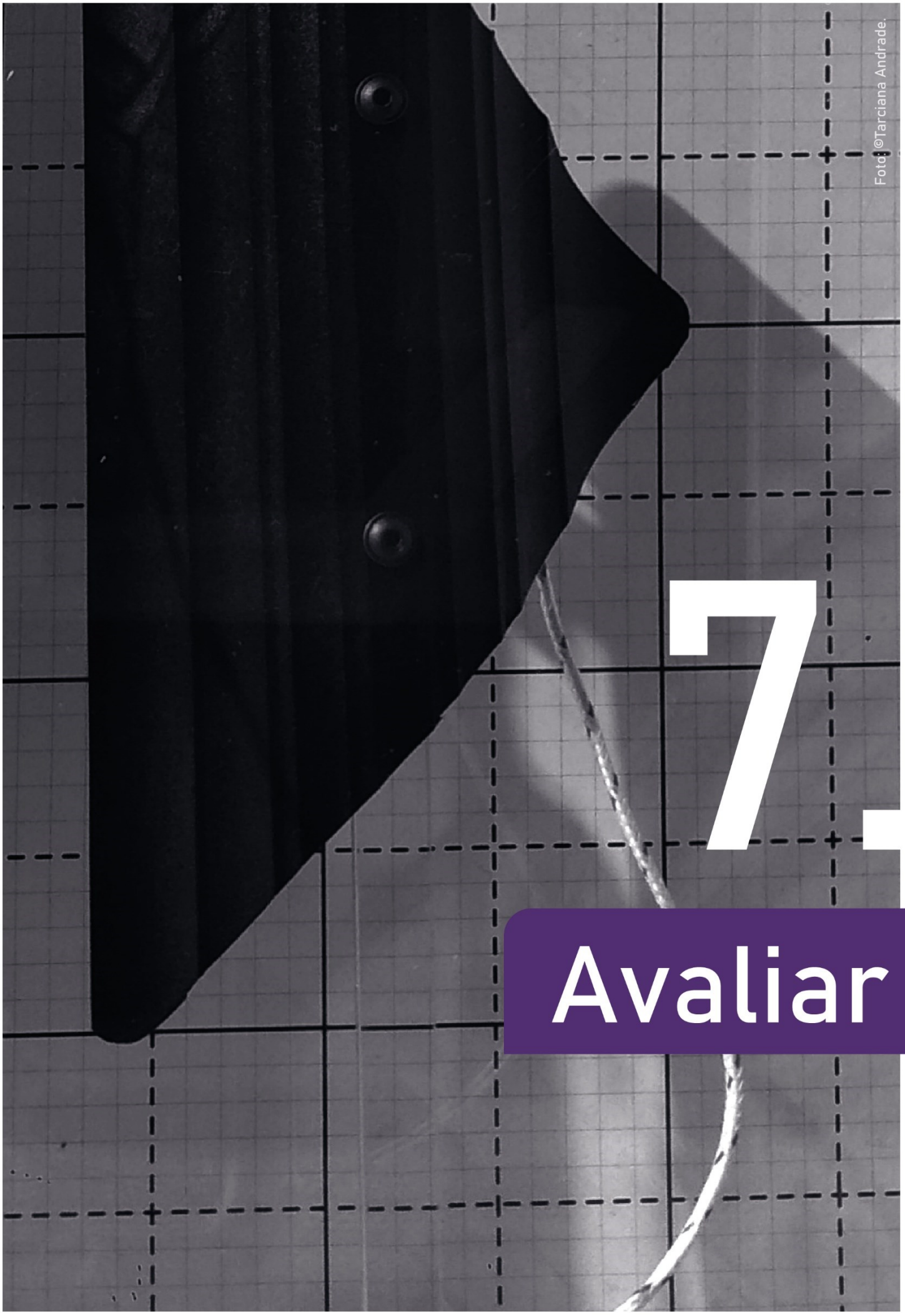


Foto: ©Tarciana Andrade.

7.

Avaliar

7.1. Nota Introdutória

Os experimentos anteriores exploraram a alteração do comportamento do biomódulo bimetal quando sujeito à variação de temperatura, mediante testes térmicos. O presente capítulo buscará analisar a **influência da temperatura ambiental no comportamento das amostras de biomódulos**, quando exposto a diferentes condições climáticas (atividade decorrente do objetivo específico 2). A coleta de dados será desenvolvida em ambiente aberto da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa. O tratamento dos dados será efetuado por análise estatística.

A versão algorítmica para simulação será desenvolvida de modo a integrar o comportamento dos biomódulos bimetais ao algoritmo de simulação (atividade referente ao objetivo 3). Posteriormente, serão demonstradas análises por incidência solar sem e com a aplicação dos biomódulos (que compreende o objetivo 4). Tenciona-se desse modo avaliar a proteção solar dos biomódulos bimetais na fachada. Desse modo, serão apresentados os resultados da pesquisa.

7.2. Análise sobre a Influência da Temperatura Externa no Comportamento dos Biomódulos

Como o título do experimento especifica, a '**Análise sobre a Influência da Temperatura Externa no Comportamento dos Biomódulos**' **[AITECB]** objetiva analisar o comportamento das amostras de biomódulos bimetais em diferentes temperaturas ambientais.

Como o metal possui elevada condutividade calorífica, estima-se que o bimetal possa sofrer influência da temperatura externa e da radiação solar incidente, de modo a transformar fração da radiação em energia térmica. Ambas as variáveis poderão influenciar o movimento das amostras, assim como as demais variáveis de influência climática (como, umidade, velocidade do vento, etc.). Contudo, o estudo em questão focará na **análise por variação de temperatura**, devido aos limites de acesso a equipamentos e infraestrutura técnica. A princípio, será esclarecido o processo de coleta de dados e posteriormente a análise dos dados.

O presente estudo considerará **temperatura externa** como sendo as temperaturas aferidas pelo termômetro posicionado no ambiente externo do experimento. Esse equipamento estava sujeito às intempéries ambientais e à incidência solar direta.

7.2.1 Infraestrutura para a Coleta dos Dados

Para definir o processo de coleta de dados do AITECB foram realizados cinco testes pilotos, entre a primavera e o verão. Durante o decorrer desses experimentos, melhorias foram implementadas, que nortearam a definição metodológica do AITECB, tanto para o processo de coleta quanto para o de análise dos dados. A seguir, será detalhada a infraestrutura para coleta dos dados que vigorou para as três coletas formalizadas.

- **Especificação das amostras:** cinco amostras foram confeccionadas. Nenhum dos biomódulos apresentou corte central, com a intenção de manter parâmetros semelhantes de comparação entre as amostras.

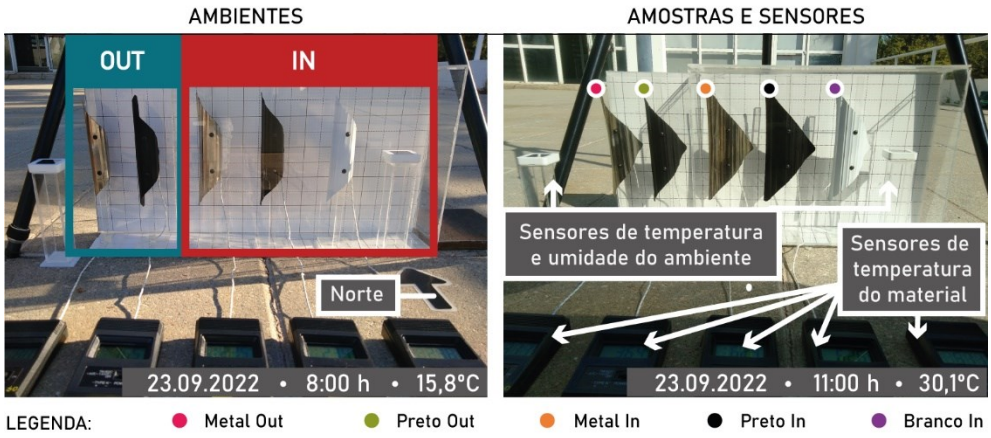
  Com relação ao acabamento superficial: tendo em vista que as cores claras refletem o impacto do Sol, enquanto as escuras absorvem (Olgyay, 2002), testes foram desenvolvidos com três tipos de acabamento no bimetal: Metal (ausência de pintura), Preto e Branco. Duas amostras foram mantidas sem acabamento de pintura no bimetal. As outras três receberam três demãos de pintura em

spray para metal, indicado para altas temperaturas e anticorrosão[61]. Das amostras que receberam pintura, duas foram em *spray* preto e uma em branco, com acabamento mate. Após período de secagem, as amostras foram fixas com a maior dimensão na vertical, em suporte em acrílico transparente, com auxílio de dois parafusos, para cada amostra.

Optou-se por não dispor de amostra branca no ambiente externo devido às limitações de espaço do experimento e de infraestrutura para registro do comportamento. Como o ambiente fechado era potencialmente mais propício ao movimento, a amostra branca foi alocada nesse espaço.

- **Definição do ambiente para acondicionar as amostras de biomódulos:** desenvolveu-se ambiente para a exposição dos módulos com espaço fechado (**Ambiente In**) e espaço aberto para expor os módulos às intempéries ambientais (**Ambiente Out**) (Figura 170). A intenção de propiciar ambientes para avaliar o comportamento das amostras em ambientes enclausurado e a sua autoativação ao ar livre.

Figura 170. Avaliar > Definição do ambiente aberto e fechado para a análise.



Nota. Localização de termômetros e sensores. A legenda evidencia sistematização de cores para cada amostra, utilizadas durante o processo de coleta de dados. Fonte: Autora (2023).

Para o **Ambiente In** elaborou-se uma caixa em acrílico transparente nas dimensões 40 x 27,5 x 8 cm, e com 4 mm de espessura. Uma tampa superior foi posicionada para facilitar o manuseio de três amostras no interior da caixa. No interior do invólucro fechado foram posicionadas três amostras (metal, preta e

[61] *Spray* na marca *Luxens*, indicado para pintura/esmalte de superfícies que lidam com altas temperaturas (como churrasqueiras e lareiras). Pode ser aplicado sobre ferrugens.

branca). Na parte frontal da caixa existiam três diminutos furos para a passagem dos fios dos termômetros por sonda.

No **Ambiente Out** estavam duas amostras posicionadas ao lado esquerdo do Ambiente In, com uma barreira vertical por detrás das amostras. Dois biomódulos foram expostos nesse ambiente, sendo um sem acabamento e o outro com pintura preta. Ambos os ambientes também contaram com papel milimetrado para referência dimensional, posicionado por trás das amostras.

- **Equipamentos para aferir a temperatura dos ambientes e umidade do local:** dois equipamentos foram posicionados, sendo o primeiro no Ambiente Out (para aferir a temperatura e umidade do ambiente externo) e o segundo no Ambiente In (com o equipamento enclausurado juntamente com as amostras) (Figura 170). Esses equipamentos estavam expostos à incidência solar, sem haver proteção do Sol.

- **Infraestrutura para aferir a temperatura das amostras:** à medida que se realizava a aferição da temperatura das amostras com o termômetro de infravermelho, nos testes térmicos, percebeu-se dificuldade em manter a precisão no processo de coleta da **temperatura do material** (Figura 170). Pois, idealmente era necessário efetuar a coleta de temperatura sempre no mesmo ponto de referência da amostra. Por esse motivo, foram adquiridos cinco **termômetros por sonda**, capazes de coletar a temperatura do material dos biomódulos em uma única posição. As sondas foram fixas na zona central de cada um dos biomódulos, com fita isolante e fita-cola. Procurou-se promover sombra nesses termômetros, para evitar superaquecimento sob a influência direta do Sol.

- **Definição da locação do experimento:** a fim de minimizar os efeitos das obstruções construtivas, distanciou-se a infraestrutura do estudo dos muros e das fachadas. Existiam apenas algumas árvores, que influenciavam no sombreamento, a depender da época e do horário do ano.

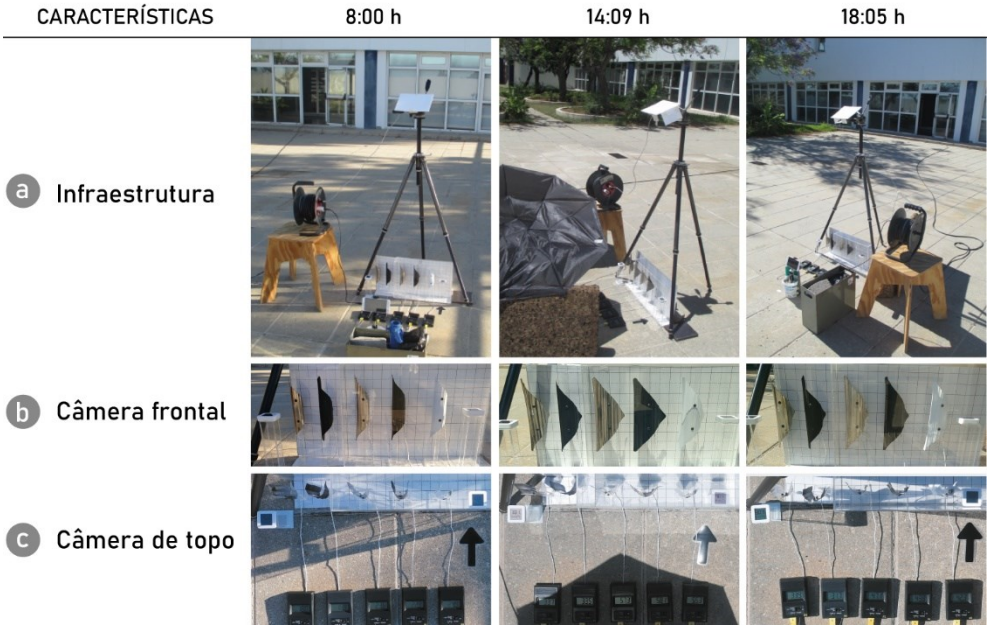
  Buscou-se proporcionar uma locação com baixa circulação de indivíduos, para promover maior controle sobre o ensaio. O local para a exposição das amostras aos condicionantes ambientais foi o jardim do quinto prédio da FAUL (38° 42' 46" N e 9° 11' 35" W) (Figura 171).

Figura 171. Avaliar > Definição da locação para o experimento.

Nota. Locação no jardim do quinto prédio da FAUL (38˚ 42' 46" N e 9˚ 11' 35" W). Fonte: Autora (2023).

- **Processo de registros do comportamento por imagem:** duas câmeras de telemóvel foram fixas em tripé (Figura 172)e vinculadas à aplicação *Open Camera,* para a captura de imagens a cada trinta segundos. Procurou-se manter a posição das câmeras e tripés entre os dias de coleta, por meio de registro prévio de locação e monitoramento. Promoveu-se sombra nos celulares na tentativa de evitar superaquecimento dos dispositivos.

Figura 172. Avaliar > Registro realizado na coleta de verão.



Nota. Exemplo do processo de registro realizado no experimento de verão, em três diferentes horários. Fonte: Autora (2023).

Fotos foram registradas em vista frontal e de topo. As frontais foram utilizadas para criar *timelapse*, para explicitar o comportamento dos biomódulos. As imagens de topo foram analisadas sobre a alteração do diâmetro de abertura e fechamento das amostras, conforme a temperatura do material.

Ao final de cada horário de coleta, os celulares eram retirados para não os deixar excessivamente expostos ao Sol. Salvaguardavam-se as imagens capturadas. Marcações nos equipamentos de registro e na infraestrutura do experimento foram efetuadas a fim de reproduzir a mesma posição para as coletas de dados posteriores.

7.2.2 Coleta de Dados

O AITECB objetiva analisar o comportamento de amostras em diferentes condições climáticas. Como mencionado anteriormente, cinco testes pilotos foram desenvolvidos entre a primavera e o verão, e os processos foram aprimorados. Um dos testes aconteceu no solstício de verão (21.06.2022). Contudo, não foi selecionado para a análise dos dados devido às condições climáticas do dia não propiciarem temperaturas para a abertura dos biomódulos (tendo em vista a experiência com os testes térmicos). Esse dia apresentou temperatura mínima de 13°C e máxima de 20°C, e precipitação de chuva.

Para as **coletas de dados formalizadas do AITECB** definiu-se que as condições meteorológicas para os dias sob análise deveriam conter temperatura mínima de máxima de 23°C, e ocorrem em data próxima aos dias de virada de estação por critérios astronômicos. Houve dificuldade em obter condições climáticas com céu limpo e altas temperaturas em dias próximos às datas supracitadas. Apesar disso, considerou-se que a análise dos biomódulos em ambientes com ocorrência de radiação difusa (nebulosidade) não perderia a relevância. Pelo contrário, poderia desvendar a adaptabilidade do módulo frente a inconstância dos condicionantes climáticos, em que uma hora abre o Sol, e minutos depois há o céu parcialmente nublado.

À vista disso, duas coletas foram realizadas. Uma próxima ao solstício de verão e outra ao equinócio de outono. Somados a essas duas coletas, recolheram-se os dados do comportamento dos biomódulos durante ocorrência onda de calor (que aconteceu no dia 13 de julho de 2022). Por conseguinte, a **AITECB contemplou os dados referentes a três dias de coleta**, a saber:

- **COLETA A – VERÃO** (28.06.2022) – data próxima ao solstício de verão. Temperatura mínima de 13°C e máxima de 24°C, com céu limpo durante todo o dia;

- **COLETA B – ONDA DE CALOR** (13.07.2022) – temperatura mínima de 23°C e máxima de 42°C. Apesar dos elevados índices de temperatura, o céu esteve parcialmente nublado e com baixa incidência de radiação solar direta;

- **COLETA C – EQUINÓCIO DE OUTONO** (23.09.2022) – temperatura mínima de 15°C e máxima de 26°C. Momentos do dia que variaram entre céu nublado e limpo.

Tendo em vista que os fatores climáticos se distinguem para cada dia e época do ano, e ainda as restrições de acesso à universidade, definiu-se três **horários de referência para coleta dos dados**:

- O primeiro deveria acontecer sempre entre às 8:00 e 9:30 h da manhã;
- O horário inicial para o segundo deveria ser trinta minutos antes do meio-dia solar. A duração da coleta seria também de uma hora e trinta minutos;
- O terceiro aconteceria três horas antes do pôr do sol, com coleta durante duas horas, a fim de coletar dados do entardecer.

Durante os três dias de coleta, cinco amostras foram observadas e os **dados ambientais** foram registrados por sensores e termômetros (**umidade relativa do ar; temperatura do ambiente interno; temperatura do ambiente externo**). Também foram registrados os **horários das medições** e as **temperaturas de cada amostra** (através de termômetros por sonda); e por fim, a **identificação dos diâmetros dos biomódulos por análise das imagens de topo.** Esses dados foram sistematicamente registrados em planilha *Excel*®.

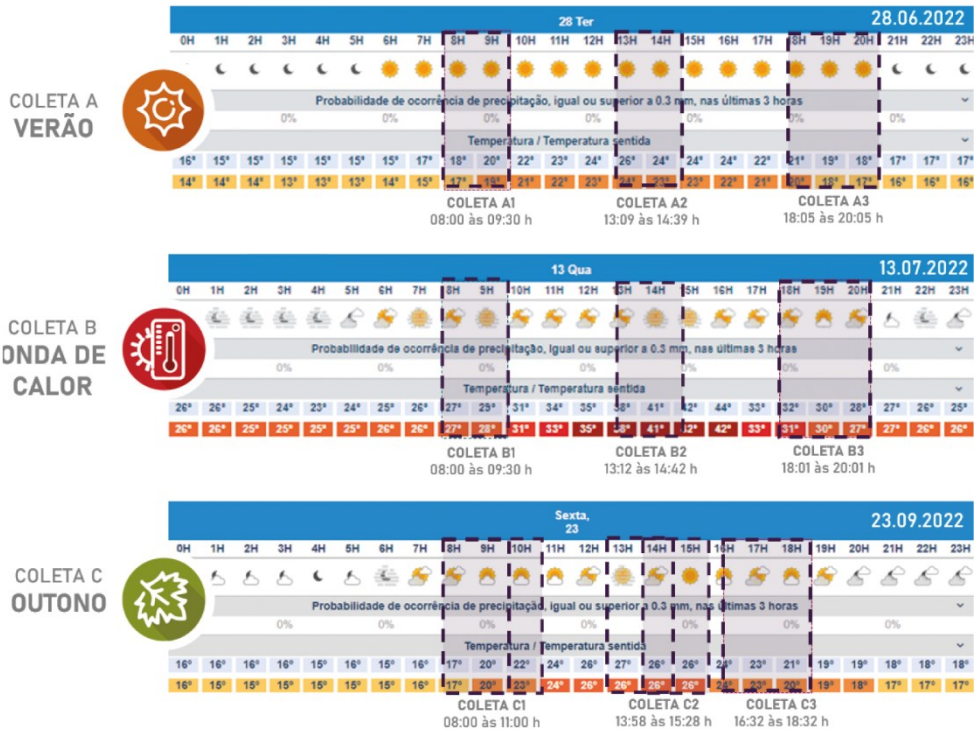
Situações decorrentes das diferentes condições climáticas suscitaram necessidade de adaptação e monitoramento durante o processo de coleta de dados. Houve elevação da velocidade do vento ao final do dia de verão; orvalho no início da manhã do outono com embaçamento contínuo da superfície acrílica do ambiente fechado; ínfimas precipitações durante a onda de calor; superaquecimento dos celulares de registro durante a onda de calor; ou ainda, necessidade de variar a sombra nos termômetros de temperatura do material, conforme a variação do percurso solar; houve também o sombreamento de árvores nas primeiras horas do dia.

Assim, para minimizar os efeitos das situações climáticas, procurou-se manter a infraestrutura metodológica de coleta básica (suscitada no item 7.2.1) e adaptar, quando necessário, algum processo durante a coleta (horário e período de duração).

No equinócio de outono, por exemplo, durante a primeira coleta do dia a sombra da árvore cobriu a área de locação do experimento, de modo a retardar a influência da radiação solar direta nos biomódulos. Por consequência, houve o retardamento comportamental dos biomódulos para o horário de referência. Para sanar tal situação, estendeu-se o período da coleta até as 11:00 h a fim de proporcionar a coleta de período de incidência solar direta sobre os módulos. Isso, oportunizou melhor detalhamento sobre o comportamento do material.

Outro ponto que vale ser relatado foi o efeito da elevada temperatura no outono sobre as fitas adesivas para fixação das sondas do termômetro do material. Nesse último dia de coleta, aconteceram sucessivos descolamentos que proporcionaram o adiamento do experimento em uma hora, não sendo possível efetuar a coleta trinta minutos antes do meio-dia solar. Isso possibilitou o registro do comportamento dos biomódulos no horário mais quente do dia, com céu limpo, que aconteceu próximo às 15:00 h. Para evitar tais transtornos, sugere-se em próximos estudos efetuar um pequeno orifício no material a fim de fixar a sonda diretamente no bimetal. A Figura 173 sintetiza os horários de coleta planejados e realizados para os três dias de coleta da AITECB. Os horários de referência para o meio-dia solar e pôr do Sol estão explicitados no **Anexo D**.

Figura 173. Avaliar > Horários de coleta de dados.



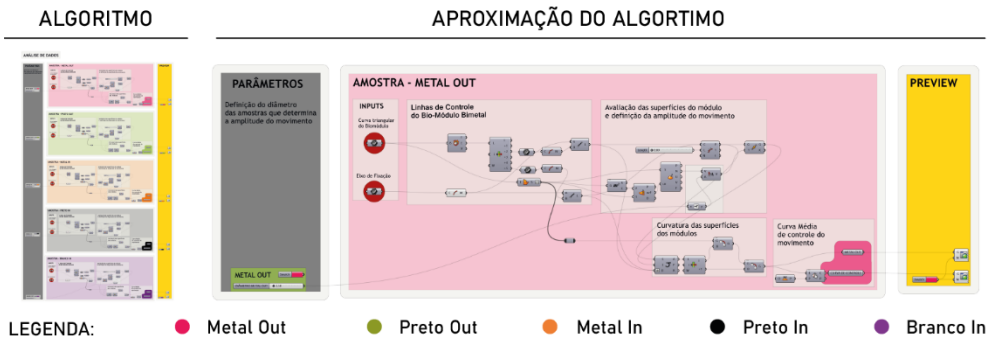
Nota. A linha pontilhada corresponde aos horários de coleta planejados. A área hachurada na cor lilás sólida são os horários efetivamente registrados. Fonte: Autora (2023).

Durante os experimentos pilotos, percebeu-se que processo de identificação dos diâmetros das amostras precisava ser sistemático e padronizado, para dirimir diferenças de posição e perspectiva entre os biomódulos sediados na mesma imagem. Tais distinções dificultavam o processo comparativo entre os módulos.

Para a **identificação do diâmetro dos biomódulos nas imagens de topo** foi desenvolvido um processo padrão do seguinte modo: uma foto foi selecionada a cada dez minutos do experimento realizado; posteriormente, as imagens foram cortadas nas mesmas dimensões; criou-se um arquivo do *Rhino 7.0*®, em que as imagens foram sistematicamente sobrepostas. Cada foto estava alocada em uma camada, a qual foi renomeada conforme o horário em que a imagem foi capturada. O conjunto de camada foi agrupado segundo o dia da realização do experimento.

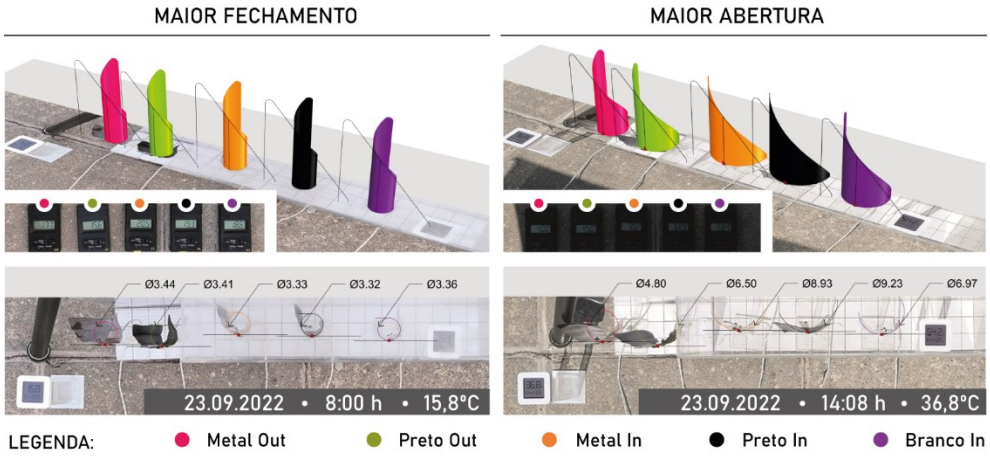
Uma versão simplificada de **algoritmo paramétrico** foi desenvolvida no *Rhino 7.0*® + *Grasshopper*® para **identificar o diâmetro das amostras** (Figura 174), sendo possível sobrepor o arco de controle e superfície triangular nas imagens a serem analisadas (Figura 175).

Figura 174. Avaliar > Algoritmo para identificar o diâmetro dos biomódulos.



Nota. A esquerda tem-se o algoritmo por amostras. Cada cor representa o código para uma amostra. A direita detalha-se o código referente à amostra metal out. Fonte: Autora (2023).

Figura 175. Avaliar > Processo de identificação do diâmetro dos biomódulos.



Nota. Análise das imagens de topo a partir da sobreposição do arco de controle em cada amostra das imagens analisadas. Fonte: Autora (2023).

Apesar da locação da infraestrutura para o experimento ser previamente estabelecida e monitorada para manter os parâmetros, constatou-se que houve pequenas distinções na posição das imagens entre os horários coleta. Por esse motivo, tinha-se sempre como referência à primeira imagem registrada para cada horário. Para identificar o diâmetro de uma das amostras na imagem de referência, era posicionada conjuntamente uma curva triangular do biomódulo e a linha correspondente ao eixo de fixação no ponto médio do eixo de fixação da amostra analisada.

Posteriormente, essas curvas eram vinculadas ao algoritmo como *inputs*. Em seguida, modificava-se o *number slider* que controlava o arco e a superfície paramétrica concebida, no intuito de identificar na imagem o diâmetro do biomódulos correspondente. O resultado numérico do *number slider* era registrado em planilha *Excel*® e consiste no diâmetro do biomódulo da imagem sob análise (*outputs* do algoritmo). Tal processo aconteceu para cada uma das cincos amostras das imagens analisadas.

A análise comparativa entre as imagens, por sua vez, foi possível porque as figuras estavam justapostas e separadas em camadas. Ao se acionar uma imagem precedente e logo após a sob análise, era possível conferir qualitativamente se houve abertura, fechamento ou ausência de movimento do biomódulo. Após a identificação do comportamento do biomódulo, controlava-se o *number slider* referente ao diâmetro do biomódulo e se registrava o resultado numérico na planilha de registro. Tal processo aconteceu sistematicamente para todas as amostras, em cada imagem analisada da AITECB.

Ao final do processo de registro dos diâmetros para cada horário da coleta, uma dimensão de referência foi coletada na primeira imagem de cada horário de coleta para ser um fator de conversão entre as fotos. Para dirimir possíveis diferenças de posição, o fator foi multiplicado por todos os diâmetros do horário de coleta em questão. Assim, uniformizaram-se os diâmetros para uma mesma escala de referência.

No que tange aos diâmetros identificados, dois parâmetros serão utilizados como referência para as análises posteriores, a saber:

- **Diâmetro dos Biomódulos Internos [DBI]**: referente aos diâmetros identificados das amostras localizadas no ambiente enclausurado: Metal In, Preto In e Branca In;

- **Diâmetro dos Biomódulos Externos [DBE]**: são os diâmetros das amostras situadas em ambiente aberto: Metal Out e Preto Out.

Os dados dos diâmetros com a influência do fator de conversão e os dados registrados nas imagens (como: temperatura e umidade do ambiente, horário da foto, temperatura do material de cada amostra) foram registrados em planilha *Excel*®. A partir desses dados, os gráficos para as análises dos dados foram gerados, os quais serão evidenciados posteriormente.

7.2.3 Análise dos dados coletados

A partir dos dados coletados e registrados em planilha foi possível gerar gráficos referentes aos três dias de coleta. Optou-se por sintetizar os dados em gráficos que facilitem a comparação entre os dias dos experimentos (Gráfico 8 ao Gráfico 11). Muito embora as coletas contemplem dias próximos às viradas de estação por critérios astronômicos (solstício de verão e equinócio de outono), as datas de coleta estão no período do ano com caraterísticas térmicas homogêneas (ver item 2.3.3.1) (Lopes et al., 2020).

Contudo, as temperaturas mínimas e máximas diárias permitiram a flexibilidade necessária para analisar a adaptabilidade dos biomódulos frente as diferentes temperaturas ambientais. Com relação às temperaturas ambientais externas aferidas ao Sol, o Gráfico 9 revela **amplitudes térmicas diárias em mais de vinte graus, nos três experimentos**. O experimento de onda de calor obteve o maior intervalo (27,2 a 49,3°C); seguido pelo outono (15,6 a 37,5°C) e verão (15,8 a 37,6°C).

Em termos de intervalo de temperatura, percebe-se que o do outono e do verão foram próximos.

Os gráficos evidenciam a ocorrência de superaquecimento durante a onda de calor e de orvalho no início da manhã do outono. Ambos os casos impediram a coleta dos dados. Durante o superaquecimento da onda de calor, houve o desligamento automático dos telemóveis para a proteção do sistema. Nesse dia, a temperatura ambiental ao Sol (temperatura externa) estava por volta de 48,8°C. Sendo assim, a máxima temperatura do material registrada foi de 70,5°C, apesar de serem observadas temperaturas do material em 75°C. O orvalho da manhã da coleta de outono, por sua vez, impediu apenas o registro dos dados referentes à umidade interna das duas primeiras medições do dia, por embaçar excessivamente o invólucro em acrílico. Ambos os casos estão evidenciados nos gráficos.

No que tange à interpretação dos dados, o Gráfico 8 aponta a umidade relativa do ar em relação ao horário de coleta. Em geral, percebe-se que o dia se inicia com mais umidade, tende a estar mais seco nas horas mais quentes do dia, e volta a intensificá-la ao fim do dia. O contrário acontece com relação à temperatura ambiental (Gráfico 9). No experimento da onda de calor identificou-se a ocorrência de baixos índices de umidade, enquanto no do outono existiram elevados níveis no início da manhã, com ocorrência de orvalho.

A temperatura do ar circundante e radiação solar direta influenciam no comportamento dos biomódulos. Isso é vislumbrado ao se confrontarem os comportamentos das amostras do ambiente interno com as do externo. As primeiras proporcionam maior amplitude de movimento, dadas as condições propícias do ambiente fechado. As diferenças de temperatura entre os ambientes chegaram ao máximo de 18,1°C no outono; seguida pelo verão (com 11,3°C) e pela onda de calor (com 8,5°C). A onda de calor apresentou a menor diferença de temperatura entre os ambientes, visto que as temperaturas externas estavam elevadas (às 8:00 h estava em 27,2°C). Durante a onda de calor houve reduzida incidência de radiação solar direta sobre os biomódulos devido às condições de céu nublado (Figura 173).

O Gráfico 10 evidencia a **temperatura do ambiente ao Sol juntamente com a temperatura das amostras analisadas em relação ao horário da coleta.** Percebe-se que as amostras externas têm uma temperatura que se aproxima da curva do ambiente externo.

Gráfico 8. Avaliar > Umidade relativa do ar em relação aos horários dos ensaios. Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

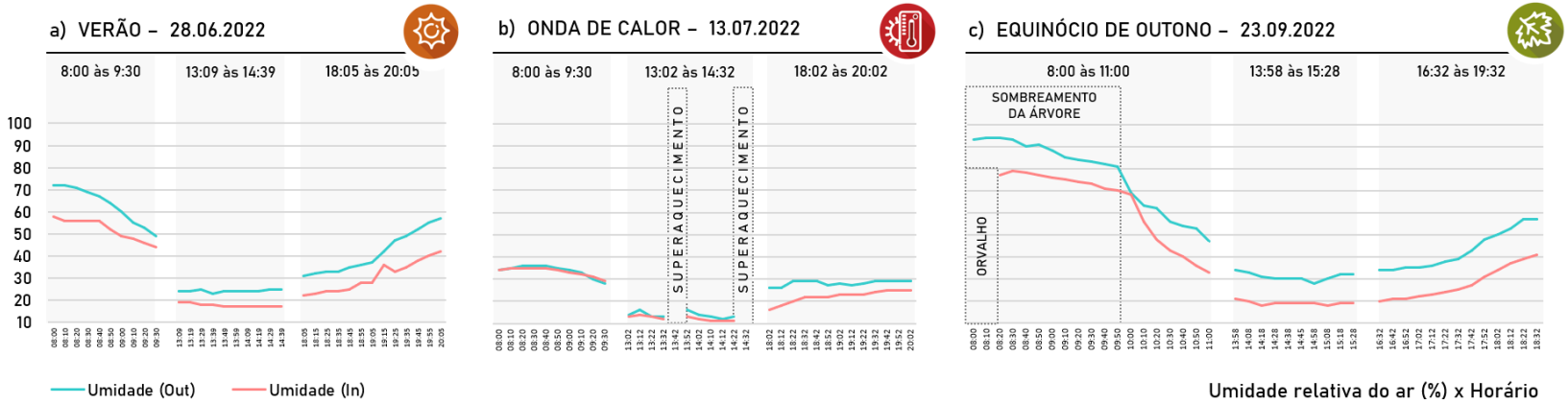


Gráfico 9. Avaliar > Temperatura do ambiente interno e externo ao Sol em relação aos horários dos ensaios. Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

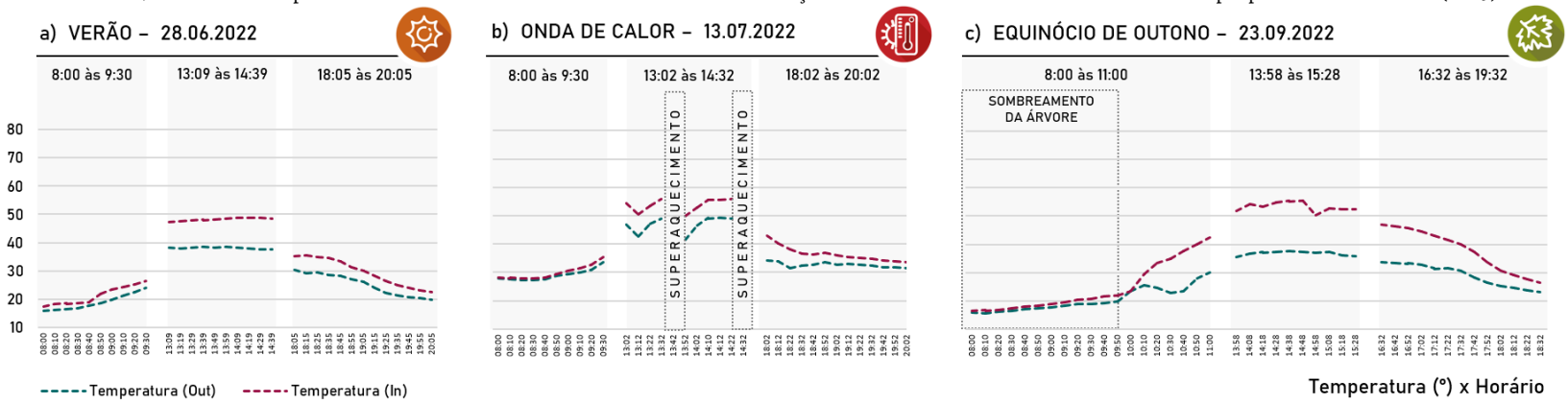


Gráfico 10. Avaliar > Temperatura do ambiente ao Sol e das amostras em relação aos horários dos ensaios. Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

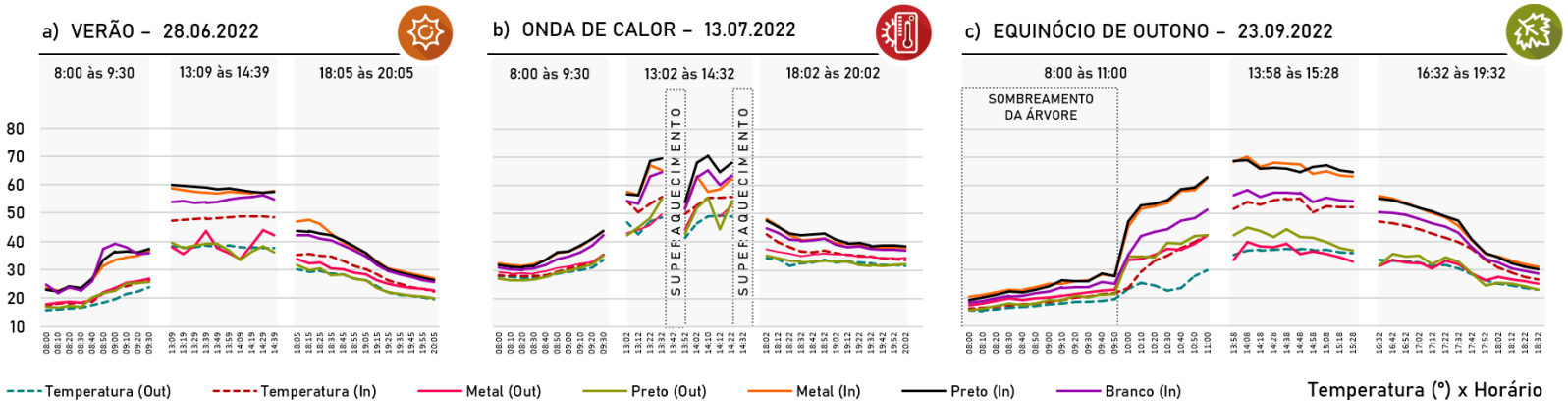
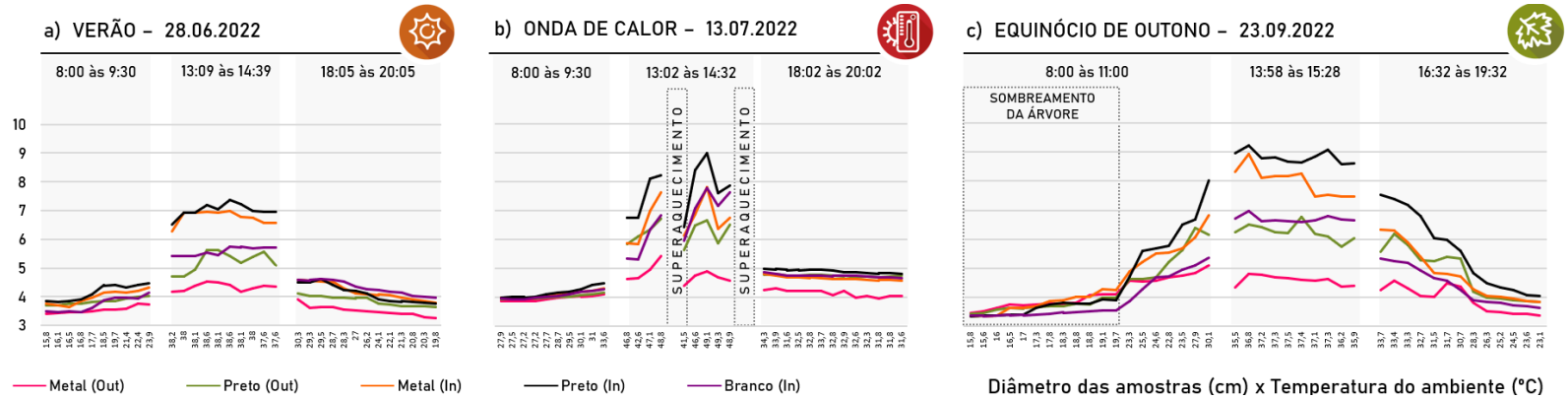


Gráfico 11. Avaliar > Diâmetro das amostras em relação a temperatura do ambiente ao Sol. Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).



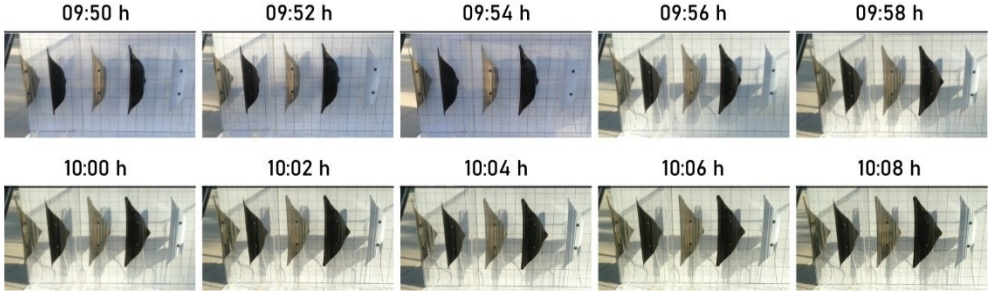
As amostras internas, por sua vez, tendem a apresentar curvas de temperatura superiores à temperatura do ambiente interno, pois **o desempenho comportamental dos biomódulos são potencializadas em ambiente fechado.**

O ambiente hermeticamente fechado proporciona maior estabilidade aos elementos climáticos do que o aberto. O Gráfico 9 evidencia que as diferenças de temperaturas entre os ambientes interno e externo podem superar 10°C. Tem-se ciência, no entanto, que tais diferenças são correlacionadas às propriedades dos materiais utilizados nas fachadas. Para tanto, recomenda-se futuramente viabilizar estudos de esquadria em escala 1:1 com o vidro translúcido para avaliar o comportamento dos biomódulos.

As curvas sinuosas nos Gráfico 10 e Gráfico 11 constatam a adaptabilidade dos módulos quando estão sujeitos a diferentes condicionantes climáticos. Isso aconteceu mediante diferentes níveis de: nebulosidade, radiação solar, sombreamento e/ou temperatura do ar. Durante a onda de calor, por exemplo, as curvas são muito mais sinuosas do que no verão. Pois, apesar das elevadas temperaturas no dia 13.07.2022, o comportamento dos módulos foi influenciado pela elevada incidência de radiação difusa, ou seja, ambiente com alta nebulosidade e falta de nitidez da atmosfera durante todo o dia. Já no verão, percebe-se que vigorou no dia o céu limpo. Isso proporcionou maior estabilidade para a temperatura das amostras e, por conseguinte, as amostras tiverem menores níveis de variação de comportamento abruptos.

No outono, por sua vez, há a demonstração do *self-shading* imediato dos biomódulos. Entre às 8:00 e 9:50, a área de locação esteve sombreada por árvore, o que retardou o comportamento dos módulos em bimetal. Em horário posterior (entre 9:50 e 10:08, Figura 176) observou-se a acentuação da temperatura do material (Gráfico 10) e da alteração do diâmetro do movimento dos biomódulos (Gráfico 11). Isso ocorreu em decorrência da incidência direta da radiação solar, que resultou na rápida elevação de temperatura do material.

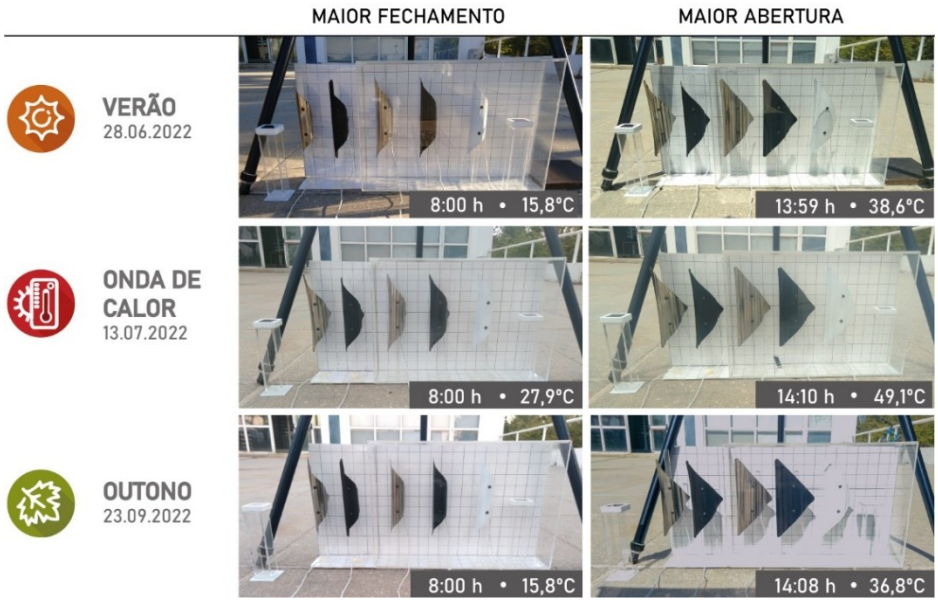
Figura 176. Avaliar > Biomódulos expostos a radiação solar direta.



Nota. Experimento do outono, entre as 9:50 e 10:08 h. Fonte: Autora (2023).

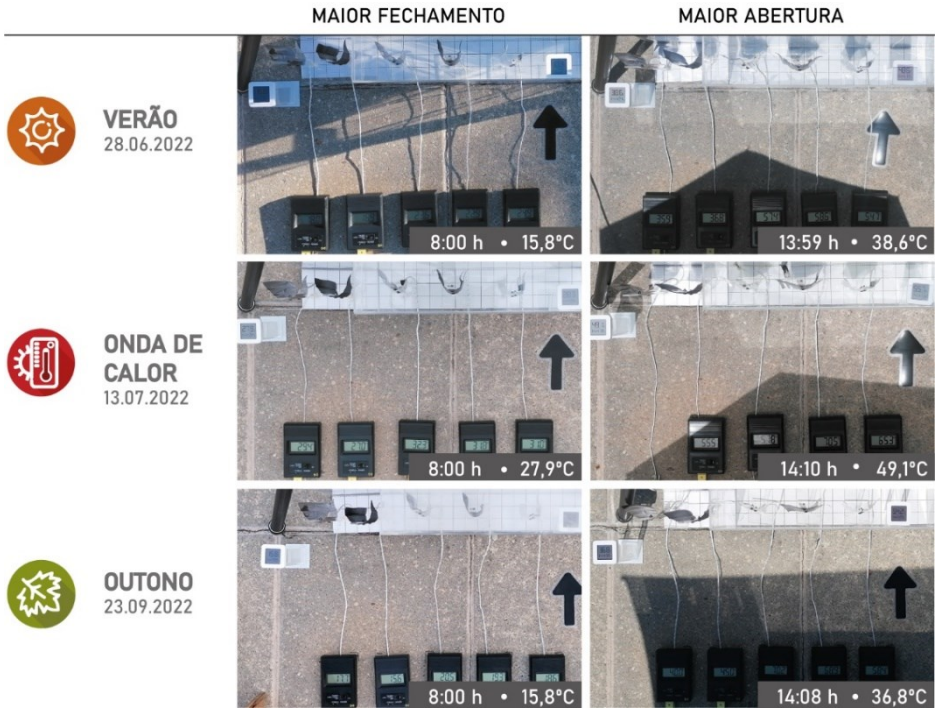
Vale salientar que o intervalo de análise da Figura 176 não contempla o diâmetro mínimo e nem o diâmetro máximo dos biomódulos. A Figura 177 e a Figura 178 indicam respectivamente a mínima e máxima abertura para cada dia de experimento, na vista frontal e de topo.

Figura 177. Avaliar > Vista frontal de mínima e máxima abertura.



Fonte: Autora (2023).

Figura 178. Avaliar > Vista de topo de mínima e máxima abertura.



Fonte: Autora (2023).

A **amplitude do movimento dos biomódulos corresponde à variação do diâmetro das amostras, entre o máximo e o mínimo identificado no dia de coleta.** A Figura 176 à Figura 178 ratificam que a **radiação incidente acentua a transmissão calorífica para os módulos em bimetal, e alteram a temperatura do material.**

7.2.4 Análise Estatística por Experimento

Para identificar o comportamento do biomódulo bimetal desenvolveu-se o **tratamento estatístico dos dados**. A primeira parte da análise busca revelar o comportamento das amostras para cada dia de coleta, comparando-se os resultados das amostras sediada no mesmo ambiente: IN (metal in, preto in e branco in) e OUT (metal out e preto out). Uma segunda abordagem demonstrará o comportamento geral dos módulos em sua relação com a temperatura ambiental. Serão utilizados os parâmetros **DBIs (Diâmetros dos Biomódulos Internos)** e **DBEs (Diâmetros dos Biomódulos Externos)** como referência (maiores detalhes ver item 7.2.3).

7.2.4.1 Análise de verão: Comportamento dos Biomódulos Internos

O experimento do verão foi realizado no dia 28 de junho de 2022. Consistiu na observação, aferição e registro dos dados sobre o comportamento das amostras de biomódulos e de dados ambientais (temperatura e umidade), entre as 8:00 e 20:05 h. Gráficos sobre os dados coletados foram explicitados no item 7.2.2.

Dos 33 conjuntos de dados sobre cada biomódulo, a Temperatura Exterior variou entre 15,8 e 38,6°C. O DBI do Metal In variou entre 3,65 e 7 cm, do Preto In entre 3,75 e 7,36 cm e do Branco In entre 3,45 e 5,74 cm (Tabela 21).

Tabela 21. Avaliar > Verão > Estatísticas descritivas das variáveis (internas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (°C)	33	15,80	38,60	27,19	8,27
Diâmetro do Metal In (cm)	33	3,65	7,00	4,91	1,28
Diâmetro do Preto In (cm)	33	3,75	7,36	5,01	1,37
Diâmetro do Branco In (cm)	33	3,45	5,74	4,52	0,78

Nota. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A análise das correlações bivariadas (Cohen & Holliday, 1982) demonstrou que o experimento do verão apresenta uma correlação forte e positiva entre o aumento

da Temperatura Exterior e o DBI, seja para o grupo de dados do Metal In (r[62],=0,938, p[63]<0,001); como para o do Preto In (r=0,919, p<0,001) e do Branco In (r=0,986, p<0,001). Isto é: quando uma variável aumenta, a outra também tende a aumentar (Tabela 22).

A interpretação para a Tabela 22, bem como as análises de correlações bivariadas posteriores, devem ser efetuadas do seguinte modo: a primeira coluna explicita as variáveis na tabela sob análise. As colunas seguintes apresentam um número natural no campo para o título. Cada número identifica a variável correspondente à primeira coluna. Assim, têm-se a correlação entre duas variáveis. Exemplo: a correlação bivariada entre o '2. Diâmetro do Metal In (cm)' e a coluna 1 que identifica a variável '1. Temperatura Exterior (°C)' é de 0,938.

Tabela 22. Avaliar > Verão > Correlações das variáveis (internas).

Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (°C)	-	-	-	-
2. Diâmetro do Metal In (cm)	.938**	-	-	-
3. Diâmetro do Preto In (cm)	.919**	.995**	-	-
4. Diâmetro do Branco In (cm)	.986**	.952**	.938**	-

Nota. N = 33. **p < 0,001. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A **análise de variância**, ou **ANOVA**[64] (Laureano, 2020), constatou que as variâncias entre as amostras não são homogêneas (*Levene*$_{(2,96)}$[65]*=10,747; p<0,001)*, mas que as médias entre os grupos dos DBIs não são significativamente diferentes no experimento do verão ($F_{(2,96)}$*=1,570; p=0,213*). Além disso, no experimento do verão a

[62] A **Correlação de Pearson** (r) foi na análise de correlações bivariadas porque as variáveis não são fortemente assimétricas, considerando o Teorema do Limite Central e o rácio de assimetria (rs). Utiliza as seguintes referências para avaliar a correlação: a) 0,19 ou menos (muito fraca); b) entre 0,2 e 0,39 (fraca); c) entre 0,4 e 0,69 (moderada); d) entre 0,70 e 0,89 (forte); e) entre 0,90 e 1,00 (muito forte) (Cohen & Holliday, 1982). Testes de normalidade: Temperatura Exterior (S-W$_{(33)}$*=0,873; p<0,001; r^{s}= -0,60);* Diâmetro do Metal In (S-W$_{(33)}$*=0,749; p<0,001, r^{s}= 2,00);* Diâmetro Interno Preto (S-W$_{(33)}$*=0,744; p<0,001, r^{s}= 2,00)*; Diâmetro do Branco In (S-W$_{(33)}$*=0,885; p<0,001, r^{s}= 0,96)*.

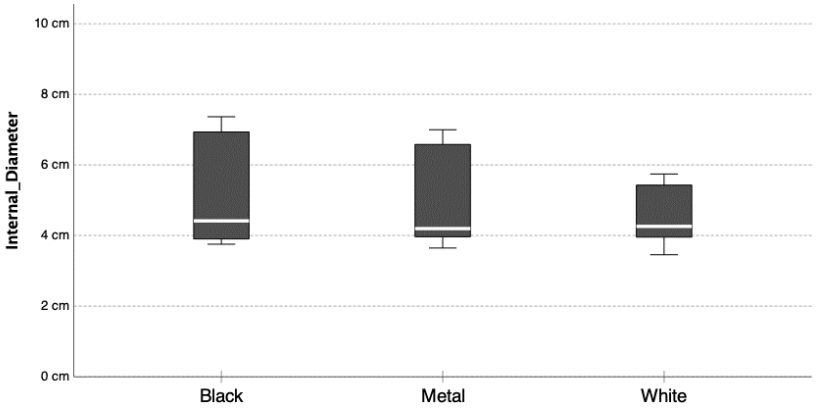
[63] O **p-value** (p) é o valor correspondente à probabilidade de não ocorrer um falso positivo, ou seja, a probabilidade de evitar o Erro do Tipo I, quando se rejeita a hipótese nula, sendo esta verdadeira. Nessa análise foi utilizada como padrão de nível de significância o p-value inferior a 0,05.

[64] Aplica-se a **análise de variância** (ANOVA) "quando se tem uma variável quantitativa (dependente) e se pretende comparar a sua média em dois ou mais grupos populacionais independentes (*K* grupos) definidos por uma variável qualitativa (independente ou fator)" (Laureano, 2020, p. 50).

[65] O teste de **Levene** é o teste de pressuposto da homogeneidade de variâncias (Laureano, 2020, pp. 63–64).

diferença de cor explicou apenas 3,2% a variância entre os DBIs $Eta^2 = 0{,}032$ (Gráfico 12).

Gráfico 12. Avaliar > Verão > Comparação da variância entre os DBIs.

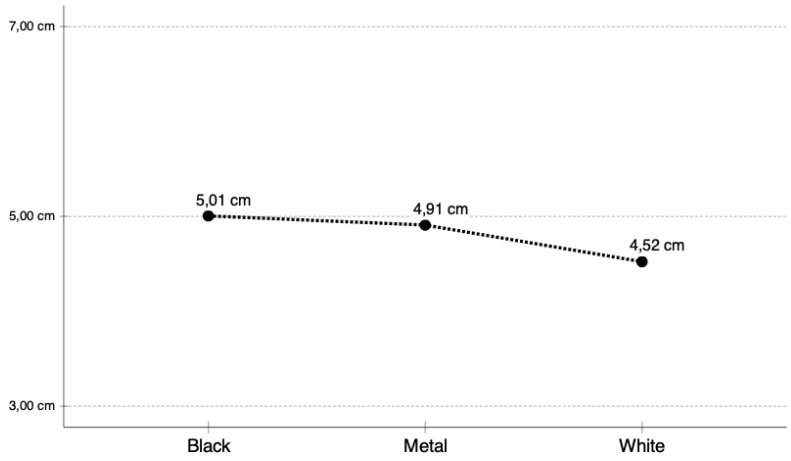


Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Pela observação da significância do teste *post-hoc*[66] de comparações múltiplas de médias de *Scheffé*, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos DBIs no experimento do verão: Preto In e Metal In ($p=0{,}946$); Preto In e Branco In ($p=0{,}251$), e Metal In e Branco In ($p=0{,}411$). O Gráfico 13 efetua comparação das médias dos DBIs sob análise.

[66] Os **testes de *post-hoc*** são utilizados "quando o teste *one-way ANOVA* ou outro teste robusto para igualdade de médias (*Welch* ou *Brown-Forsythe*) leva a aceitar-se que existe pelo menos um grupo que tem média diferente dos demais" (Laureano, 2020, p. 65). Tais testes possibilitam a identificação dos pares de grupos populacionais que se diferenciam entre si, em termos médios. Os mais frequentemente aplicados são: a) *Tukey* (amostras de igualdade dimensão); b) *Bonferroni e Scheffé* (caso exista homogeneidade das variâncias); c) *Dunnett'C* e *Games-Howell* (para a ocorrência de heterogeneidade das variâncias) (Laureano, 2020). O autor ressalta que o teste de *Scheffé* confere bons resultados quando as variâncias são diferentes, sendo, por isso, o teste mais usualmente utilizado.

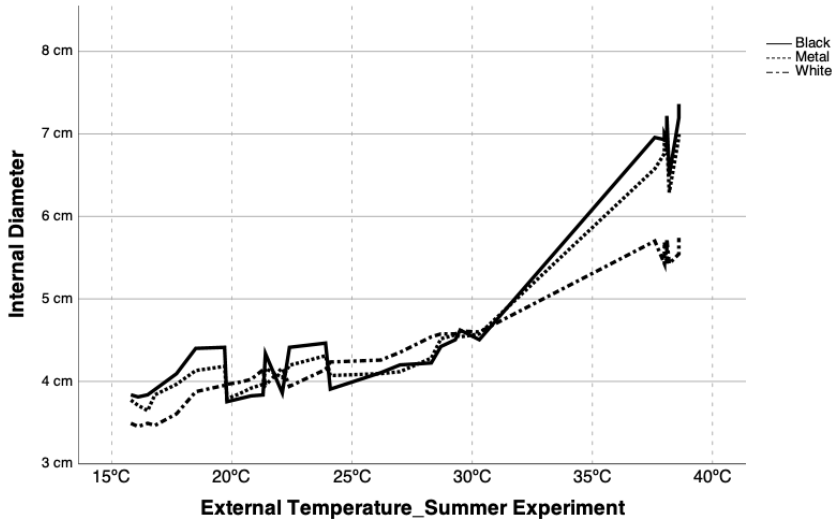
Gráfico 13. Avaliar > Verão > Comparativo entre as médias dos DBIs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Conclui-se que neste experimento o comportamento foi semelhante entre os biomódulos, com uma amplitude de diâmetro maior do Biomódulo Preto In e do Metal In em temperaturas acima de 30°C (Gráfico 14).

Gráfico 14. Avaliar > Verão > Comportamento dos Biomódulos Internos.



Nota. DBIs em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

7.2.4.2 Análise de verão: Comportamento dos Biomódulos Externos

A esta investigação importa também compreender como foi o comportamento dos biomódulos na relação existente entre Diâmetros Externos e a incidência da Temperatura Ambiental (Exterior). Para tanto, no experimento do verão foram medidas as correlações entre a Temperatura Exterior e os DBEs das amostras Metal

Out e Preto Out[67]. O Metal variou entre 3,36 e 5,08 cm e o biomódulo Preto entre 3,41 e 6,76 cm (Tabela 23).

Tabela 23. Avaliar > Verão > Estatísticas descritivas das variáveis (externas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (°C)	33	15,80	38,60	27,19	8,27
Diâmetro do Metal Out (cm)	33	3,26	4,54	3,37	0,40
Diâmetro do Preto Out (cm)	33	3,65	5,62	4,27	0,68

Nota. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A Temperatura Exterior tem uma correlação forte e positiva com o DBE do Metal Out (r=0,912, p<0,001) e forte com o Diâmetro do Preto Out (r=0,897, p<0,001) (Tabela 24).

Tabela 24. Avaliar > Verão > Correlações das variáveis (externas).

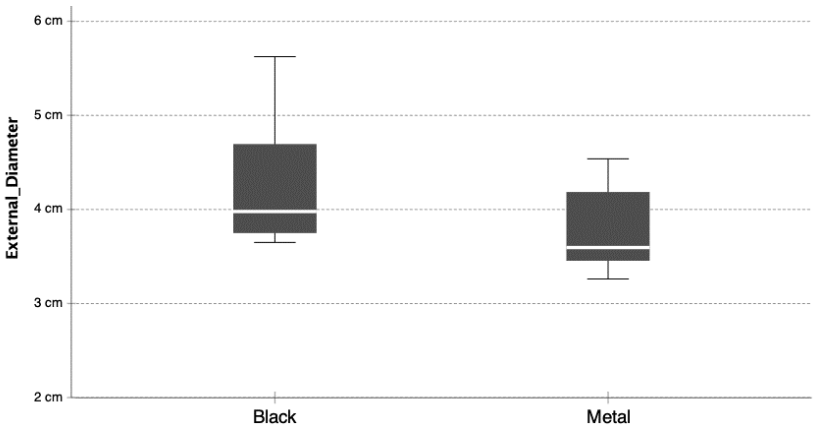
Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (°C)				
2. Diâmetro do Metal Out (cm)	.912**			
3. Diâmetro do Preto Out (cm)	.897**	.970**		

Nota. N = 33. **p < 0.001. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A análise de variância demonstrou que as variâncias entre os grupos não são homogêneas ($Levene_{(1,64)}=11,311;\ p<0,001$), e que as médias entre os grupos dos DBEs são significativamente diferentes ($F_{(1,64)}=12,965;\ p<0,001$). No caso dos DBEs, a diferença de cor explicou 16,8% da variância entre os diâmetros dos módulos (Eta^2 = 0,168) (Gráfico 15).

[67] Teste de normalidade: Temperatura Exterior ($S\text{-}W_{(33)}=0,873;\ p<0,001$; $r^s= -0,60$); Diâmetro do Metal Out ($S\text{-}W_{(33)}=0,854;\ p<0,001$, $r^s= 1,71$); Diâmetro do Preto Out ($S\text{-}W_{(33)}=0,781;\ p<0,001$, $r^s= 2,50$).

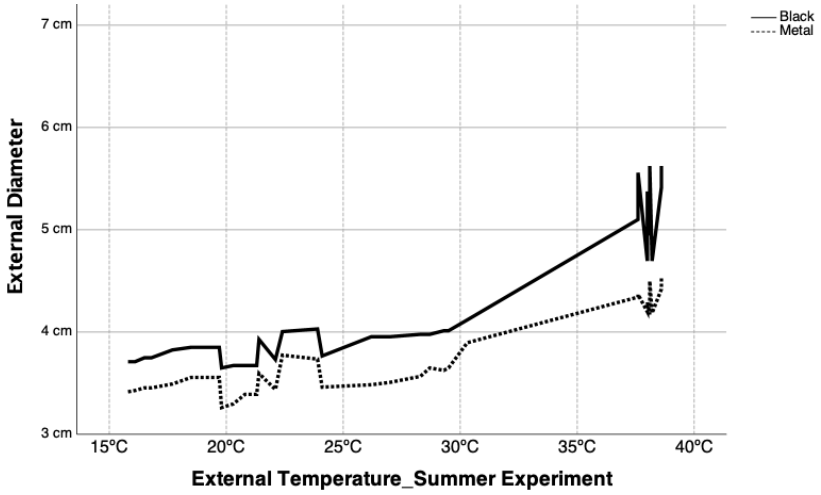
Gráfico 15. Avaliar > Verão > Comparação da variância entre os DBEs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Assim, conclui-se que existem diferenças relativas ao comportamento dos módulos quando expostos à temperatura ambiental, com maior amplitude de movimento do Biomódulo Preto Out do que o de Metal Out, no que se refere ao experimento do verão (Gráfico 16).

Gráfico 16. Avaliar > Verão > Comportamento dos Biomódulos Externos.



Nota. DBEs em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

7.2.4.3 Análise da onda de calor: Comportamento dos Biomódulos Internos

O experimento da onda de calor foi realizado no dia 13 de julho de 2022 e compreendeu a observação, medição e registro dos dados referentes ao experimento sobre o comportamento dos biomódulos, entre os horários às 8:00 e 20:02 h.

Nos 32 conjuntos de dados coletados sobre cada biomódulo, a Temperatura Exterior variou entre 27,2˚C e 49,3˚C. O DBI do Metal In variou entre 3,95 e 7,81 cm, o do Preto In entre 3,97 e 8,99 cm e o do Branco In entre 3,93 e 7,77 cm (Tabela 25).

Tabela 25. Avaliar > Onda de calor > Estatísticas descritivas das variáveis (internas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (˚C)	32	27,20	49,30	35,49	7,56
Diâmetro do Metal In (cm)	32	3,95	7,81	5,05	1,13
Diâmetro do Preto In (cm)	32	3,97	8,99	5,45	1,52
Diâmetro do Branco In (cm)	32	3.93	7,77	5,05	1,13

Nota. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Na análise de correlações bivariadas[68], o experimento da onda de calor também revelou a ocorrência de uma correlação forte e positiva entre o aumento da Temperatura Exterior e o DBI: Metal In (r=0,938, p<0,001); Preto In (r=0,975, p<0,001) e Branco In (r=0,945, p<0,001) (Tabela 26).

Tabela 26. Avaliar > Onda de calor > Correlações das variáveis (internas).

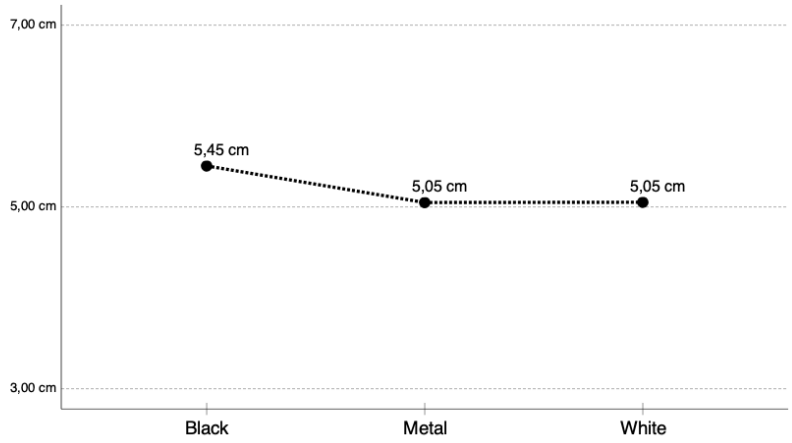
Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (˚C)				
2. Diâmetro do Metal In (cm)	.963**			
3. Diâmetro do Preto In (cm)	.975**	.991**		
4. Diâmetro do Branco In (cm)	.945**	.960**	.968**	

Nota. N = 32. **p < 0.001. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Existem evidências estatísticas para afirmar que há um comportamento semelhante entre os módulos no experimento da onda de calor, pois há homogeneidade das variâncias do Diâmetro Interno ($Levene_{(2,93)}=2,575; p=0,082$) e a variância também não é estatisticamente diferente entre os grupos ($F_{(2,93)}=1,105; p=0,351$). Além disso, as médias entre os grupos dos DBIs são equivalentes ($Brown\text{-}Forsythe_{(2,85)}=1,058; p=0,352$) (Gráfico 17).

[68] Teste de normalidade: Temperatura Exterior ($S\text{-}W_{(32)}=0,814; p<0,001; r^s= 2,14$); Diâmetro do Metal In ($S\text{-}W_{(32)}=0,811; p<0,001, r^s= 2,87$); Diâmetro Preto In ($S\text{-}W_{(32)}=0,800; p<0,001, r^s= 2,70$); Diâmetro Branco In ($S\text{-}W_{(32)}=0,812; p<0,001, r^s= 3,03$). Dada a não normalidade das variáveis, optou-se pelo *Bootstrapping* com 1.000 amostras e intervalo de confiança a 95% para a análise da correlação de Pearson.

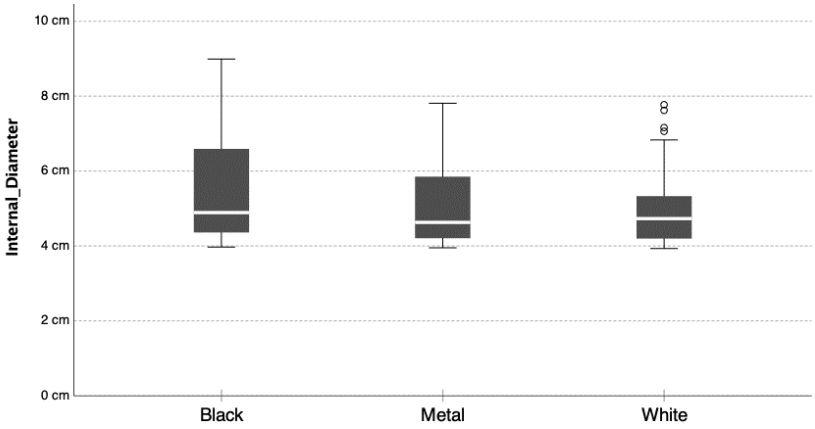
Gráfico 17. Avaliar > Onda de calor > Comparativo entre as médias dos DBIs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A diferença de cor explicou apenas 2,2% da variância entre os DBIs ($Eta^2 = 0{,}022$), o que certifica que a alteração de cores não afetou os diâmetros internos do experimento do outono (Gráfico 18).

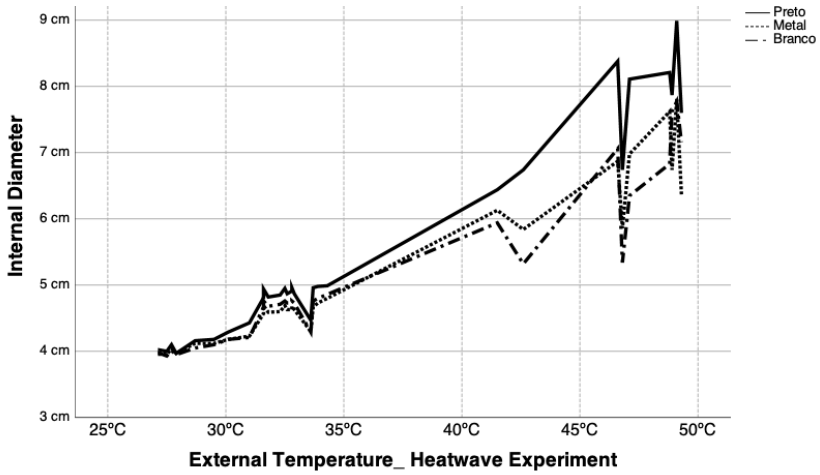
Gráfico 18. Avaliar > Onda de calor > Comparação da variância entre os DBIs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Conclui-se, portanto, que os Diâmetros dos Biomódulos Internos tiveram um comportamento semelhante quando expostos à temperatura ambiental no experimento da onda de calor, apesar do Módulo Preto In apresentar maior amplitude de movimento (Gráfico 19).

Gráfico 19. Avaliar > Onda de calor > Comportamento dos Biomódulos Internos.



Nota. DBIs em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

7.2.4.4 Análise da onda de calor: Comportamento dos Biomódulos Externos

Para a análise referente à influência da onda de calor na alteração dos DBEs, o Metal Out obteve uma amplitude movimento entre 3,87 e 5,43 cm. O Preto Out entre 3,93 e 6,73 cm (Tabela 27). A Temperatura externa se alterou entre 27,2˚C e 49,3˚C.

Tabela 27. Avaliar > Onda de calor > Estatísticas descritivas das variáveis (externas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (˚C)	32	27,20	49,30	35,49	7,56
Diâmetro do Metal Out (cm)	32	3,87	5,43	4,26	0,38
Diâmetro do Preto Out (cm)	32	3,93	6,73	4,94	0,91

Nota. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Mais uma vez a análise das correlações bivariadas[69] constataram a ocorrência de uma correlação forte e positiva entre a elevação da Temperatura Exterior e o DBE do Metal Out (r=0,926, p<0,001) e do Preto Out (r=0,964, p<0,001) (Tabela 28).

[69] Testes de normalidade: Temperatura Exterior ($S\text{-}W_{(32)}$=*0,814; p<0,001;* r^s*= 0,60);* Diâmetro do Metal Out ($S\text{-}W_{(32)}$*=0,811; p<0,001,* r^s*= 1,71);* Diâmetro do Preto Out ($S\text{-}W_{(32)}$*=0,800; p<0,001,* r^s*= 2,52)*.

Tabela 28. Avaliar > Onda de calor > Correlações das variáveis (externas).

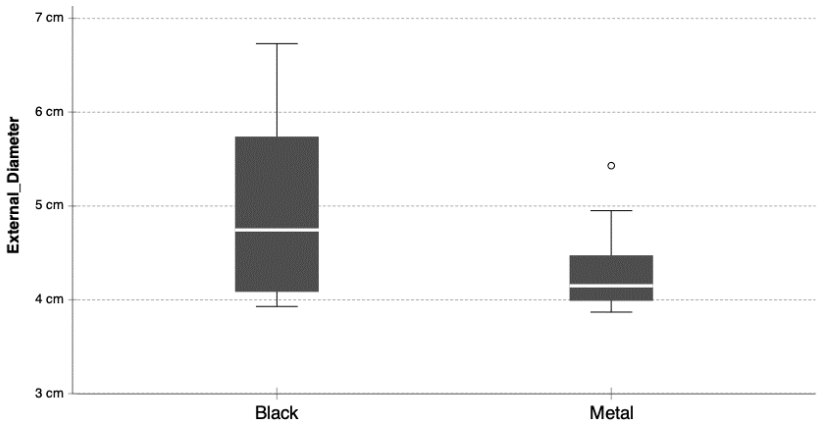
Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (°C)				
2. Diâmetro do Metal Out (cm)	.926**			
3. Diâmetro do Preto Out (cm)	.964**	.930**		

Nota. N = 32. $^{**}p < 0.001$. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A ANOVA revelou que as variâncias são estatisticamente diferentes ($Levene_{(2,62)}=18,931; p<0,001$), são diferentes entre os grupos ($F_{(1,62)}=15,196; p<0,001$). E que as médias entre os grupos dos Diâmetros Internos são também diferentes ($Brown\text{-}Forsythe_{(1,41)}=15,196; p<0,001$).

No caso dos Diâmetros Externos, a diferença de cor explicou 19,7% da variância dos módulos na onda de calor ($Eta^2 = 0,197$), o que demonstra nesse caso que a cor dos materiais influenciou em relação ao comportamento (Gráfico 20).

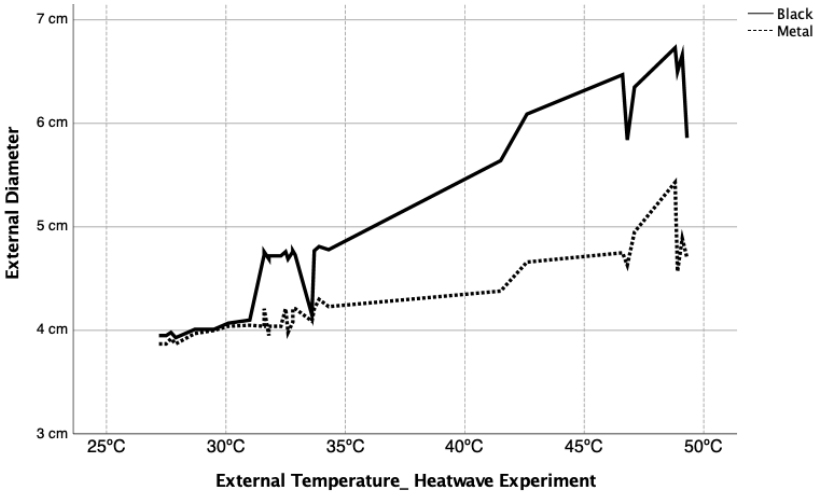
Gráfico 20. Avaliar > Onda de calor > Comparação da variância entre dos DBEs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Portanto, conclui-se que os Diâmetros Externos dos módulos são influenciados pela cor quando expostos à temperatura ambiental. No experimento da onda de calor, é perceptível a maior amplitude de movimento referente ao módulo Preto Out (Gráfico 21).

Gráfico 21. Avaliar > Onda de calor > Comportamento dos Biomódulos Externos.



Nota. DBEs em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

7.2.4.5 Análise de outono: Comportamento dos Biomódulos Internos

O experimento de outono, realizado no dia 23 de setembro de 2022, contou com a observação e registro de 42 dados por amostra de Biomódulo. A Temperatura Externa variou entre 15,6 e 37,5˚C. O DBI do Metal In teve o mínimo de 3,33 cm e o máximo de 8,93 cm; do Preto In variou entre 3,32 e 9,23 cm; e do Branco In entre 3,36 e 6,97 cm (Tabela 29).

Tabela 29. Avaliar > Outono > Estatísticas descritivas das variáveis (internas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (˚C)	42	15,60	37,50	27,01	7,61
Diâmetro do Metal In (cm)	42	3,33	8,93	5,41	1,71
Diâmetro do Preto In (cm)	42	3,32	9,23	5,88	2,09
Diâmetro do Branco In (cm)	42	3,36	6,97	4,71	1,28

Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A análise de correlações bivariadas das amostras evidencia uma correlação forte e positiva com o aumento da Temperatura Externa, seja para o Diâmetro do Metal In (r=0,886[70], p<0,001), quanto o do Preto In (r=0,942, p<0,001) e do Branco In (r=0,916, p<0,001). Os três biomódulos tiveram um comportamento geral

[70] Teste de normalidade: Temperatura Exterior (S-$W_{(42)}$=0,908; p=0,003; r^s= -0,38); Diâmetro do Metal In (S-$W_{(42)}$=0,891; p<0,001, r^s= 1,64); Diâmetro do Preto In (S-$W_{(42)}$ 0,879; p<0,001, rs= 0,84); Diâmetro do Branco In (S-$W_{(42)}$ =0,842; p<0,001, r^s= 1,63).

semelhante, i.e., quando a Temperatura Exterior aumenta, os Diâmetros Internos tendem a aumentar (Tabela 30).

Tabela 30. Avaliar > Outono > Correlações das variáveis.

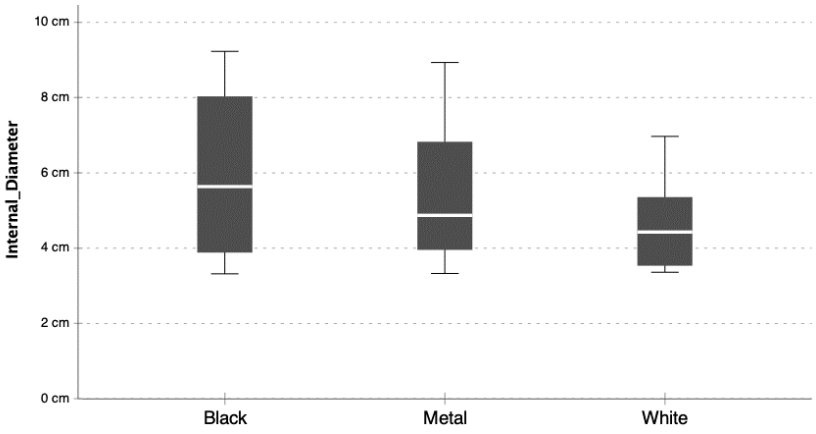
Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (°C)				
2. Diâmetro do Metal In (cm)	.886**			
3. Diâmetro do Preto In (cm)	.942**	.975**		
4. Diâmetro Interno Branco In (cm)	.916**	.982**	.986**	

Nota. N = 42. $^{**}p < 0.001$. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A análise de variância demonstrou que os grupos não têm variâncias homogêneas (*Levene$_{(2,123)}$=8,507; p<0,001)*, e que pelo menos uma das médias dos DBIs é significativamente diferente entre os biomódulos (*Brown-Forsythe$_{(2,107)}$=4,908; p=0,009*).

O Gráfico 22 indica que a variação do diâmetro é mais acentuada para o biomódulo Preto In e o de Metal In do que no módulo Branco In. As diferenças de cores nos módulos explicam 7,4% da variância dos diâmetros no ambiente interno (*Eta²* = 0,074).

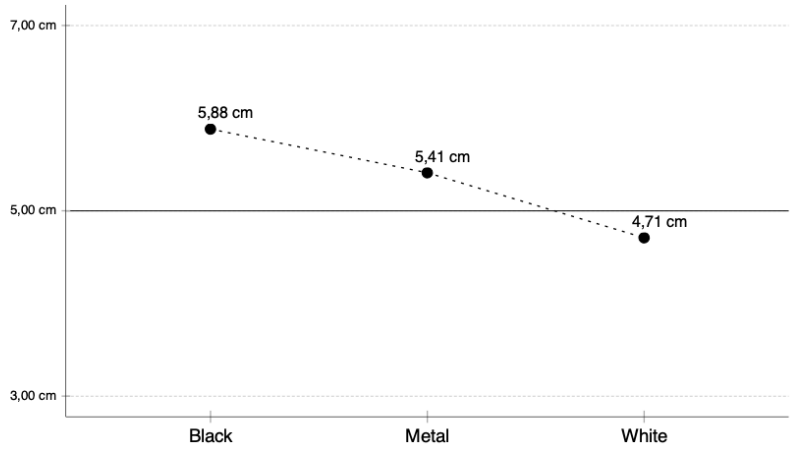
Gráfico 22. Avaliar > Outono > Comparação da variância entre os DBIs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Pela observação da significância do teste *post-hoc* de comparações múltiplas de diferenças de médias de *Games-Howell,* é possível afirmar que estas diferenças não são estatisticamente significativas nos pares Preto In e Metal In (p=0,498) e Metal In e Branco In (p=0,091). Porém, existe diferença e é estatisticamente significativa entre os Módulos Preto In e Branco In (p=0,008). O Gráfico 23 compara as médias dos DBIs sob análise.

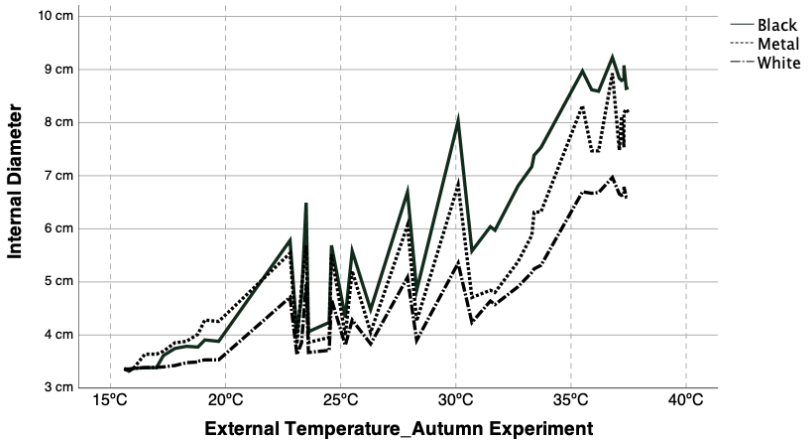
Gráfico 23. Avaliar > Outono > Comparativo entre as médias dos DBIs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Conclui-se que o comportamento do Biomódulo Preto In é o que mais se distingue em relação à Temperatura Externa, tanto pelas maiores médias quanto pela amplitude de movimento do DBIs, no que se refere ao experimento do outono (Gráfico 24).

Gráfico 24. Avaliar > Outono > Comportamento dos Biomódulos Internos.



Nota. DBIs em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

7.2.4.6 Análise de outono: Comportamento dos Biomódulos Externos

Para finalizar a análise relativa a cada experimento importa compreender como os dados do ensaio do outono influenciaram na alteração dos diâmetros externos dos biomódulos. A Temperatura Exterior variou entre 15,6 e 37,5˚C, como já explicitado. Por sua vez, o DBE do Metal Out variou entre 3,36 cm e 5,08 cm, e o do biomódulo Preto Out entre 3,41 cm e 6,76 cm (Tabela 31).

Tabela 31. Avaliar > Outono > Estatísticas descritivas das variáveis (externas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (°C)	42	15,60	37,50	27,01	7,61
Diâmetro do Metal Out (cm)	42	3,36	5,08	4,16	0,486
Diâmetro do Preto Out (cm)	42	3,41	6,76	4,91	1,11

Nota. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A Temperatura Exterior tem uma correlação moderada e positiva com o Diâmetro do Metal Out (r=0,642[71], p<0,001) e forte com o Diâmetro do Preto Out (r=0,906, p<0,001) (Tabela 32).

Tabela 32. Avaliar > Outono > Correlações das variáveis.

Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (°C)				
2. Diâmetro do Metal Out (cm)	.642**			
3. Diâmetro do Preto Out (cm)	.906**	.856**		

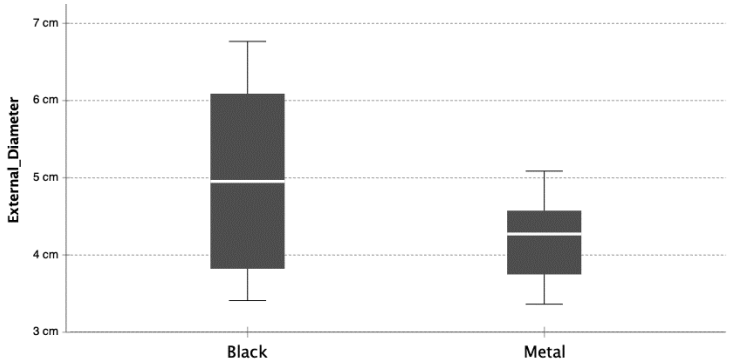
Nota. N = 42. **p < 0.001. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Assim, existem evidências estatísticas de que os módulos têm médias significativamente diferentes ($t_{(82)}$[72]$=-3,977;\ p<0,001,\ d=0,40$) e variâncias também $F_{(82)}=66,814;\ p<0,001$. As diferenças de cores nos módulos explicam 16,2% (Eta^2 = 0,162) da variância dos DBEs.

[71] Teste de normalidade: Temperatura Exterior ($S\text{-}W_{(42)}=0,908;\ p=0,003$; $r^S= -0,38$); Diâmetro Externo Metal ($S\text{-}W_{(42)}=0,938;\ p=0,24$, $r^S= -0,41$); Diâmetro Externo Preto ($S\text{-}W_{(42)}=0,879;\ p<0,001$, $r^S= 0,28$).

[72] O **teste paramétrico *t*** "para duas amostras independentes aplica-se quando se tem uma variável quantitativa (dependente) e se pretende comparar a sua média em dois grupos populacionais independentes definidos por uma variável qualitativa (independente)" (Laureano, 2020, p. 34).

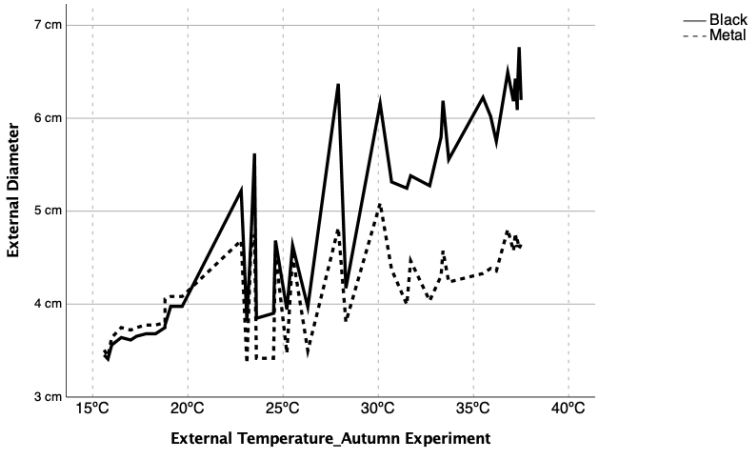
Gráfico 25. Avaliar > Outono > Comparação da variância entre os DBEs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Conclui-se que o comportamento do biomódulo Preto Out apresentou melhores respostas às mudanças de Temperatura Externas do que o Metal Out, no ensaio do outono (Gráfico 26).

Gráfico 26. Avaliar > Outono > Comportamento dos Biomódulos Externos.



Nota. DBEs em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

7.2.5 Análise Estatística para Identificar Comportamento Geral

Após a análise de cada experimento separadamente, será realizada a **análise geral sobre a influência da Temperatura Externa no comportamento dos Biomódulos** que contemplará a concomitante análise dos três experimentos. Para tanto, buscou-se parametrizar o comportamento geral dos módulos, mediante compreensão sobre como os Diâmetros dos Biomódulos Internos e Externos se comportam em relação à Temperatura Exterior.

7.2.5.1 Comportamento Geral dos Biomódulos Internos

No que tange à análise geral do comportamento dos Biomódulos Internos, foram coletados 107 dados para cada amostra referente a esse ambiente (Metal In, Preta In e Branca In) (Tabela 33).

Tabela 33. Avaliar > Geral > Estatísticas descritivas das variáveis (internas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (°C)	107	15,60	49,30	29,60	8,64
Diâmetro do Metal In (cm)	107	3,33	8,93	5,15	1,43
Diâmetro do Preto In (cm)	107	3,32	9,23	5,48	1,75
Diâmetro do Branco In (cm)	107	3.36	7,77	4,75	1,11

Nota. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

As correlações bivariadas[73] demonstram a existência da amplitude de movimento dos biomódulos relacionada com a Temperatura Exterior, em uma relação forte e positiva no Metal In (r=0,776, p<0,001); Preto In (r=0,800, p<0,001) e Branco In (r=0,883, p<0,001) (Tabela 34).

Tabela 34. Avaliar > Geral > Correlações das variáveis.

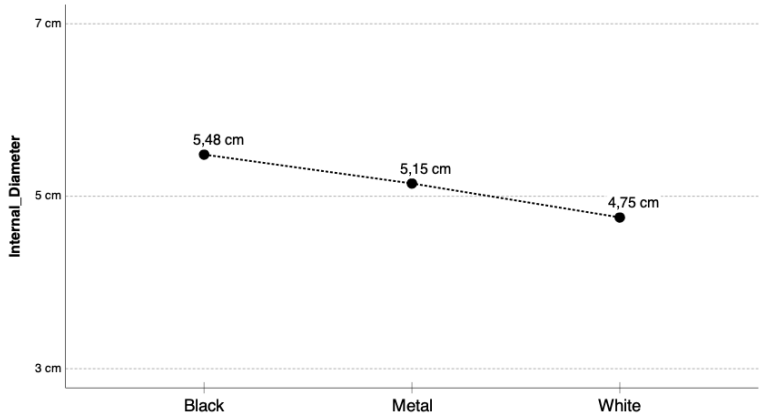
Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (°C)				
2. Diâmetro do Metal In (cm)	.776**			
3. Diâmetro do Preto In(cm)	.800**	.978**		
4. Diâmetro do Branco In (cm)	.883**	.932**	.942**	

Nota. N = 107. **p < 0.001. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A ANOVA revela que as variâncias não são homogêneas ($Levene_{(2,318)}$=20,297; p<0,001) e são estatisticamente diferentes entre os grupos ($F_{(2,318)}$=6,726; p<0,001). Isso significa que pelo menos uma das médias entre os DBIs é diferente ($Brown\text{-}Forsythe_{(2,282)}$=6,726; p=0,001).

[73] Teste de normalidade: Temperatura Exterior (S-$W_{(107)}$=0,965; p=0,006; r^s= 1,11); Diâmetro do Metal In (S-$W_{(107)}$=0,870; p<0,001, r^s= 3,72); Diâmetro do Preto In (S-$W_{(107)}$=0,874; p<0,001, r^s= 3,11); Diâmetro do Branco In (S-$W_{(107)}$=0,913; p<0,001, r^s= 3,60). Dada a não normalidade das variáveis, optou-se pelo *Bootstrapping* com 1.000 amostras e intervalo de confiança a 95% para a análise da correlação de Pearson.

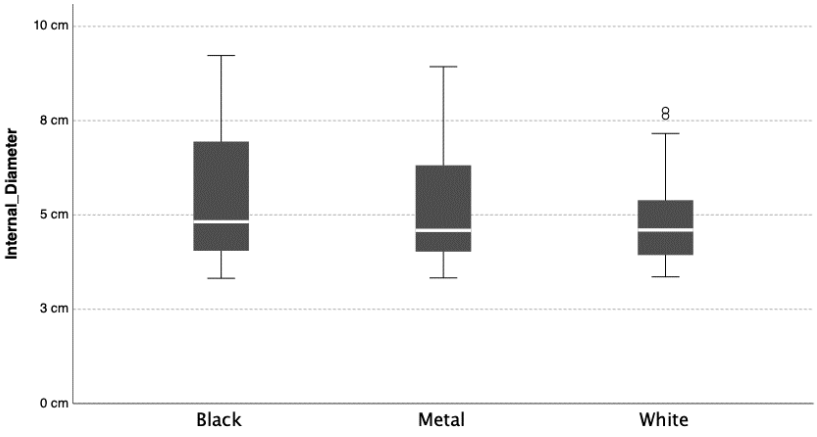
Gráfico 27. Avaliar > Geral > Comparativo de médias de DBIs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

O teste *post hoc* de comparação de médias de *Games-Howell* indicou que são estatisticamente diferentes apenas as médias entre o Preto In e Branco In (p=0,001), não sendo estatisticamente significativas as diferenças de médias entre Preto In e Metal In (p=0,278), e Metal In e Branco In (p=0,066) (Gráfico 28).

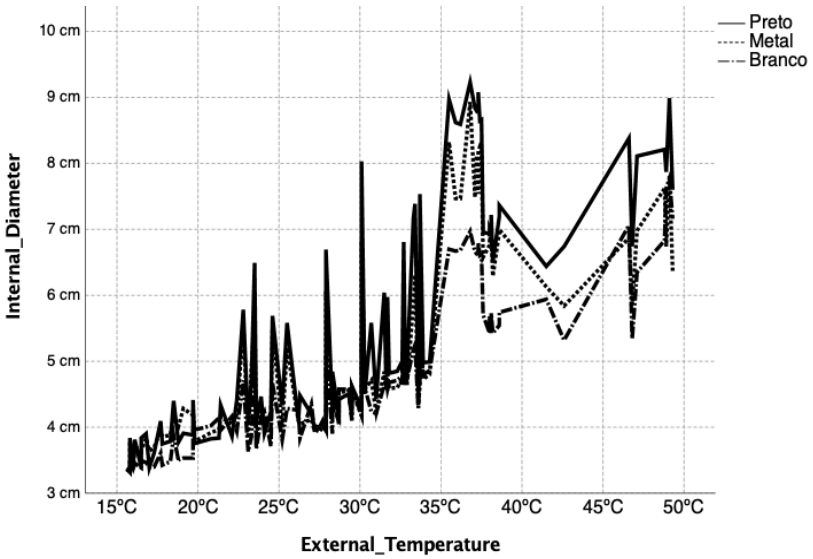
Gráfico 28. Avaliar > Geral > Comparação da variância dos DBIs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

A diferença de cor explica pouco do comportamento dos DBIs (4,1% da variância, i.e. $Eta^2 = 0{,}041$). No geral, o comportamento dos diâmetros internos entre Preto In e Metal In são semelhantes. O Branco In, por sua vez, é o que destoa mais do comportamento, como é perceptível no Gráfico 29 a seguir.

Gráfico 29. Avaliar > Geral > Comportamento dos Biomódulos Internos.



Nota. DBIs em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

No entanto, foi observado que o **efeito da aplicação de cor (*Eta*²) altera o comportamento dos biomódulos na sua relação com o aumento da Temperatura Externa**. No cenário de ampliação de temperatura, o comportamento vai modificando, e o efeito da diferença de cor dos módulos tende a ampliar (Tabela 35).

Pode-se afirmar que o efeito da cor influencia a abertura dos Diâmetros Internos de forma acentuada sobretudo para temperatura que ultrapassa de 32˚C para 33˚C. Sai de 15,6% de explicação de variância para 23,7%. Isso significa um incremento de 8,1% no efeito da diferença de cor no comportamento dos DBIs. Quando a temperatura chega a 34˚C, esse índice aumenta novamente, agora em 9,1% (Eta²= 0,328), que influencia na abertura dos Diâmetros Internos. E a 35˚C, o índice aumenta em 6,3% (ETA²= 0,391).

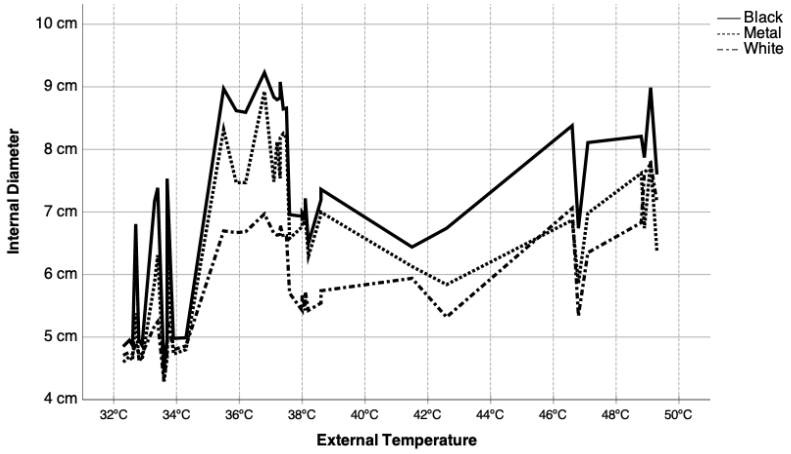
Tabela 35. Avaliar > Geral > Estatísticas descritivas das variáveis.

N	Temperatura Externa	Metal		Preto		Branco			
		Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Eta²	Aumento no Efeito (%)
107	=15°C	5,15	1,43	5,48	1,75	4,75	1,11	0,041	--
87	≥ 20°C	5,45	1,41	5,87	1,70	5,03	1,04	0,056	1,5
72	≥ 25°C	5,67	1,43	6,16	1,70	5,22	1,03	0,069	1,3
61	≥ 28°C	5,92	1,39	6,46	1,64	5,42	0,99	0,089	2,00
57	≥ 29°C	6,03	1,37	6,60	1,60	5,50	0,97	0,106	1,7
54	≥ 30°C	6,12	1,35	6,72	1,56	5,56	0,96	0,117	1,1
50	≥ 31°C	6,21	1,33	6,81	1,53	5,64	0,94	0,123	0,6
43	≥ 32°C	6,46	1,26	7,09	1,46	5,81	0,91	0,156	3,3
36	≥ 33°C	6,80	1,08	7,47	1,25	6,01	0,85	0,237	8,1
30	≥ 34°C	7,09	0,88	7,74	1,04	6,23	0,75	0,328	9,1
29	≥ 35°C	7,16	0,78	7,84	0,92	6,28	0,71	0,391	6,3
27	≥ 36°C	7,11	0,77	7,77	0,91	6,25	0,73	0,378	-1,3
25	≥ 37°C	7,02	0,70	7,68	0,88	6,20	0,74	0,382	0,4
17	≥ 38°C	6,75	0,53	7,36	0,72	6,10	0,84	0,358	-2,4
9	≥ 39°C	6,69	0,71	7,67	0,86	6,59	0,91	0,276	-8,2
9	≥ 40°C	6,71	0,71	7,67	0,86	6,59	0,71	0,276	0
9	≥ 41°C	6,69	0,71	7,67	0,86	6,59	0,91	0,276	0
8	≥ 42°C	6,76	0,72	7,83	0,78	6,68	0,94	0,316	4
7	≥ 43°C	6,89	0,67	7,98	0,70	6,87	0,82	0,366	5
7	≥ 44°C	6,89	0,67	7,98	0,70	6,87	0,82	0,366	0
7	≥ 45°C	6,89	0,67	7,98	0,70	6,87	0,82	0,366	0
7	≥ 46°C	6,89	0,67	7,98	0,70	6,87	0,82	0,366	0
5	≥ 47°C	7,10	0,60	8,15	0,52	7,14	0,58	0,477	11,1
4	≥ 48°C	7,13	0,69	8,16	0,60	7,34	0,43	0,436	-4,1

Nota. D.P. = Desvio Padrão. Variáveis: Temperaturas Externas e DBIs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Após 35°C, o efeito da diferença de cor começa a cair (-11,5%) na Temperatura de 39°C. No entanto, ainda explica 27,6% da diferença de comportamento dos Diâmetros Internos (ETA^2=0,276). Entre 40°C e 42°C, há estabilidade. A partir dessa temperatura há um novo aumento, de 9% entre 41°C e 43°C, seguido de estabilidade nas temperaturas que ficam entre 44°C e 46°C. Quando o material chega a 47°C e temperaturas maiores, o efeito da cor tem um novo aumento, desta vez de 11,1%. Ao passar de 48°C, começa a cair novamente (Gráfico 30).

Gráfico 30. Avaliar > Geral > Comportamento dos DBIs para Temperaturas Externas acima dos 32°C.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

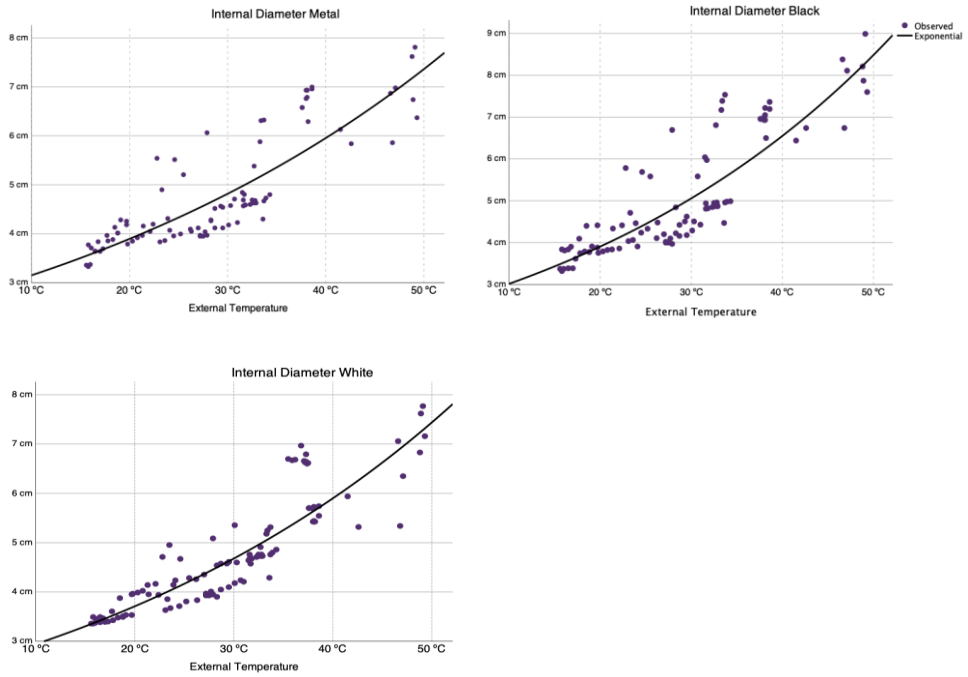
A análise sobre o comportamento dos Biomódulos permite inferir que o efeito da cor se acentua nas temperaturas que ficam no intervalo entre 32°C e 35°C, e segue relevante à medida que a Temperatura Externa se eleva.

7.2.5.2 Função do Comportamento Geral dos Biomódulos Internos

Considerando a análise conjunta dos experimentos AITECB, o comportamento geral dos Biomódulos Internos foi identificado através de modelos de regressão, construídos como curvas ajustadas aos dados coletados das amostras internas. No caso do Biomódulo Branco In, foram mantidas todas as observações. Para a amostra de Biomódulo Preta In e Metal In, foram retirados 12 *outliers* (casos extremos) do modelo de regressão.

Os modelos exponenciais demonstraram ser superiores aos modelos lineares na explicação da variância dos DBIs, que depois da retirada dos casos extremos chegaram a um coeficiente de 71,1% (R^2 = 0,711) no caso do Metal e 73,2% (R^2 = 0,732) no caso do Preto. Assim, a curva ajustada aos dados pode ser dada por um modelo de equação de natureza exponencial, que explicou 73,2% (R^2 = 0,732) da variância dos Diâmetros Internos do Metal e 76,3% (R^2 = 0,763) da variância do Biomódulo Preto, e 81,4% Branco (R^2=0,814), conforme descrito abaixo (Gráfico 31 e Tabela 36).

Gráfico 31. Solucionar > Gráficos do comportamento dos Biomódulos Internos.



Nota. DBIs em relação ao aumento de Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Tabela 36. Solucionar > Funções do comportamento dos Biomódulos Internos.

Biomódulo Interno Metal	y = 2,549633445083052 * exp(0,02120868076812351 * x)
Biomódulo Interno Preto	y = 2,328562114192839 * exp(0,02586197606837488 * x)
Biomódulo Interno Branco	y = 2,333833764228873 * exp(0,02318329595218789 * x)

Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

7.2.5.3 Comportamento Geral dos Biomódulos Externos

Com relação a análise do comportamento dos Diâmetros Externos dos experimentos AITECB, foram coletados 107 dados de cada amostra externa sob análise (Metal Out e Preto Out). O diâmetro do Metal Out variou entre 3,26 e 5,43 cm, e o do Preto Out entre 3,41 e 6.77 cm (Tabela 37).

Tabela 37. Avaliar > Geral > Estatísticas descritivas das variáveis (externas).

	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Temperatura Externa (°C)	107	15,60	49,30	29,60	8,64
Diâmetro do Metal Out (cm)	107	3,26	5,43	4,07	0,47
Diâmetro do Preto Out (cm)	107	3,41	6,77	4,72	0,97

Nota. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Conforme observado na análise dos experimentos individuais, os dados das correlações bivariadas[74] de todos os experimentos identificam um aumento de variação forte e positivo entre as variáveis (Tabela 38). Ou seja, uma influência direta entre a temperatura externa e os diâmetros dos biomódulos.

Tabela 38. Avaliar > Geral > Correlações das variáveis.

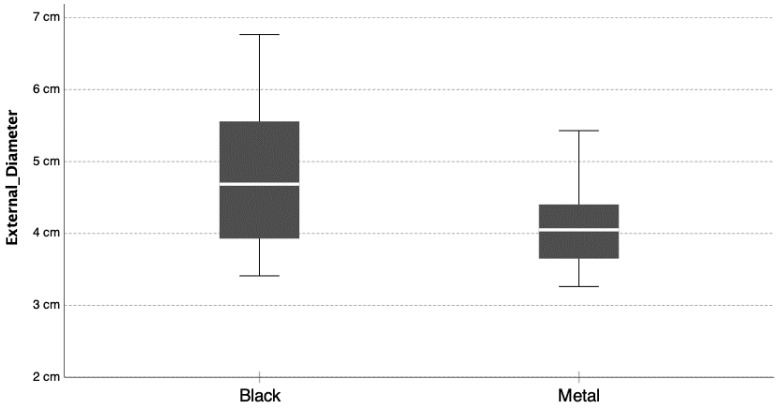
Variáveis	1	2	3	4
1. Temperatura Exterior (°C)				
2. Diâmetro do Metal Out (cm)	.749**			
3. Diâmetro do Preto Out (cm)	.824**	.897**		

Nota. N = 107. $^{**}p < 0.001$. Variáveis: Temperaturas Externas e DBEs. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

No caso dos DBEs, a realização da ANOVA constatou que diferença de cor explicou 15,3% da variância dos diâmetros dos módulos (Eta^2 = 0,153), que as variâncias não são homogêneas ($Levene_{(1,212)}=64,316; p<0,001$), e são estatisticamente diferentes entre os grupos ($F_{(1,212)}=38,176; p<0,001$).

[74] Teste de normalidade: Temperatura Exterior (S-$W_{(107)}=0,965; p=0,006$; $r^s= 1,11$); Diâmetro Externo Metal (S-$W_{(107)}=0,969; p=0,013$, $r^s= 1,04$); Diâmetro Externo Preto (S-$W_{(107)}=0,893; p<0,001$, $r^s= 2,44$). Dada a não normalidade das variáveis, optou-se pelo *Bootstrapping* com 1.000 amostras e intervalo de confiança a 95% para a análise da correlação de Pearson.

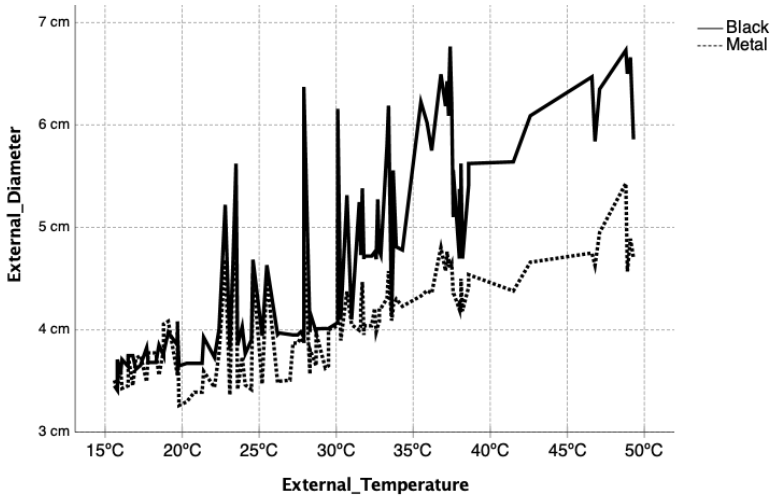
Tabela 39. Avaliar > Geral > Comparação da variância dos DBEs.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Assim, o comportamento dos Biomódulos na relação entre a Temperatura Externa e os Diâmetros Externos é diferente, dada a alteração de cor e a variação de temperatura (Gráfico 32).

Gráfico 32. Avaliar > Geral > Comportamento dos Biomódulos Externos.



Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

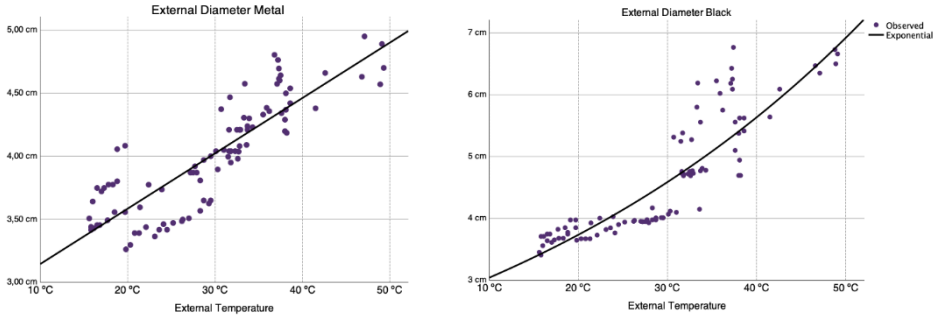
7.2.5.4 Função do Comportamento Geral dos Biomódulos Externos

O comportamento geral das amostras externas foi analisado a partir de modelos de regressão, construídos como curvas ajustadas aos dados observados relativos aos Diâmetros Externos dos Biomódulos e Temperatura Externa. Para definir a curva ajustada aos dados, foram retirados doze casos extremos (*outliers*) dos Módulos Metal Out e Preto Out. Após a retirada dos *outliers*, o Diâmetro do Metal Out variou entre 3,26 e 4,95 cm, e do Módulo Preto Out entre 3,41 e 6,77 cm.

A curva ajustada aos dados que relacionam as Temperaturas Externas e os DBEs em todos os experimentos é dada por um modelo de equação de natureza linear para o Metal, que explicou 73,8% da variância do Diâmetro Externo (R^2=0,738), um pouco acima do modelo exponencial, que explicou 73% da variância (R^2=0,730). Isso revela que o modelo linear que relaciona Temperatura Externa e o Diâmetro Externo do Metal é mais adequado para demonstrar o comportamento geral do Metal Externo, e que este possui uma relação uniforme.

Já no caso do Biomódulo Preto, o modelo linear apresenta relevante distinção do exponencial. O modelo linear explicou 76,9% (R^2= 0,769) da variância do Módulo Preto Out, enquanto o Exponencial chegou a 79,6% do comportamento (R^2= 0,796). Isso certifica que o modelo exponencial é o mais adequado para explicar o comportamento do Biomódulo Preto Out. As funções de cada modelo estão descritas no gráfico a seguir.

Gráfico 33. Solucionar > Gráfico do comportamento dos Biomódulos Externos.



Nota. Diâmetros Externos dos Biomódulos em relação à Temperatura Externa. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

Tabela 40. Solucionar > Funções do comportamento dos Biomódulos Externos

Biomódulo Interno Metal	y = 0,04386029950779172 * x + 2,707388575524418
Biomódulo Interno Preto	y = 2,479866215484978 * exp(0,020517053575608 73*x)

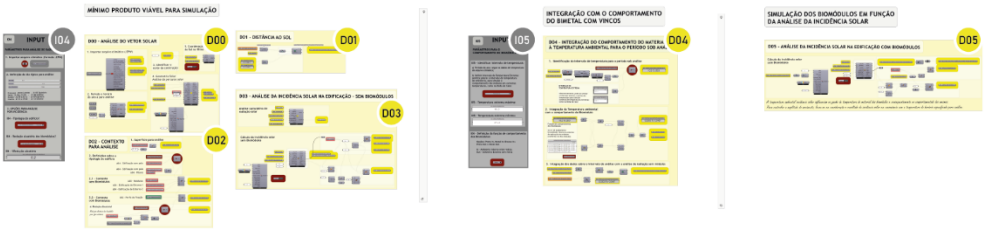
Nota. Cálculos próprios. Fonte: Autora (2023).

As **funções gerais dos comportamentos das amostras** poderão ser integradas à concepção algorítmica para simular o comportamento dos Biomódulos Bimetais. Se utilizar as versões em ambiente hermeticamente fechado, as funções de referência serão as para o ambiente interno (amostra Preto In, Metal In ou Branco In). Para simular as amostras sujeitas às intempéries ambientais, as funções que deverão ser utilizadas são as que se referem ao comportamento das amostras externas (Preto Out e Metal Out).

7.3. Algoritmo para Simulação do Comportamento dos Biomódulos

Para conceber a infraestrutura para **Simulação do Comportamento dos Biomódulos [SCB]**, desenvolveu-se algoritmo em *Grasshopper*® com o *plug-in* Ladybug 1.5.0. O algoritmo está descrito no *Cluster* D (Figura 179), e é composto por *subclusters* entre D00 e D05, e o quadro de *Input* 04 e 05. Embora a Figura 179 esteja ilegível, a figura corresponde a um mapa do algoritmo. Cada parte será detalhada entre a Figura 180 e Figura 188.

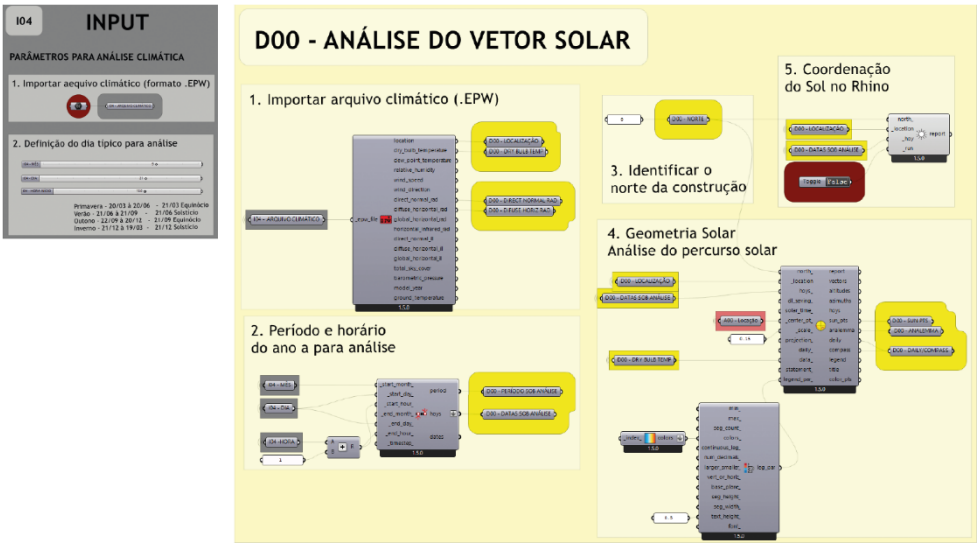
Figura 179. Solucionar > ETAPA Definir Algoritmo de Simulação: *Cluster* D



Fonte: Autora (2023).

O arquivo climático sobre o clima de Lisboa foi importado do climate.onebuilding.org (2021) para o *subcluster* D00. A temperatura de bulbo seco, a radiação normal direta e a radiação horizontal difusa foram utilizadas para as simulações de radiação.

Figura 180. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D00

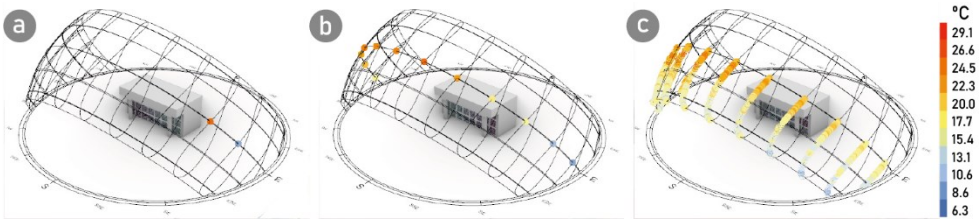


Fonte: Autora (2023).

O componente *LBSun Path* permite **simular a geometria solar** para diferentes períodos do ano (Figura 181) (Ladybug Tools LLC, 2023). Como *output* do *LBSun Path*

têm-se os **vetores solares** (Ladybug Tools LLC, 2023) que serão utilizados nas análises de proteção solar dos biomódulos.

Figura 181. Solucionar > Seleção de diferentes períodos do ano para análise.



Nota. Percurso solar entre: a) 8 e 9 h do dia 21.09; b) 0 e 23 h do dia 21.09; c) 0 e 23 h, entre os dias 21.09 e 21.12. Fonte: Autora (2023).

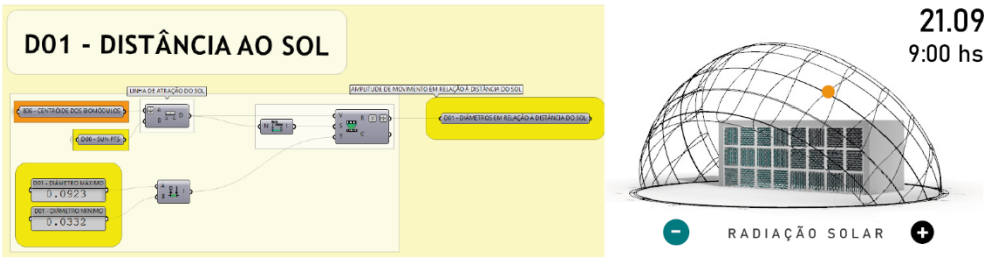
A **seleção do intervalo do ano e horário para análise** se encontra no quadro de *Input* 04. As simulações do biomódulo serão apontadas no item 7.4. Ademais, ainda fazem parte do D00 a definição no Norte da construção e o componente *LB Set Rhino Sun*. Esse último coordena a visualização no *Rhino 7.0*® com as análises do *Ladybug*, de modo a gerar correspondência do Sol com o local e data/hora sob análise.

Como visto anteriormente, o filtro para decidir entre a simulação pela distância dos biomódulos para o Sol ou para simulação que se baseia na incidência solar se encontra-se no *Subcluster* B08 e quadro de *Input* 01. A seguir, serão discriminados os algoritmos que alimentam esse filtro. A primeira opção está alocada no *Subcluster* D01, enquanto a segunda está entre o *Subcluster* D02 e D05.

7.3.1 Algoritmo para Simulação pela Distância ao Sol

O *subcluster* D01 aborda a simulação pela **Distância ao Sol** (Figura 182) que leva em consideração a distância do centroide de cada módulo para o Sol (como um ponto atrator). As distâncias irão influenciar o **diâmetro dos arcos de controle referente a cada biomódulo**. Esses arcos variam entre o diâmetro mínimo e máximo identificados na análise do comportamento do biomódulo em ambiente externo do outono (3,32 cm e 9,23 cm respectivamente, conforme descrito no item 0). E assim, produzirá uma lista de 'D01 diâmetros em relação à distância ao Sol' (*output* do *subcluster* D01).

Figura 182. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D01.



Nota. A imagem a esquerda revela simulação para o dia 21.09, às 9:00 h. Fonte: Autora (2023).

Os biomódulos estarão mais fechados com as maiores distâncias do Sol. A situação contrária acontecerá com relação às menores distâncias. Nessa opção, o comportamento dos biomódulos não é influenciado pelas obstruções construtivas (como a pala do ambiente de teste e as edificações urbanas do entorno (Figura 144 e Figura 145)). E segue sempre uma amplitude de variação de diâmetros constante. Contudo, o processamento algorítmico é leve e ágil. Tal opção é indicada para fins de verificação conceitual do biomódulo.

7.3.2 Algoritmo para Simulação por Incidência Solar

Para controlar a amplitude do movimento dos módulos cinéticos, confeccionou-se '**Algoritmo para Simulação por Incidência Solar**', conforme a alteração da temperatura ambiental e análise de incidência solar.

O algoritmo atua do seguinte modo: efetua uma primeira análise para identificar a radiação incidente na fachada sem biomódulos, para um período do ano e horário previamente especificado. A **definição do diâmetro de abertura dos biomódulos acontece de modo gerativo**, através da integração das funções de comportamento gerais dos biomódulos ao algoritmo de simulação. As funções foram identificadas na 'Análise sobre a Influência da Temperatura Externa no Comportamento dos Biomódulos' (item 7.2.5).

Os locais que apresentarem maior incidência solar contarão com biomódulos com maior abertura. Em contrapartida, nos de menor incidência serão alocados módulos mais fechados. Posteriormente, uma nova análise solar é efetuada com os biomódulos aplicados na fachada a fim de averiguar o resultado de proteção solar. Esse é o princípio de desenvolvimento. A seguir serão esclarecidos os códigos que dão suporte a análise por incidência solar.

7.3.2.1 Definição de contexto para análise

O *subcluster* D02 organiza o contexto para as análises por incidência solar (Figura 183), seja sem ou com a aplicação dos biomódulos. O primeiro passo consistiu em criar superfície plana interna ao ambiente de teste, e paralela à fachada com distância ajustável (a princípio em 20 cm). Essa superfície será utilizada como referência para conferir as análises (*output* 'D02 – Geometria para análise').

Foram concebidas duas abordagens de contexto para proceder às análises, que podem bloquear a radiação solar, são elas: '**D02 – contexto sem biomódulos**' ou '**D02 – contexto com biomódulos**'. A primeira opção considera como contexto as edificações do entorno (Edifício 1 e Edifício 5 da FAUL), as molduras da fachada e a seleção do filtro '**I04 – tipologia da edificação**' (entre a opção edificação sem pala ou com pala).

Figura 183. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D02.

Fonte: Autora (2023).

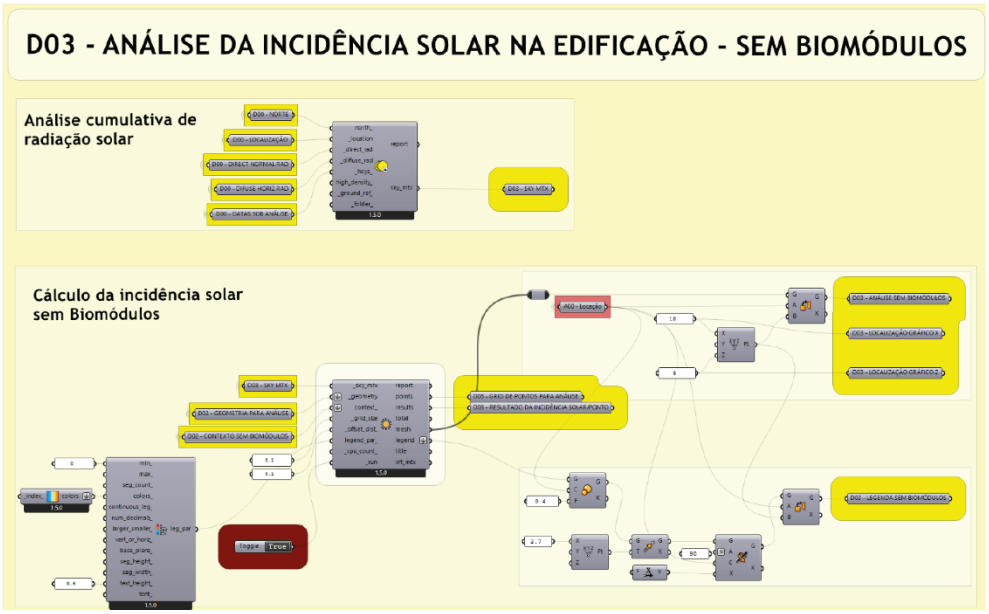
Para segunda opção, '**D02 – contexto com biomódulos**', soma-se às definições descritas para o contexto anterior, o filtro '**I04 – Redução Aleatória?**'. Tal filtro perfaz a diminuição da quantidade de biomódulos aleatoriamente e confere efeito estético à fachada (Figura 151**f**). O controle da quantidade percentual a ser reduzida é efetuado através do parâmetro customizável '**I04 – % redução aleatória**'. Para o contexto com biomódulos, adiciona-se ainda os perfis para a fixação dos biomódulos.

7.3.2.2 Análise de Incidência Solar sem Biomódulos

O *subcluster* D03 irá tratar da análise de incidência solar sem os biomódulos (Figura 184). O componente *LB Cumulative Sky Matrix* utiliza a função *gendaymtx* do *Radiance* para obter matriz com valores de radiação de secções da cúpula celeste (Ashdown & Ward, 2013; Ladybug Tools LLC, 2023). Recebe *inputs* referentes ao *subclusters* D00 como: o norte da construção, o arquivo climático .EPW de Lisboa, a radiação normal direta, a radiação horizontal difusa e o período no ano sob análise. O processamento das informações gera o *output* 'D03 – *sky_mtx*', com as informações cumulativas da cúpula celeste (um primeiro passo necessário para desenvolver as análises de radiação).

Os estudos sobre a radiação incidente podem ser usados para avaliar o impacto da orientação de um edifício no uso de energia e no tamanho do custo dos sistemas de resfriamento (Ladybug Tools LLC, 2023). Ou ainda, para estimar a energia que pode ser coletada através de sistemas fotovoltaicos (Ladybug Tools LLC, 2023).

Figura 184. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D –*Subcluster* D03.



Fonte: Autora (2023).

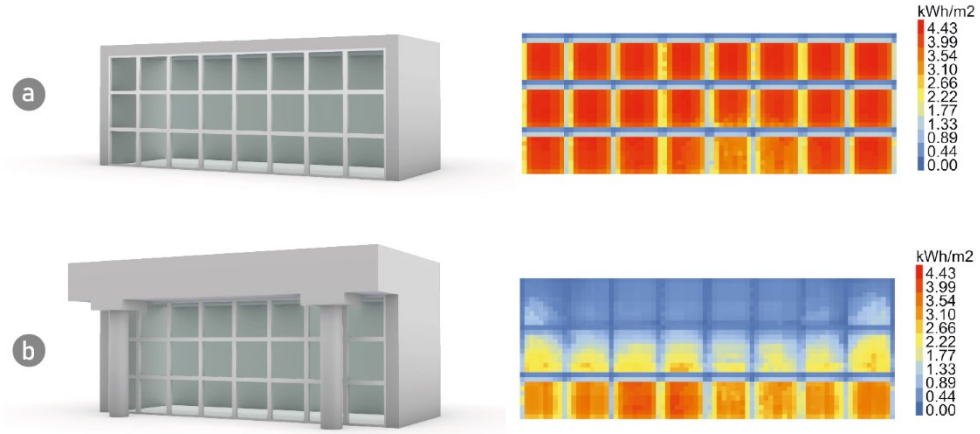
O componente *LB Incident Radiation* calcula a **radiação incidente** numa dada geometria (no caso a superfície da 'D02 – geometria para análise'). Salienta-se, no entanto, que as análises não incluem a reflexão da energia solar (Ladybug Tools LLC, 2023).

Para conferir o cálculo da incidência solar sem biomódulos foram utilizados os seguintes *inputs:* D03 – sky_mtx; D02 – geometria para análise, D02 – contexto sem

biomódulos e configurações para a legenda dos gráficos (com intervalo mínimo para incidência em zero e máximo para o que a simulação identificar).

Como *output* do *Subcluster* D03 tem-se: 'D03 – *grid* de pontos para análise'; 'D03 – Resultado da incidência solar/ponto' (uma lista de números é produzida. Cada número indica a radiação incidente cumulativa recebida por cada um dos pontos da matriz do céu em kWh/m²); 'D03 – Análise sem biomódulos' (Figura 185) (malha colorida que representa a radiação incidente cumulativa recebida pela 'D02 – geometria para análise'), e respectiva legenda que revela o kWh/m² correspondente às cores da malha.

Figura 185. Solucionar > Algoritmo: Incidência solar sem biomódulos.



Nota. Simulação para o dia 21.09, entre as 0 e 23h: a) tipologia sem pala; b) tipologia com pala. Temperatura no dia entre 18 e 26,2°C. Fonte: Autora (2023).

7.3.2.3 Análise de Incidência Solar com Biomódulos

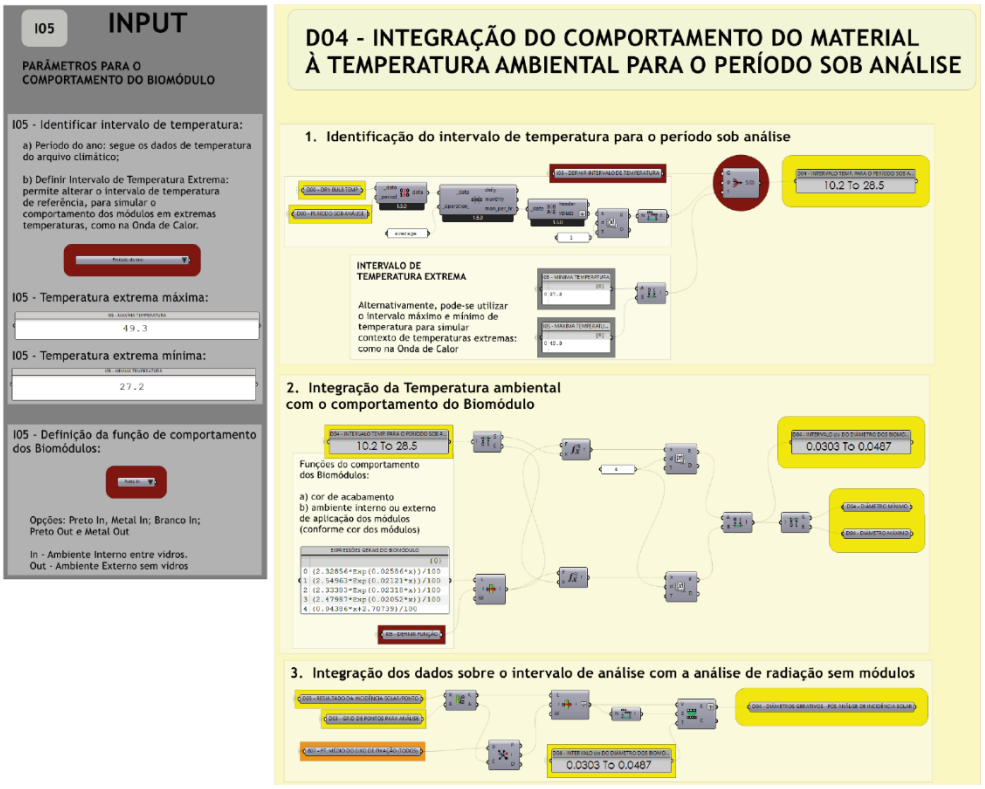
A 'Análise de Incidência solar com os Biomódulos' está descrita nos dois *subclusters* D04 e D05. O primeiro *subcluster* objetiva **integrar as funções do comportamento geral dos biomódulos à temperatura ambiental sob análise**.

Em um primeiro momento, é necessário **identificar o intervalo de temperatura ambiental** proporcionados pelo arquivo climático, em função do período e horário (dados previamente especificados no quadro de *Input* 05) (Figura 186). Alternativamente, pode-se definir o intervalo máximo e mínimo de temperatura, para simular a ocorrência de temperaturas extremas (como os dados coletados sobre a onda de calor do dia 13/07/2022, que será utilizada como referência para as simulações posteriores).

Um segundo passo consiste em **relacionar a temperatura ambiental às funções do comportamento geral dos biomódulos**. O filtro 'I05 - Definição da função de comportamento dos Biomódulos' permitirá a escolha entre as distintas equações identificadas através da AITECB, para cada uma das amostras (Preto In, Metal In, Branco In, Preto Out e Metal Out).

A opção entre o Ambiente In e o Out irá se referir à disposição dos módulos em ambiente hermeticamente fechado (entre vidros) ou não. O *output* dessa etapa algorítmica será a transposição do intervalo de temperatura ambiental para o intervalo de amplitude de movimento dos biomódulos.

Figura 186. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D04.



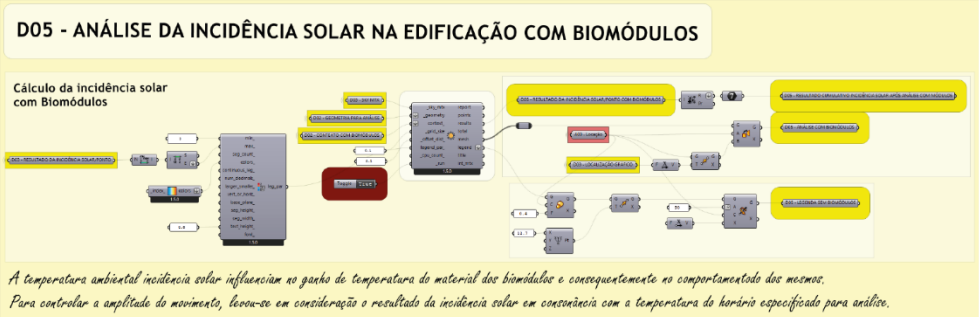
Fonte: Autora (2023).

O terceiro e último passo do *Subcluster* D04 objetiva recalcular os resultados da primeira análise de incidência solar (com os ambientes de testes sem biomódulos) em relação ao domínio de amplitude de movimento identificados.

O *output* desse *subcluster* será uma lista de dados com um diâmetro para cada um dos biomódulos presentes na fachada ('D04 – Diâmetros gerativos – pós-análise de incidência solar'). Onde houver maior incidência solar, os biomódulos estarão com maiores diâmetros. A situação contrária ocorrerá quando houver menores índices de incidência.

O *subcluster* D05 (Figura 187) objetiva realizar nova análise de incidência solar, e permitir comparação entre a fachada com e sem a disposição dos biomódulos. O D05 se assemelha ao D03, mas dessa vez os biomódulos são adicionados ao processo de simulação como contexto (*input* 'D02 – Contexto com Biomódulos'), e contam com comportamento influenciado pela lista de diâmetros gerativos identificados anteriormente.

Figura 187. Solucionar > Algoritmo: *Cluster* D – *Subcluster* D05.

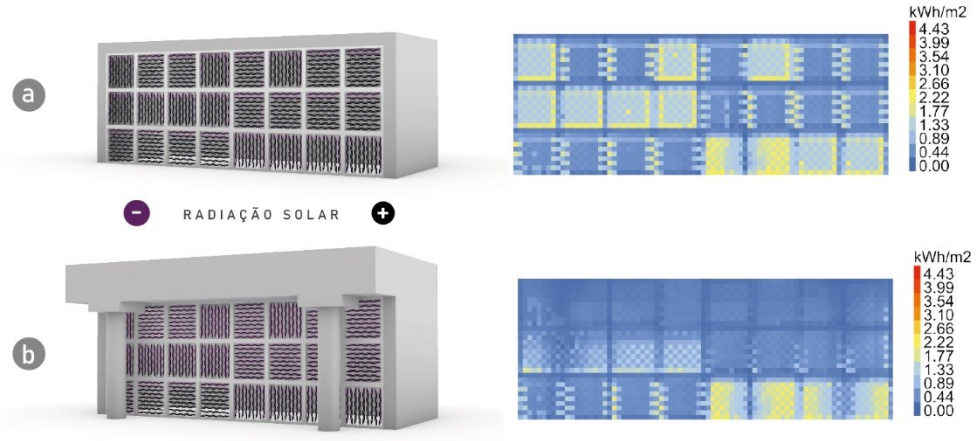


Fonte: Autora (2023).

Para manter correspondência entre as simulações sem e com biomódulos, o valor máximo da incidência solar é o alcançado pelo 'D03 – Resultado da Incidência Solar/ponto' obtido na primeira simulação sem os módulos de proteção solar (*input* do componente para legenda). Como *outputs* do *subclusters* D05 serão geradas novas versões de: 'D05 – Resultado da incidência solar/ponto com biomódulos'; 'D05 – Análise com biomódulos' (Figura 188) (malha colorida que representa a radiação incidente cumulativa recebida pela 'D02 – geometria para análise'), e respectiva legenda em kWh/m².

Desse modo, pode-se afirmar que o **comportamento dos biomódulos ocorre de modo gerativo, baseado em critérios de desempenho de incidência solar e variação de temperatura ambiental.** Para tanto, leva em conta a zona climática identificada, a definição do norte da construção, o período e horário sob análise, a temperatura de bulbo seco, a radiação normal direta e a difusa, e os resultados da primeira análise de incidência solar. Assim como, o intervalo de temperatura identificado e o resultado da incidência solar da fachada sem biomódulos.

Figura 188. Solucionar > Algoritmo: Incidência solar com biomódulos.



Nota. Simulação para o dia 21.09, entre as 0 e 23h: a) tipologia sem pala; b) tipologia com pala. Temperatura no dia entre 18 e 26.2°C. Diâmetro entre 3,71 e 5,29 cm. Elementos modulares de 1 x 1x 0,08 m. Em cada elemento constam 72 unidades de biomódulos. Fonte: Autora (2023).

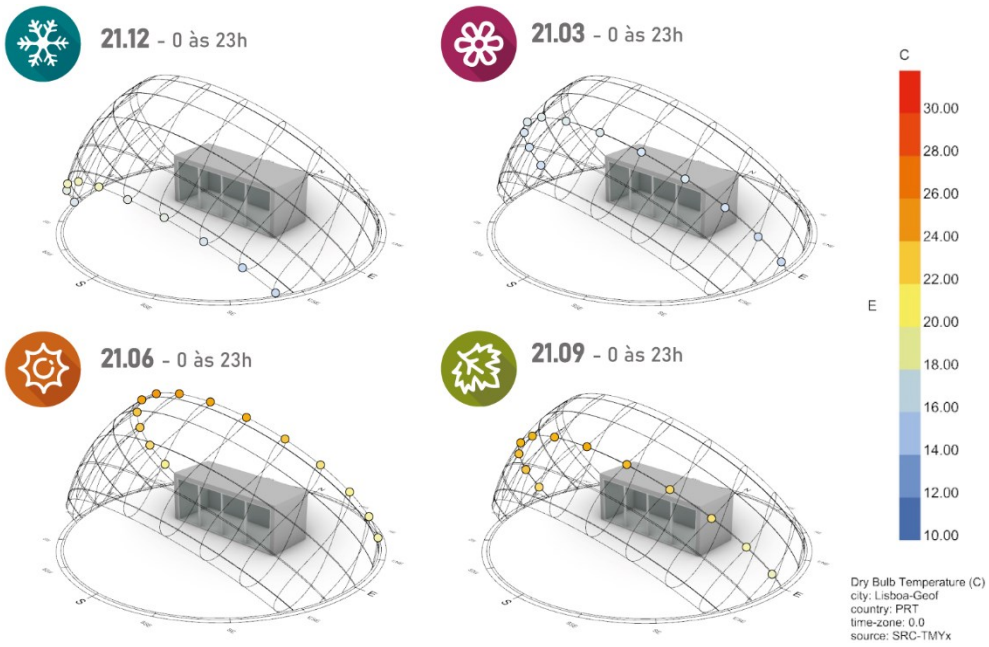
7.4. Simulação do Comportamento dos Biomódulos

O presente tópico objetiva **simular o comportamento dos biomódulos em distintos períodos do ano e horários do dia**, tendo em vista o emprego do 'Algoritmo para Simulação por Incidência Solar'. E assim, **avaliar a proteção solar dos biomódulos na fachada**. Todas as simulações levaram em conta os dados climáticos de Lisboa (climate.onebuilding.org, 2021).

7.4.1 Procedimentos metodológicos

Os dias selecionados para se desenvolver as avaliações de modo preditivo correspondem a **datas próximas aos dias da virada de estação por critérios astronômicos** (21/12 (equinócio de inverno); 21/03 (equinócio de primavera); 21/06 (solstício de verão); 21/09 (solstício de outono)) (Figura 189).

Figura 189. Solucionar > Geometria solar das datas de referência.



Fonte: Autora (2023).

Para os dias selecionados, relembra-se que os critérios astronômicos correspondem a diferentes distâncias entre a Terra e o Sol, que proporcionam a variação de quantidade de energia solar no planeta. O solstício de verão apresentará o dia mais longo do ano, enquanto o de inverno será o mais curto. Mas isso não significa dizer que serão identificadas relações de temperatura condizentes com o que racionalmente se entende pelas estações.

Como afirmado por Lopes et al. (2020), em Lisboa há uma mudança no ciclo anual da temperatura com a ampliação do período mais quente. Também está a acontecer caraterísticas térmicas semelhantes para períodos do ano que pertencem a estações astronômicas distintas (ver item 2.3.3.1). Salienta-se ainda que o arquivo climático de referência sintetiza os dados de Lisboa entre 2007 e 2021 (climate.onebuilding.org, 2021). Nesse sentido, a Tabela 41 explicita síntese dos dados coletados nas simulações referente às datas que serão utilizadas como referência. O solstício de verão, por exemplo, apresenta intervalo de temperatura ligeiramente superior ao equinócio de outono.

Tabela 41. Solucionar > Dias dos ensaios para simulação.

DATAS DE REFERÊNCIA		TEMPERATURA (°C)		INCIDÊNCIA SOLAR (kWh/m²)
		MÍNIMA	MÁXIMA	
21/12	solstício de inverno	11,7	18,3	6.203
21/03	equinócio de primavera	11,1	16,7	8.525
21/06	solstício de verão	17	27,5	4.271
21/09	equinócio de outono	18	26,2	9.234

Fonte: Autora (2023).

Conforme Lechner (2009) havia mencionado, todas as orientações exceto a sul recebem a máxima radiação solar no verão. Assim, os maiores índices de incidência solar na fachada sul pertencem às datas por critério astronômicos de outono, seguido da primavera, do inverno, e do verão respectivamente. Ressalta-se que a quantidade de kWh/m² está relacionada à incidência nos envidraçados verticais. Se as análises fossem realizadas em relação ao plano horizonte que contém o ambiente de teste, a estação do verão obteria o maior nível de incidência. A princípio serão desenvolvidas simulações entre as zero e vinte e três horas. Posteriormente serão explicitadas simulações para os horários entre as oito e nove horas da manhã, e entre as treze e quatorze horas da tarde (Tabela 42).

Tabela 42. Solucionar > Horários dos ensaios para simulação.

DATAS DE REFERÊNCIA		HORÁRIO	TEMPERATURA (°C)		INCIDÊNCIA SOLAR (kWh/m²)
			MÍNIMA	MÁXIMA	
21/12	solstício de inverno	8 às 9 h.	13,6	13,8	1.155
		13 às 14h.	18,3	18,3	968
21/03	equinócio de primavera	8 às 9 h.	14,0	14,5	1.102
		13 às 14h.	16,2	16,7	2.444
21/06	solstício de verão	8 às 9 h.	21	22	484
		13 às 14h.	27,1	27,5	1.060
21/09	equinócio de outono	8 às 9 h.	18,8	22,1	1.675
		13 às 14h.	25,5	25,7	2.261

Fonte: Autora (2023).

Desse modo, tenciona-se **demonstrar análises em dias do ano, como também para horários específicos** (que contemplem temperaturas relativamente baixas ou horários quentes do dia).

No mais, para **simular temperaturas extremas** optou-se por adotar os intervalos de temperatura ambiental identificados durante coleta de dados de onda de calor,

realizada no dia 13 de julho de 2022 (Tabela 43). Os dados foram registrados por meio de infraestrutura do experimento AITECB (termômetro externo que estava exposto às intempéries ambientais).

Tabela 43. Solucionar > Temperaturas para simulação em temperaturas extremas.

DATA DE REFERÊNCIA		HORÁRIO	TEMPERATURA (°C)		INCIDÊNCIA SOLAR (kWh/m²)
			MÍNIMA	MÁXIMA	
13/07	onda de calor	8 às 20h.	27,2	49,9	4.390
		8 às 9 h.	27,2	29,5	532
		13 às 14h.	41,5	48,8	1.108

Fonte: Autora (2023).

Os dados de incidência solar, no entanto, corresponderão aos dados previstos pelo arquivo climático para o dia e horários do dia referência. Acredita-se ser possível **simular e revelar o comportamento dos biomódulos em diferentes condições climáticas, desde amenas às extremas temperaturas.**

As simulações foram desenvolvidas em relação às duas tipologias do ambiente de teste (edifício sem pala de sombreamento e com pala) supracitadas anteriormente (item 6.2). As simulações admitem situações sem a aplicação dos biomódulos na fachada sul e com a aplicação. A orientação da posição dos biomódulos na fachada poderá ser vertical ou horizontal. Consequentemente, existem seis opções para simular, sendo duas sem e quatro com biomódulos. A Figura 190 sintetiza os ambientes para as análises.

Figura 190. Solucionar > Opções do ambiente de teste para simulação.

Fonte: Autora (2023).

Esses ambientes foram levados em consideração durante todas as avaliações de incidência solar (Figura 191 à Figura 205). O contexto sem pala representa o contexto

com máxima incidência solar (contexto extremo para simulações). O cenário com pala, por sua vez, objetiva avaliar a disposição dos biomódulos em consonância com a implementação de sistema passivo de sombreamento. A pala foi amplamente utilizada nas fachadas sul e norte da FAUL[75] (local de referência para o ambiente de teste). Ressalta-se, no entanto, que não faz parte do âmbito da presente análise avaliar a eficácia da pala e sim os níveis de proteção proporcionados pela disposição dos biomódulos.

Para a **avalição de incidência solar** propriamente, a fachada do ambiente de teste foi subdividida em quatro painéis de 2 x 3 m, com duas camadas de vidro de 0,6 mm. As molduras em perfis de alumínio possuíam 8 cm de largura. A configuração em quatro painéis foi utilizada com a intenção de maximizar a área de envidraçados do ambiente de teste, de modo a minimizar a interferência das molduras nas simulações por incidência solar. Pois, o principal objetivo das simulações reside em perceber o nível de proteção solar dos biomódulos, diante dos respectivos comportamentos gerativos em diferentes condições climáticas. A distância útil entre vidros é de 5,4 cm (espaço destinado à aplicação dos perfis de fixação com os biomódulos bimetais).

Os módulos cinéticos utilizados não dispuseram de recorte central e raio de *fillet* nas extremidades (processo referentes ao *subcluster* B10). Assim, os Biomódulos Bimetais utilizados nas simulações correspondem a superfícies triangulares na dimensão de 9,4 x 18,8 cm. Foram necessários 2.088 biomódulos para a versão de biomódulos na horizontal e 2.128 unidades para o da vertical.

No que tange ao **acabamento de biomódulo** a ser simulado, ratifica-se que o 'Algoritmo de Simulação por Incidência Solar' permite simular qualquer um dos comportamentos das amostras do AITECB (visto que as funções de comportamento geral dos biomódulos foram integradas ao algoritmo). Contudo, **optou-se por utilizar nas simulações os biomódulos que possuem o melhor desempenho térmico. No caso, o comportamento dos biomódulos Preto In** (acabamento superficial preto, alocado em ambiente hermeticamente fechado) (maiores detalhes, ver item 0). Assim, todas as análises utilizaram essa tipologia de biomódulo de modo a permitir a comparação entre os dados.

Cada **avaliação por incidência solar** apresentará seis malhas coloridas que identificam os níveis de radiação incidente cumulativa para a superfície da fachada sul, do ambiente de teste. Cada malha refere-se a uma das opções evidenciadas na Figura 190. Um exemplo das avaliações consta na Figura 191. Tal imagem explicita

[75] A quantidade de painéis da fachada utilizados na FAUL corresponde a aproximadamente 1 x 1 m, sendo três linhas por oito colunas (Figura 37 e Figura 185).

a máxima situação de incidência (fachada sem pala e sem biomódulos). A legenda do lado direito revela o kWh/m² correspondente às cores da malha, para o dia e horário sob análise.

Na posição inferior direita das malhas são explicitadas as quantidades restantes em kWh/m² para as situações simuladas (sem ou com biomódulos). Entre parênteses está a percentagem de proteção dos biomódulos em relação à tipologia do ambiente de teste sob análise. No mais, no lado esquerdo da imagem sempre serão identificados o intervalo de temperatura referente ao dia e horários simulados, e a amplitude dos biomódulos.

Salienta-se ainda que as análises comparativas entre as diferentes imagens simuladas de distintas estações (exemplo entre Figura 191 e Figura 192), levando-se em consideração a escala cromática por si só, não serão compatíveis. Pois, cada malha e legenda exibe correspondência com os dados referentes a análise em questão. Portanto, recomenda-se sempre ter atenção à escala numérica das legendas cromáticas, para perceber as distintas relações de intensidade de incidência solar entre as avaliações.

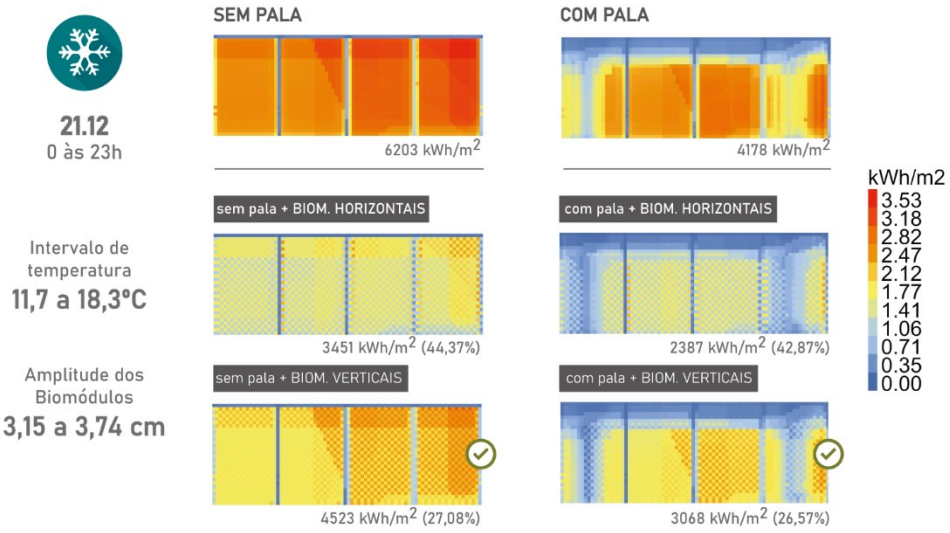
7.4.2 Simulações para dias de referência

Para efeitos de didáticos, optou-se por iniciar a disposição das simulações a partir da data referente a dezembro, seguir os dias selecionados pela ordem das estações do ano, e por fim apresentar a análise referente à onda de calor. Esses primeiros estudos foram realizados para o período entre as 00 e 23h, horário padrão simulado pelas ferramentas Ladybug Tools LLC (2023), que contempla todos os horários do dia.

Ressalta-se ainda que as análises que serão explicitadas serão sempre em função da tipologia de referência sob análise (opção 1: sem pala; opção 2: com pala). Ou seja, o efeito de proteção para tipologia sem pala ou o efeito para a com pala. Isso quer dizer que os índices de incidência solar para cada coluna de malhas serão sempre referentes às tipologias sem os biomódulos, e estão alocadas na primeira linha de malhas de cada análise.

A primeira **simulação referente ao dia 21 de dezembro** (inverno) (Figura 191) contempla o intervalo de temperatura entre 11,7 e 18,3°C, e amplitude dos diâmetros dos biomódulos entre 3,15 e 3,74 cm. O ambiente de teste sem pala recebeu uma incidência solar de 6.203 kWh/m². Os biomódulos na posição vertical sem pala proporcionaram uma proteção de 27,08%, enquanto os horizontais de 44,37%. Na versão do ambiente de teste com pala, os biomódulos verticais protegeram 26,57% e os horizontais 42,87% respectivamente.

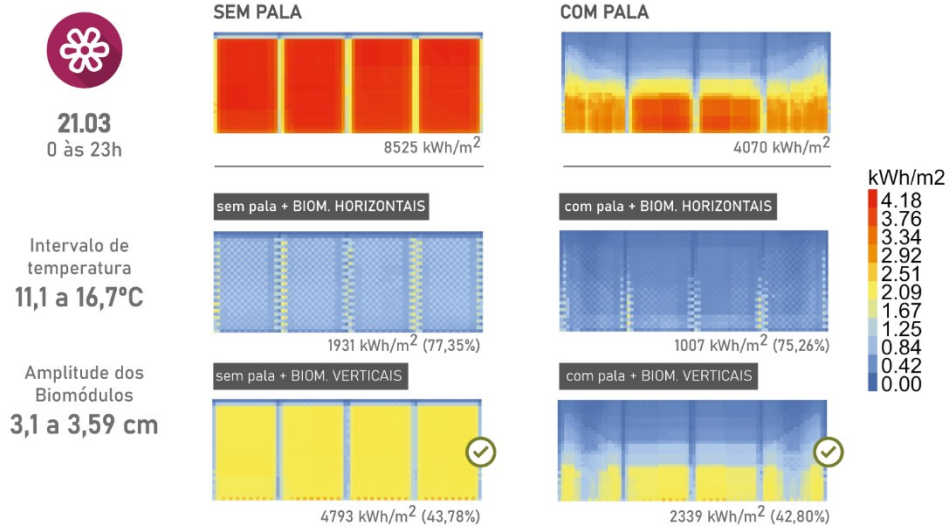
Figura 191. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.12 (0 às 23 h).



Fonte: Autora (2023).

Já na **simulação para o dia 21 de março** (primavera) (Figura 192), o ambiente de teste sem pala recebeu uma incidência solar de 8.525 kWh/m², e contou com intervalos de temperatura entre 11,1 e 16,7°C. Os diâmetros dos módulos cinéticos variaram entre 3,1 e 3,59 cm. Os biomódulos na posição horizontal sem pala obtiveram uma proteção de 77,35%, enquanto os verticais de 43,78%. Na versão do ambiente de teste com pala, os biomódulos horizontais protegeram 75,26% e o verticais 42,80% respectivamente.

Figura 192. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.03 (0 às 23 h).

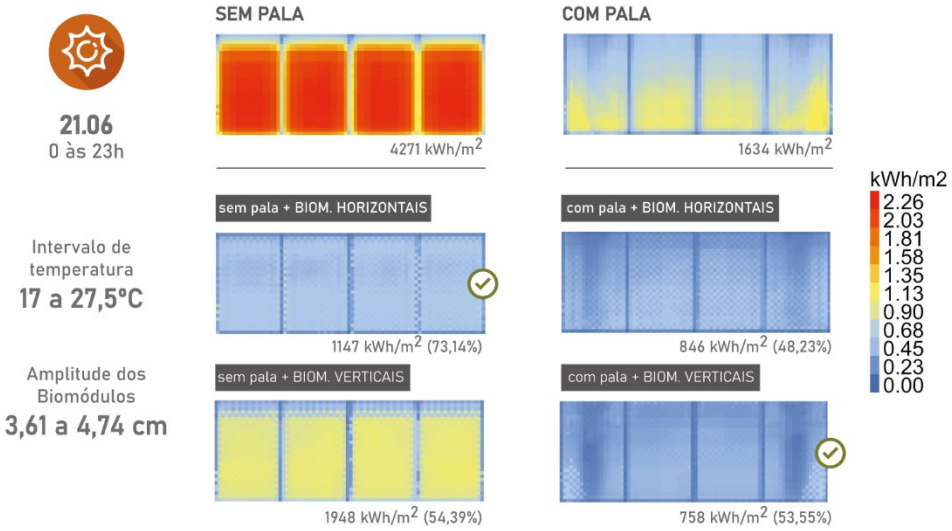


Fonte: Autora (2023).

A **simulação referente ao dia 21 de junho** (verão) (Figura 193), por sua vez, demonstrou um intervalo de temperatura entre 17 e 27,5°C, com diâmetros dos

módulos entre 3,61 e 4,74 cm. A incidência solar total identificada na fachada foi de 4.271 kWh/m². Para a tipologia sem pala, os biomódulos horizontais tiveram uma proteção de 73,14%, e a vertical de 54,39%. Com relação às edificações com pala, percebeu-se que as verticais dispuseram de maior nível de proteção (53,55%) do que as horizontais (48,23%), muito embora as diferenças sejam pouco mais de 5%. Nessa situação almeja-se evitar o excesso de exposição solar.

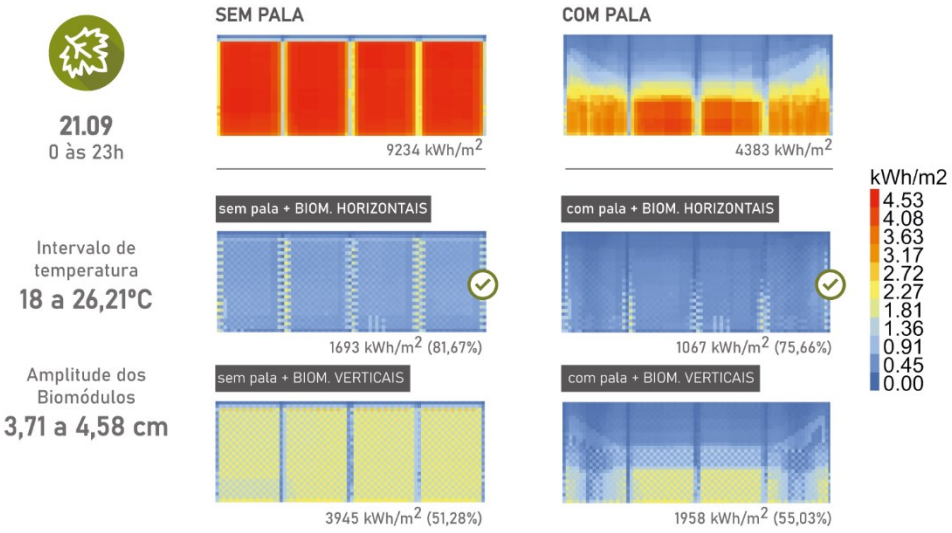
Figura 193. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.06 (0 às 23 h).



Fonte: Autora (2023).

A **simulação para o dia 21 de setembro** (outono) contou com o maior índice de exposição solar identificado nos estudos (9.234 kWh/m²) (Figura 194). O intervalo de temperatura variou entre 18 e 26,21°C, e amplitude dos biomódulos entre 3,71 e 4,58 cm. Na versão sem pala, os biomódulos horizontais admitiram uma proteção de 81,67%, e os verticais de 57,28%. Para a tipologia com pala, a versão horizontal também apresentou o melhor desempenho (75,66%) do que a vertical (55,03%).

Figura 194. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 21.09 (0 às 23 h).

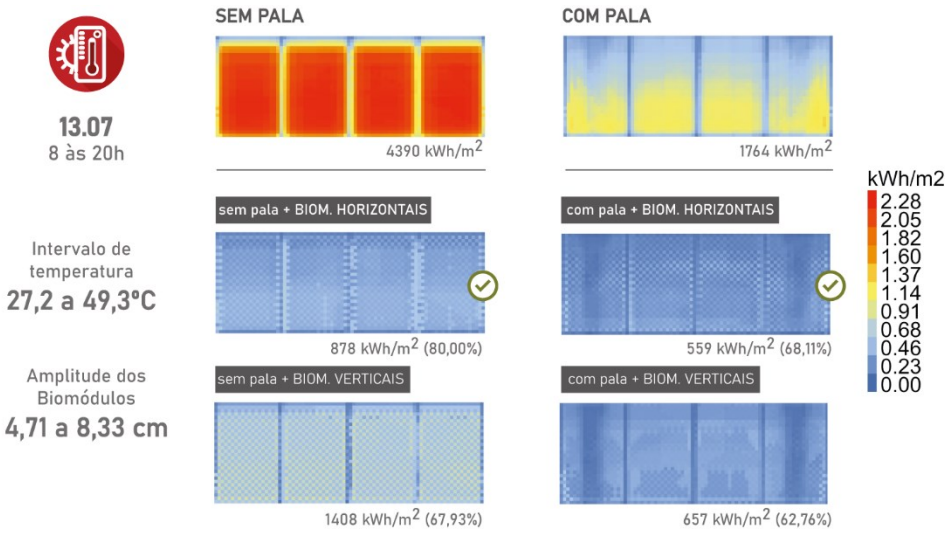


Fonte: Autora (2023).

A próxima **simulação contempla a ocorrência de temperatura extrema**. Como mencionado anteriormente, os dados de horário e temperatura ambiental referem-se aos dados coletados durante a onda de calor do dia 13 de julho de 2022. Nesse dia, o termômetro ao Sol variou entre 27,2 e 49,3 ˚C (Figura 195). Isso resultou na variação do comportamento dos biomódulos entre 4,71 e 8,33cm.

No que tange ao comportamento dos biomódulos, a edificação sem pala com os biomódulos horizontais teve uma proteção de 80%, enquanto os verticais proporcionaram 67,93%. Já a tipologia com pala, dispôs de 68,11% de proteção quando sujeito aos biomódulos na posição horizontal e 62,76% na vertical.

Figura 195. Avaliar > Simulação por incidência solar - dia 13.07.2022 (8 às 20 h).



Fonte: Autora (2023).

As simulações até então desenvolvidas permitem inferir que a aplicação dos biomódulos em uma tipologia sem pala podem proporcionar proteção entre 27,08% e 67,93% para a disposição dos biomódulos na vertical, e entre 44,37% e 81,67% na horizontal (Tabela 44). Quando levado em consideração a tipologia com pala, a disposição vertical variou entre 26,57% e 62,76%, enquanto a horizontal contemplou proteção entre 42,87% e 75,66%.

Os intervalos de temperatura identificados nas análises do dia 21 de dezembro e 21 de março compreenderam baixas temperaturas. Nessas situações em que há ocorrência de **temperaturas amenas almeja-se maximizar a exposição solar do ambiente construído**. Por esse motivo as versões verticais foram destacadas como melhor opção. No dia 21 de março, a versão sem pala com biomódulos verticais teve exposição solar superior (4.796 kWh/m²) a versão com pala sem biomódulos (4.070 kWh/m²). Situação semelhante foi identificada na simulação do dia 21 de dezembro. Quando os biomódulos são aplicados na horizontal houve perda de exposição solar.

Tabela 44. Avaliar > Síntese de índices de proteção das simulações.

DIA	**21.12**		**21.03**		**21.06**		**21.09**		**13.07**	
TEMP.	11.7 a 18.3 ˚C		11.1 a 16.7 ˚C		17 a 27.5 ˚C		18 a 26.2 ˚C		27.2 a 49.3 ˚C	
TIPOL.	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)
Sem Pala	44,37	**27,08**	77,35	**43,78**	**73,14**	54,39	**81,67**	57,28	**80,00**	67,93
Com Pala	42,87	**26,57**	75,26	**42,80**	48,23	**53,55**	**75,66**	55,03	**68,11**	62,76

Nota. TEMP.= Intervalo de temperatura. TIPOL: = Tipologia da edificação. H. = Posição Horizontal; V. = Posição Vertical. Em negrito são destacados os resultados relevantes. Fonte: Autora (2023).

Contudo, ao se avaliar os **níveis de proteção solar em situações de elevada temperatura**, seja para o dia 21 de junho, 21 de setembro ou 13 de julho, majoritariamente as versões horizontais proporcionaram desempenho superior às verticais. Isso pode ser observado ao se avaliar os resultados referentes à tipologia sem pala. A análise dos dados permite inferir ainda que a versão horizontal dos biomódulos proporcionam proteção solar superior à edificação com pala, nos três dias supracitados.

Em síntese, as simulações para os dias de referência indicaram que a **aplicação dos biomódulos na horizontal apresentam maiores níveis de proteção, enquanto os da vertical proporcionam maior adaptabilidade aos distintos intervalos de temperatura ambientais.**

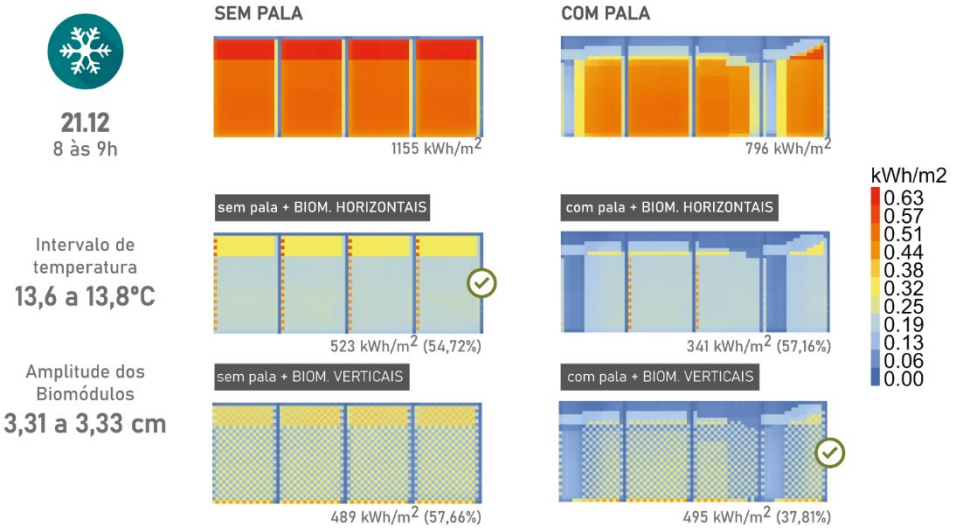
As simulações até então evidenciadas contemplaram intervalos de temperatura que compreendem as amplitudes térmicas diárias. Como visto anteriormente, a disposição dos biomódulos na fachada em diferentes diâmetros acontece através da correlação direta entre os intervalos de temperatura identificados e os níveis de incidência solar. Portanto, os próximos estudos evidenciarão intervalos de temperatura restritos a horários de análise, no intuito de demonstrar o comportamento dos biomódulos para contextos climáticos pontuais, em que não necessariamente há a ocorrência de elevadas amplitudes térmicas.

7.4.3 Simulações para horários específicos

O presente tópico objetiva desenvolver simulações entre as oito e nove horas da manhã, e entre as treze e quatorze horas da tarde. Tenciona-se desse modo, **avaliar o comportamento dos biomódulos para contextos térmicos homogêneos, sujeitos a menores amplitudes térmicas**.

Entre as **oito e nove horas do dia 21 de dezembro** (inverno) (Figura 196), a simulação identificou uma incidência total de 1.155 kWh/m². A temperatura variou entre 13,6 e 13,8°C. Os biomódulos na posição horizontal favoreceram uma proteção de 54,72%, enquanto os da vertical de 57,66%. Quando levada em conta a edificação com pala, a versão vertical protegeu 37,81% e a horizontal 57,16%. Nesse período, os diâmetros dos biomódulos variaram entre 3,31 e 3,33 cm, que contempla dimensões próximas às mínimas identificadas na AITECB.

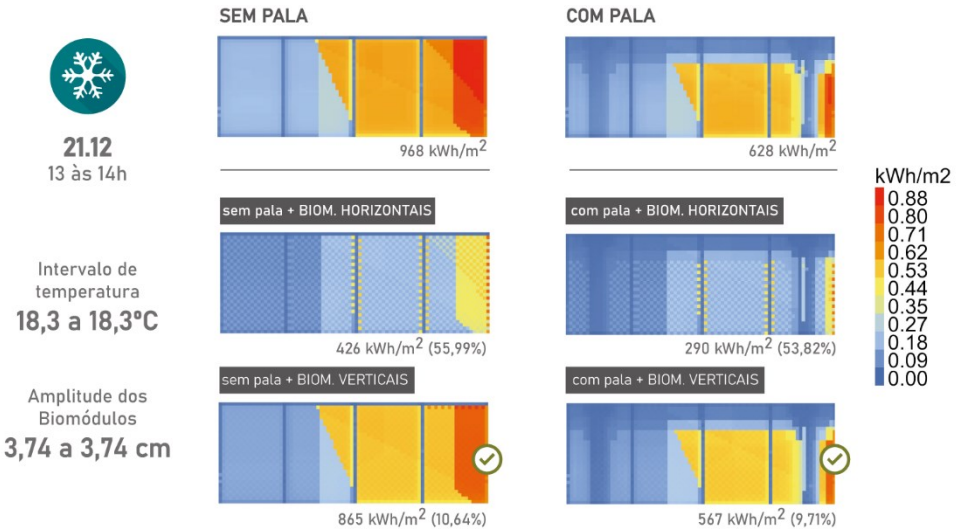
Figura 196. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.12 (8 às 9h.)



Fonte: Autora (2023).

No horário entre as **treze e quatorze horas do dia 21 de dezembro** (Figura 197) foi constatada uma menor quantidade de radiação incidente (968 kWh/m²) do que pela manhã. Houve o sombreamento na fachada proporcionado pelo Edifício 1, da FAUL. A temperatura ambiental esteve em 18,3°C. Como não houve variação de temperatura, todos os biomódulos estiveram com o mesmo diâmetro de 3,74 cm.

Figura 197. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.12 (13 às 14h.)



Fonte: Autora (2023).

A edificação sem pala aliada aos biomódulos na vertical exibiu menor nível de proteção (10,64%), enquanto a versão com biomódulos na horizontal teve 55,99%. A tipologia com pala, por sua vez, protegeu 9,71% quando os biomódulos estavam na vertical e 53,82% quando posicionados na horizontal.

Pode-se afirmar que nas primeiras horas do dia 21 de dezembro houve uma perda de ganho solar quando se compara a disposição vertical dos biomódulos (489 kWh/m²) com a tipologia com pala e sem biomódulos (796 kWh/m²) (Figura 196). Contudo, entre as treze quatorze horas a versão vertical superou os níveis de exposição solares (865 kWh/m²) da versão com pala sob análise (628 kWh/m²) (Figura 197).

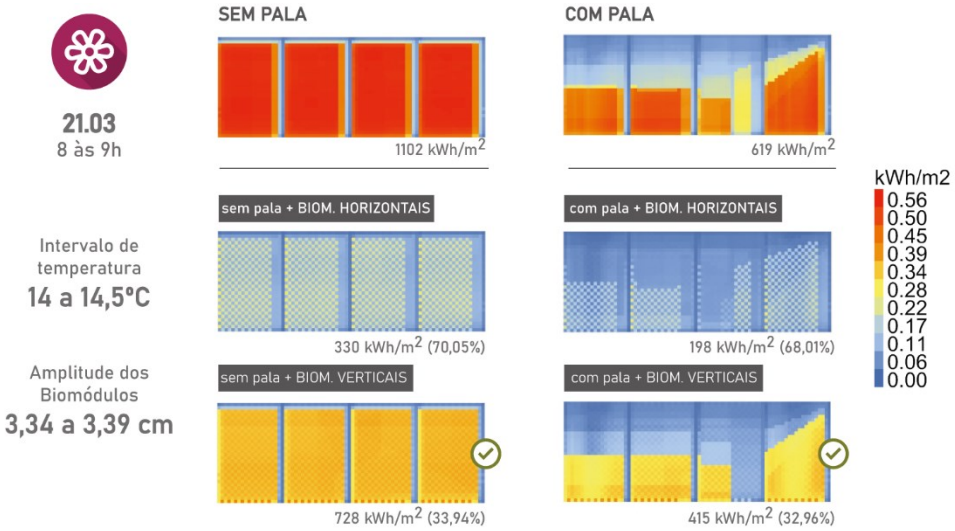
Tem-se ciência de que é necessário maximizar a radiação solar em baixas temperaturas. Apesar dos biomódulos verticais terem proporcionado tal efeito nos horários mais quentes do dia 21 de dezembro, a mesma situação não é vislumbrada no período do amanhecer.

A **simulação para a manhã do dia 21 de março** (primavera) (Figura 198) identificou uma incidência solar em 1.102 kWh/m², entre as oito e nove horas da manhã. A temperatura ambiental é amena (variou entre 14 e 14,5°C), e os diâmetros oscilaram

entre 3,34 cm e 3,39 cm. Para esse intervalo de temperatura, também se almeja maximizar a exposição solar para promover ganhos solares ao espaço construído.

As versões verticais apresentaram menores níveis de proteção. Já as horizontais bloquearam em demasia a radiação solar. Por exemplo, a versão vertical sem pala protegeu 33,94%, e a horizontal 70,05%. Já a com pala e os biomódulos na posição vertical foi de 32,96%, enquanto a horizontal de 68,01%. Mais uma vez, se observa que a versão vertical assegurou maiores níveis de ganho solares para a edificação.

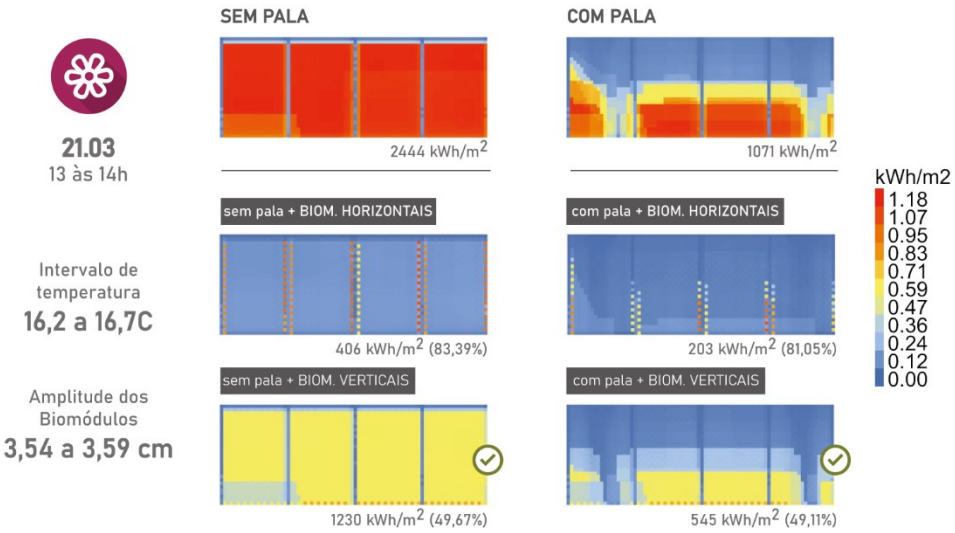
Figura 198. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.03 (8 às 9h.)



Fonte: Autora (2023).

Circunstâncias de proteção semelhantes foram identificadas para a **simulação entre as treze e quatorze horas** (Figura 199). Esse período contou com incidência solar na fachada mais que o dobro da incidência da manhã. (2.444 kWh/m²). As temperaturas continuaram a ser amenas (entre 16,2 e 16,7°C).

Figura 199. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.03 (13 às 14h.)



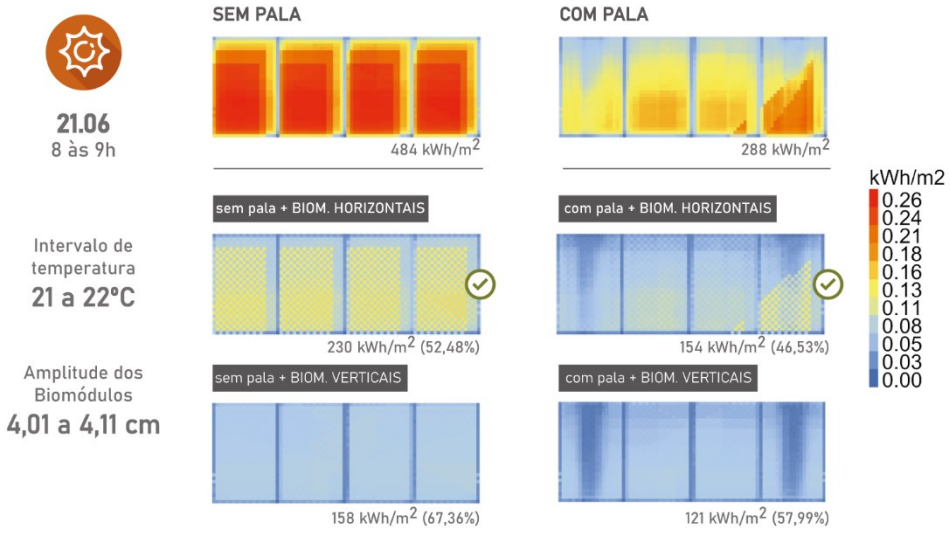
Fonte: Autora (2023).

Os biomódulos verticais com edificação sem pala asseguraram uma proteção de 49,67% e os horizontais de 83,39%. A versão com pala, por sua vez, possibilitou 49,11% para os módulos verticais, e 81,05% quando posicionados na horizontal. Deve-se avaliar se os níveis de proteção desempenhados pela versão horizontal serão adversos nas estações com baixa temperaturas.

Como também foi observado na análise de 21 de dezembro, os resultados referentes a simulação para a tarde do dia 21 de março também proporcionaram maiores níveis de exposição solares. Pois, a versão sem pala com biomódulos verticais teve 1.230 kWh/m² de radiação, enquanto a com pala e sem biomódulos foi de 1.071 kWh/m².

No que tange à primeira **simulação do dia 21 de junho** (verão) (Figura 200), a incidência solar direta na fachada foi identificada em 484 kWh/m². As temperaturas variaram entre 21 e 22°C, e os diâmetros entre 4,01 e 4,11 cm. Nessa análise, os biomódulos horizontais proporcionaram maiores níveis de exposição solares do que os verticais. Situação contrária até então ao que fora verificado. A opção sem pala somado aos biomódulos horizontais obteve índice de proteção de 52,48% e com biomódulos verticais de 67,36%. Já tipologia com pala com biomódulos horizontais proporcionou 46,53% de proteção e a com os módulos verticais de 57,99%. Contudo, ambas as orientações, dispuseram de proteções superiores à tipologia de fachada com pala e sem biomódulos.

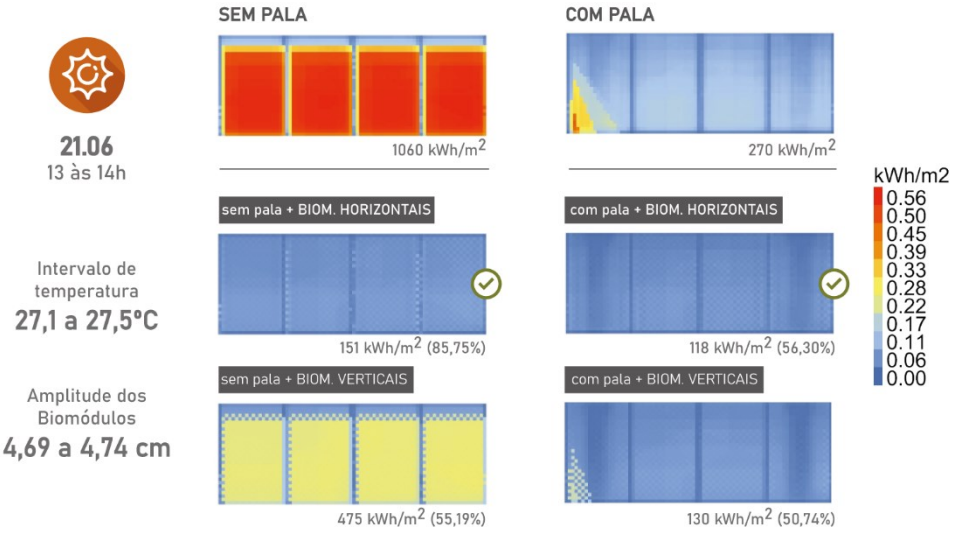
Figura 200. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.06 (8 às 9h.)



Fonte: Autora (2023).

Para o período entre as treze e quatorze horas (Figura 201) ocorreram elevadas temperaturas (27,1 a 27,5 °C). A incidência na fachada esteve em 1.060 kWh/m² (maior que o dobro da manhã). E os diâmetros do biomódulos variaram entre 4,69 e 4,74 cm. A Figura 201 evidencia que a tipologia sem pala junto com os biomódulos horizontais assegurou proteção de 85,75%, enquanto a versão com módulos verticais foi de 55,19%. Já a versão com pala e biomódulos horizontais protegeu 56,30% e a com módulos verticais foi de 50,74%.

Figura 201. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.06 (13 às 14h.)

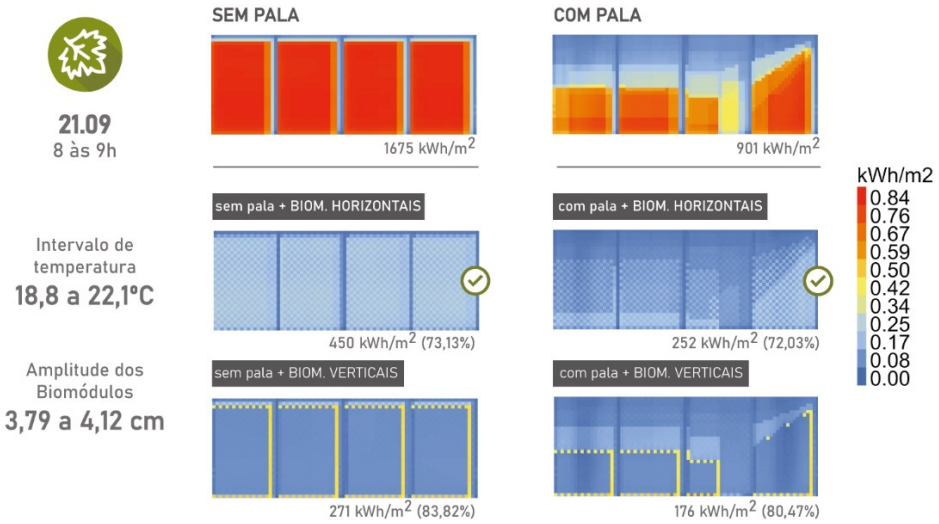


Fonte: Autora (2023).

Para tal cenário, recomenda-se **minimizar os ganhos térmicos de radiação**. Os biomódulos na posição horizontal resultam em desempenho superior, quando sujeito a elevadas temperaturas.

A **simulação para o dia 21 de setembro** (outono), por sua vez, exibe uma incidência solar direta em 1.675 kWh/m², entre as oito e nove horas da manhã (Figura 202). As temperaturas oscilaram entre 18,8 e 22,1°C, e os diâmetros entre 3,79 e 4,12 cm. A tipologia sem pala com biomódulos horizontais possibilitou maior exposição solar (73,13%) do que a vertical (83,82%).

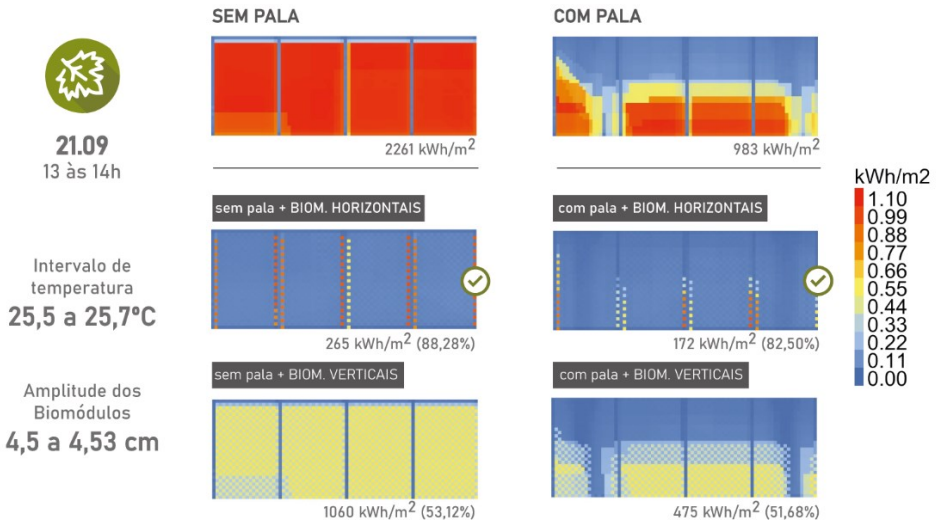
Figura 202. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.09 (8 às 9h.)



Fonte: Autora (2023).

Entre as treze e quatorze horas houve a ocorrência de temperaturas mais elevadas que 25°C (Figura 203). A incidência solar para esse período foi cerca de 26% superior à da manhã (2.261 kWh/m²). Os biomódulos horizontais revelaram melhor desempenho para o bloqueio da exposição solar, seja com relação à versão vertical ou aos resultados obtidos com a tipologia com pala sem biomódulos. Os diâmetros variaram entre 4,5 e 4,53 cm.

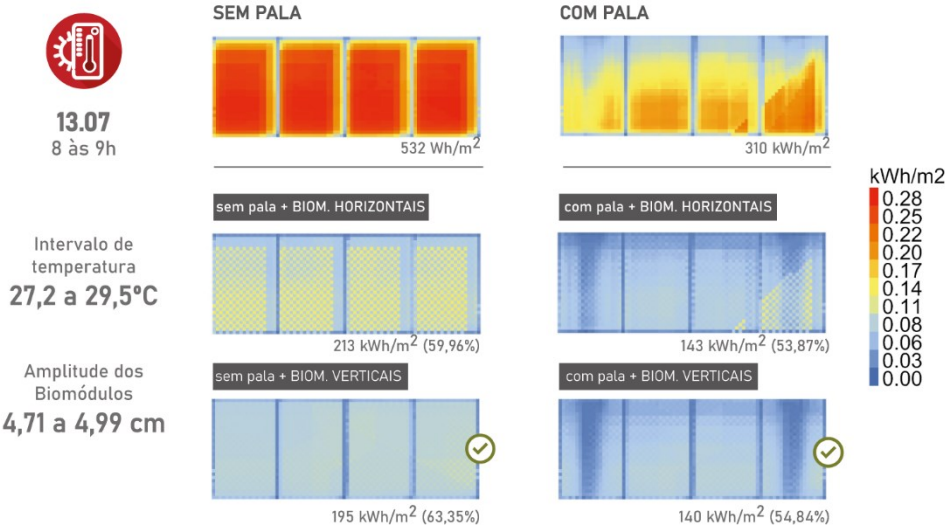
Figura 203. Avaliar > Simulação por incidência solar - 21.09 (13 às 14h.)



Fonte: Autora (2023).

As próximas simulações trarão à tona **temperaturas extremas referentes à análise do 13 de julho de 2022** (onda de calor). Entre as oito e nove horas da manhã, o intervalo de temperatura identificado foi entre 27,2 e 29,5 °C (Figura 204). Os diâmetros dos biomódulos variaram entre 4,71 e 4,99 cm. A disposição dos biomódulos na vertical proporcionou melhores resultados que a horizontal, seja para a tipologia sem ou com pala.

Figura 204. Avaliar > Simulação por incidência solar – 13.07.2022 (8 às 9h.)

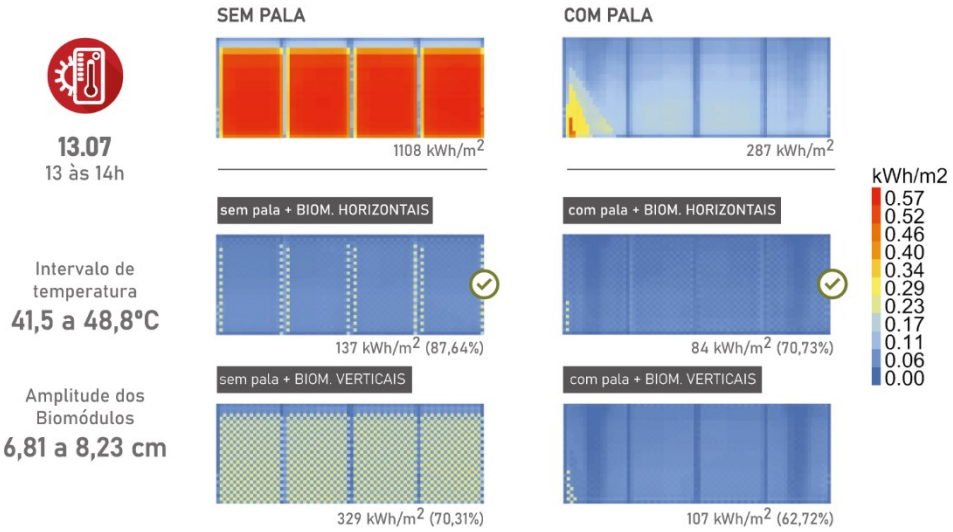


Fonte: Autora (2023).

O período entre as treze e quatorze horas evidencia elevadas temperaturas, entre 41,5 e 48,8°C. Consequentemente, os biomódulos obtiveram acentuadas aberturas

(de 6,81 a 8,23 cm). Nesse cenário, a disposição dos biomódulos na horizontal viabilizou maiores níveis de proteção (seja para tipologia sem ou com pala).

Figura 205. Avaliar > Simulação por incidência solar - 13.07.2022 (13 às 14h.)



Fonte: Autora (2023).

A Tabela 45 sintetiza os intervalos de temperatura identificados entre as oito e nove horas da manhã, e respectivos índices de proteção para as aplicações do biomódulos na horizontal ou vertical. No que se refere à tipologia sem pala, os biomódulos na posição horizontal variam a proteção entre 52,48 e 73,13%. Os verticais entre 33,94 e 83,82%. Nas simulações com pala, a proteção horizontal variou entre 46,53 e 72,03%, e a vertical entre 32,96 e 80,47% respectivamente.

Tabela 45. Avaliar > Síntese de índices de proteção > entre as 8 e 9h.

DIA	**21.12**		**21.03**		**21.06**		**21.09**		**13.07**	
TEMP.	13,6 a 13,8 ˚C		14 a 14,5 ˚C		21 a 22 ˚C		18,8 a 22,1˚C		27,2 a 29,5 ˚C	
TIPOL.	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)
Sem Pala	**54,72**	57,66	70,05	**33,94**	**52,48**	67,36	**73,13**	83.82	59,96	**63,35**
Com Pala	57,16	**37,81**	68,01	**32,96**	**46,53**	57,99	**72,03**	80.47	53,87	**54,84**

Nota. TEMP.= Intervalo de temperatura. TIPOL: = Tipologia da edificação. H. = Posição Horizontal; V. = Posição Vertical. Em negrito são destacados os resultados relevantes. Fonte: Autora (2023).

Já a Tabela 46 sumariza os dados referentes às simulações entre as treze e quatorze horas da tarde. A tipologia sem pala compreendeu índices de proteção com a versão horizontal que variaram entre 55,99 e 88,28%. E a vertical entre 10,64 e 70,31%.

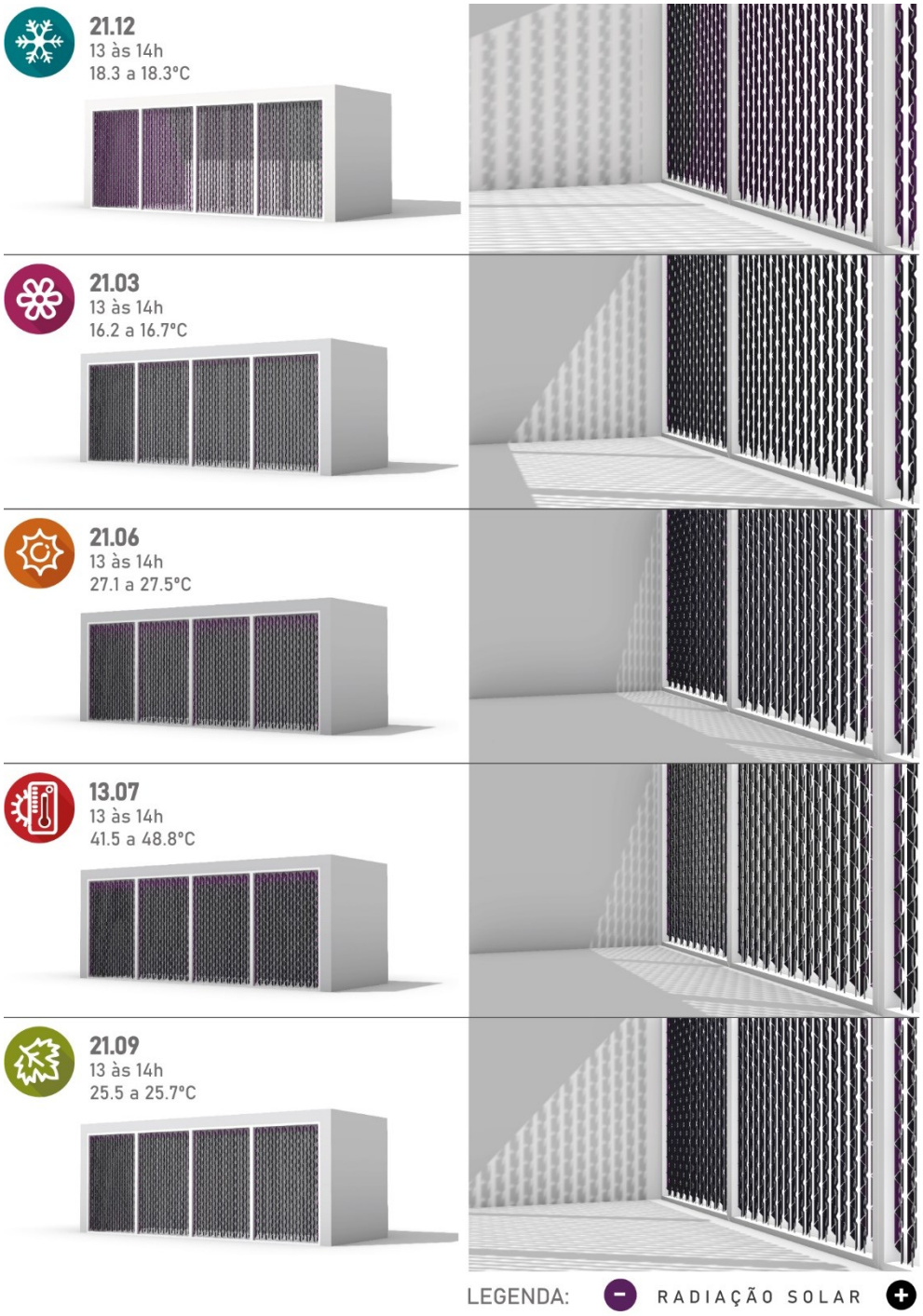
Tabela 46. Avaliar > Síntese de índices de proteção > entre as 13 e 14h.

DIA	**21.12**		**21.03**		**21.06**		**21.09**		**13.07**	
TEMP.	18,3 a 18,3 ˚C		16,2 a 16,7 ˚C		27,1 a 27,5 ˚C		25,5 a 25,7˚C		41,5 a 48,5 ˚C	
TIPOL.	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)	**H.** (%)	**V.** (%)
Sem Pala	55,99	**10,64**	83,39	**49,67**	**85,75**	55,19	**88,28**	53,12	**87,64**	70,31
Com Pala	53,82	**9,71**	81,05	**49,11**	**56,30**	50,74	**82,50**	51,68	**70,73**	62,72

Nota. TEMP.= Intervalo de temperatura. TIPOL: = Tipologia da edificação. H. = Posição Horizontal; V. = Posição Vertical. Em negrito são destacados os resultados relevantes. Fonte: Autora (2023).

Já a versão com pala com biomódulos horizontais abrangeu proteções entre 53,82 e 82,5%. E a com módulos verticais entre 9,71 e 62,72%. O efeito do sombreamento dos biomódulos é exposto na Figura 206 e Figura 207, entre as treze e quatorze horas, para a tipologia sem pala, que representa o contexto extremo de incidência solar.

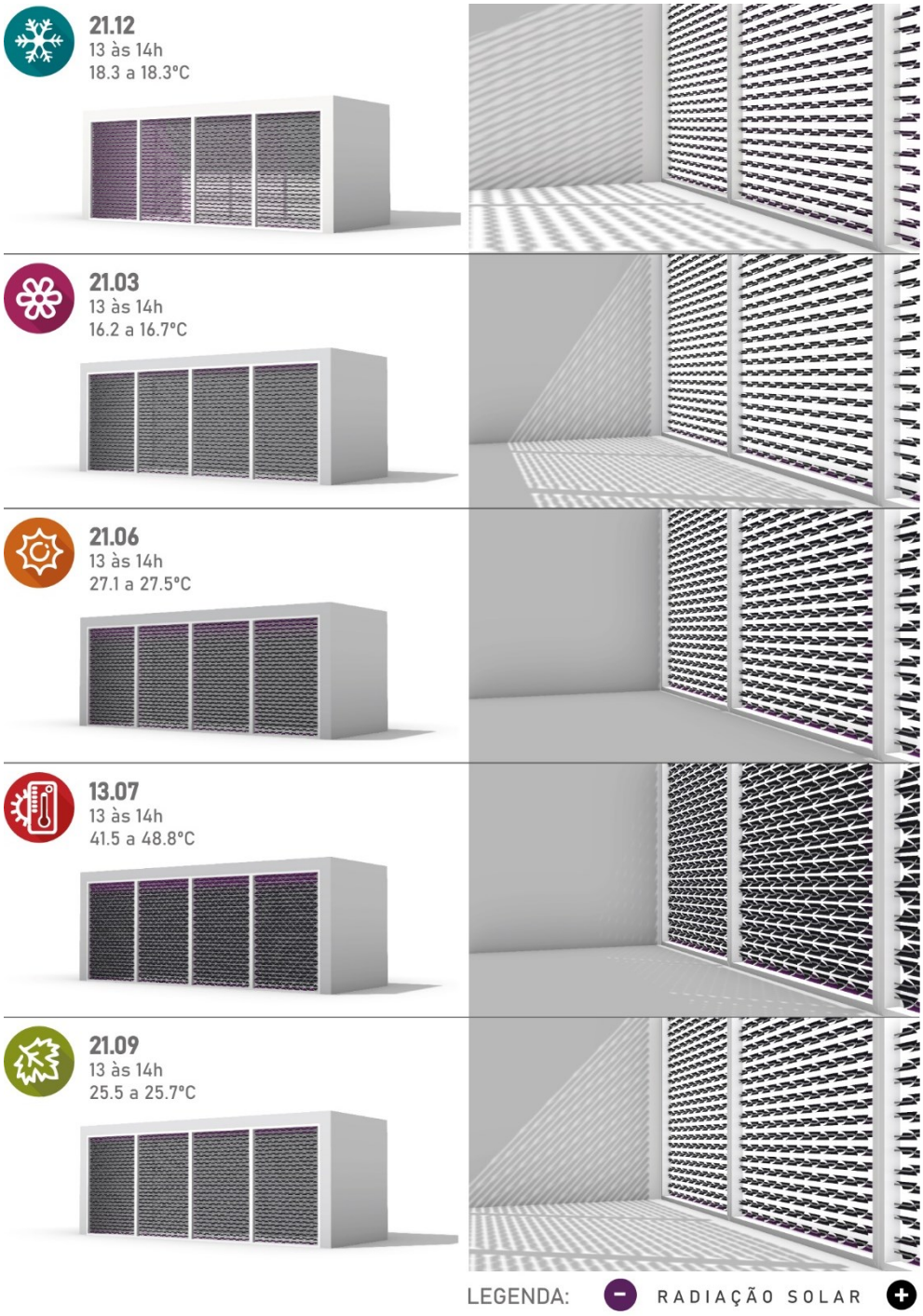
Figura 206. Avaliar > Sombra por Biomódulos na vertical (13 às 14 h).



Fonte: Autora (2023).

A Figura 207 indica elevados níveis de proteções solares, sobretudo para o dia 21/06 e 13/07.

Figura 207. Avaliar > Sombra por Biomódulos na horizontal (13 às 14 h).



Fonte: Autora (2023).

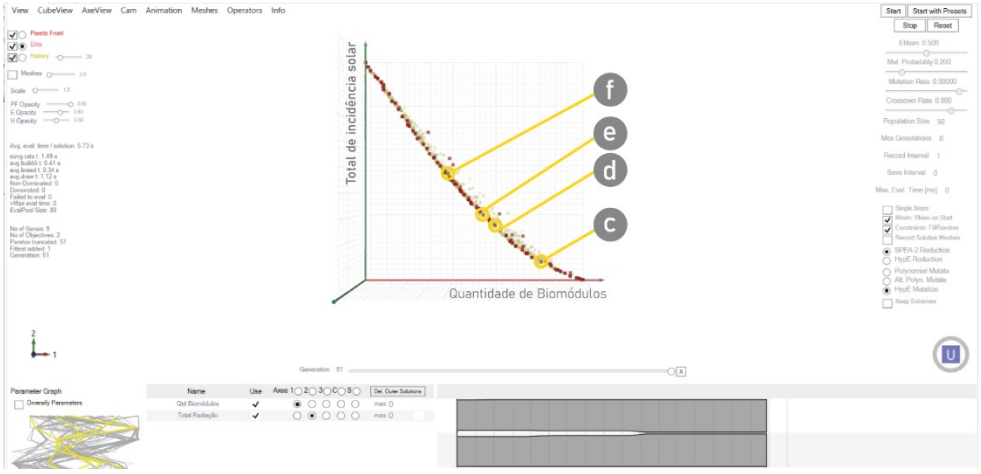
7.5. Solução Híbrida com Algoritmo Evolutivo

Para as simulações da presente seção, será considerada a incidência solar ao longo do ano (01 de janeiro a 31 de dezembro, 31 de dezembro entre as zero e vinte e três horas). Optou-se por dispor a fachada do ambiente de teste com pala com oito subdivisões de 1x 3 x 0,08 m, para explorar diferentes disposições.

Como visto anteriormente, a fachada com pala representa um contexto particular em referência ao ambiente de teste na Universidade de Lisboa. As palas são um sistema passivo eficaz, capaz de proporcionar proteção solar responsiva em distintas épocas do ano (Lechner, 2009). A principal região sujeita a proteção das palas situa-se no quadrante superior das fachadas (nas alturas mais elevadas). Ao se aplicar os biomódulos nessa região haverá uma redundância de proteção (Figura 209**a** e **b**).

Não se considera, no entanto, que ao se utilizarem as palas não seja possível implementar os módulos cinéticos. Pois, a associação conjunta é uma oportunidade para aprimorar o desempenho de proteção solar, sobretudo quando os biomódulos forem dispostos em posições que aconteçam maiores níveis de incidência solar. Nesse sentido, desenvolveu-se uma **solução híbrida**, por meio de versão de **algoritmo evolutivo multiobjetivo** (Floreano et al., 2008). A Figura 208 apresenta a **fronteira de pareto** mediante implementação de algoritmo evolutivo.

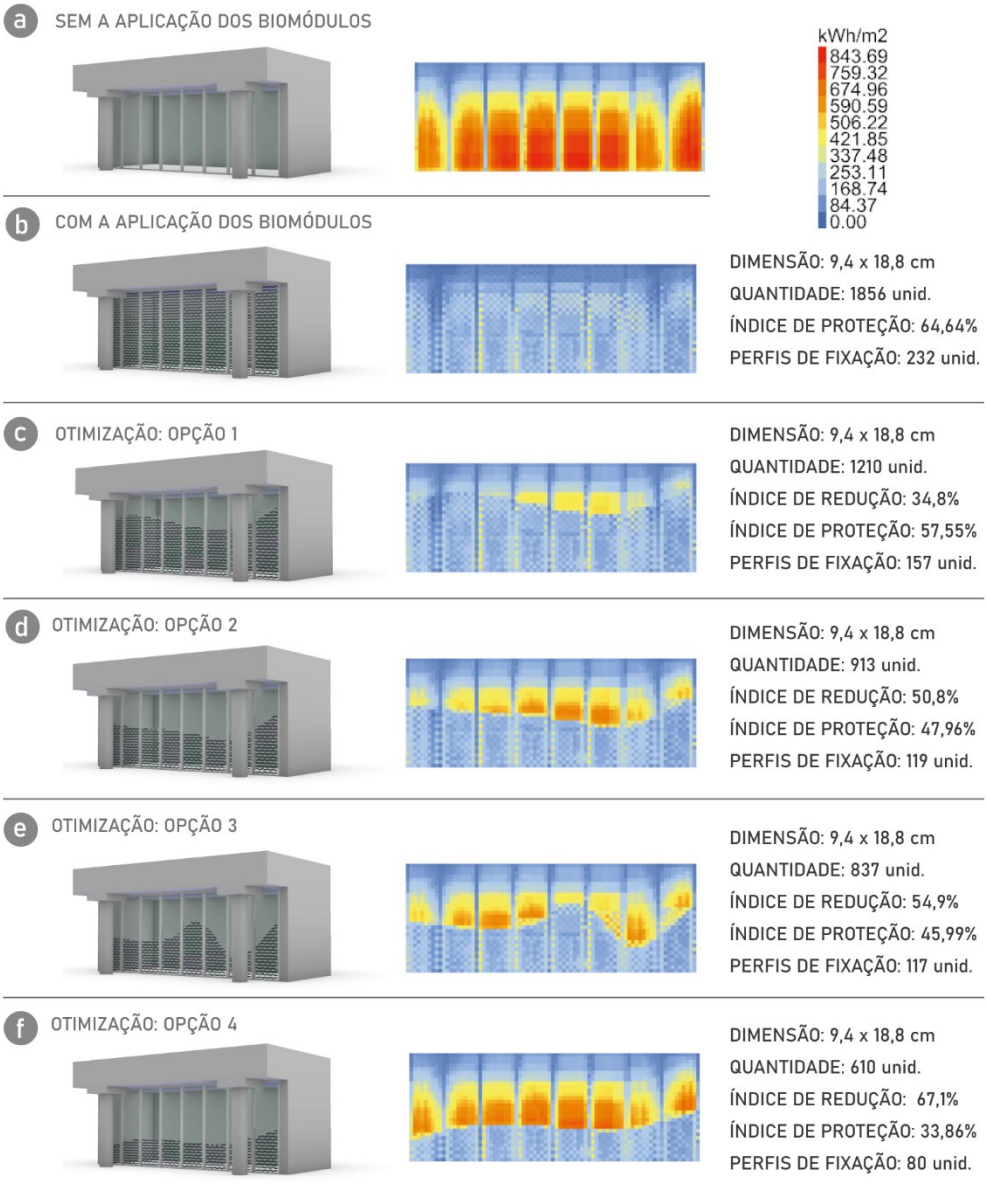
Figura 208. Digrama de Pareto para processo de otimização.



Nota. Dois objetivos foram atribuídos, a saber: redução da quantidade de biomódulos e da incidência solar. Nove genes constaram no processo de otimização (entre posições para os pontos e o grau de curvatura da própria curva). A intensidade da cor dos cubos aponta para a dominância das soluções. Versões dos cubos transparentes correspondem a soluções que já foram dominadas. Os cubos marcados em amarelo, com letras 'c' a 'f', representam as quatro soluções evidenciadas na próxima imagem. Fonte: Autora (2023).

O algoritmo foi concebido mediante uso do *plug-in Octopus* (*Octopus Manual*, n.d.). Considerou-se a aplicação dos biomódulos abaixo de curva NURBS, construída através de cinco pontos dispostos parametricamente ao longo da fachada. O controle das posições dos pontos da curva e o grau de curvatura das curvas foram elencadas como *genes* do algoritmo. As *fitness functions* utilizadas buscaram reduzir a incidência solar na fachada em consonância com a redução da quantidade de biomódulos. Os eixos do gráfico (Figura 208) correspondem aos dois objetivos que configuram a dominância de pareto com as soluções factíveis (Floreano et al., 2008; Martino, 2015), sendo a curva limite evidenciada pelas soluções dominantes (cubos vermelhos escuros

Figura 209. Incidência solar anual: contexto com pala e processo de otimização.



Nota. As simulações de incidência solar para a fachada de 8,0 x 3,0 m sob análise demonstraram temperaturas ambientais entre 10,2°C e 28,5°C. No algoritmo paramétrico configuraram-se oito

painéis de envidraçados de 1,0 x 3,0 m x 0,08 m. A incidência solar total identificada foi de 843,69 kWh/m². Ao aplicar 1.856 biomódulos horizontalmente na fachada, houve um índice de proteção solar anual de 64,64%. Fonte: Autora (2023).

). A avaliação de cada solução demorou em média de 5,73 segundos por iteração. Foram implementadas cinquenta e uma gerações, com populações de cinquenta unidades. Quatro opções otimizadas foram selecionadas e constam no gráfico sobre a fronteira de pareto (Figura 208**c** a **f**) e as opções (Figura 209**c** a **f**).

A opção da Figura 209**c**, por exemplo, reduz de 1.856 para 1.210 biomódulos. Ou seja, uma redução na quantidade de módulos cinéticos de 34,8%. Em relação à proteção solar, os 1.856 módulos proporcionam uma proteção de 64,64%, enquanto a versão otimizada da Figura 209**c** possibilitou proteção de 57,55%. A opção da Figura 209**d**, por sua vez, reduz para 913 unidades de biomódulos (50,8% de redução) e apresenta um índice de proteção de 47,96%. Tal solução também contribui para a permeabilidade visual ao longo da fachada. Assim, constata-se que não há uma única solução, mas sim um conjunto de soluções otimizadas que deverão ser avaliadas e selecionadas pelo projetista.

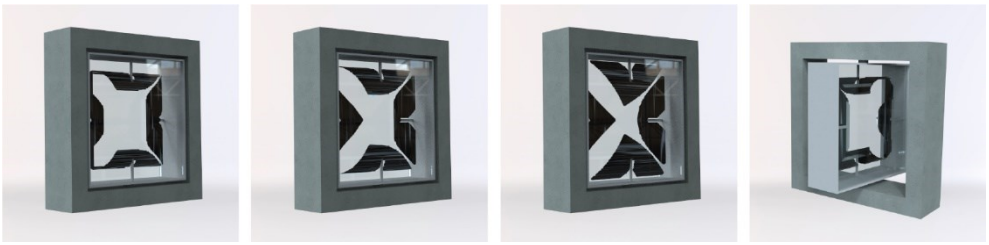
Por fim, ressalta-se que o desenvolvimento do algoritmo evolutivo não fazia parte do âmbito da presente investigação. Contudo, acredita-se que ao aliar as vantagens da pala com as dos biomódulos, sob processos de convergência, será possível otimizar os níveis de proteção solar, economizar a quantidade de biomódulos, e ainda aprimorar a permeabilidade visual do espaço construído. Esse último, poderá vir a ser um terceiro objetivo para otimização sob abordagem gerativa do algoritmo evolutivo, em estudos futuros.

7.6. Diferentes Aplicações Conceituais dos Biomódulos

Em referência à tipologia do cobogó definiu-se como premissa de desenvolvimento a **modularidade**. Tal característica possibilita que o Biomódulo Bimetal possa ser aplicado de diferentes modos, como elementos constituintes de: cobogó; fachadas de edificações e pavilhão em ambiente aberto para a promoção de sombreamento.

A Figura 210 apresenta versão conceitual de cobogó de 31,6 x 31,6 x 8,3 cm, com quatro biomódulos de 9,3 x 18,6 cm. Os biomódulos são fixos em uma estrutura em alumínio, juntamente com vidros. Tal estrutura pode ser rotacionada em até 90°, pelo usuário, para proporcionar ventilação ao espaço construído. Os biomódulos estão posicionados de modo espelhado para proporcionar a amplitude do movimento sem haver colisão entre os módulos.

Figura 210. Solucionar > Renderização > Cobogó com Biomódulos.



Nota. Conceito dos biomódulos aplicados à cobogó 31,6 x 31,6 x 8,3 cm. Renderização no *software KeyShot*® 10. Fonte: Autora (2023).

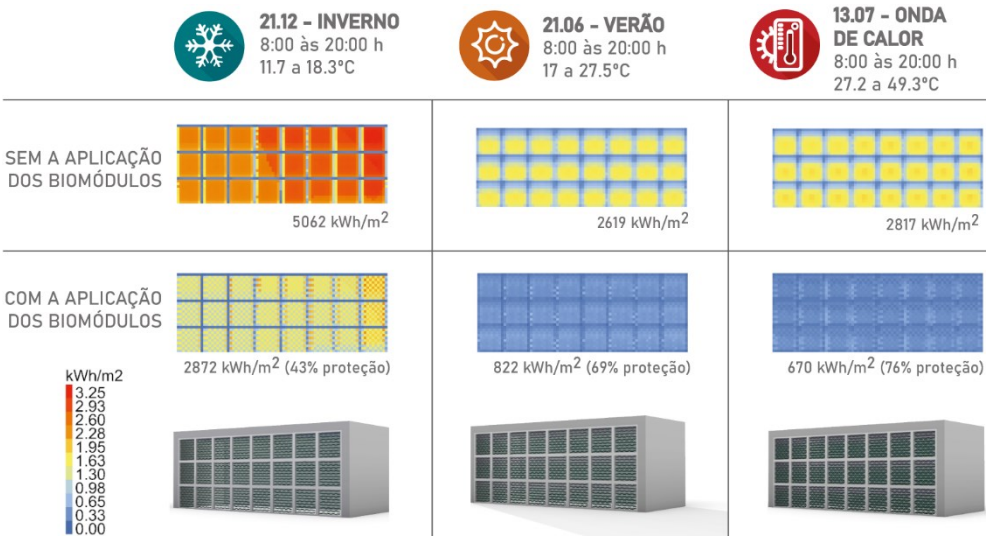
Outra versão de elemento modular para fachada é composta por setenta e dois biomódulos entre duas camadas de vidro translúcido, e possui a dimensão de 1 x 1 x 0,08 m. A moldura e os perfis de fixação dos biomódulos são confeccionados em alumínio (Figura 211).

Figura 211. Solucionar > Renderização > Elemento modular 1 x 1 x 0,08 m.

Nota. Renderização no *software KeyShot*® 10. Fonte: Autora (2023).

A Figura 212 simula os níveis de incidência solar para edificações sem pala, entre as oito e vinte horas. Os dias de referência para a simulação foram solstício de inverno e de verão, e na onda de calor do dia 13 de julho de 2022.

Figura 212. Avaliar > Simulação de incidência solar com elementos de 1 x 1 x 0,08 m.

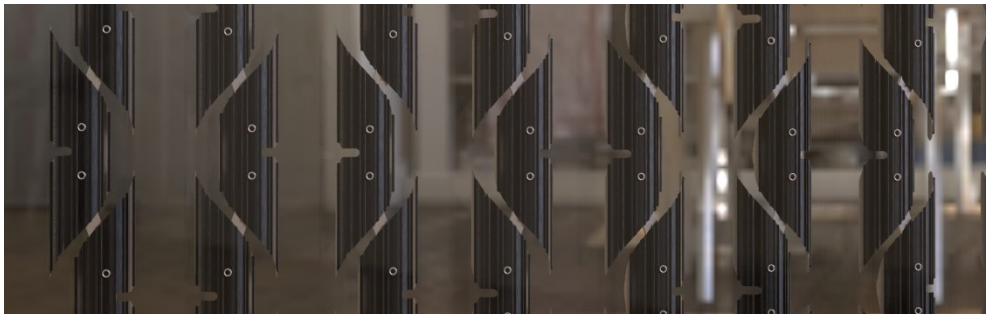


Fonte: Autora (2023).

Optou-se por proceder à simulação sem pala por ser o contexto climático de incidência solar extrema sob análise. Percebe-se que o nível de proteção durante a ocorrência de onda de calor pode chegar a 76% quando se compara a opção com e sem módulos. No inverno a proteção chegou a 43%. Ressalta-se ainda que os níveis de incidência solar observados na situação de inverno com biomódulos são superiores aos níveis de incidência durante a onda de calor e o verão, seja para a versão com ou sem a utilização dos biomódulos. Nesse sentido, observa-se que os módulos cinéticos se adaptam a diferentes condições de temperatura ambiental, sem necessitar de qualquer dispositivo mecânico ou de eletricidade para acionar o sistema.

A aplicação em painéis de vidro de fachadas, por sua vez, é uma solução que pode contemplar elevada área, de modo a proteger responsivamente como um organismo vivo o envelope de um edifício. A Figura 213 exibe versão aproximada de renderização vertical em fachada com biomódulos com recorte central.

Figura 213. Solucionar > Renderização > Envidraçado com biomódulos na vertical.



Nota. Renderização no *software KeyShot*® 10. Fonte: Autora (2023).

A Figura 214 à Figura 218 utilizam como referência para as renderizações o jardim localizado em frente a fachada sul do edifício 5 da FAUL, para demonstrar visualmente os biomódulos em baixas e altas temperaturas. Para essas aplicações, as árvores foram utilizadas como referência de contexto urbano (ao invés do edifício 1 e edifício 5, utilizados na seção climática).

Duas situações climáticas foram simuladas. A primeira, aborda o amanhecer do solstício de inverno (contemplado na Figura 214 e Figura 216). Relembra-se que neste dia 21.12, entre as oito e nove horas da manhã, a temperatura ambiental estava entre 13,6 e 13,8°C, e os biomódulos variam o diâmetro entre 3,31 e 3,33cm.

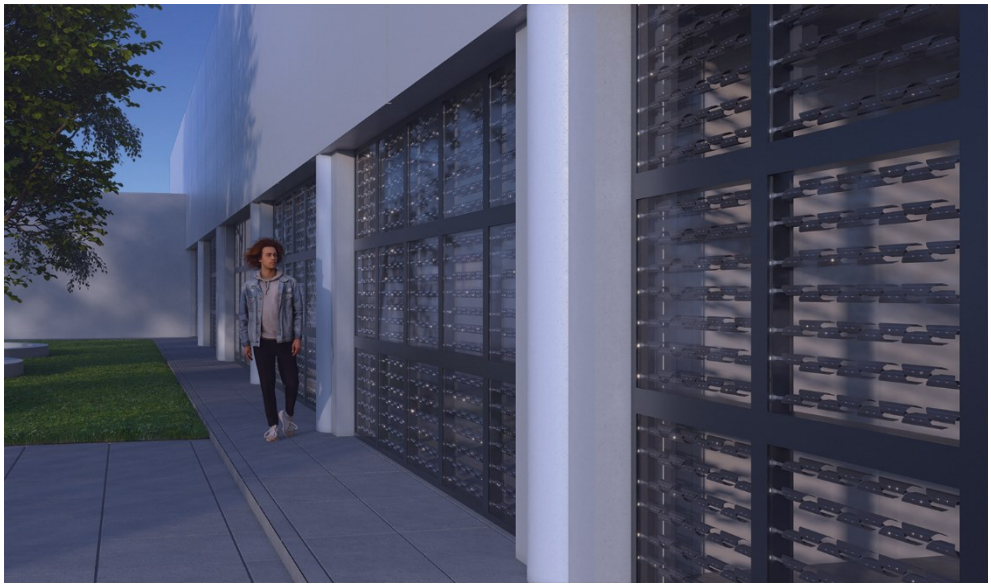
A segunda situação evidencia o comportamento dos biomódulos sob elevadas temperaturas (Figura 214, Figura 217 e Figura 218). Para tanto, foram utilizados os dados referentes a onda de calor do dia 13 de julho de 2022 como referência, entre as treze e quatorze horas da tarde. Recorda-se que o intervalo de temperatura identificado esteve entre 41,5 e 48,8 °C. A amplitude do comportamento dos biomódulos variou entre 6,81 e 8,23 cm (Figura 205).

Para além dos pontos supracitados, simulou-se fachada vertical de envidraçados e pavilhão para sombreamento em ambiente aberto. Nesse sentido, a função do comportamento dos biomódulos teve que corresponder a referência de ambiente sob análise (ambiente fechado e ambiente aberto respectivamente). Assim, durante a efetuação das simulações para cada tipologia, selecionou-se a função de comportamento Preto In (para os envidraçados) e a função Preto Out (para o pavilhão). Os biomódulos foram aplicados na orientação horizontal, entre dois vidros translúcidos (0,6 cm.de espessura) de elementos na dimensão 0,83 x 1,0 x 0,1 m. A Figura 214 simula a disposição dos biomódulos em baixas temperaturas e a Figura 215 em elevadas.

O pavilhão conceitual demonstrado utilizou os módulos cinéticos na horizontal e na vertical. O algoritmo permite utilizar outras superfícies orgânicas geratrizes de distintos pavilhões paramétricos. Ressalta-se que o conceito do pavilhão aplicou biomódulos com grandes dimensões. Para tornar a opção viável à implementação, recomenda-se investigá-la em profundidade.

Para o pavilhão de proteção solar, uma superfície orgânica com quatro pontos de base foi concebida nas dimensões de 7 x 6,2 x 4,47 m. A fim de demonstrar biomódulos com larguras superiores às investigadas e proporcionar maior detalhe de visualização conceitual, serão utilizados biomódulos com dimensões paramétricas em torno de 27,8 cm de largura por 55 cm de altura. O pavilhão com biomódulos na horizontal é composto por 913 biomódulos fixos com parafusos nos perfis de alumínio (Figura 216). Versão de pavilhão com biomódulos na vertical utiliza 819 módulos (Figura 217 a Figura 218).

Figura 214. Solucionar > Renderização > Envidraçado sob baixas temperaturas.



Nota. Simulação para o amanhecer no solstício de inverno (13,6 a 13,8˚C). Renderização no *software 3D Studio Max*® 2024 e *Corona Chaos*® 10. Fonte: Autora (2023).

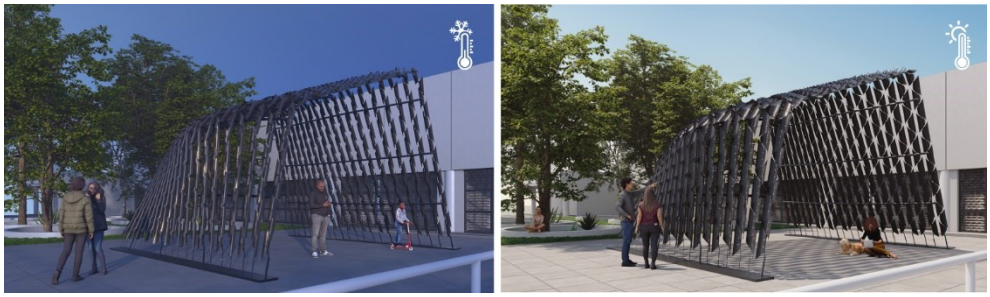
Figura 215. Solucionar > Renderização > Envidraçado sob altas temperaturas.

Nota. Simulação durante onda de calor (41,5 a 48,8˚C).. Renderização no *software 3D Studio Max*® 2024 e *Corona Chaos*® 10. Fonte: Autora (2023).

Figura 216. Solucionar > Renderização > Pavilhão biomódulos na horizontal

Nota. Simulação no solstício de inverno (13,6 a 13,8˚C) e onda de calor (41,5 a 48,8˚C). Renderização no *software 3D Studio Max*® 2024 e *Corona Chaos*® 10. Fonte: Autora (2023).

Figura 217. Solucionar > Renderização > Pavilhão biomódulos na vertical.



Nota. Simulação no solstício de inverno (13,6 a 13,8˚C) e onda de calor (41,5 a 48,8˚C). Renderização no *software 3D Studio Max*® 2024 e *Corona Chaos*® 10. Fonte: Autora (2023).

Figura 218. Solucionar > Renderização > Vista Frontal Pavilhão sob altas temperaturas.

Nota. Simulação na onda de calor (41,5 a 48,8˚C). Renderização no *software 3D Studio Max*® 2024 e *Corona Chaos*® 10. Fonte: Autora (2023).

Por fim, o presente tópico buscou revelar a versatilidade de aplicação que o biomódulo bimetal permite e a simplicidade de sua geometria triangular, a qual adiciona complexidade à formação por meio da aplicação dos vincos e recortes paramétricos. Soma-se ainda, a influência climática que proporciona comportamento gerativo e termorresponsivo por *self-shading*. Por meio deste biomódulo bioinspirado é possível desenvolver um simples cobogó com quatro módulos cinéticos; elementos modulares 1 x 1 m com setenta e duas unidades; ou ainda, fachadas de edifícios e estruturas orgânicas.

7.7. Estudos Preliminares para Estudos Futuros

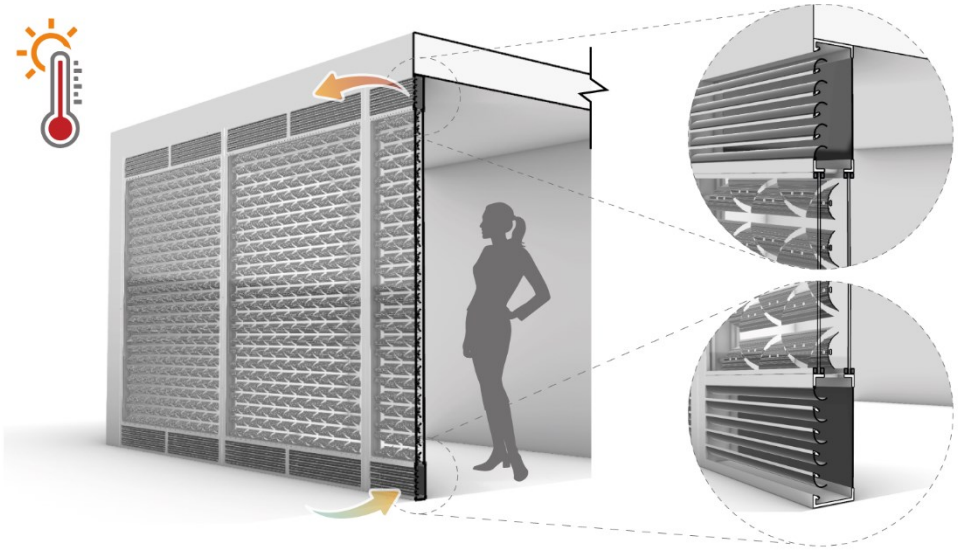
Os testes térmicos iniciais constataram a sensibilidade do material às variações de temperatura e massa de fluidos. O experimento AITECB, por sua vez, constatou a potencialização do comportamento responsivo dos Biomódulos em ambiente hermeticamente fechado. As temperaturas dos módulos internos do AITECB atingiram em média mais de 60°C, durante as horas mais quentes do dia. As simulações por incidência solar demonstraram a capacidade de proteção solar do Biomódulo Bimetal, em distintos períodos.

Como visto anteriormente, uma fração de energia solar interceptada pelos materiais translúcidos é absorvida, e transmitida ao ambiente interno e externo, por convecção e irradiação (Olgyay, 2002). Se a cavidade entre os vidros com os biomódulos sobreaquecer poderá ofertar efeito adverso por irradiação. Portanto, efetuar o controle de massa de fluidos na cavidade dos envidraçados é um desdobramento relevante para a pesquisa**.**

Salienta-se, no entanto, que **essa vertente de desenvolvimento não faz parte dos objetivos da presente investigação.** Sendo assim, o presente tópico almeja ensaiar versão conceitual para estudos futuros, que buscará **gerir o funcionamento dos biomódulos por meio de sistema de fachada ventilada**. (Figura 219 e Figura 220). Acredita-se que ao associar a capacidade de condutividade térmica dos biomódulos ao sistema de gestão de massa de fluidos por convecção será possível contribuir para a promoção do conforto térmico no ambiente construído.

A cavidade entre vidros poderá ser naturalmente ventilada. **Quando houver a ocorrência de altas temperaturas, o ganho solar poderá ser conduzido para fora da edificação, por sistema com venezianas móveis em bimetal sem vincos** (Figura 219). Conforme outrora elucidado, o material sem vincos tende a fechar ao ser aquecido, e abrir ao se resfriar. O uso de faixas bimetálicas sem intervenção poderá ser utilizado para controlar o fluxo de ar. E assim, poder-se-á **mitigar ganhos térmicos por irradiação e contribuir para o arrefecimento do espaço**.

Figura 219. Estudo futuro > Fachada ventilada em elevadas temperaturas.

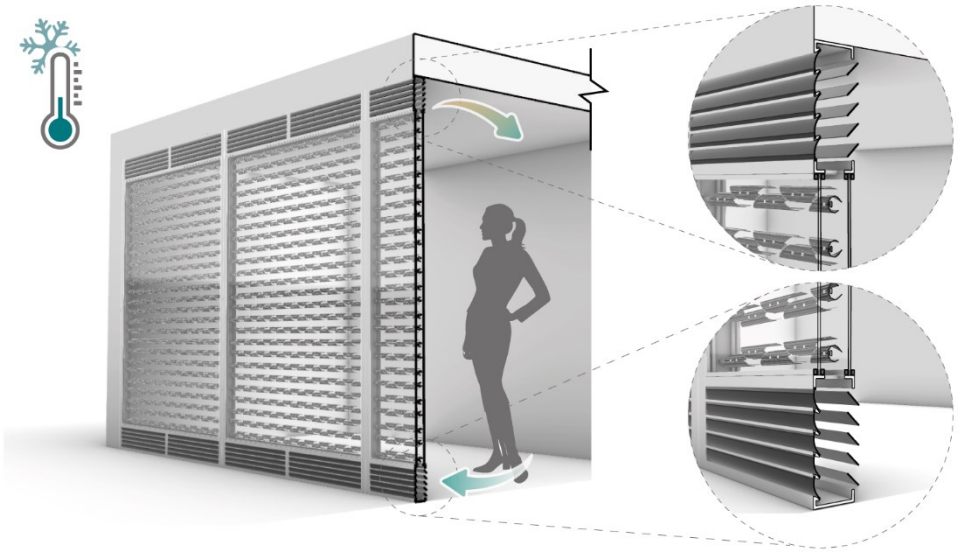


Nota. Durante a ocorrência de elevadas temperaturas, as venezianas bimetálicas são responsáveis por efetuar a troca de ar entre a cavidade dos vidros e o ambiente externo. Já as venezianas convencionais, voltadas ao ambiente interno, deverão estar fechadas. Fonte: Autora (2023).

O bimetal utilizado deverá possuir maior espessura do que a do biomódulo. Na Figura 219 foram utilizadas faixas bimetálicas de 5 x 9,2 cm, com 0,12 mm de espessura. Ratifica-se, no entanto, que será preciso estudos com o material, para definição de especificações técnicas. Recomenda-se ainda testar composição de bimetal que permita acionar a abertura e fechamento das venezianas bimetálicas por ímã, de modo automático e sem energia. Entre o **Anexo I** e o **Anexo K** o conceito proposto é detalhado.

Por sua vez, em **baixas temperaturas a ventilação deverá acontecer entre a cavidade entre os vidros e o ambiente construído** (Figura 220). O ganho solar no interior da cavidade, deverá ser direcionado para o interior da edificação, a fim de contribuir para o aquecimento do espaço. Para esse modo de funcionamento, as venezianas bimetálicas deverão estar fechadas, visto que a temperatura ambiental não será suficiente para conferir capacidade cinética ao bimetal. Um sistema de veneziana convencional na parte superior e inferior da sala, voltada para área interna, deverá colaborar para o controle das massas de fluidos. Para maximizar o ganho térmico no ambiente, as venezianas internas deverão estar abertas durante a ocorrência de incidência solar.

Figura 220. Estudo futuro > Fachada ventilada em baixas temperaturas.



Nota. As venezianas bimetálicas voltadas a área externa estarão sempre fechadas nas temperaturas frias, para evitar o arrefecimento. A troca de ar acontece entre as venezianas convencionais internas à edificação e a cavidade de ar da fachada. Fonte: Autora (2023).

Uma alternativa de desenvolvimento é efetuar o controle de sistema de ventilação por meio de fios tensionados em consonância com ligas de memória de forma. Como referência a esse tipo de desenvolvimento têm-se o projeto Air Flow(er) (Figura 60**b**). Pode-se estudar diferentes modos de acionamento para os dispositivos controle de ventilação, em que os do ambiente externo funcionam de modo contrário aos internos. Assim, o material inteligente SMA seria utilizado em ambas as situações, responsivamente.

Em síntese, o sistema de gestão de fachada ventilada em consonância com os biomódulos possui dois modos de funcionamento, que deverão ser alternados conforme as condições climáticas. Nas estações mais quentes o primeiro evita o sobreaquecimento do sistema com biomódulos. Já nas estações mais frias, a radiação solar na fachada pré-aquecerá o ar que retornará posteriormente à sala. As venezianas, bimetálicas e convencionais, permitirão a gestão de massa de fluidos por convecção entre o ambiente externo e interno à construção respectivamente.

Considera-se que esse conceito balizará diretrizes relevantes para a **avaliação e promoção do conforto térmico** no ambiente construído. Precisará de **simulações avançadas por *CFD*, a fim de avaliar o conforto térmico e a eficácia da mecânica dos fluidos para a ventilação.** Recomenda-se ainda, o desenvolvimento de protótipo de esquadria em escala 1:1, com respectivos materiais finais para a fachada, a fim de validar o desenvolvimento. O desafio, no entanto, é manter o funcionamento do sistema independente de dispositivos eletromecânicos.

8. Concluir

A problemática da pesquisa compreendeu as **alterações climáticas sem precedentes** e **severas previsões de onda de calor** para a região mediterrânica do sul da Europa. Estudos preditivos sobre Lisboa afirmaram que haverá sessenta dias por ano de ondas de calor, no final do século XXI (Lopes et al., 2020). O calor extremo poderá ampliar a taxa de mortalidade de 12,1 em 2020 para 29,5 em 2050, a cada cem mil habitantes nessa localidade (Casimiro et al., 2006).

Por sua vez, a principal questão de pesquisa consiste em: 'De que modo se pode potencializar a adaptabilidade climática dos ambientes construídos por meio do desenvolvimento de elemento modular cinético para fachadas por bioinspiração no movimento de plantas?'. A hipótese da pesquisa considerou ser possível a concepção do elemento **por meio de processo biomimético sobre os movimentos násticos das plantas, experimentação com material inteligente e do projeto computacional, é possível desenvolver um módulo cinético para fachadas, adaptável a diferentes condições climáticas e que não necessita de dispositivo eletromecânico para funcionar.**

O real contributo da presente investigação reside na capacidade de adaptação responsiva do Biomódulo Bimetal sem necessitar de energia elétrica ou qualquer dispositivo mecânico. O elemento cinético se adapta aos condicionantes ambientais, **como um organismo vivo, que troca constantemente informações com o meio que o circunscreve.**

Por exemplo, o comportamento dos biomódulos foi influenciado pelo sombreamento da árvore, pelas nuvens no céu e pelas barreiras construtivas do entorno urbano durante a coleta de dados da AITECB. Os experimentos exploratórios térmicos iniciais também revelaram tal característica. Na Figura 119 é possível identificar o momento da abertura da câmara quente e consequente rapidez de reação do material com vincos entre 42 °C e 48°C. Tudo isso acontece em decorrência da influência dos elementos climáticos e das barreiras do entorno na temperatura do material. Assim, é possível afirmar que **os biomódulos funcionam responsivamente à variação de temperatura e condicionantes ambientais.**

Os próximos subtópicos irão esclarecer os resultados obtidos para cada objetivo da investigação, assim como, irá pontuar os estudos futuros.

8.1. Selecionar organismo de referência

Para iniciar o desenvolvimento buscou-se **selecionar organismo de referência para abordagem metodológica de biomimética** (objetivo 1). De acordo com M. Oliveira (2019), a identificação de sistemas biológicos relevantes é o primeiro obstáculo da relação entre biologia – biomimética – arquitetura. Ratifica-se que o caminho não

foi fácil, uma vez que foi necessário um extenso trabalho de revisão sistemática de literatura em campo de estudo diferente do domínio dos investigadores. Mais precisamente a área de biologia vegetal sobre os movimentos násticos das plantas.

A estreita colaboração com profissionais de biologia foi imprescindível para o processo de identificação e seleção da gramínea *Ammophila arenaria* como organismo para bioinspiração. Por essa planta ser facilmente encontrada na flora de Portugal Continental foi possível desenvolver os estudos de observação e constatar a sofisticada adaptação de suas folhas ao stresse hídrico e salino (T. Andrade, Beirão, Arruda, & Cruz, 2021; Chergui et al., 2017).

Como visto, tal organismo exibe um **mecanismo de rolamento foliar reversível**, para conservação da água e proteção dos efeitos de radiação (Chergui et al., 2017). Isso só é possível graças à **anatomia da planta** repleta de células buliformes e sulcos que acompanham toda a extensão longitudinal da folha (as nervuras). As nervuras conferem estratégia de deformação elástica à folha *A. arenaria*, e são capazes de reduzir e ampliar reversivelmente a área da superfície foliar. As características supracitadas possuem relação direta com o padrão de abertura e fechamento foliar. O complexo funcionamento fisiológico, morfológico e comportamental da planta permite o controle do movimento, diante das adversidades climáticas.

8.2. Definição do Modelo Conceitual

Buscou-se **definir conceito para o elemento modular e selecionar material capaz de replicar o comportamento para a promoção de proteção solar nas fachadas. Somado a isso, tinha-se o desafio de proporcionar o movimento responsivo sem haver a necessidade de uso de dispositivo eletromecânico para acionar o sistema** (objetivo 2).

No que tange à definição de conceito produziu-se a etapa de *Brainstorming* por meio da realização de caixa morfológica e esboços, sessão de cocriação online com equipe multidisciplinar e análise dos respectivos dados coletados. Ressalta-se que durante a sessão de cocriação buscou-se repensar a aplicação do cobogó (elemento que possui função de ventilar, iluminar, promover a proteção solar e privacidade) para o contexto climática de Lisboa. Esse elemento deveria apresentar referência à *Ammophila arenaria*.

As análises dos dados da sessão revelaram que em relação ao cobogó a **modularidade** surgiu como a principal alusão. Em relação à analogia com a *A. arenaria*, o controle osmótico corresponde à estratégia do organismo que se destaca para uma possível bioinspiração. Para um processo de analogia "o essencial é

entender, captar o princípio para o qual uma determinada coisa acontece na natureza, e daí aplicar para um novo conhecimento" (A. Arruda, 2018, p. 5). Nesse sentido, o movimento de abertura e fechamento da planta foi a estratégia da *A. arenaria* que despertou maior atenção durante a sessão de cocriação. Tal estratégia pode ser emulada para sistemas humanos baseados em pneumática e hidráulica, ou ainda pela própria bioinspiração na morfologia da planta.

Após a etapa de *brainstorming*, os requisitos de desenvolvimento foram estabelecidos em referência à **morfologia da planta (as nervuras), ao movimento reversível do organismo da** *A. arenaria* **e ao respectivo controle da área de superfície foliar** (redução e ampliação, com baixa necessidade de profundidade). Assim, objetivou-se estabelecer os requisitos do projeto, a fim de transpor a dificuldade de escala (o segundo obstáculo da relação entre biologia – biomimética – arquitetura (M. Oliveira, 2019)).

8.3. Seleção do Material: o Bimetal

A pergunta de pesquisa '**Qual material adotar para o elemento modular a fim de reduzir a necessidade de dispositivos eletromecânicos para acionar o sistema?**' ainda compreende atividades no âmbito do objetivo 2. Para tanto, foi desenvolvida análise sobre fachadas cinéticas com a intenção de compreender projetos de referência inspirados na natureza e diferentes estratégias de deformação de material. Os estudos demonstraram propostas para fachadas que unem a bioinspiração à pesquisa de materiais com capacidade de resposta inerente ao material e ao projeto computacional (L. Charpentier et al., 2022; V. Charpentier et al., 2017; Fiorito et al., 2016; Kuru et al., 2019; López et al., 2017; Menges, 2012b; Menges & Reichert, 2015; Reichert et al., 2014; Schleicher et al., 2015; Sung, 2016).

Após a análise da *Ammophila arenaria* e de projetos cinéticos, um caminho norteador foi estabelecido para desenvolver solução composta por **células autônomas, que respondam à variação de temperatura por *self-shading*. O material inteligente bimetal** é um material de mudança de forma (Vazquez et al., 2019) que se curva ao ser aquecido (Engineered Material Solutions, n.d.; Ritter, 2007; Schmidt-Nielsen, 1997; Sung, 2016), de modo previsível e repetível (Foged & Pasold, 2015). Como desvantagem, há a natureza do material que por ser permanente laminado impede a separação para reciclagem. Mas dada a propriedade termorresponsiva, o bimetal foi selecionado para experimentação por ser capaz de transformar parcela da radiação solar incidente em energia térmica, sem necessitar de atuadores e sensores eletromecânicos para se curvar. Todos os testes desenvolvidos utilizaram o material com camada ativa em $Mn_{75}Ni_{15}Cu_{10}$ e a passiva em Ni_{36}.

Com o objetivo de otimizar a resposta do material aos condicionantes ambientais, a faixa bimetálica adquirida por pedido especial foi de 0,06 mm de espessura por 10 cm de largura. A diminuta espessura não foi especificada por acaso, mas fruto de revisão de literatura prévia aos projetos e grupos de estudo de referência (DOSU Studio Architects, 2021; Sung, 2016). As amostras bimetálicas testadas sem nenhuma intervenção tendem a fechar quando aquecida e reabrir ao se arrefecer, tal como a folha da *Ammophila arenaria*.

8.4. Abstrair níveis de adaptação da *Ammophila arenaria*

Em referência às nervuras presentes na morfologia da *Ammophila arenaria* e ao movimento reversível foliar, identificou-se a aplicação dos vincos na camada ativa do bimetal como uma oportunidade para controlar a capacidade cinética do material selecionado.

Os vincos na camada ativa do bimetal alteram a posição inicial da amostra, proporcionam resistência ao movimento natural do material e formam nervuras ao longo do material bimetálico. Ao ser aquecido, o bimetal com vincos continua a tentar exercer o movimento em direção ao fechamento do material. Contudo, se a relação entre a forma da amostra e a variação de temperatura não for capaz de ultrapassar a resistência dos vincos, **o comportamento do bimetal se restringirá a proporcionar a abertura do material, diante do aquecimento e fechamento quando o material se arrefecer. O domínio dessa relação constatou ser possível o controle do comportamento do bimetal para propostas por *self-shading*.**

Ao emular o princípio morfológico da *Ammophila arenaria* para concepção do Biomódulo Bimetal, por bioinspiração, atribuiu-se deformação plástica ao bimetal com o sistema de vincos, sendo essa deformação responsável por proporcionar o controle do comportamento responsivo do material. Assim, a **estratégia de deformação do material** (V. Charpentier et al., 2017) adotada para os biomódulos corresponde à **variação descontínuas das propriedades do bimetal** (inerente à própria composição do material, composto por duas camadas com distintos coeficientes de expansão térmico) e as **estratégias geométricas** (mediante a confecção dos vincos na camada ativa).

8.5. Experimentos Exploratórios com o Bimetal e Biomódulo

Uma série de experiências em superfícies bimetálicas foram desenvolvidas até se **atingir um grau de controle preciso sobre o comportamento material com vincos.** Foram desenvolvidos experimentos **exploratórios sistematizados** que totalizaram cinco estudos sobre vincos manuais e mais cinco sobre vincos por fabricação digital.

Apesar de terem sido realizados análises sobre a média proporcional da morfologia das nervuras em cinco secções transversais da planta, quando se transferiu o conhecimento para o âmbito do bimetal, percebeu-se desempenho superior para as proporções de vincos intercalados. Salienta-se que o material contém características propriedades físicas próprias, que devem ser levadas em consideração para o processo de abstração sobre o organismo. Assim, os padrões de vincos intercalados e sem vincos nas extremidades foram selecionados para os desenvolvimentos. Os vincos são uma referência à morfologia da planta adaptada às propriedades do material.

Os testes com fabricação digital exploraram a confecção de vincos mediante estampagem com matrizes impressas em 3D. Para a confecção das matrizes, procurou-se identificar atributos e parâmetros que pudessem ser replicados em futuras versões formais de módulos. Defende-se que não existe um parâmetro isolado e determinante, mas a confluência inter-relacional entre parâmetros e características distintas, tais como: a) padrão de vincos intercalados 3,5/7 mm, associado à ausência de vincos nas extremidades do elemento modular; b) tolerância contínua e uniforme de 0,25 mm na matriz de estampagem plana, com um intervalo de 2,5 mm entre as paredes do bimetal e da matriz; c) influência direta da escala do módulo no resultado da estampagem; e) ângulo de 35°; f) ausência de raio do dente; g) profundidade de vinco de 3 mm, e h) evitar marcar excessivamente os vincos ao ponto de impedir o movimento. Recomenda-se a utilização desses parâmetros como referência em estudos posteriores que possam explorar a versatilidade formal dos módulos cinéticos. Ressalta-se que os estudos são conclusivos para as especificações técnicas do material sob análise.

O Biomódulo Bimetal compreende o modelo conceitual para o módulo cinético para fachadas. A versão triangular do biomódulo foi tomada como referência a fim de investigar em profundidade o comportamento responsivo em escala 1:1 (9,3 x 18,6 cm). Para a prototipagem das amostras de Biomódulos, utilizou-se corte a laser da peça em bimetal triangular e matriz plana impressa em 3D para estampar os vincos. Os parâmetros para a matriz foram mencionados no parágrafo anterior. Após a estampagem, os fechamentos dos protótipos foram aprimorados. **Testes térmicos**

foram implementados e indicaram que é possível controlar o comportamento do bimetal (Figura 138). No entanto, existe um tênue limite entre aprimorar o comportamento do biomódulo e a promoção da não ocorrência de movimento. Rigor é, portanto, uma característica fundamental para controlar a fabricação e assegurar um comportamento uniforme.

Os **sulcos ou vincos na camada ativa do bimetal combinam as características da planta à inteligência do bimetal**. Conferem deformação plástica ao Biomódulo Bimetal e resistência ao movimento natural do material quando exposto à variação de temperatura. Possibilitam o **comportamento do biomódulo do seguinte modo: abertura à medida que o elemento é aquecido e fechamento à medida que se arrefece**. Assim, a **deformação plástica colabora para o controle do comportamento responsivo do biomódulo**.

Com relação aos limites identificados, ratifica-se que a **experimentação com o bimetal apresenta desafios técnicos** que precisam ser considerados e aprofundados em futuras investigações. A dificuldade em estabilizar o material naturalmente curvo é uma delas. Será problemático e incerto obter resultados regulares por processo subtrativos de corte a laser, se não houver consistentes processos para a estabilização do material. A estampagem, por sua vez, conferiu maior controle.

Futuros experimentos poderão integrar o processo de corte ao processo de estampagem para a **fabricação industrial** dos módulos cinéticos. Reconhece-se, no entanto, que esse caminho requer **desenvolvimento multidisciplinar**, com acesso à infraestrutura e a equipamentos de processamento de metal industriais. Os estudos desenvolvidos até então seguiram ao nível de prototipagem. Deve-se, ainda, aprimorar o fechamento da forma tendo em vista os processos fabris estabelecidos. O aprofundamento dos estudos poderá explorar a utilização de máquinas de estampagem de metal para medir os níveis de pressão necessários para estampar o bimetal, de modo a conferir maior precisão ao processo de produção, redução dos custos e promover repetibilidade.

Outra relevante via de análise é a investigação sobre a **fadiga do material, a fim de avaliar quantos ciclos os módulos cinéticos podem suportar às alterações de temperatura ambientais.** Pois é necessário gerir o risco e conhecer as potencialidades do produto para uma inovação (Baxter, 2011). Envolver profissionais de engenharia na equipe de desenvolvimento torna-se premente para estudos posteriores. O **ciclo de vida do produto** também deve ser planejado e investigado no intuito de proporcionar o retorno dos insumos à cadeia de produção industrial de ciclo fechado (McDonough & Braungart, 2002). Desse modo, poder-se-á colaborar para a redução do desperdício, para que os biomódulos após a sua vida útil alimentem a concepção de algo. E portem-se como nutrientes técnicos

para indústrias, a fim de evitar a produção de compósitos de baixa qualidade durante processos de reciclagem (McDonough & Braungart, 2002).

Por fim, salienta-se que o processo de determinação formal poderá ser ampliado para além dos desenvolvimentos até então realizados (a exemplo, estudos exploratórios iniciais na Figura 223 e Figura 224). **Pois o princípio de desenvolvimento é conferir vincos na camada ativa do bimetal, e assim oportunizar o controle do comportamento do material. Esse é o real contributo e inovação da investigação em questão. Ao lidar com essa característica, percebe-se que o conceito do Biomódulo Bimetal não é um módulo triangular. São os vincos e esses podem ser aplicados em um universo de possibilidades.** Para tanto, acredita-se que tal contributo mereça atenção para salvaguardar a propriedade intelectual por patente. A versão do biomódulo estudada em profundidade foi apenas o ponto de partida. Futuros estudos, explorarão a versatilidade e a customização de soluções com amplo alcance, para além das relações topológicas e algorítmicas até então desenvolvidas.

8.6. Identificação dos Comportamentos dos Biomódulos

Para averiguar a **capacidade do biomódulo por *self-shading* foram realizados experimentos em ambiente externo ao laboratorial**. Optou-se por avançar com os estudos no Concelho de Lisboa por ser acessível à investigação e pela região apresentar um clima desafiador. Nesse concelho há a ocorrência de elevadas amplitudes térmicas diárias e distintas necessidades frente às diferentes épocas do ano. A decisão de alocar os experimentos na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa também se deveu a questões de acesso e viabilidade para a pesquisa. As simulações também adotaram o clima de Lisboa como referência.

A '**Análise sobre a Influência da Temperatura Externa no Comportamento dos Biomódulos**' foi desenvolvida mediante processos sistematizados de coleta de dados de cinco amostras de biomódulos em diferentes circunstâncias ambientais na FAUL. Foram coletados dados em três datas: dia próximo ao solstício de verão (28.06.2022), onda de calor (13.07.2022) e equinócio de outono (23.09.2022).

Muito embora os elementos climáticos atuem de modo complexo, ressalta-se que a presente investigação definiu **recorte para coleta, controle e tratamento dos dados de variáveis referentes à temperatura do ar externo e à temperatura do ambiente fechado**. Não foram coletados dados de radiação solar e velocidade do vento devido a limites de acesso à infraestrutura. Em relação às cinco amostras foram coletadas as **temperaturas do material com distintos acabamentos superficiais e respectivas variações dos diâmetros**.

O experimento AITECB foi estruturado em dois ambientes: o hermeticamente fechado (ambiente in) e ambiente externo (ambiente out). A análise estatística dos dados permite inferir que os **biomódulos sediados em ambiente fechado potencializam o desempenho de resposta à proteção solar**, em relação aos alocadas em ambiente externo. Permite ainda concluir que o comportamento geral da amostra preta exibiu melhor desempenho que a do metal (sem acabamento) e a branca, seja para as amostras do ambiente interno ou externo.

No geral, os experimentos do ambiente interno demonstraram que o efeito da cor foi acentuado em temperaturas ambientais que ficam no intervalo entre 32˚C e 35˚C. A amostra preta interna possui maior amplitude de diâmetro variando entre 3,32 e 9,23 cm, enquanto o intervalo de temperatura compreendeu 15,6˚C a 49,3˚C.

Pode-se afirmar ainda que as diferenças entre as médias dos Diâmetros dos Biomódulos Internos não são estatisticamente significativas entre a amostra Preta In e a Metal In, mas são entre a Preta In e a Branca In. Isso explica-se pela cor preta absorver o impacto do Sol, enquanto a cor clara reflete (Gráfico 10). Como a uma parcela da energia solar incidente é transformada em energia térmica, os biomódulos pretos alcançaram maiores níveis de temperatura e apresentaram melhor desempenho de movimento, em linhas gerais.

Contudo, isso não significa dizer que se deve apenas utilizar a versão preta na fachada. **Há a possibilidade de variar as cores dos biomódulos. Recomenda-se, no entanto, alocar com o auxílio do algoritmo de simulação os biomódulos escuros nas zonas em que houver maiores níveis de incidência solares, e os mais claros em situações contrárias**. Reconhece-se ainda que as cores escuras deverão potencializar o desempenho dos biomódulos e responder com maior agilidade.

Após a tratamento estatístico dos dados da AITECB, identificou-se o **comportamento geral dos biomódulos através de modelos de regressão**, que explicam no mínimo 73,2% a variância dos diâmetros dos biomódulos em relação à variação da temperatura ambiental. Em geral, os modelos foram descritos por equações exponenciais (com a exceção do modelo para a amostra externa de metal, que foi linear). **As equações de comportamento dos biomódulos foram posteriormente integradas ao algoritmo de simulação por incidência solar**.

A partir da AITECB pode-se afirmar que o **Biomódulo Bimetal funciona de modo responsivo à variação de temperatura, sem necessitar de energia elétrica ou qualquer elemento eletromecânico**. No mais, os experimentos desenvolvidos confirmaram que a inter-relação entre distintas variáveis (como temperatura do ar, dimensão e forma das peças, posição do eixo de fixação e exposição à radiação solar) podem influenciar o comportamento dos biomódulos. Os testes são conclusivos para os tamanhos dos protótipos e especificações de materiais sob análise.

Futuros experimentos poderão **aprimorar a infraestrutura de coleta e o tratamento dos dados a fim de torná-los automatizados.** Sugere-se dispor de invólucro para teste das amostras com os materiais especificados para a fachada. Pois, tem-se ciência que as propriedades dos materiais influenciam na difusibilidade térmica (propriedade do material de aquecer mais ou menos rapidamente). O desempenho de abertura e fechamento dos biomódulos poderá ser avaliada sob a influência das especificações técnicas finais. Recomenda-se ainda proceder aos estudos com diferentes tipologias de vidro.

Outro ponto que pode ser levado em conta para os próximos ensaios é **disposição de diferentes tipos de sensores para controle dos elementos climáticos** (como o de incidência solar e de velocidade do vento, por exemplo) para além da temperatura.

Pontua-se ainda que **processo de identificação da variação dos diâmetros dos biomódulos deve ser pensado para seguir processos automáticos**. Desse modo, será possível ampliar o período de coleta de dados, para vinte e quatro horas por dia ou até meses e anos de coleta. E assim, obter uma maior quantidade de dados para tratamento estatístico sobre o comportamento dos biomódulos. Pois, considera-se que houve perda de dados ao se efetuar a coleta em três momentos do dia, ao invés de proceder o dia inteiro de coleta. Isso foi identificado durante a análise dos dados da AITEC. Porque entre às 8 e 9 horas não se contempla todo o intervalo de aquecimento do material, e quando se retorna entre às 13 e 14 horas já se alcançou as temperaturas mais elevadas do dia. Assim, pode haver perda de dados sobre temperaturas ambientais. Tal situação foi minimizada durante o ensaio do outono com a extensão do tempo de coleta. Nesse sentido, para garantir que não haja perdas de informações, recomenda-se efetuar a recolha de dados durante o dia inteiro.

Como estudos futuros para a investigação, ressalta-se relevância para a **confecção de protótipo de esquadria em escala 1:1 com materiais que correspondam às especificações finais da fachada**. Não foi possível implementar o protótipo, devido às restrições orçamentárias e ao tempo hábil da presente pesquisa. O protótipo deverá possuir duas camadas de vidro, de modo a formar cavidade de ar para posicionar os biomódulos e perfis de fixação em alumínio entre os vidros.

Recomenda-se levar em consideração o conceito evidenciado sobre fachada ventilada para gerir as massas de fluidos internamente aos vidros e contribuir para o conforto térmico da construção (item 7.7 e **Anexo I** à **K**). Assim, durante a ocorrência de elevadas temperaturas se evitará o sobreaquecimento e irradiação do calor para o ambiente construído. E, poderá contribuir para a redução de perda de temperatura durante a ocorrência de climas frios. A esquadria em escala 1:1 poderá ser utilizada para avaliar influência do vidro e do invólucro como um todo no desempenho de abertura e fechamento dos biomódulos.

8.7. Algoritmo Computacional

A solução da investigação responde à pergunta de pesquisa 'Como desenvolver o **algoritmo computacional** de modo a proporcionar de módulo para fachadas em Lisboa?'. O processo de desenvolvimento do algoritmo foi descrito em detalhes durante o capítulo seis e sete, ao longo de quatro *clusters* de definições. É capaz de gerar e simular a implementação dos biomódulos em distintas configurações nas fachadas (objetivo 3) e de proceder simulação da incidência solar (objetivo 4).

O algoritmo computacional pode ser utilizado na fase de concepção para simular e analisar antecipadamente a influência das biomódulos bimetálicos na regulação e controle da incidência solar na fachada. Dessa forma, espera-se contribuir para a sustentabilidade dos edifícios e para o desenvolvimento do nZEB através de fachadas cinéticas sem a utilização de dispositivos eletromecânicos para desencadear o funcionamento do sistema.

8.8. Algoritmo Paramétrico

A definição algorítmica permite gerar soluções paramétricas de módulos cinéticos e aplicá-los ao longo de fachadas (objetivo 3). O controle paramétrico permite proporcionar **diferentes níveis de detalhamento dos biomódulos** (de superfícies triangulares às superfícies complexas com vincos e recortes). Os **vincos ampliam a fidelidade conceitual do algoritmo. Já os recortes proporcionam versatilidade e personalização para os elementos modulares, que mantém relação topológica com a tesselação triangular inicial.**

O algoritmo permite a **produção de uma família de biomódulos.** Contudo, como se trata de módulos para promoção da proteção solar, quão maior forem os níveis de recortes, menor será a eficácia de proteção dos módulos. Assim, recomenda-se a **avaliação por simulação dos níveis de proteção solar** à medida que se efetua o recorte dos biomódulos. Pontua-se a necessidade de avaliar a ferramenta algorítmica e solução do módulo cinético com utilizadores / *stakeholders* finais, a fim de validar a solução proposta, tanto no nível prático quanto no estético da implementação.

Estudos futuros para o algoritmo paramétrico poderão explorar a **aplicação de mais de uma opção de biomódulo em uma mesma fachada**, cuja relação entre a área dos módulos esteja diretamente relacionada com a análise de incidência solar. Ou seja, módulos com menores recortes estarão posicionados nas regiões com maiores exposições solares, e o contrário acontecerá em a regiões com menores

incidências. A definição de *script* com programação escrita poderá ser efetuada a fim de aprimorar o desempenho algorítmico.

Outro ponto para estudo futuro diz respeito ao desenvolvimento de versão de algoritmo que leve em conta os parâmetros dos biomódulos virtuais para definir as matrizes por estampagem, que possibilitarão a materialização dos elementos cinéticos. Mas isso irá depender dos processos de fabricação e equipamentos estabelecidos para a produção em escala.

8.9. Algoritmo de Simulação

O **algoritmo de simulação** buscou avaliar a implementação dos biomódulos em projetos de arquitetura por meio de simulação baseada em modelação computacional por incidência solar. **A definição atribui diâmetros gerativos aos biomódulos, através da influência dos níveis de incidência solar da fachada e da temperatura ambiental do período sob análise.**

A correlação entre o intervalo de temperatura identificado e as equações de comportamento gerais dos biomódulos da AITECB promovem a variação dos diâmetros dos elementos modulares. Os locais que apresentam maiores incidências contam com biomódulos com maiores aberturas. Em contrapartida, os de menores alocam módulos mais fechados. É possível obter simulações das incidências solares sem e com a aplicação dos módulos, a fim de averiguar o resultado de proteção da incidência solar.

Para efetuar as simulações propriamente, duas tipologias de ambiente de teste foram utilizadas como referência. A sem pala que representa o contexto extremo de incidência solar. E a versão com pala, que possui sistema passivo de proteção solar (utilizado na fachada norte e sul da FAUL, Figura 37). Tais distinções objetivaram avaliar diferentes comportamentos frente aos índices extremos de incidência solar e à obstrução construtiva massiva.

Simulações de proteção de incidência solar foram desenvolvidas com biomódulos pretos entre vidros, posicionados na posição vertical e na horizontal entre vidros (objetivo 4). O clima de Lisboa e o local da FAUL foram utilizados como referência. Ratifica-se que a **definição algorítmica permite simular qualquer zona climática**, desde que haja a associação do arquivo climático do local e a orientação solar da construção.

As simulações foram realizadas de modo preditivo para os dias de virada de estação por critério astronômico. E para o dia 13 de julho de 2022, através dos intervalos de

temperatura ambientais identificados durante a coleta da onda de calor da AITECB. Foram também desenvolvidas simulações para horários específicos (ao amanhecer - entre as 8 e 9 horas e para horário que contempla elevadas temperaturas - entre as 13 e 14 horas).

Conforme outrora explicitado, quando as temperaturas são reduzidas, deve-se promover os ganhos térmicos através da promoção da radiação solar. Assim, para o contexto climático de referência, as análises demonstraram que os biomódulos na vertical proporcionam maiores níveis de exposição solares em temperaturas amenas que os posicionados na horizontal. Reconhece-se que a **disposição dos biomódulos na vertical oportuniza maior adaptabilidade frente às diferentes características térmicas das distintas estações.** Quando se almeja restringir os níveis de exposições solares da fachada sul, sujeita a elevadas temperaturas ambientais, por sua vez, recomenda-se utilizar os biomódulos na posição horizontal. Pois, as **simulações evidenciaram que os biomódulos aplicados na horizontal possuem desempenho de proteção solar superior ao vertical**.

Como visto, para a tipologia com pala, uma opção é alocar os biomódulos apenas nas posições com maiores níveis de incidência solar. Pois, a pala exerce eficientemente a função de sombreamento. Ao aliar as vantagens da pala com as dos biomódulos, será possível **otimizar a proteção solar, a quantidade de biomódulos e a permeabilidade visual da fachada**. Estudos futuros, podem aprofundar algoritmos evolutivos tendo em conta os critérios supracitados.

No mais, as análises revelaram **distintos comportamentos dos Biomódulos Bimetais por *self-shading* mediante variação de temperatura ambiental e incidência solar.** O algoritmo computacional contempla a algoritmo paramétrico e de simulação. É possível conceber parametricamente os biomódulos em distintas configurações e simular a proteção solar por incidência solar.

Finalmente, à medida que se leva em consideração os elementos climáticos conflitantes (visibilidade e os ganhos/perdas de calor, a iluminação e a ventilação natural), **simulações para controle térmico da edificação** associadas a **processos de otimização** torna-se premente para futuros estudos. Recomenda-se o desenvolvimento de análises de desempenho energético, conforto térmico e de iluminação natural. A versão conceitual sobre fachada ventilada irá requerer simulações avançadas por CFD para análises de conforto térmico do ambiente construído. Desse modo, espera-se que o módulo cinético para fachadas contribua para promover o conforto do usuário e reduzir do consumo de eletricidade.

8.10. Considerações Finais do Documento

A hipótese de pesquisa foi confirmada, pois '**por meio de processo biomimético sobre os movimentos násticos das plantas, experimentação com material inteligente e do projeto computacional, é possível desenvolver um módulo cinético para fachadas, adaptável a diferentes condições climáticas e que não necessita de dispositivo eletromecânico para funcionar**' foi possível desenvolver o Biomódulo Bimetal. Tal elemento foi bioinspirado na morfologia e no comportamento reversível da *Ammophila arenaria* a fim de controlar dinamicamente as fachadas por *self-shading*. Considera-se ainda que o desenvolvimento atendeu aos objetivos da investigação.

A transdisciplinaridade entre os campos de conhecimento das ciências da natureza, sociais e exatas deu suporte à pesquisa em questão, de modo a ligar projetistas aos biólogos e à tecnologia. O design funciona aqui, como um integrador de disciplinas e o projeto/conceitualização, como processo para a alcançar a convergência entre as distintas áreas de conhecimento.

O real contributo da pesquisa reside na relevância dos vincos no controle da resposta térmica do bimetal, de modo a permitir o movimento cinético dos biomódulos sem eletricidade ou qualquer dispositivo mecânico. Os vincos na camada ativa do bimetal são uma abstração às nervuras da planta, e colaboram para a adaptação do dispositivo a diferentes condições climáticas. O elemento modular cinético é, portanto, controlado ativamente por variação térmica, de modo previsível e repetível.

Contudo, como visto anteriormente, são inúmeros os desdobramentos que perpassam por: simulação para controle térmico, eficiência energética, CFD e iluminação natural; testes de fadiga; planejamento do ciclo de vida do produto para retorno e devolução à cadeia de produção; protótipo de esquadria 1:1 com biomódulos; desenvolvimento de solução para fachadas ventiladas; especificações para produção industrial, entre outros. Assim, tem-se ciência de que esta investigação não acabou. É apenas o ponto de partida.

Por fim, reafirma-se que Biomódulo Bimetal alia a inteligência da planta à do material, além de não utilizar dispositivo eletromecânico para acionar o sistema. Sua implementação em projetos de arquitetura poderá contribuir para a mitigação do sobreaquecimento do ambiente construído e ampliar a sustentabilidade de edificações com energia quase zero.

Referências

AB_Lab's. (2019, December). *Pho'liage ®*. https://www.artbuild.com/lab/pholiage

Achten, H. (2014). One and Many: An Agent Perspective on Interactive Architecture. In D. Gerber, A. Huang, & J. Sanchez (Eds.), *ACADIA 2014 Design Agency Proceedings* (Issue October, pp. 479–486). https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2014.479

Aelenei, D., Aelenei, L., & Pacheco, C. (2016). Adaptive Façade: concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, *91*, 269–275. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218

Aguiar, R., Queiroz, N., & Araújo, R. (2017). Biônica e Biomimética no contexto da complexidade e sustentabilidade em projeto. In A. Arruda (Ed.), *Design &Complexidade* (pp. 125–140). Blucher. https://doi.org/10.5151/9788580392159-07

Ahlquist, S., & Menges, A. (2011). Introduction: computational design thinking. In A. Menges & S. Ahlquist (Eds.), *Computational Design Thinking* (pp. 10–29). John Wiley & Sons Ltd.

Ahmar, S., & Fioravanti, A. (2012). Botanics and Parametric Design Fusions for Performative Building Skin: An application in hot climates. *Smart and Responsive Design - ECAADe 32*, *2*, 595–604. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2014.2.595

Ahmar, S., & Fioravanti, A. (2014). How plants regulate heat: Biomimetic Inspirations for building skins. In F. Madeo & M. Schnabel (Eds.), *Architectural Research through to Practice: 48th International Conference of the Architectural Science Association 2014*, (pp. 343–354). The Architectural Science Association & Genova University Press.

Alcoforado, M., Lopes, A., Andrade, H., & Vasconcelos, J. (2005). *Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa*. https://www.researchgate.net/publication/262567483

Al-obaidi, K. M., Ismail, M. A., Hussein, H., & Abdul, A. M. (2017). Biomimetic building skins: An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 1472–1491. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.028

Amaral, P., Ramos, G., Martins, A., & Santos, I. (2022, July 13). *Incêndios em Portugal: a situação ao minuto*. RTP Notícias. https://www.rtp.pt/noticias/pais/incendios-em-portugal-a-situacao-ao-minuto_e1419363

Anderson, C. (2010, February). Átomos são os novos Bits. *Exame, Ed.962, n. 3*, 96–105.

Anderson, T. (2005). *Velcro® being pulled apart*. Nikon Small World [Photograph]. https://www.nikonsmallworld.com/galleries/2005-photomicrography-competition/velcro-being-pulled-apart

Andrade, H. (2021, August 3). *12 plugins de Grasshopper que revolucionam o projeto*. Membrana Paramétrica. https://membranaparametrica.com/grasshopper-plugins/

Andrade, T., Arruda, A., Araújo, R., & Vicente, M. (2021). Sessão de cocriação: para repensar o elemento construtivo cobogó por inspiração biológica. In L. Librelotto, P. Ferroli, & R. Magnago (Eds.), *ENSUS 2021: IX Encontro de Sustentabilidade em projeto* (pp. 136–148).

Andrade, T., Beirão, J., & Arruda, A. (2022). Processo metodológico para propor módulo cinético e bioinspirado para fachada: um estudo em biomimética com sessão de

cocriação. In K. Araujo & V. Cavalcanti (Eds.), *Fronteiras do Design 3: [Entre] outros possíveis* (1st ed., Vol. 3, pp. 182–186). Blucher. https://doi.org/10.5151/9786555502206-08

Andrade, T., Beirão, J., Arruda, A., Araújo, R., & Soares, T. (2020). Overview of Nastic Movements in Plants: A Data Collection for Developing Responsive Facades. In A. Estévez (Ed.), *4th International Conference for Biodigital Architecture & Genetics* (pp. 212–221).

Andrade, T., Beirão, J., Arruda, A., & Cruz, C. (2021). The Adaptive Power of Ammophila arenaria: Biomimetic Study, Systematic Observation, Parametric Design, and Experimental Tests with Bimetal. *Polymers*, *13*(15), 1–17. https://doi.org/10.3390/polym13152554

Andrade, T., Beirão, J., Arruda, A., & Eysen, C. (2021). Toward adaptable and responsive facades: using strategies for transforming of the material and bio-based materials in favor of sustainability. In A. Arruda, C. Langella, & D. Bella (Eds.), *Cuaderno 149 | Centro de Estudios en Diseño y Comunicación (2021/2022)* (pp. 37–59). https://doi.org/https://doi.org/10.18682/cdc.vi149.5515

Anglès, J. (2010). *Disfrutar de la natureza con Gaudí e la Sagrada Familia*. Editorial Milenio.

Archi-Union Architects. (2014, September 15). *Silk-wall*. New Business Media. https://www.area-arch.it/en/silk-wall/

Arruda, A. (2015). Como a Biônica e Biomimética se relacionam com as estruturas naturais na busca de um novo modelo de pesquisa projetual. *VI Congreso Latinoamericano de Enseñanza Del Diseño*.

Arruda, A. (2018). Métodos e processos em biônica e biomimética: a revolução tecnológica pela natureza. In *Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a revolução tecnológica pela natureza*. Blucher.

Arruda, A. (2020). *Bionica e Design Carmelo Di Bartolo e il Centro Ricerche IED: esperienze memorabili da 30 protagonisti* (1st ed.). Blucher.

Ashdown, I., & Ward, G. (2013). Gendaymtx - generate an annual Perez sky matrix from a weather tape. In *Radiance*. https://www.radiance-online.org/learning/documentation/manual-pages/pdfs/gendaymtx.pdf

ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Addendum to ANSI ASHRAE 55-2020 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE.

AskNature. (2016). *Homeostatic facade system: Decker Yeadon*. https://asknature.org/idea/homeostatic-facade-system/#.XH1Oi4hKjIU

Associazione Culturale Silvia Dell'Orso. (2010, February 9). *Leonardo da Vinci, particolae del Codice sul volo degli uccelli, 1505-1506*. https://a-sdo.org/visioni-darte-2016-le-culture-del-mondo/leonardo-da-vinci-particolae-del-codice-sul-volo-degli-uccelli-1505-1506/

Autodesk. (2016, February 17). *Daylight factor calculation in Revit*. Autodesk. https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/

Daylight-factor-calculation-in-Revit.html?us_oa=dotcom-us&us_si=220f1cff-8d01-40fe-80af-bf2235d8f811&us_st=ecotect%20revit

Autodesk. (2023). *Robot Structural Analysis*. Autodesk Inc. https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview?term=1-YEAR&tab=subscription

Avarth. (2016). *Monthly mean min max temps*. http://hydrashare.github.io/hydra/viewer?owner=avarth&fork=hydra&id=monthly_mean_min_max_temps&slide=0&scale=1&offset=0,0

Azcon-Bieto, J., & Talon, M. (2008). Fundamentos de Fisiologia Vegetal. In *Universidad de Barcelona* (2nd ed.). McGraw-Hill Interamericana de Espãna. https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201

Badarnah, L. (2012). *Towards the Living envelope: biomimetics for building envelope adaptation* [Doctoral dissertation, Technische Universiteit Delf]. https://doi.org/https://doi.org/10.4233/uuid:4128b611-9b48-4c8d-b52f-38a59ad5de65

Badarnah, L., & Fernandez, J. (2015). Morphological configurations inspired by nature for thermal insulation materials. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures [IASS], April*.

Badarnah, L., & Kadri, U. (2014). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 37–41. https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458

Baxter, M. (2011). *Projeto de Produto - Guia prático para o desenvolvimento de novos produtos* (i. (Tradução) Iida, Ed.; 2nd ed.). Blücher.

Becker, T., & Huffer, S. (2015). *Breathing Skins*. https://www.tebe.berlin/innovation/

Beirão, J., & Duarte, J. (2018). Generic grammars for design domains. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, *32*, 225–239. https://doi.org/10.1017/S0890060417000452

Benyus, J. (1997). Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. In *Quill*. Harper Perennial.

Benyus, J. (2012). *Biomimética: Inovação inspirada pela natureza* (6th ed.). Pensamento Cultrix Ltda.

Bhushan, B. (2009). Biomimetics: Lessons from Nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *367*(1893), 1445–1486. https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0011

Biomimicry 3.8. (2015). Biomimicry DesignLens: a visual guide. In *Biomimicry 3.8*. https://biomimicry.net/the-buzz/resources/biomimicry-designlens/

Biomimicry 3.8. (2023). *Biomimicry 3.8: a regenerative world is possible*. https://biomimicry.net

Biomimicry Institute. (2019). *The Biomimicry Institute: Nature-Inspired Innovation*. https://biomimicry.org/

Biomimicry Institute. (2021). *It's time to ask nature*. https://asknature.org/

Böke, J., Denz, P., Suwannapruk, N., & Vongsingha, P. (2022). Active, Passive and Cyber-Physical Adaptive Façade Strategies: a Comparative Analysis Through Case Studies. *Journal of Facade Design and Engineering*, *10*(2), 1–18. https://doi.org/10.47982/jfde.2022.powerskin.01

Bomfim, G. (1995). *Metodologia para desenvolvimento de Projetos*. Editora Universitária UFPB.

Bonsiepe, G. (1992). *Teoria e prática do design industrial: elementos para um manual crítico*. Centro Português de Design.

Braun, V., & Clarke, V. (2013). *Successful qualitative research: a practical gride for beginners*. SAGE Publications.

Bresinsky, A., Körner, C., Kadereit, J., Neuhaus, G., & Sonnewald, U. (2012). *Tratado de Botânica de Strasburger* (36th ed.). ARTMED.

Bui, D., Nguyen, T., Ghazlan, A., Ngo, N., & Ngo, T. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied Energy*, *265*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797

Bürdek, B. (2006). *História, teoria e prática do design de produtos.* (Birkhäuser). Blücher.

Burry, M. (2003). Between intuition and process: parametric design and rapid prototyping. In *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing* (pp. 149–162). Taylor & Francis.

Caetano, I., & Leitão, A. (2020). Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. *Architectural Science Review*, *63*(2), 165–174. https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1680524

Caetano, I., Leitão, A., & Bastos, F. (2020). From Architectural Requirements to Physical Creations An Algorithmic-based Approach for Façade Design. *Journal of Facade Design and Engineering*, *8*(December), 59–80. https://doi.org/10.7480/jfde.2020.2.4543

Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, *9*(2), 287–300. https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008

Calatrava, S. (2023). *Reggio Emilia Stazione Mediopadana*. Santiago Catatrava Architects & Engineers. https://calatrava.com/projects/reggio-emilia-stazione-mediopadana-reggio-emilia.html

Caldas, L. (2008). Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics*, *22*(1), 59–70. https://doi.org/10.1016/j.aei.2007.08.012

Camacho, D., Sacht, H., & Vettorazzi, E. (2018). De los elementos perforados al cobogó: histórico de uso en la arquitectura Brasilera y consideraciones sobre su adaptación al clima. *PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção*, *8*(3), 205–216. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.20396/

Cambridge University Press & Assessment. (n.d.-a). *Cambridge Dictionary: Algorithm*. Cambridge Dictionary. Retrieved March 17, 2023, from https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/algorithm

Cambridge University Press & Assessment. (n.d.-b). *Cambridge Dictionary: Homeostasis*. Cambridge Dictionary. Retrieved April 8, 2019, from https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/homeostasis

Carrington, D. (2021, March 25). *Dimming the sun: $100m geoengineering research programme proposed*. The Guardiam. https://www.theguardian.com/environment/2021/mar/25/top-us-scientists-back-100m-geoengineering-research-proposal

Casimiro, E., Calheiros, J., Santos, F. D., & Kovats, S. (2006). National assessment of human health effects of climate change in Portugal: Approach and key findings. *Environmental Health Perspectives*, *114*(12), 1950–1956. https://doi.org/10.1289/ehp.8431

Casler, M., & Undersander, D. (2019). Identification of Temperate Pasture Grasses and Legumes. In *Horse Pasture Management* (pp. 11–35). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812919-7.00002-0

Castro, E., & Duarte, J. (2013). Mass customization of ceramic tableware through digital technology. *Green Design, Materials, and Manufacturing Processes*, 467–471. https://doi.org/10.1201/b15002-91

Cateloy, F. (n.d.). *Institut Du Mond Arabe: Architecture*. Institut Du Mond Arabe [Photograph]. Retrieved February 16, 2023, from https://www.imarabe.org/fr/architecture

Celani, G., & Pupo, R. T. (2008). Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: definições e estado da arte no Brasil. In *Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo*.

Centro de Informação Metal Mecânica. (2020). *Comportamento Elástico e Plástico dos Materiais*. https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6521

Chapman, S., Watson, J., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, *32*(10), 1921–1935. https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4

Charpentier, L., Cruz, E., Nenov, T., Guidoux, K., & Ware, S. (2022). Pho'liage: Towards a Kinetic Biomimetic Thermoregulating Façade. In F. Palombini & S. Muthu (Eds.), *Bionics and Sustainable Design* (pp. 367–401). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-19-1812-4_12367

Charpentier, V., Hannequart, P., Adriaenssens, S., Baverel, O., Viglino, E., & Eisenman, S. (2017). Kinematic amplification strategies in plants and engineering. *Smart Materials and Structures*, *26*(6), 1–30. https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa640f

Chen, K., Wang, X., Fessehaie, A., Yin, Y., Wang, X., & Arora, R. (2013). Is expression of aquaporins (plasma membrane intrinsic protein 2s, PIP2s) associated with thermonasty (leaf-curling) in Rhododendron? *Journal of Plant Physiology*, *170*(16), 1447–1454. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.05.007

Chergui, A., Hafid, L., & Melhaoui, M. (2017). Characteristics of marram grass (Ammophila arenaria L.), plant of the coastal dunes of the Mediterranean Eastern Morocco: Ecological, morpho-anatomical and physiological aspects. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, *8*(10), 3759–3765.

Cilento, K. (2012). *Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas*. ArchDaily. https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas

Climate Change Institute. (2023, July 13). *Daily 2-meter Air Temperature*. Climate Reanalyser, University of Maine. https://climatereanalyzer.org/clim/t2_daily/

Climate.OneBuilding.Org. (2022, October 17). *Repository of free climate data for building performance simulation From the Creators of the EPW*. https://www.climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/PRT_Portugal/index.html

Cohen, L., & Holliday, M. (1982). *Statistics for Social Scientists*. Harper & Row.

Collins, M., Nelson, C., Moore, K., & Barnes, R. (2017). *Forages, Volume 1: An Introduction to Grassland Agriculture* (7th ed., Vol. 1). Wiley Blackwell.

Costa, J., & Cunha, A. (2019). *Atlas da flora da Serra D'água à Foz do âncora*. Município de Viana do Castelo e Município de Caminha.

Couceiro, M. (2016). Biomimética. In F. Braida, J. Fonseca, & V. Morais (Eds.), *101 Conceitos de Arquitetura e Urbanismo na Era Digital* (pp. 36–37). ProBooks.

Cox, L. (2020, February 24). *"Unprecedented" globally: more than 20% of Australia's forests burnt in bushfires*. The Guardiam. https://www.theguardian.com/australia-news/2020/feb/25/unprecedented-globally-more-than-20-of-australias-forests-burnt-in-bushfires

Cross, N. (1982). Designerly ways of knowing. *Design Studies*, *3*(4), 221–227. https://doi.org/10.1016/0142-694X(82)90040-0

Cross, N. (2011). *Design Thinking: Understanding How Designers Think and Work*. Berg Publishing. https://doi.org/10.5040/9781474293884

Darwin, C. (2009). *The Power of Movement in Plants* (F. Darwin, Ed.). Cambridge University Press (original work published in 1880).

Dear, R., & Brager, G. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, *34*, 549–561.

Decker Yeadon LLC. (2014, January 8). *Homeostatic Façade System*. Material District. https://materialdistrict.com/article/homeostatic-facade-system/

Dijigow, P. (2021, August 19). *A planta que inspirou a invenção do velcro*. Escola de Botânica [Fotografia]. https://www.escoladebotanica.com.br/post/velcro

Doroteo, J. (2016, June 11). *Let Your Building "Breathe" With This Pneumatic Façade Technology*. ArchDaily. https://www.archdaily.com/789230/let-your-building-to-breathe-with-this-pneumatic-facade-technology

Dorst, K. (2004). *The Problem of Design Problems*. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.105.6547

DOSU Studio Architects. (2021). *DO|SU Studio Architecture*. https://www.dosu-arch.com/bloom

EcoLogicStudio. (2019). *HORTUS_XL | Astaxanthin.g*. https://www.create-sdu.com/projects/hortusxlastaxanthing

Einstein, A. (1917). The Quantum Theory of Radiation. *Physikalische Zeitschrift*, *18*(121), 1–15.

Engineered Material Solutions. (n.d.). Thermostatic Bimetal Designer' s Guide. In *Wickeder Group*. Wickeder Group.

Estévez, A. (2021). Sustainable Nature-Inspired Architecture. In D. Ting & J. Stagner (Eds.), *Sustainable Engineering Technologies and Architectures*. AIP Publishing.

European Commission. (2022, September 12). *Energy performance of buildings directive Revised in 2018, the directive will help reach the building and renovation goals set out in the European Green Deal*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

European Solar Shading Organization. (2006). *Energy saving and CO2 reduction potential from solar shading systems and shutters in the EU-25 (ESCORP-EU25)*. www.es-so.org

Fang, Y. (2017). *Optimization of Daylighting and Energy Performance Using Parametric Design, Simulation Modeling, and Genetic Algorithms*. Doctoral dissertation, Graduate Faculty of North Carolina State University.

Faria, R. (2012, March 18). *O que o velcro e carrapicho têm em comum?* De Toda Forma [Fotografia]. https://detodaforma.com/velcro-e-carrapicho/

Fernandes, M. (2013). *A Arquitectura Brasileira num dos vértices do triângulo Portugal/África/Brasil: o seu papel na divulgação do Movimento Moderno em Angola e Moçambique*. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G., & Ranzi, G. (2016). Shape morphing solar shadings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 863–884. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086

Fischer, T., & Herr, C. (2001). Teaching generative design. *Proceedings of the Conference on Generative Art*, 4(April), 1–14. http://generativedesign.eu/on/cic/ga2001_PDF/fischer.pdf

Floreano, D., Mattiussi, C., & Brooks, R. (2008). *Bio-Inspired Artificial Intelligence: theories, methods, and technologies*. The MIT Press. https://doi.org/10.1007/s10710-010-9104-3

Foged, I., & Pasold, A. (2010). Performative Responsive Architecture Powered by Climate. In A. Sprecher, S. Yeshayahu, & P. Lorenzo-Eiroa (Eds.), *LIFE in:formation, On Responsive Information and Variations in Architecture: Proceedings of the 30th Annual Conference of the ACADIA* (Issue October 2010, pp. 243–249). Cooper Union, Pratt Institute.

Foged, I., & Pasold, A. (2015). Thermal Activated Envelope: Development of a Method and Model for Programming Material Behaviour in a Responsive Envelope. In B. Martens, G. Wurzer, T. Grasl, W. Lorenz, & R. Schaffranek (Eds.), *Real Time - Proceedings of the 33rd eCAADe Conference - Volume 2, Vienna University of Technology, Vienna, Austria* (Issue October, pp. 449–458). https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2015.2.449

Fox, M. (2016). *Interactive architecture: Adaptive world* (1st ed.). Princeton Architectural Press.

Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. E. G. Bond Ltd.

Frazer, J. (2002). Creative Design and the Generative Evolutionary Paradigm. In *Bentley and Come* (pp. 253–274). Polytechnic University.

Freio, A. (2015, July 14). *Henning Larsen's university building has a facade that moves in response to changing heat and light*. Deezen. https://www.dezeen.com/2015/07/14/henning-larsen-syddansk-universitet-sdu-kolding-campus-building-denmark-green-standards-university/

Frick-Ruppert, J. (2010). *Mountain Nature: a seasonal natural history of the southern appalachians*. The University of North Carolina Press.

Fritz, R., & Mcneil, A. (2019, January 4). *Radiance*. Radsite. https://www.radiance-online.org/about

Gadelhak, M. (2019). *A Computational Framework for the Optimization of the Environmental Performance of Facades in Early Design Stages*.

Gadgil, R. (2006). *Marram grass: friend or foe? A review of the use of Ammophila arenaria on New Zealand Sand Dunes*. New Zealand Forest Research Institute Limited, Rotorua.

García, F. (1995). *Manual de Climatología Aplicada: Clima, Meio Ambiente y Planificación* (Rafael Puyol Antolín & Julio Vinuesa Angulo, Eds.). Editorial Sintesis S. A.

Garcia, S. (2015). A Grammar-Based System for Chair Design: From Generic to Specific Shape Grammars. *Real Time - Proceedings of the 33rd ECAADe Conference - Volume 1, Vienna University of Technology, Vienna, Austria*, *1*, 427–436.

Gero, J. (1996). Creativity, emergence and evolution in design. *Knowledge-Based Systems*, *9*, 435–448.

Gershenfeld, N. (2012). How to make almost anything: The digital fabrication revolution. *Foreign Affairs*, *91*(6), 43–57. https://doi.org/10.1145/2775280.2792721

Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, *18*, 11–23.

Gladman, A., Matsumoto, E., Nuzzo, R., Mahadevan, L., & Lewis, J. (2016). Biomimetic 4D printing. *Nature Materials*, *15*(4), 413–418. https://doi.org/10.1038/nmat4544

Glynn, R., & Sheil, B. (2011). *MEDIA-ICT Chapter Author(s): ENRIC RUIZ GELI and HIS TEAM AT CLOUD 9 Book Title: Fabricate 2011 Book Subtitle: Making Digital Architecture* (pp. 174–183). https://www.jstor.org/stable/j.ctt1tp3c6d.33

Gonçalves, H., & Graça, J. (2004). *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal* (D. / IP-3E, Ed.).

Gonçalves, J., & Duarte, D. (2006). Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. *Ambiente Construído*, *6*, 51–81.

González, F. (2004). *Arquitectura Bioclimática: en un entornosostenible* (M. Torres, M. Lería, C. Morata, & J. Crespo, Eds.). Editorial Munilla-Lería.

Google. (n.d.). *Design sprint: Sketch Methods*. Retrieved August 15, 2020, from https://designsprintkit.withgoogle.com/methodology/phase3-sketch

Grigore, M., Ivanescu, L., & Toma, C. (2014). *Halophytes : An Integrative Anatomical Study*. Springer International Publishing Switzerland. https://doi.org/DOI 10.1007/978-3-319-05729-3

Gruber, P., & Gosztonyi, S. (2010). Skin in architecture: Towards bioinspired facades. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *138*, 503–513. https://doi.org/10.2495/DN100451

Guggenheim Museum Bilbao. (1997). *Guggenheim Museum Bilbao*. https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building

Gumuchdjian, P., & Rogers, R. (2011). *Cidades para um pequeno planeta* (G. Gilli, Ed.; 1st ed.).

Guo, Q., Dai, E., Han, X., Xie, S., Chao, E., & Chen, Z. (2015). Fast nastic motion of plants and bioinspired structures. *Journal of the Royal Society Interface*, *12*(110), 1–14. https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0598

Hauer, E. (2018). *Erwin Hauer*. http://www.erwinhauer.com/eh/about/

Heisserer, A., Bell, B., Dukov, A., Nguyen, K., & Pinder, T. (2014). *Bimetal Facade System*. https://www.adamheisserer.com/#/bimetal-facade/

Heisserer, A., Nguyen, K., & Pinder, T. (2013a). *BI-METAL FACADE: Thermal Bi-Metal Fins in Triple Glazed Windows*. DARC Digital Architecture Research. http://darc.uta.edu/bimetal-1

Heisserer, A., Nguyen, K., & Pinder, T. (2013b). Embedded Responsiveness. *FALL 2013. UTA ARCH 5670.*, 12.

Henning Larsen. (n.d.). *University of Southern Denmark: Campus Kolding*. Henning Larsen. Retrieved February 17, 2023, from https://henninglarsen.com/en/projects/0900-0999/0942-sdu-campus-kolding

Hensel, M. (2008). Performance- Oriented Design Precursors and Potentials. *Architectural Design*, 48–53. https://doi.org/10.1002/ad.641

Hensel, M., Menges, A., & Weinstock, M. (2004). Emergence: Morphogenetic Design Strategies. In *Architectural Design* (Vol. 74, Issue 3).

Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2017). *Facade Construction Manual* (2nd ed.). DETAIL Business Information GmbH. https://doi.org/10.11129/9783955533700

Higueras, E. (2006). *Urbanismo Bioclimático*. Gustavo Gil, SL.

Hosseini, S., Mohammadi, M., Rosemann, A., Schröder, T., & Lichtenberg, J. (2019). A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review. *Building and Environment*, *153*, 186–204. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040

Huiskes, A. (1979). Biological flora of the British Isles: Ammophila Arenaria (L .) Link (Psamma Arenaria (L .) Roem . et Schult .; Calamgrostis Arenaria (L .) Roth). *Journal of Ecology*, *67*(1), 363–382. https://www.jstor.org/stable/2259356

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. (2022). *8.º Relatório provisório de incêndios rurais: 1 de janeiro a 15 de outubro*.

Invasive Species Compendium. (2019). *Poa pratensis (smooth meadow-grass)*. https://www.cabi.org/isc/datasheet/42489#tosummaryOfInvasiveness

IPCC. (2018). *Special Report: Global Warming of 1.5 °C*. https://www.ipcc.ch/sr15/

IPMA. (2022). *O clima: normais climatológicas*. IPMA. https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/

ISO 18458:2015. (2015, May). *ISO 18458 2015 Biomimetics—Terminology, Concepts and Methodology*. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18458:ed-1:v1:en

Jardim Botânico UTAD. (n.d.). *Poa pratensis L.* Retrieved June 12, 2020, from https://jb.utad.pt/especie/Poa_pratensis

Jarjat, P., Nenov, T., & Ware, S. (2020). Pho'liage ®: A Biomimetic Façade which increases Building Energy Efficiency. *Artbuild*, 1–50.

J.Mayer.H architects. (2023). *Metropol Parasol, the Redevelopment of the Plaza de la Encarnacíon in Seville*. J.MAYER.H Architects [Photograph]. https://jmayerh.de/metropol-parasol/.

Kadioglu, A., Terzi, R., Saruhan, N., & Saglam, A. (2012). Current advances in the investigation of leaf rolling caused by biotic and abiotic stress factors. *Plant Science*, *182*, 42–48. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.01.013

Kanthal. (2008). *Kanthal Thermostatic Bimetal Handbook*. Kanthal AB.

Kapsali, V. (2016). *Biomimicry for designers: applying Nature's Processes and Materials in he Real World*. Thames & Hudson.

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V., & Zeeuw Van Der Laan, A. (2015). Material driven design (MDD): A method to design for material experiences. *International Journal of Design*, *9*(2), 35–54. http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965/693

Karanouh, A., & Kerber, E. (2015). Innovations in dynamic architecture. *Journal of Facade Design and Engineering*, *3*(2), 185–221. https://doi.org/10.3233/fde-150040

Kennedy, J., & Garaita, M. (2001). Structural Biological Materials. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 46, Issue 4). https://doi.org/10.1016/s0144-8617(01)00240-5

Kim, J., Park, Y., Lee, J., & Park, C. (2019). Developmental polarity shapes thermo-induced nastic movements in plants. *Plant Signaling and Behavior*, *14*(8), 1–3. https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1617609

Kirimtat, A., Krejcar, O., Ekici, B., & Tasgetiren, M. F. (2019). Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. *Solar Energy*, *185*(July 2018), 100–111. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.048

Kirimtat, A., Kundakci, B., Chatzikonstantinou, I., & Sariyildiz, S. (2016). *Review of simulation modeling for shading devices in buildings*. *53*, 23–49. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020

Kleppner, D. (2005). Rereading Einstein on radiation. *Physics Today*, *58*(2), 30–33. https://doi.org/10.1063/1.1897520

Knight, T. (1989). *Shape Grammars in Education and Practice: History and Prospects*. http://www.mit.edu/~tknight/IJDC/

Knippers, J., Gresser, G., Körner, A., Born, L., Mader, A., Saffarian, S., Poppinga, S., & Schleicher, S. (2016). *Flectofold: Bio-inspired kinetic curved-line folding with distinct flexible hinge-zones*. https://axelkoerner.com/2016/11/15/flectofold/

Knippers, J., Gresser, G., Speck, T., Bischoff, M., Saffarian, S., Born, L., Körner, A., Mader, A., Sachse, R., Westermeier, A., Poppinga, S., & Schleicher, S. (2018). *FLECTOFOLD Demonstrator, BauBionik Exhibition, Natural History Museum, Stuttgart, 2018*. University of Stuttgart. https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/flectofold-demonstrator/

Knippers, J., Scheible, F., Helbig, K., Engineering, A., Knippers, M. O., Gmbh, H., & Jungjohann, H. (2012). *Bio-inspired Kinetic GFRP-façade for the Thematic Pavilion of the EXPO 2012 in Yeosu*. https://www.researchgate.net/publication/311534824

Kolarevic, B. (2003). Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing. In B. Kolarevic (Ed.), *Spon Press* (Vol. 16). Spon Press.

Koller, D., & Volkenburgh, V. (2011). *The Restless Plant*. Harvard University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Kong, D., Behling, S., & Bow, A. (2002). *Projects: City Hall*. Foster + Paterns. https://www.fosterandpartners.com/projects/city-hall

Kuru, A., Oldfield, P., Bonser, S., & Fiorito, F. (2019). Biomimetic adaptive building skins: Energy and environmental regulation in buildings. *Energy and Buildings*, *205*, 28. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109544

Kuru, A., Oldfield, P., Bonser, S., & Fiorito, F. (2020). A framework to achieve multifunctionality in biomimetic adaptive building skins. *Buildings*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10070114

Ladybug Tools LLC. (2022). *Ladybug Tools*. https://www.ladybug.tools/

Ladybug Tools LLC. (2023). *Ladybug Primer*. https://docs.ladybug.tools/ladybug-primer/components

Lau, O. S., Song, Z., Zhou, Z., Davies, K. A., Chang, J., Yang, X., Wang, S., Lucyshyn, D., Tay, I. H. Z., Wigge, P. A., & Bergmann, D. C. (2018). Direct Control of SPEECHLESS by PIF4 in the High-Temperature Response of Stomatal Development. *Current Biology*, *28*(8), 1273-1280.e3. https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.02.054

Laureano, R. (2020). *Testes de Hipóteses e Regressão: o meu manual de consulta rápida com SPSS Statistics* (M. Robalo, Ed.; 1st ed.). Edições Sílabo, Lda.

Lawrence, R. J., & Després, C. (2004). Futures of Transdisciplinarity. In *Futures* (Vol. 36, Issue 4, pp. 397–405). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.futures.2003.10.005

Lawson, B. (2006). *How Designers Think: The design process demystified* (4th ed.). Architectural Press.

Leach, N. (2009). Digital morphogenesis. *Architectural Design*, *79*(1 SPEC. ISS.), 32–37. https://doi.org/10.1002/ad.806

Leach, N. (2014). Parametrics Explained. *Next Generation Building*, *1*(1). https://doi.org/10.7564/14-ngbj10

Lechner, N. (2009). *Heating, cooling, lighting: sustainable design methods for architects* (N. Hoboken, Ed.; 3rd ed.). : John Wiley & Sons, Inc.

Leite, J. (2012, January 31). *Palácio da Justiça de Lisboa*. Restos de Coleção [Fotografia]. http://restosdecoleccao.blogspot.com/2012/01/palacio-da-justica-de-lisboa.html

Li, S., & Wang, K. (2015a). Fluidic origami: A plant-inspired adaptive structure with shape morphing and stiffness tuning. *Smart Materials and Structures*, *24*(10), 105031. https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/10/105031

Li, S., & Wang, K. (2015b). Fluidic origami with embedded pressure dependent multi-stability: A plant inspired innovation. *Journal of the Royal Society Interface*, *12*(111). https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0639

Lienhard, J. (2014). *Bending-Active Structures using elastic deformation in static and kinematic systems and the structural potentials therein*. Universität Stuttgart.

Lienhard, J., Schleicher, S., Poppinga, S., Masselter, T., Müller, L., & Sartori, J. (2012). Flectofin ® A Hinge-less Flapping Mechanism Inspired by Nature International. *International Bionic-Award 2012*, 18.

Lift Architects. (n.d.). *The Air Flow(er)*. Retrieved June 7, 2019, from http://www.liftarchitects.com/air-flower

Lisboa E-Nova – Agência de Energia e Ambiente de Lisboa. (n.d.). *Observatórios Lisboa: Energia*. Retrieved February 9, 2023, from http://www.observatorios-lisboa.pt/info_energia.html

Loonen, R., Rico-Martinez, J., Favoino, F., Brzezicki, M., Menezo, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. (2015). Design for façade adaptability-Towards a unified and systematic characterization. *Proceedings of the 10th Energy Forum - Advanced Building Skins, Bern, Switzerland*, 1274–1284. https://www.researchgate.net/publication/279955723

Loonen, R., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *25*, 483–493. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016

Lopes, A., Oliveira, A., Correia, E., & Reis, C. (2020). *Identificação das Ilhas de Calor Urbano e Simulação para as Áreas Críticas da Cidade de Lisboa: Fase 1-Caraterização e cartografia das ilhas de calor atuais*.

López, M., Rubio, R., Martín, S., & Croxford, B. (2017). How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 692–703. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018

Luo, Y., & Li, Q. (2010). Effects of light and low temperature on the reciprocal style curvature of Flexistylous Alpinia Species (Zingiberaceae). *Acta Physiologiae Plantarum*, *32*(6), 1229–1234. https://doi.org/10.1007/s11738-010-0497-7

Malhão, D., & Bruneck, R. (2011). *Oceanário de Lisboa*. Campos Costa Arquitetos [Fotografia]. https://camposcosta.com/projeto/oceanario-de-lisboa/

Marconi, M., & Lakatos, E. (2003). Fundamentos de metodologia científica. In Editora Atlas S.A. (Ed.), *Editora Atlas S. A.* (5th ed.). https://doi.org/10.1590/S1517-97022003000100005

Marshall, S., & Ward, M. (2019). *The Breeze Block Book* (S. Marshall & M. Ward, Eds.). Uro Publications.

Martin, B., & Hanington, B. (2012). Universal methods of design: 100 ways to research complex problems, develop innovative ideas, and design effective solutions. In *Choice Reviews Online*. Rockport Publishers.

Martín-Gómez, C., Zuazua-Ros, A., Bermejo-Busto, J., Sanz, C., Baquero, E., & Miranda, R. (2019). Potential strategies offered by animals to implement in buildings energy performance: Theory and practice. *Frontiers of Architectural Research*, *8*, 17–31.

Martino, J. (2015). *Algortimos Evolutivos: como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura*. UNICAMP.

Materiability Research Group. (n.d.). *Hydroceramic*. 2013. Retrieved March 14, 2020, from http://materiability.com/portfolio/hydroceramic/

Mazzoleni, I. (2013). *Architecture Follows Nature: biomimetic principles for innovative design*. CRC Press.

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*.

McNeel Europe. (2023). *Food4Rhino: apps for Rhino and Grasshopper*. McNeel Europe. https://www.food4Rhino.com/en

Mediopadana. (2022). *Una stazione per tante destinazioni*. Mediopadana. https://www.stazione-mediopadana.it/index.html

Mendonça, P. (2005). *Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados* [Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho]. https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/4250

Menges, A. (2012a). *Material Computation: higher integration in morphogenetic design* (2nd ed.). Architectural Design.

Menges, A. (2012b). *HygroScope: Morfologia Meteorossensitiva*. http://www.achimmenges.net/?p=5083

Menges, A., & Ahlquist, S. (2011). *Computational Design Thinking*. John Wiley & Sons Ltd.

Menges, A., Knippers, J., Bechert, S., Krieg, O., Schwinn, T., Sonntag, D., Alvarez, M., Brütting, J., Campbell, S., Chumak, M., Chung, H., Few, J., Herter, E., Jaroszewski, R., Kao, T., Kim, D., Lai, K., Lee, S., Manitta, R., … Nebelsick, J. (2015). *ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16*. University of Stuttgart. https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2015-16/

Menges, A., Knippers, J., Krieg, O., Mihaylov, B., Brachat, P., Busch, B., Fahimian, S., Gegenheimer, C., Haberbosch, N., Kästle, E., Kwon, Y., Zhai, H., Gabler, M., La

Magna, R., Reichert, S., Schwinn, T., & Waimer, F. (2011). *ICD/ITKE Research Pavilion 2011*. Universität Stuttgart. https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/

Menges, A., & Reichert, S. (2015). Performative wood: Physically programming the responsive architecture of the HygroScope and HygroSkin projects. *Architectural Design*, *85*(5), 66–73. https://doi.org/10.1002/ad.1956

Merin, G. (2013, July 5). *AD Classics: The Crystal Palace / Joseph Paxton*. ArchDaily [Photograph]. https://www.archdaily.com/397949/ad-classic-the-crystal-palace-joseph-paxton

Mills, G. (2006). *The Climate of London by Luke Howard (1833)* (International Association for Urban Climate, Ed.; Vol. 1). SATTAL (Walkinstown, Dublin) and bound by Antiquarian Bookcrafts (Rathfarnham, Dublin). .

Minorsky, P. V. (2019). Insights into thermonastic leaf movements. *Plant Physiology*, *180*(2), 682–683. https://doi.org/10.1104/pp.19.00520

Mitchell, W. J., & McCullough, M. (1995). *Digital Design Media : Online Contents* (2nd ed.). Van Nostrand Reinhold.

Mitro, E. (2014, September 18). *IAAC students create hydroceramic: a passive cooling system for buildings*. DesignBoom. https://www.designboom.com/architecture/iaac-dmic-hydroceramic-passive-cooling-system-09-18-2014/

Mobe Lab. (2015). *The Grasshopper Primer*. Mode Lab. https://modelab.gitbooks.io/grasshopper-primer/content/index.html

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, DG. (2015). Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, *24*(2), 335–342. https://doi.org/10.5123/s1679-49742015000200017

Mountain, E. (n.d.). *Coordenadas de latitude e longitude*. Shutterstock, Inc. Retrieved January 20, 2023, from https://www.shutterstock.com/pt/image-vector/latitudelongitudecoordinates-326090990

Muhammad, G., Hussain, M., Jantan, I., & Bukhari, S. (2016). Mimosa pudica L., a High-Value Medicinal Plant as a Source of Bioactives for Pharmaceuticals. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *15*(2), 303–315. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12184

Munari, B. (1981). *Das coisas nascem coisas* (J. Vasconcelos, Ed.). Edições 70.

Muratovski, G. (2016). *Research for Designers: A Guide to Methods and Practice* (Mila Steele, Ed.). SAGE Publications Ltd.

Nakamura, Y., Reichelt, M., Mayer, V. E., & Mithöfer, A. (2013). Jasmonates trigger prey-induced formation of "outer stomach" in carnivorous sundew plants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *280*(1759). https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0228

NASA Science. (2010). *National Aeronautics and Space Administration, Science Mission Directorate*. NASA Science. https://science.nasa.gov/ems/01_intro

National Laboratory of the U.S. Department of Energy. (2023). *OpenStudio®* . OpenStudio® . https://openstudio.net

Nematchoua, M., Orosa, J., & Afaifia, M. (2022). Prediction of daily global solar radiation and air temperature using six machine learning algorithms; a case of 27 European countries. *Ecological Informatics*, *69*. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101643

Niklas, K. (1989). Mechanical Behavior of Plant Tissues As Inferred From the Theory of Pressurized Cellular Solids. *American Journal of Botany*, *76*(6), 929–937. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1989.tb15071.x

Nilsen, E. (1990). Why Do Rhododendron Leaves Curl ? *Arnoldia*, *50*, 30–35.

Nilsen, E., Arora, R., & Upmanyu, M. (2014). Thermonastic leaf movements in Rhododendron during freeze-thaw events: Patterns, functional significances, and causes. *Environmental and Experimental Botany*, *106*, 34–43. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.01.005

Nouvel, J., Lézénès, G., Soria, P., & Architecture Studio. (2019). *Arab World Institute*. http://www.jeannouvel.com/en/projects/institut-du-monde-arabe-ima/

Oceanário de Lisboa. (2015). *O Oceanário*. [Fotografia]. https://www.oceanario.pt/o-oceanario

Octopus Manual. (n.d.). Retrieved May 28, 2023, from https://www.food4rhino.com/en/app/octopus

Olgyay, V. (1973). *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. University Press (Trabalho original publicado em 1963).

Olgyay, V. (2002). *Arquitectura y Clima: manual de diseño para arquitectos y urbanistas* (Susana Rodríguez Alamparte, Ed.; 2nd ed.). Gustavo Gili Editorial S.A (Trabalho original publicado na década de 50).

Oliveira, A., Lopes, A., Correia, E., Niza, S., & Soares, A. (2021). Heatwaves and summer urban heat islands: A daily cycle approach to unveil the urban thermal signal changes in Lisbon, Portugal. *Atmosphere*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/atmos12030292

Oliveira, A., Lopes, A., & Soares, A. (2022). Excess Heat Factor climatology, trends, and exposure across European Functional Urban Areas. *Weather and Climate Extremes*, *36*. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100455

Oliveira, M. (2019). *Towards a Bio-Shading System Concept Design Methodology* (Issue December). Doctoral dissertation, Instituto Universitário de Lisboa, School of Technology and Architecture.

Oliver Betz, Annette Birkhold, Marco Caliaro, Benjamin Eggs, Anja Mader, Jan Knippers, Oliver Röhrle, & Olga Speck. (2016). Adaptive Stiffness and Joint-Free Kinematics:Actively Actuated Rod-Shaped Structuresin Plants and Animals and Their Biomimetic Potential in Architecture and Engineering. In J. Knippers, K. Nickel, & T. Speck (Eds.), *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biologically-Inspired Systems* (1st ed., pp. 139–140). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2

Omrany, H., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Raahemifar, K., & Tookey, J. (2016). *Application of passive wall systems for improving the energy ef fi ciency in buildings : A comprehensive review*. *62*, 1252–1269. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.010

Onoda, Y., Westoby, M., Clissold, F., Cornelissen, J., Fine, P., & Jerome, J. (2011). Global patterns of leaf mechanical properties. *Ecology Letters*, *14*, 301–312. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01582.x

Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Town Planning Technion*, *27*, 229–265. https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002

Oxman, R. (2008). Performance-based Design : Current Practices and Research Issues. *International Journal of Architectural Computing*, 17. https://doi.org/10.1260/147807708784640090

Oxman, R. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, *52*, 4–39. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001

Park, Y., Lee, H., Gil, K., Kim, J., Lee, J., Lee, H., Cho, H., Vu, L., Smet, I., & Park, C. (2019). Developmental programming of thermonastic leaf movement. *Plant Physiology*, *180*(2), 1185–1197. https://doi.org/10.1104/pp.19.00139

Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. (2010, May 19). *Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN

Paulert, R. (2012). *Uso de elementos vazados na arquitetura: estudo de três obras educacionais contemporâneas*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

P.Bentley. (1999). Evolutionary Design by Computers. In *Evolutionary Design by Computers*. Morgan Kaulfmann Publishers Inc.

Peters, B., & Peters, T. (2013). Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design. In *Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design* (Vol. 9781118522). https://doi.org/10.1002/9781118653074

Pine, J. (1993, July). Mass Customization: The New Frontier in Business Competition. *The Academy of Management Review*, *19*(3), 588–593. http://www.jstor.org/stable/258941 .

Potsdam Institute for Climate Impact Research. (2018). *UN climate summit agrees on rulebook – yet more ambition is needed: PIK leaders at COP24 in „Heißzeit" times*. https://www.pik-potsdam.de/news/in-short/un-climate-summit-agrees-on-rulebook-yet-more-ambition-is-needed-pik-leaders-at-cop24-in-201eheisszeit201c-times

Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., & Kilian, A. (2007). *Architectural Geometry* (D. Bentley, Ed.; 1st ed.). Bentley Institute Press.

Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural Geometry. *Computers & Graphics*, *47*, 145–164.

Pupo, R. T. (2009). *Inserção da prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto: um novo desafio para o ensino da arquitetura*.

Randall, D., Burggren, W., & French, K. (2002). *Eckert animal physiology: mechanisms and adaptations*. W. H. Freeman anda Company.

Rascio, N., Carfagna, S., Esposito, S., Rocca, N., Gullo, M., Trost, P., & Vona, V. (2012). *Elementi di Fisiologia Vegetale*. Edises.

Rathee, A., Mitrofanova, E., Santayanon, P., Markopoulou, A., Alexandre Dubor, & Belge, M. (2013). *Hydroceramic*. https://iaac.net/project/hydroceramic/

Reichert, S., Menges, A., & Correa, D. (2014). Computer-Aided Design Meteorosensitive architecture : Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design*, *60*, 50–69. https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010

Reis, C., Lopes, A., & Nouri, A. (2022). Urban heat island data by local weather types in Lisbon metropolitan area based on Copernicus climate variables data set for European cities. *Data in Brief*, *42*, 1–7.

Ritter, A. (2007). *Smart Materials: in architecture, interior architecture and design*. Birkhäuser – Publishers for Architecture.

Rivière, M., Derr, J., & Douady, S. (2017). Motions of leaves and stems, from growth to potential use. *Phiysical Biology*, *14*(5), 33. https://doi.org/10.1088/1478-3975/aa5945%0AThis

Robert McNeel & Associates. (2023). *Rhino in Architecture, Engineering, and Construction*. Robert McNeel & Associates. https://www.rhino3d.com/for/architecture/

Rodrigues, J., & Martins, P. (2005). *Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica (Vol. 1 - Fundamentos teóricos* (Vol. 1). Escolar Editora.

Rodrigues, J., & Martins, P. (2010). *Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica (Vol. 2 - Aplicações industriais)* (2nd ed.). Escolar Editora.

Rodrigues, T., & Machado, S. (2008). Pulvinus functional traits in relation to leaf movements: A light and transmission electron microscopy study of the vascular system. *Micron*, *39*(1), 7–16. https://doi.org/10.1016/j.micron.2007.09.001

Rodríguez-Echeverría, S., Freitas, H., & Putten, P. (2008). Genetic Diversity and Differentiation of Ammophila arenaria (L .) Link as Revealed by ISSR Markers. *Journal of Coastal Research*, *24*(1), 122–126. https://doi.org/10.2112/06-0668.1

Royall, E. (2010). Defining Biomimicry: Architectural Applications in Systems and Products. In C. for S. Development (Ed.), *UTSoA - Seminar in Sustainable Architecture*. The University of Texas at Austin. School of Archiitecture.

Rutten, D. (2011, March 4). *Evolutionary Principles applied to Problem Solving*. I Eat Bugs For Breakfast. https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/

Sack-Nielsen, T. (2017). *Performance through thickfolds: approaching climate-responsive behaviours through shape, materialisation and kinematics* [Doctor of Philosophy in Architecture]. Aarhus School of Architecture.

Sands, L. (2023, July 5). *This July 4 was hot. Earth's hottest day on record, in fact.* The Washington Post. https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2023/07/05/hottest-day-ever-recorded/

Sarakinioti, M., Turrin, M., Konstantinou, T., Tenpierik, M., & Knaack, U. (2018). Developing an integrated 3D-printed façade with complex geometries for active temperature control. *Materials Today Communications*, *15*, 275–279. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.027

Sarakinioti, M., Turrin, M., Teeling, M., De Ruiter, P., Van Erk, M., Tenpierik, M., Konstantinou, T., Knaack, U., Pronk, A., Teuffel, P., Van Lier, A., Vorstermans, R., Dolkemade, E., De Klijn, M., Loonen, R., Hensen, J., & Vlasblom, D. (2017). Spong3d 3D printed facade system enabling movable fluid heat storage. *Spool*, *4*(2), 57–60. https://doi.org/10.7480/spool.2013.1.624

Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Speck, T., & Knippers, J. (2015). A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. *CAD Computer Aided Design*, *60*(January), 105–117. https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.01.005

Schmidt-Nielsen, K. (1997). *Animal Physiology: Adaptation and environment* (5th ed.). Cambridge University Press.

Schön, D., & Wiggins, G. (1992). *Kinds of seeing and their functions in designing*.

Shelden, D. (2002). Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry's Architecture. In *Department of Architecture: Vol. Doctor of*. Doctoral dissertation, Masachusetts Institute of Technology, Masachusetts.

SIC Notícias. (2022, July 13). *Incêndios em Portugal: calor extremo e vento causam grande preocupação*. SIC Notícias. https://sicnoticias.pt/pais/2022-07-13-Incendios-em-Portugal-calor-extremo-e-vento-causam-grande-preocupacao-691e584e

Smeer, M. (2022). *Climate Consultant* . https://climate-consultant.informer.com/6.0/

Snodgrass, A., & Coyne, R. (1996). Is Designing Hermeneutical? *Architectural Theory Review*, *2*(1), 65–97. https://doi.org/10.1080/13264829609478304

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *104*(March), 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Soares, T. (2023). *Nature Morphologic Design (NMD) -Metodologia para a Concepção de Linha de Artefatos com Inspiração na Morfologia da Natureza*. Tese de Doutoramento, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Design PPGDesign.

Sociedade Portuguesa de Botânica. (2022). *Flora.on*. https://flora-on.pt/

Soddu, C. (1995). The design of morphogenesis. An experimental research about the logical procedures in design processes. *Demetra Magazine*, 1–5.

Song, J., Heo, S., & Shim, J. (2018). Snapping Facades: Exploring Elastic Instability for the Building Envelope. *Technology Architecture and Design*, *2*(1), 45–54. https://doi.org/10.1080/24751448.2018.1420964

Steadman, P. (2008). *The evolution of designs: biological analogy in architecture and the applied arts*. Routledge Taylor and Francis Group (original work published in 1979).

Stiny, G., & Gips, J. (1971). Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture. *Anais Do Congresso IFIP*, 1–16. https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2

Storey, M. (2002, July 21). *Ammophila arenaria*. Diiscover Life. https://www.discoverlife.org/mp/20p?see=I_MWS4513&res=640

Strahler, A. (1989). *Geografia Física* (A. A. J. Guilló, Ed.; 7th ed.). Omega SA.

Sung, D. (2016). Smart Geometries for Smart Materials : Taming Thermobimetals to Behave. *Journal of Architectural Education ISSN:*, *70*(1), 96–106. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10464883.2016.1122479

Szewczyk, W., Dubas, E., Kowalik, K., Jezierski, T., & Gł, T. (2015). Anatomical and morphological factors affecting wear tolerance of turfgrass. *Scientia Horticulturae*, *185*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.01.013

Talpa. (2016, March 12). *Marram grass under the microscope*. BlipFoto [Photograph]. https://www.blipfoto.com/entry/2155345469121758434

TBM Designs. (2020). *InVert Self-Shading Window System: flipping energy efficiency on its head*. https://www.tbm-designs.com

Tedeschi, A. (2018). *AAD_Algorithms-Aided Design: Parametric Estrategies using grasshopper* (F. Wirz, Ed.). Le Penseur Publisher.

Terzidis, K. (2004). The nature of computation Algorithmic Design: A Paradigm Shift in Architecture? *Proceedings of the 22nd ECAADe Conference*, 201–207. http://www.bol.ucla.edu/~kostas/

Thompson, D. (1992). *On Growth and Form: The Complete Revised Edition*. New ed. Cambridge University Press (original work published in 1942).

Turrin, M., Von Buelow, P., & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, *25*(4), 656–675. https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.009

Ueda, M., Ishimaru, Y., Takeuchi, Y., & Muraoka, Y. (2019). Plant nyctinasty – who will decode the 'Rosetta Stone'? *New Phytologist*, *223*(1), 107–112. https://doi.org/10.1111/nph.15717

Uehlein, N., & Kaldenhoff, R. (2008). Aquaporins and plant leaf movements. *Annals of Botany*, *101*(1), 1–4. https://doi.org/10.1093/aob/mcm278

United Nations. (2015). *Sustainable development gols: the17 goals*. United Nations . https://sdgs.un.org/goals

University of Southern Denmark. (2021). *Campus Kolding: SDU in Kolding is situated by the harbour along with a number of other educational institutions*. https://www.sdu.dk/en/om_sdu/byerne/kolding/studieliv

U.S. Department of Energy's, Building Technologies Office, & National Renewable Energy Laboratory. (2023, March 31). *Energy Plus*. EnergyPlus. https://energyplus.net/

Vassão, C. (2010). *Metadesign: ferramentas, estratégias e ética para complexidade*. (1st ed.). Blucher.

Vaz, C., Souza, J., Pinto, H., Cardoso, A., & Queiroz, N. (2016). O desenvolvimento de elementos de protenção de fachada responsivos - exploração e controle de processo. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, *11*(2), 73–87. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v11i2.118141 O

Vazquez, E. (2018). *Masonry screen walls in Paraguai: creating a digital framework for optimizing environmental performance through shape configuration*. Dissertation of master, Pennsylvania State University, Pennsylvania,USA.

Vazquez, E., Randall, C., & Duarte, J. (2019). Shape-changing architectural skins: a review on materials, design and fabrication strategies and performance analysis. *Journal of Facade Design and Engineering*, *7*(2), 91–102. https://doi.org/10.7480/jfde.2019.2.3877

Velcro IP Holdings LLC. (2023). *Velcro(R):original-thinking*. Velcro IP Holdings LLC. https://www.velcro.com/original-thinking/our-story/

Vieira, A., Borba, C., & Rodrigues, J. (2013). *Cobogó de Pernambuco* (J. Rodrigues, Ed.; 1st ed.).

Volkov, A., Foster, J., Baker, K., & Markin, V. (2010). Mechanical and electrical anisotropy in Mimosa pudica pulvini. *Plant Signaling and Behavior*, *5*(10), 1211–1221. https://doi.org/10.4161/psb.5.10.12658

Volkov, A., O'Neal, L., Volkova, M., & Markin, V. (2013). Morphing structures and signal transduction in Mimosa pudica L. induced by localized thermal stress. *Journal of Plant Physiology*, *170*(15), 1317–1327. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.05.003

Wahbeh, W. (2017). Building skins, parametric design tools and BIM platforms. *Conference Proceedings of the 12th Conference of Advanced Building Skins*, 1104–1111. https://www.researchgate.net/publication/320244444

Wallpaper Flare. (n.d.). *Mimosa pudica leaf*. Wallpaper Flare [Photograph].

Walter, H. (2008). Floral biology, phytogeography and systematics of Eriosyce subgenus Neoporteria (Cactaceae). *Bradleya*, *26*(26), 75–98. https://doi.org/10.25223/brad.n26.2008.a6

Wang, H., Nilsen, E., & Upmanyu, M. (2020). *Mechanical basis for thermonastic movements of cold-hardy Rhododendron leaves*.

Wang, X., Arora, R., Horner, H. T., & Krebs, S. L. (2008). Structural adaptations in overwintering leaves of thermonastic and nonthermonastic Rhododendron species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *133*(6), 768–776. https://doi.org/10.21273/jashs.133.6.768

Wang, X., Penga, Y., Singerb, J. W., Fessehaie, A., Krebs, S. L., & Arora, R. (2009). Seasonal changes in photosynthesis, antioxidant systems andELIPexpressionin a thermonastic and non-thermonasticRhododendronspecies.pdf. *Elsevier Enhanced Reader*, *177*, 607–617. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.08.009

Whitehead, H. (2003). Law of form. In *Architecture inthe Digital Age: Design and Manufacturing* (pp. 116–148).

Wood, W. (1953). Thermonasty in tulip and crocus flowers. *Journal of Experimental Botany*, 4(1), 65–77. https://doi.org/10.1093/jxb/4.1.65

Woodbury, R. (2010). Elements of parametric design. In *Routledge* (Vol. 1).

World Meteorological Organization. (2018). *Guide to climatological practices*. World Meteorological Organization.

World Weather & Climate Information. (2020). *Climate and Average Monthly Weather in Lisbon (Lisbon region), Portugal*. https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine,lisbon,Portugal

Zaha Hadid Architects. (2012). *Hey Aliyev Centre*. Zaha Hadid Architects. http://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre/

HUONA (SHANGHAI) NEW MATERIAL CO., LTD
No.58, Tieli Road, Baoshan District, Shanghai, 201902 China
TEL: +86 21 66650080 FAX:+86-21-56116916

产品技术质量证明书
CERTIFICATE OF QUALITY

合同号(Contract No)：			WE HEREBY CERTIfY THAT THIS REPORT IS CORRECT AND THAT ALL TEST RESULTS ARE IN COMPLIANCE WITH THE SPECIFICATION DESCRIBED HEREIN.			运输号 Transport No	/	目的地 Destination	
订货 单位 (Buyer):						日期（Date）	2020/5/24		
序号 Item	产品名称 Product	产品规格 Specification	状态 Temper	数量（kg) Quantity	原材料批号 Raw material Batch No	熔炼批号 Melt No	加工批号 Processing Batch No	制造方法 Manufacture Methods	包装 (Packing)
1	5J11	0.10 x 24.5mm	硬态	51.86	HJ200547	S19-1480	BR-1	Annealed	Carton

机 械 性 能 及 其 他 检 测 项 目(Mechanical properties and other inspection items)

序号 Item	Flexivity		Modules of Elasticity	Linearity Temperature	硬 度 Hardness HV	探伤检查 Nondestructive Test	表面质量/尺寸检查 Inspection of Surf.Qual.and Dim.
2	10-90℃ x10^{-6}/℃	40-150℃ x10-6/℃	N/mm^2（*10^5）	℃	/	合格	合格
	38.7x(1+/4%)	37.6	1.38	-20~200			

化 学 成 分(Chemical Composition)

序号 Item		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	杂质 Impurity	标准 Standard
3	Mn75Ni15Cu10	0.05	—	Bal	0.03	0.02	—	14.0-16.0	9.0-11.0	≤0.8	/	GB/T 4461-1992
	Ni36	0.05	≤0.3	≤0.6	0.02	0.02	—	35.0-37.0	—	Bal	/	

QUALITY INSPECTION DEPARTMENTS
质 检 部

Page: 1-1

Apêndice B – Fatura do Bimetal.

HUONA

COMMERCIAL INVOICE

HUONA (SHANGHAI) NEW MATERIAL CO., LTD

地址：Add:No.58, Tieli Road, Baoshan District, Shanghai, 201902 China
电话：Mob:+86-189 3065 3049 Tel: + 021 6665 0080
网址：Web:www.shhuona.com
邮箱：Email:sales@shhuona.com

INVOICE #. HJ200922
INVOICE DATE: 2020/10/19
DUE DATE: 2020/10/12

Customers:

Name: ***University of Lisbon***
Address: ***Portugal***
Contact: ***Mrs. Tarciana Andrade***
Phone: ***+351-917-875454***

ITEM	GRADE	DESCRIPTION	QTY / KG	UNIT PRICE	AMOUNT
1	P675r	P675r THERMAL BIMETAL STRIP THICKNESS: 0.025" WIDTH: 100 mm QTY: 1 KGS OTHERS: Bimetal Print on the passive layer	1.00	€112.37	€112.37

BENEFICARY'S BANK:
Western Union : Frist Name Second Name
Jinghua Zhao

Subtotal: €112.37
Discount: €0.00
Payment Cost: €10.00
Total Payment: €122.37

NOTE:

1. Price Terms:EXW Shanghai, 100% T/T Payment in advance
2. Lead Time: Within 10-15 days after received the deposit
3. Port of Loading: Shanghai ,China
4. Packaging: Cartons

Thank You For Your Cooperation !

HUONA (SHANGHAI) NEW MATERIAL CO.,LTD 新材料有限公司

Authorized Signature

Anexos

Anexo A – Organismos identificados na revisão

Síntese dos organismos (entre plantas individuais e famílias de plantas) que possuem movimentos násticos, e foram identificadas durante a revisão sistemática de literatura. Organismos em negrito têm mais de uma tipologia de movimento.

Nastic	*Organism*	*Biological Model Summary*
THI	*Aldrovanda vesiculosa*	*Carnivorous plant – mechanism is the source of the rapid speed of trap closure. The midrib (central or middle rib of a leaf) connecting the two lobes can bend inward in the closed configuration (Guo et al., 2015);*
	Berberis vulgaris L. var. asperma	*Stamen movements – mechanism through which the stamens automatically snap towards the stigma when touched or shook by strong wind gusts or insects. Barberry pollen grains are sticky and gradually placed on the stigma by Seismonasty movement (Ebadi, Rezaei, & Fatahi, 2010);*
	Cactaceae (*Opuntia polyacantha*)	*Stamen movements of flower – anatomically, the sensitive and non-sensitive filaments exhibit different tissue organization. A thin unicellular epidermal layer is characteristic in sensitive filaments versus two or three epidermal layers in non-sensitive filaments (Cota-Sánchez, Almeida, Falconer, Choi, & Bevan, 2013);*
	Dionaea muscipula	*Carnivorous plant – Sensitive mechanoreceptors (Hedrich & Neher, 2018). The trap closes in tenth of seconds if a prey touches a trigger hair twice (Guo et al., 2015; Volkov, Murphy, Clemmons, Curley, & Markin, 2012). Non-muscular movement based on hydraulics and mechanical elasticity (Volkov, Coopwood, & Markin, 2008), by a pressure differential between the upper and lower layers of the leaf (Guo et al., 2015; Volkov et al., 2013). Responses to environmental stimuli, appear to be regulated through electrical signal transductions (Foster, Volkov, & Markin, 2010). Trap changes its curvature from concave to convex shape when is opening (Volkov, Pinnock, Lowe, Gay, & Markin, 2011);*
	Drosera glanduligera	*Carnivorous plant – fast motion for the capture of prey, with adjacent sticky glue-tentacles (Guo et al., 2015);*
	Loasaceae (*Blumenbachia insignis, Nasa poissoniana, Nasa macrothyrsa,* Loasaceae subfam. Loasoideae)	*Plant-pollinator systems (Siriani-Oliveira, Cerceau, & Schlindwein, 2020) – Complex mechanisms regulating the pollen to pollinator visits (Henning, Mittelbach, Ismail, Acuña-Castillo, & Weigend, 2018; Henning & Weigend, 2013). Stamen movements. Thigmonastic pollen appears to be a crucial component of floral adaptation to pollinator behaviour (Henning et al., 2018; Henning & Weigend, 2012; Weigend, Ackermann, & Henning, 2010). Each anther provides a fresh pollen load representing a small part of the total pollen production of a single flower, and plant memory to optimize your process (Mittelbach, Kolbaia, Weigend, & Henning, 2019; Weigend et al., 2010);*
	Mimosa pudica	*Plant leaf movements – response to touch, osmotic motors and electrically controlled morphing structures with optimum performance. Leaf flexible movements by the pulvinus (fast loss of water and turgor) – response to light or darkness, shock, and touch*

		(Volkov et al., 2013). Well-developed water channels. Hypotheses for movement: muscular, osmotic mechanisms and chemical (Volkov, Foster, Baker, & Markin, 2010).
	Oxalidaceae (*Biophytum sensitivum DC)*	Plant leaf movements – The pulvinus is a motor structure consisting of a rod of sclerenchyma surrounded by collenchymas. In addition, botanists have discovered signaling molecule called turgorin which is thought to be a new class of phytohormone regulating all the leaf movements by controlling the turgor of plant cells (Bharati & Sahu, 2012);
	Passifloraceae (Subg. Decaloba, Sect. Xerogona)	Mechanically-induced movement of the androgynophore that is probably involved in pollination – The movement is due to a vacuolar remodelling in a group of parenchymatous cells at the base of the androgynophore (Scorza, Rossi, & Dornelas, 2014);
	Samanea saman	*Plant leaf movements by Aquaporins – associated with diurnally regulated increases in rates of membrane water transport (Uehlein & Kaldenhoff, 2008);*
	Utricularia	*Carnivorous plant – The trap is composed of a hollow trap body, a 'trap door' (which grants entrance to the trap body's interior), and four outward facing trigger hairs located on the trap door. Firing and resetting of traps in Utricularia are associated with water flow and trap volume changes (Guo et al., 2015).*
NYC	Aeschynomene	*Nocturnal movement of cotyledons – appears to be provided only by pulvini movements since cotyledonary petioles did not significantly change their orientation at night (Schütz Rodrigues, da Silva Hartmann, & Silva Flores, 2019);*
	Albizia lophantha	*Leaflet movements during nyctinastic closure – contribution of Nitric Oxide (Bergareche, Moysset, Angelo, Chellik, & Simón, 2014);*
	Aloe vera	*This plant response is probably related to crassulacean acid metabolism in Aloe vera with stomata closed during the day and open at night (Volkov, Baker, et al., 2011);*
	Arabidopsis thaliana	*Leaf movements – Activation of the ion current (Ueda, Ishimaru, Takeuchi, & Muraoka, 2019);*
	Leguminous (*Bauhinia rufa, Copaifera langsdorffii, Senna rugosa* (Caesalpinioideae), *Andira humilis, Dalbergia miscolobium, Zornia diphylla* (Faboideae), *Stryphnodendron polyphyllum* (Mimosoideae). *Mimosa rixosa* (also	*Vascular system and pulvinus – occupies a central position, comprises phloem and xylem and is delimited by a living sheath of septate fibers in all the species studied. The histological features are common to pulvini and are linked to their greatest flexibility and ability for leaf movements (Volkov et al., 2010);*

	SEI), *Mimosa flexuosa* (also SEI)	
	Mimosa pudica	*Control the circadian clock. The pulvinus has mechanical and electrical anisotropy and the movements of the petiole are accompanied by a change of the pulvinus shape (Muhammad, Hussain, Jantan, & Bukhari, 2016; Volkov, Baker, et al., 2011);*
	Samanea saman	*Leaf-opening process in circadian rhythmic nastic movement: pulvinus and ion channels (Ueda et al., 2019);*
	Viola banksii	*Petal movement – provides a mixed strategy with the advantages of both out-crossing in open during the day flowers (when pollinators are active) and self-pollination at nigh (Kwiatkowska et al., 2019);*
THE	***Arabidopsis thaliana***	*Thermonastic leaf movement and thermomorphogenesis. Response of stomatal development, (Forget, Parker, & Hughes, 2018; Kim, Park, Lee, & Park, 2019; Y.-J. Park et al., 2019). Regulated polarity of auxin flow underlies thermonastic (Minorsky, 2019; Y.-J. Park et al., 2019).*
	Daphniphyllum macropodum	*Leaf movements (drooping and rolling) – at freezing temperatures in the winter, and the leaf moisture and leaf thickness. The phenomena of drooping and rolling were easily observed in the leaves of D. macropodum at –6.9°C, which disappeared at –3.6°C (Park & Matsumoto, 2017);*
	Ericaceae (*Rhododendron maximum, Rhododendron catawbiense Michx.*)	*Leaf movements (drooping and curling) induced by subfreezing temperatures (Barlow, Klingelé, Klein, & Sen, 2008; Chen et al., 2013; Die, Arora, & Rowland, 2017). Photoprotection strategies (Wang et al., 2009). Potential adaptive significance of leaf morphology and anatomy (Liu, Xia, Krebs, Medeiros, & Arora, 2019; Nilsen, Arora, & Upmanyu, 2014; Wang, Arora, Horner, & Krebs, 2008). Aquaporins (AQPs) – the transmembrane water-channels, may be involved in regulating water redistribution and thus leaf curling, and specific anatomical features, including cell-wall structure (Chen et al., 2013);*
PHO	Zingiberaceae (Alpinia Species)	*Reciprocal style curvature of Flexistylous – Style of each flower curves twice during its 1-day anthesis and styles of two phenotypes of each Alpinia species in the same population synchronously curve in opposite directions at the same time (Luo & Li, 2010);*
	Cactaceae (Eriosyce subgenus Neoporteria)	*Morphological flower characters – photonastic/scotonastic perianth segment movement and photoperiodism. Influence by pollinators, particularly hummingbirds (Walter, 2008);*
EPI	***Samanea saman***	*Plant leaf movements by Aquaporins (pulvinar movement) – associated with diurnally regulated increases in rates of membrane water transport, which in many cases has been shown to be facilitated by aquaporins. Epinastic (i.e. based on different growth velocities of the adaxial and abaxial halves of the leaf) (Uehlein & Kaldenhoff, 2008).*
	Tobacco	*Leaf movements (described as epinastic) occur without the presence of specialized motor organs. The movements are the result of periodically different elongation growth velocities of the adaxial and*

		abaxial sides of the leaf blades and petioles (Minervini, Fischbach, Scharr, & Tsaftaris, 2016; Uehlein & Kaldenhoff, 2008).
HYP	***Arabidopsis thaliana***	*Leaf Movement – Thermal induction of leaf hyponasty is stimulated by developmentally programmed polar auxin transport in Arabidopsis (Kim et al., 2019).*
HYD	*Triticum aestivum L.*	*The flag leaf this plant rolls up into a cylinder in response to drought conditions and then unrolls when leaf water relations improve. This is a strategy that control extending leaf and improving grain size particularly under drought (Sirault, Condon, Wood, Farquhar, & Rebetzke, 2015);*
CHE	*Drosera capensis*	*Carnivorous plant – reaction triggered by simultaneous sensitivity between the tentacles and organic substances secreted by the prey. Different ways to fold the leaf and the tentacles. Auxin was suggested to be the factor responsible for this movement, and influence of jasmonic acid (Nakamura, Reichelt, Mayer, & Mithöfer, 2013);*
SCO	**Cactaceae (Eriosyce subgenus Neoporteria)**	*Morphological flower characters – photonastic/scotonastic perianth segment movement and photoperiodism. Influence by pollinators, particularly hummingbirds (Walter, 2008);*

Fonte: Autora (2023).

Anexo B – Referências do Anexo A.

Barlow, P. W., Klingelé, E., Klein, G., & Sen, M. M. (2008). Leaf movements of bean plants and lunar gravity. Plant Signaling and Behavior, 3(12), 1083–1090. https://doi.org/10.4161/psb.3.12.6906

Bergareche, C., Moysset, L., Angelo, A. P., Chellik, S., & Simón, E. (2014). Nitric-oxide inhibits nyctinastic closure through cGMP in Albizia lophantha leaflets. Journal of Plant Physiology, 171(14), 1299–1305. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.04.009

Bharati, A. C., & Sahu, A. N. (2012). Ethnobotany, phytochemistry and pharmacology of Biophytum sensitivum DC. Pharmacognosy Reviews, 6(11), 68–73. https://doi.org/10.4103/0973-7847.95893

Chen, K., Wang, X., Fessehaie, A., Yin, Y., Wang, X., & Arora, R. (2013). Is expression of aquaporins (plasma membrane intrinsic protein 2s, PIP2s) associated with thermonasty (leaf-curling) in Rhododendron? Journal of Plant Physiology, 170(16), 1447–1454. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.05.007

Cota-Sánchez, J. H., Almeida, O. J. G., Falconer, D. J., Choi, H. J., & Bevan, L. (2013). Intriguing thigmonastic (sensitive) stamens in the Plains Prickly Pear Opuntia polyacantha (Cactaceae). Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 208(5–6), 381–389. https://doi.org/10.1016/j.flora.2013.04.009

Die, J. V., Arora, R., & Rowland, L. J. (2017). Proteome dynamics of cold-acclimating Rhododendron species contrasting in their freezing tolerance and thermonasty behavior. PLoS ONE, 12(5), 1–17. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177389

Ebadi, A., Rezaei, M., & Fatahi, R. (2010). Mechanism of seedlessness in Iranian seedless barberry (Berberis vulgaris L. var. asperma). Scientia Horticulturae, 125(3), 486–493. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.04.002

Forget, S. E., Parker, E. M., & Hughes, N. M. (2018). Effects of leaf prostration on microclimate and ecophysiology of the evergreen fern, Polystichum acrostichoides. Environmental and Experimental Botany, 154, 80–88. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.10.018

Foster, J. C., Volkov, A., & Markin, V. S. (2010). Biologically Closed Electrical Circuits in Plants, 25(16), 23–28. https://doi.org/10.1149/1.3300059

Guo, Q., Dai, E., Han, X., Xie, S., Chao, E., & Chen, Z. (2015). Fast nastic motion of plants and bioinspired structures. Journal of the Royal Society Interface, 12(110), 1–14. https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0598

Hedrich, R., & Neher, E. (2018). Venus Flytrap: How an Excitable, Carnivorous Plant Works. Trends in Plant Science, 23(3), 220–234.

Henning, T., Mittelbach, M., Ismail, S. A., Acuña-Castillo, R. H., & Weigend, M. (2018). A case of behavioural diversification in male floral function – the evolution of

thigmonastic pollen presentation. Scientific Reports, 8(1). https://doi.org/10.1038/s41598-018-32384-4

Henning, T., & Weigend, M. (2012). Total control – pollen presentation and floral longevity in loasaceae (blazing star family) are modulated by light, temperature and pollinator visitation rates. PLoS ONE, 7(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041121

Henning, T., & Weigend, M. (2013). Beautiful, complicated-and intelligent?: Novel aspects of the thigmonastic stamen movement in Loasaceae. Plant Signaling and Behavior, 8(6). https://doi.org/10.4161/psb.24605

Kim, J. Y., Park, Y. J., Lee, J. H., & Park, C. M. (2019). Developmental polarity shapes thermo-induced nastic movements in plants. Plant Signaling and Behavior, 14(8), 1–3. https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1617609

Kwiatkowska, M., Bohdanowicz, J., Cubała, M., Słomka, A., Żabicka, J., Żabicki, P., … Kuta, E. (2019). A new pollination system in non-cleistogamous species of Viola results from nyctinastic (night-closing) petal movements – A mixed outcrossing-selfing strategy. Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 253(January), 1–9. https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.01.007

Liu, B., Xia, Y. ping, Krebs, S. L., Medeiros, J., & Arora, R. (2019). Seasonal responses to cold and light stresses by two elevational ecotypes of Rhododendron catawbiense: A comparative study of overwintering strategies. Environmental and Experimental Botany, 163(February), 86–96. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.023

Luo, Y. L., & Li, Q. J. (2010). Effects of light and low temperature on the reciprocal style curvature of Flexistylous Alpinia Species (Zingiberaceae). Acta Physiologiae Plantarum, 32(6), 1229–1234. https://doi.org/10.1007/s11738-010-0497-7

Minervini, M., Fischbach, A., Scharr, H., & Tsaftaris, S. A. (2016). Finely-grained annotated datasets for image-based plant phenotyping. Pattern Recognition Letters, 81, 80–89. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.10.013

Minorsky, P. V. (2019). Insights into thermonastic leaf movements. Plant Physiology, 180(2), 682–683. https://doi.org/10.1104/pp.19.00520

Mittelbach, M., Kolbaia, S., Weigend, M., & Henning, T. (2019). Flowers anticipate revisits of pollinators by learning from previously experienced visitation intervals. Plant Signaling and Behavior, 14(6), 1–5. https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1595320

Muhammad, G., Hussain, M. A., Jantan, I., & Bukhari, S. N. A. (2016). Mimosa pudica L., a High-Value Medicinal Plant as a Source of Bioactives for Pharmaceuticals. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15(2), 303–315. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12184

Nakamura, Y., Reichelt, M., Mayer, V. E., & Mithöfer, A. (2013). Jasmonates trigger prey-induced formation of "outer stomach" in carnivorous sundew plants. Proceedings of

the Royal Society B: Biological Sciences, 280(1759). https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0228

Nilsen, E. T., Arora, R., & Upmanyu, M. (2014). Thermonastic leaf movements in Rhododendron during freeze-thaw events: Patterns, functional significances, and causes. Environmental and Experimental Botany, 106, 34–43. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.01.005

Park, S. G., & Matsumoto, M. (2017). A study of the leaf phenology and thermonastic leaf movement of Daphniphyllum macropodum. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 62(2), 329–335.

Park, Y.-J., Lee, H.-J., Gil, K.-E., Kim, J. Y., Lee, J.-H., Lee, H., … Park, C.-M. (2019). Developmental Programming of Thermonastic Leaf Movement. American Society of Plant Biologists, 37. https://doi.org/10.1104/pp.19.00139

Schütz Rodrigues, R., da Silva Hartmann, L., & Silva Flores, A. (2019). Seedling morphology of some Brazilian taxa of Aeschynomene (Leguminosae) and its systematic relevance. Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 255(October 2018), 69–79. https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.04.002

Scorza, L. C. T., Rossi, M. L., & Dornelas, M. C. (2014). Vacuolar remodelling mediates touch-induced androgynophore movement in Passiflora (Subg. Decaloba, Sect. Xerogona) flowers. Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 209(11), 613–619.

Sirault, X. R. R., Condon, A. G., Wood, J. T., Farquhar, G. D., & Rebetzke, G. J. (2015). " Rolled - upness ": phenotyping leaf rolling in cereals using computer vision and functional data analysis approaches. Plant Methods, 1–11. https://doi.org/10.1186/s13007-015-0095-1

Siriani-Oliveira, S., Cerceau, I., & Schlindwein, C. (2020). Specialised protagonists in a plant–pollinator interaction: the pollination of Blumenbachia insignis (Loasaceae). Plant Biology, 22(2), 167–176. https://doi.org/10.1111/plb.13072

Ueda, M., Ishimaru, Y., Takeuchi, Y., & Muraoka, Y. (2019). Plant nyctinasty – who will decode the 'Rosetta Stone'? New Phytologist, 223(1), 107–112. https://doi.org/10.1111/nph.15717

Uehlein, N., & Kaldenhoff, R. (2008). Aquaporins and plant leaf movements. Annals of Botany, 101(1), 1–4. https://doi.org/10.1093/aob/mcm278

Volkov, A. G., Baker, K., Foster, J. C., Clemmons, J., Jovanov, E., & Markin, V. S. (2011). Circadian variations in biologically closed electrochemical circuits in Aloe vera and Mimosa pudica. Bioelectrochemistry, 81(1), 39–45. https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2011.01.004

Volkov, A. G., Coopwood, K. J., & Markin, V. S. (2008). Inhibition of the Dionaea muscipula Ellis trap closure by ion and water channels blockers and uncouplers. Plant Science, 175(5), 642–649. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.06.016

Volkov, A. G., Foster, J. C., Baker, K. D., & Markin, V. S. (2010). Mechanical and electrical anisotropy in Mimosa pudica pulvini. Plant Signaling and Behavior, 5(10), 1211–1221. https://doi.org/10.4161/psb.5.10.12658

Volkov, A. G., II, S. L. H., Vilfranc, C. L., Murphy, V. A., Wooten, J. D., Paulicin, H., … Markin, V. S. (2013). Venus flytrap biomechanics: Forces in the Dionaea muscipula trap. Journal of Plant Physiology, 170(1), 25–32.

Volkov, A. G., Murphy, V. A., Clemmons, J. I., Curley, M. J., & Markin, V. S. (2012). Energetics and forces of the Dionaea muscipula trap closing. Journal of Plant Physiology, 169(1), 55–64. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.08.003

Volkov, A. G., Pinnock, M. R., Lowe, D. C., Gay, M. S., & Markin, V. S. (2011). Complete hunting cycle of Dionaea muscipula: Consecutive steps and their electrical properties. Journal of Plant Physiology, 168(2), 109–120. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.06.007

Walter, H. (2008). Floral biology, phytogeography and systematics of Eriosyce subgenus Neoporteria (Cactaceae). Bradleya, 26(26), 75–98. https://doi.org/10.25223/brad.n26.2008.a6

Wang, X., Arora, R., Horner, H. T., & Krebs, S. L. (2008). Structural adaptations in overwintering leaves of thermonastic and nonthermonastic Rhododendron species. Journal of the American Society for Horticultural Science, 133(6), 768–776. https://doi.org/10.21273/jash.133.6.768

Wang, X., Peng, Y., Singer, J. W., Fessehaie, A., Krebs, S. L., & Arora, R. (2009). Seasonal changes in photosynthesis, antioxidant systems and ELIP expression in a thermonastic and non-thermonastic Rhododendron species: A comparison of photoprotective strategies in overwintering plants. Plant Science, 177(6), 607–617. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.08.009

Weigend, M., Ackermann, M., & Henning, T. (2010). Reloading the revolver – male fitness as a simple explanation for complex reward partitioning in Nasa macrothyrsa (Loasaceae, Cornales). Biological Journal of the Linnean Society, 100(1), 124–131. https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2010.01419.

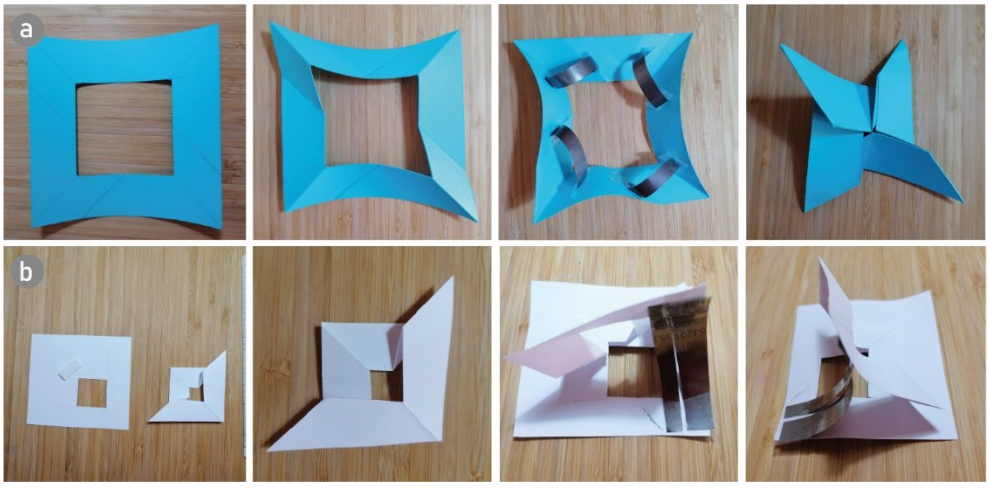
Anexo C – Livre experimentação que contribuíram para a definição do conceito.

Múltiplas experimentações foram desenvolvidas a fim de compreender o material, sob processo empírico, sob processo exploratório de criação e avaliação (Karana et al., 2015)., para obter **insights para futuras abordagens**.

Buscou-se conceber a ideia em papel, e posteriormente realizar testes iniciais com o bimetal. Assim, foi possível desenvolver estudos exploratórios com reduzida utilização de material. Explorou-se livremente o uso do bimetal como atuador do sistema (Figura 221 e Figura 222); geometrias e oportunidades conceituais para o desenvolvimento (Figura 221 à Figura 224).

A Figura 221, por exemplo, demonstra experimentações com dobraduras de papel associadas a. faixas de bimetálicas. Montou-se os estudos, e em seguida testou com secador térmico. O resultado não foi satisfatório, estima-se que em decorrência da diminuta espessura do bimetal.

Figura 221. Teste papel e faixas bimetálica com função de atuador.



Fonte: Autora (2023).

A Figura 222 testou várias faixas do material inteligente investigado com vincos. Tais faixas foram associadas a outro material, como o papel com dobras semelhantes as marcações dos vincos e a palha da *Ammophila arenaria*.

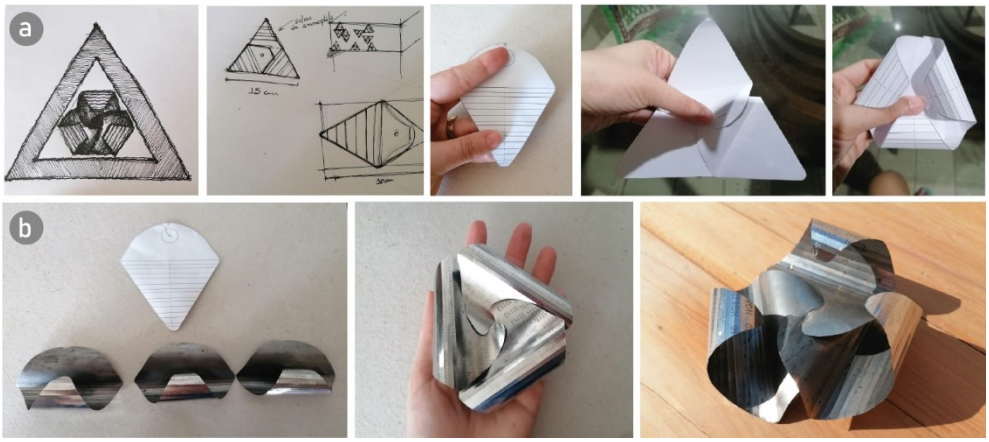
Os testes iniciais demonstraram potencial de exploração, visto que a atuação conjunta das faixas possibilita o movimento quando sujeito à variação térmica, muito embora seja menor do que a peça unicamente em bimetal (Figura 222**c**).

Figura 222. Faixas bimetálicas com vincos como atuador.

Fonte: Autora (2023).

O próximo estudo, explorou peças encaixáveis com vincos, que formam módulo cuja geometria lembra um cata-vento. O conjunto das peças poderia ser aplicado internamente a um cobogó ou nas fachadas (Figura 223).

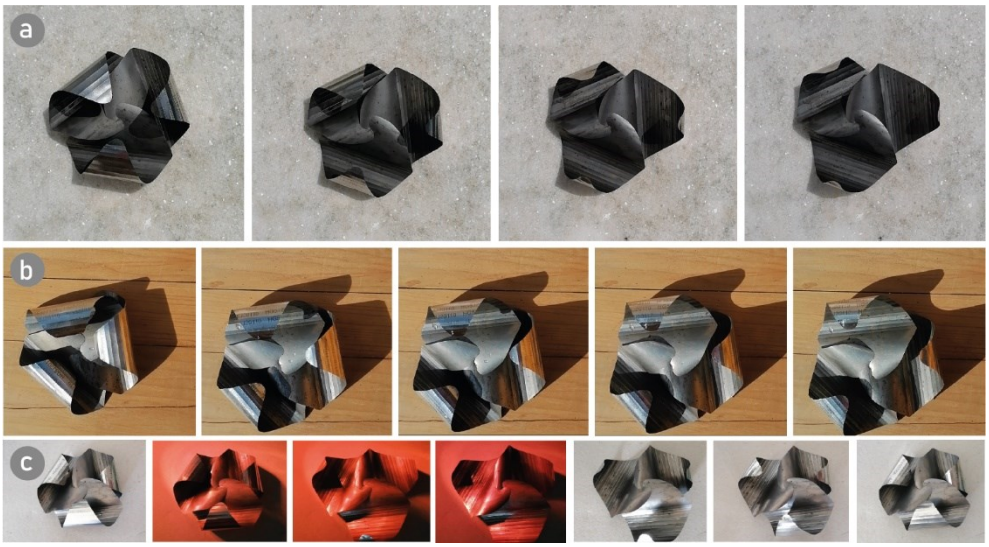
Figura 223. Três peças que compõem o módulo cata-vento.



Nota. a) conceito no papel de peças encaixáveis que formam um triângulo equilátero, b) com posterior execução no bimetal. Fonte: Autora, 2023.

O módulo cata-vento foi testado sob diferentes temperaturas com radiação solar, infravermelho, secador térmico e gelo. A Figura 224 explicita exposição solar e ao infravermelho.

Figura 224. Diferentes testes para alteração de temperatura.

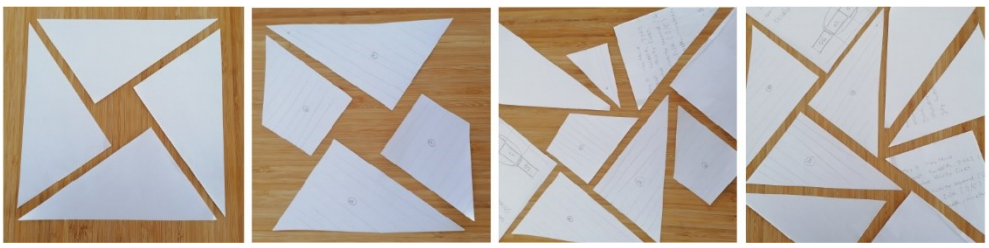


Nota. a – b) exposição do módulo à radiação solar; c) à luz infravermelha. Fonte: Autora (2023).

Muito embora, o conceito do módulo cata-vento fosse interessante, optou-se por não prosseguir porque: a) há uma sobreposição central de material que não economiza o bimetal; b) baixa relação com a *Ammophila arenaria*; e c) os estudos publicados sobre Pho'liage (AB_Lab's, 2019), que também exploravam três folhas em bimetal radialmente espaçadas.

Para a presente investigação **tenciona-se adotar uma abordagem cuja estratégia de desenvolvimento ofereça uma oportunidade para explorar distintas formas de módulos para fachadas. Os vincos no bimetal centralmente posicionados, e aplicados em diferentes formas podem conferir essa versatilidade, além de serem uma referência à morfologia da** *Ammophila arenaria*. Com o papel criou-se livremente peças (Figura 225 e Figura 226) para tentar imaginar como essas poderiam ser aplicadas nas fachadas.

Figura 225. Estudos exploratórios com papel, com diferentes cortes e posições.



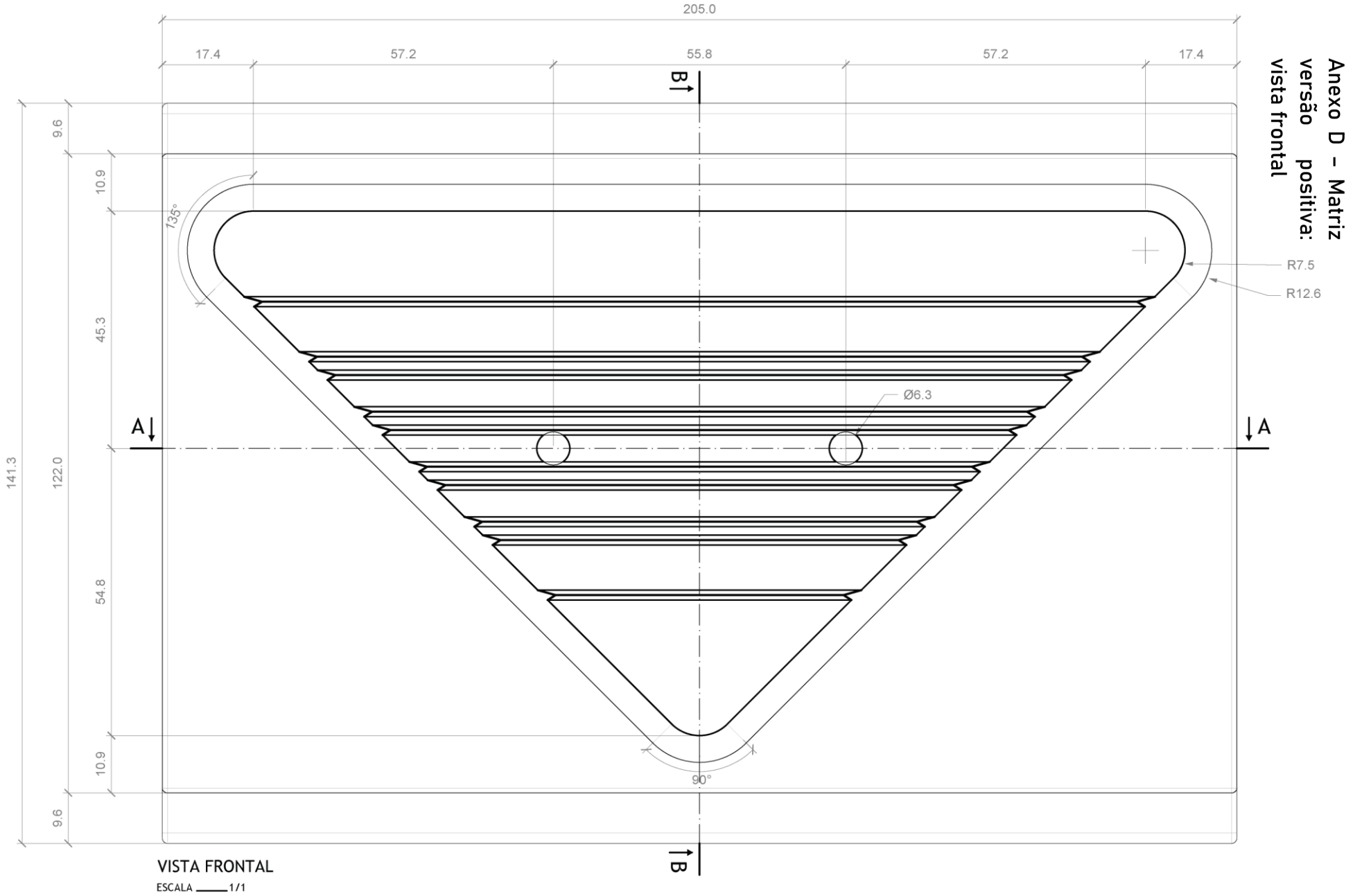
Fonte: Autora (2023).

Posteriormente, o material inteligente foi dotado de vincos, de modo a conferir capacidade cinética aos módulos (Figura 226).

Figura 226. Pensar com o papel, materializar com o bimetal.

Nota. a) processo de concepção de módulo a partir do papel; b) teste com secador térmico. Fonte: Autora (2023).

A Figura 226 demonstra o pensamento com o papel e a materialização com o bimetal. Com o secador portátil, a temperatura da superfície do bimetal variou entre 18.7 °C e 25.5°C, que promoveu a abertura e fechamento em decorrência da variação.



Anexo D – Matriz versão positiva: vista frontal

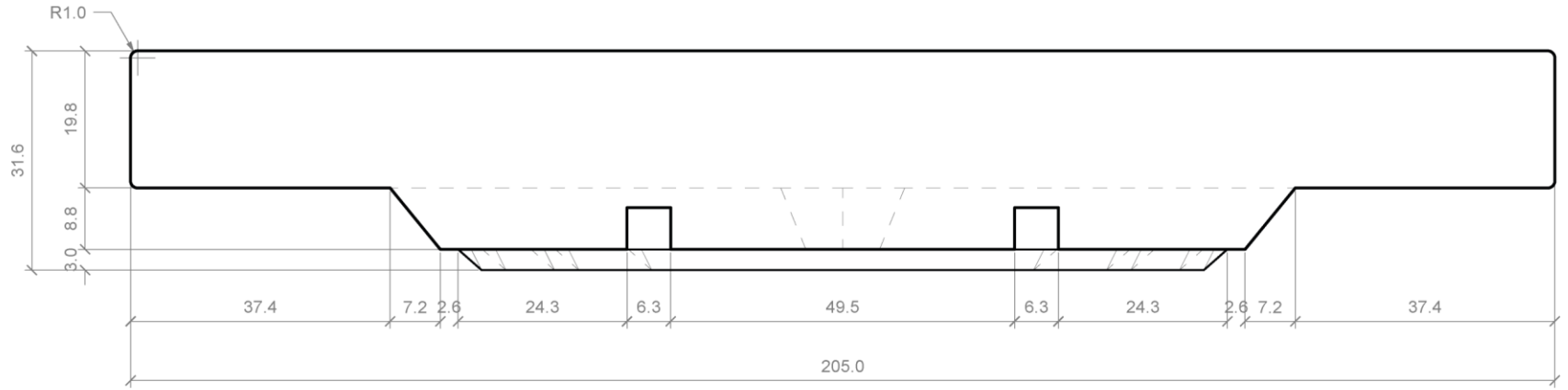
VISTA FRONTAL

ESCALA 1/1

PROJETO: MATRIZ PARA ESTAMPAGEM - VERSÃO POSITIVA

PRANCHA: VISTA FRONTAL	ESCALA: 1/1	PRANCHA: **01/02**
RESPONSÁVEL: TARCIANA ANDRADE	DATA: 20.02.2022	REV. 00

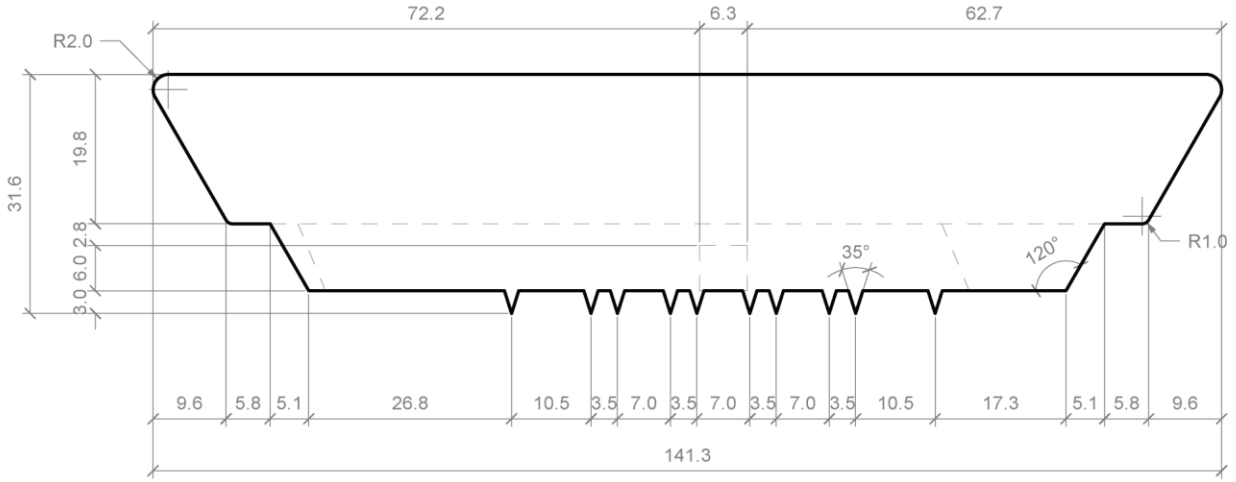
Anexo E – Matriz versão positiva: perspectiva e cortes.



CORTE AA

ESCALA 1/1

PERSPECTIVA

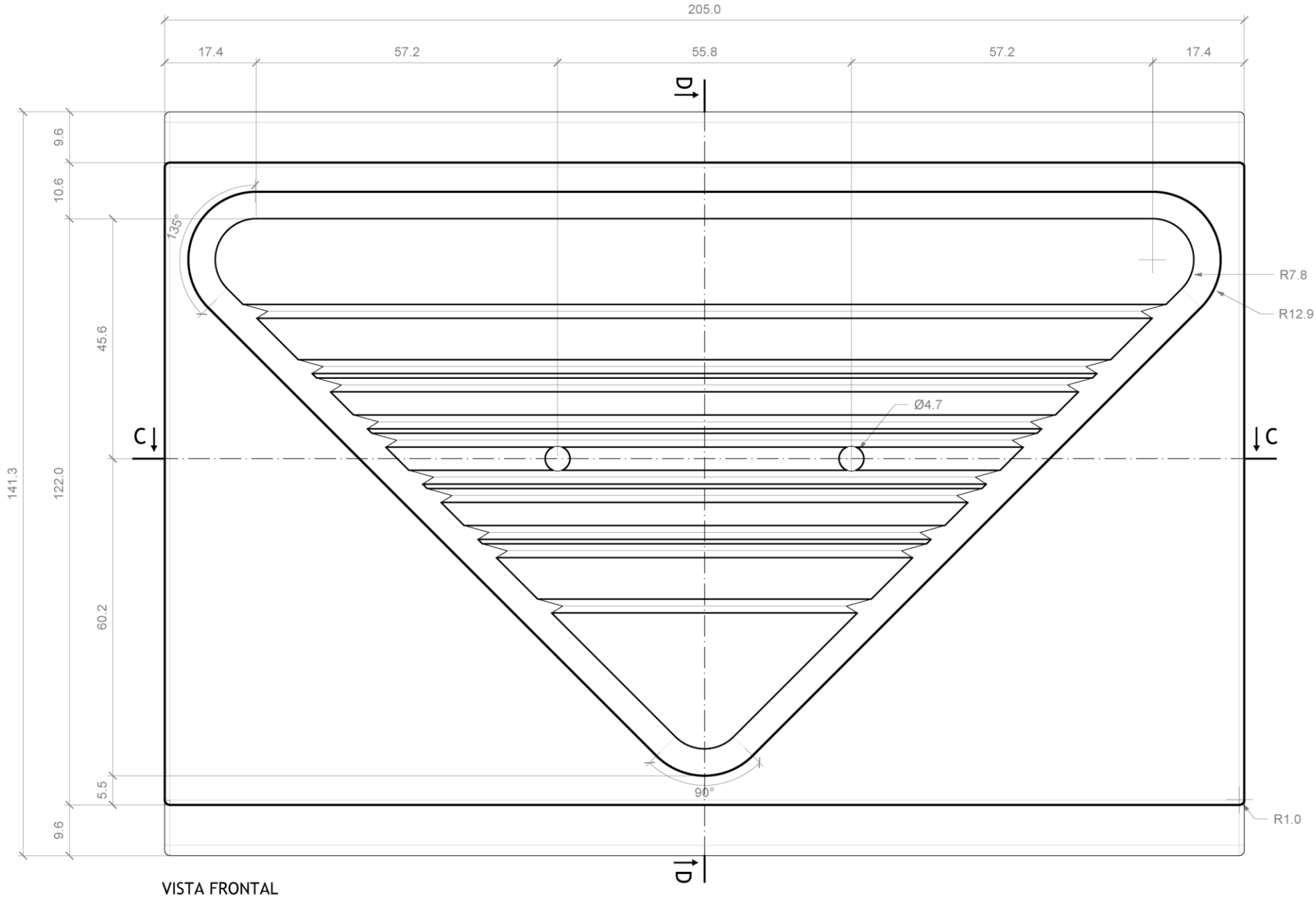


CORTE BB

ESCALA 1/1

PROJETO: MATRIZ PARA ESTAMPAGEM - VERSÃO POSITIVA

PRANCHA: PERSPECTIVA, CORTE AA E CORTE BB	ESCALA: 1/1	PRANCHA: **02/02**
RESPONSÁVEL: TARCIANA ANDRADE	DATA: 20.02.2022	REV. 00



Anexo F – Matriz versão negativa: vista frontal

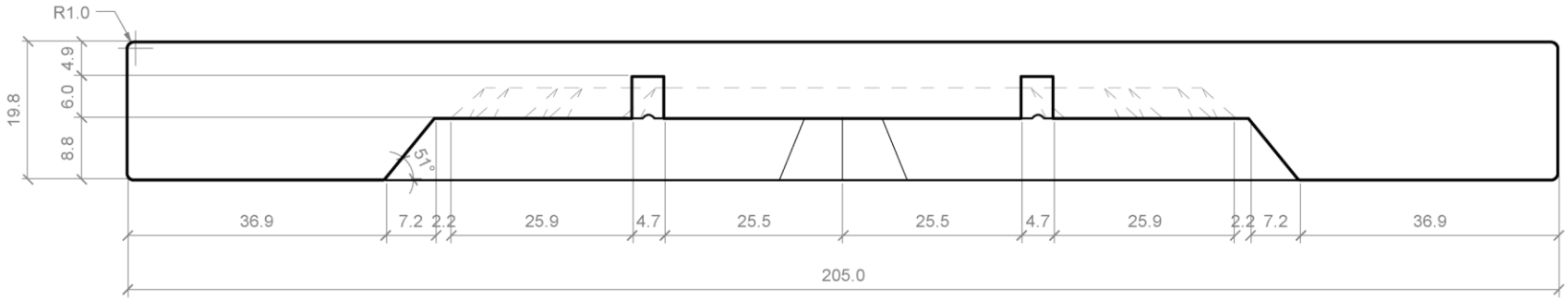
VISTA FRONTAL

ESCALA 1/1

PROJETO: MATRIZ PARA ESTAMPAGEM - VERSÃO NEGATIVA

PRANCHA: VISTA FRONTAL	ESCALA: 1/1	PRANCHA: **02/02**
RESPONSÁVEL: TARCIANA ANDRADE	DATA: 20.02.2022	REV. 00

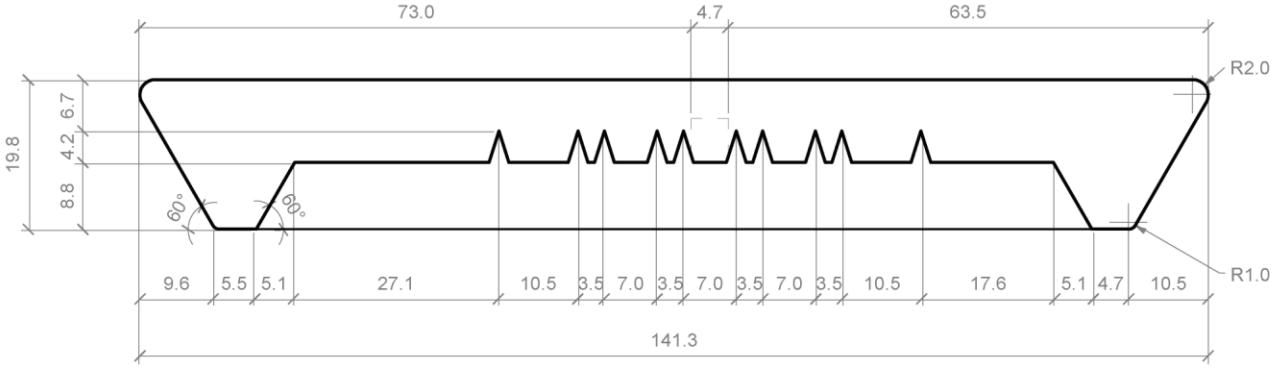
Anexo G – Matriz versão negativa: perspectiva e cortes.



CORTE CC

ESCALA ——— 1/1

PERSPECTIVA



CORTE DD

ESCALA ——— 1/1

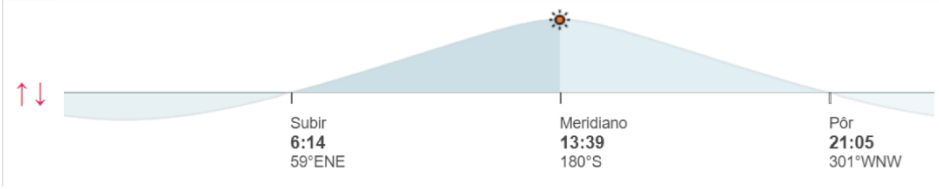
PROJETO: MATRIZ PARA ESTAMPAGEM - VERSÃO NEGATIVA

PRANCHA: PERPSPECTIVA, CORTE CC E DD	ESCALA: 1/1	PRANCHA: **02/02**
RESPONSÁVEL: TARCIANA ANDRADE	DATA: 20.02.2022	REV. 00

Anexo H – Horário de referência para o meio-dia solar.

COLETA A — VERÃO - 28.06.2022

2022	Nascer/pôr do sol		Duração do dia		Crepúsculo Astronômico		Crepúsculo Náutico		Crepúsculo Civil		Meio-dia Solar	
Jun	Nascer do sol	Ocaso	Comprimento	Diff.	Começar	Fim	Começar	Fim	Começar	Fim	Hora	Mil. km
28	6:14 (59°)	21:05 (301°)	14:51:21	−0:22	4:16	23:03	5:02	22:17	5:42	21:37	13:39 (74,5°)	152,084



13:39
Altitude
75°Dia
Rubrica
180° S
Posição

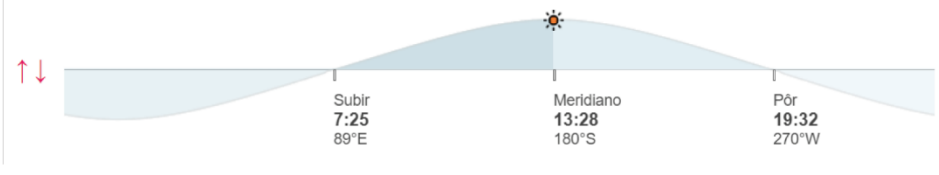
COLETA B — ONDA DE CALOR - 13.07.2022

2022	Nascer/pôr do sol		Duração do dia		Crepúsculo Astronômico		Crepúsculo Náutico		Crepúsculo Civil		Meio-dia Solar	
Jul	Nascer do sol	Ocaso	Comprimento	Diff.	Começar	Fim	Começar	Fim	Começar	Fim	Hora	Mil. km
13	6:22 (61)	21:01 (299)	14:39:16	−1:09	4:28	22:55	5:12	22:11	5:51	21:32	13:42 (73,0°)	152,069

13:42
Altitude
73°Dia
Rubrica
180° S
Posição

COLETA C — EQUINÓCIO DE OUTONO- 23.09.2022

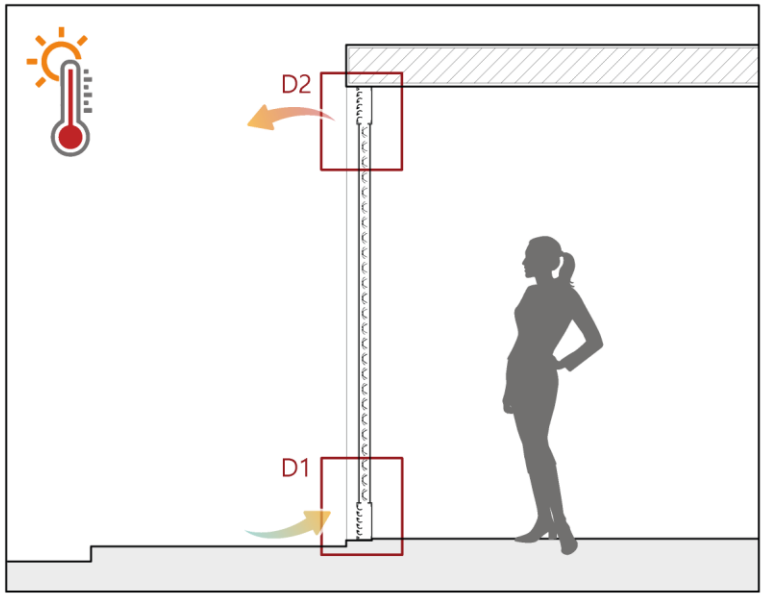
2022	Nascer/pôr do sol		Duração do dia		Crepúsculo Astronômico		Crepúsculo Náutico		Crepúsculo Civil		Meio-dia Solar	
Pôr	Nascer do sol	Ocaso	Comprimento	Diff.	Começar	Fim	Começar	Fim	Começar	Fim	Hora	Mil. km
23	7:25 (89°)	19:32 (270°)	12:07:08	−2:29	5:55	21:01	6:27	20:29	6:58	19:58	13:28 (51,1°)	150,122



13:28
Altitude
51°Dia
Rubrica
180° S
Posição

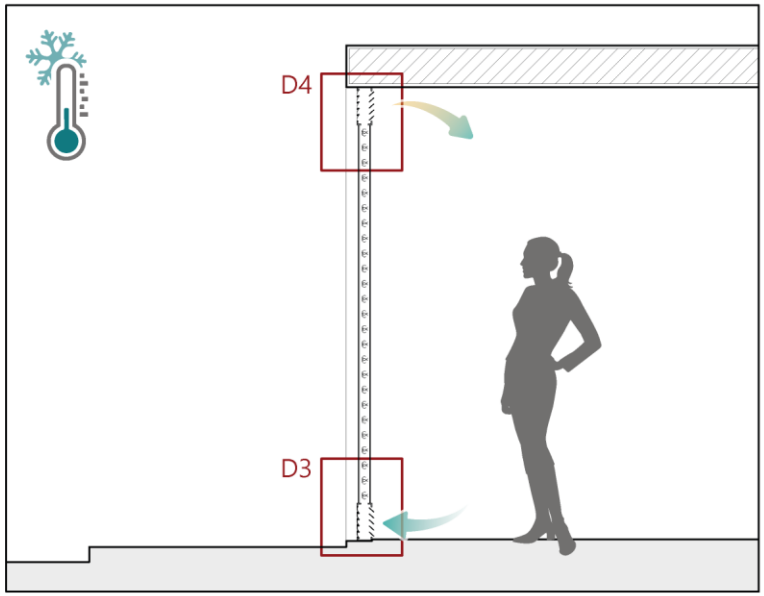
Nota. Dados foram coletados no site Time and Date (https://www.timeanddate.com/sun/portugal/lisbon).

Anexo I – Conceito para fachada ventilada: diagrama de ventilação.



CORTE ESQUEMÁTICO PARA ALTAS TEMPERATURAS

ESCALA _____ 1/50



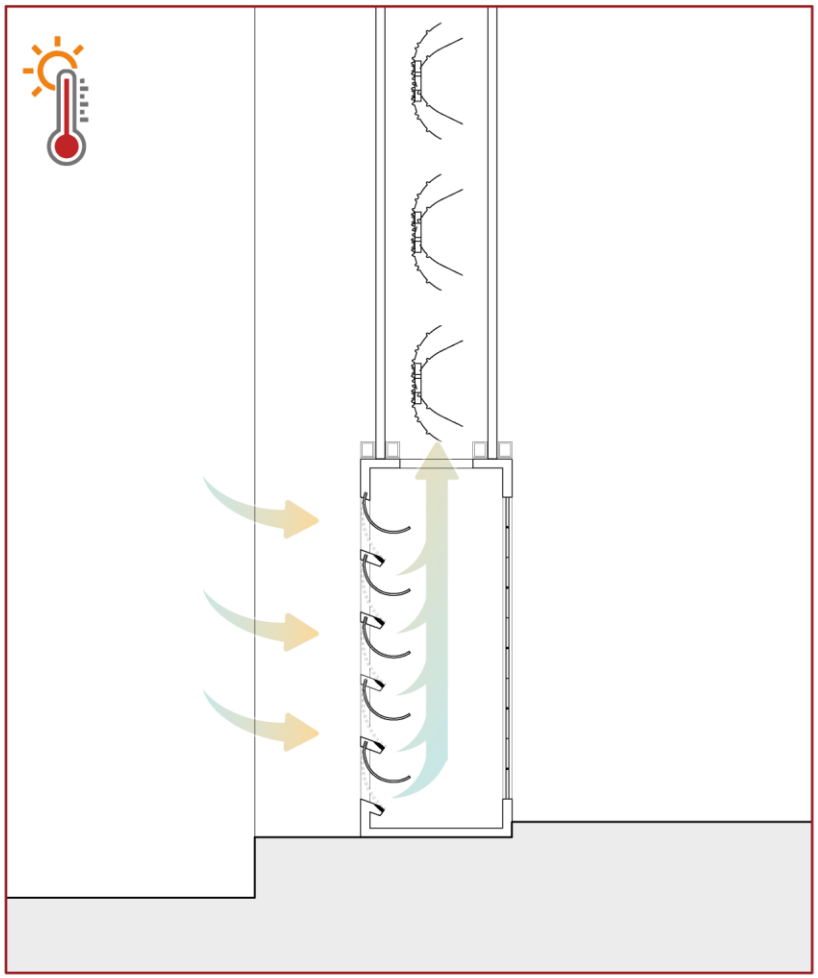
CORTE ESQUEMÁTICO PARA BAIXAS TEMPERATURAS

ESCALA _____ 1/50

PROJETO: CONCEITO PARA FACHADA VENTILADA

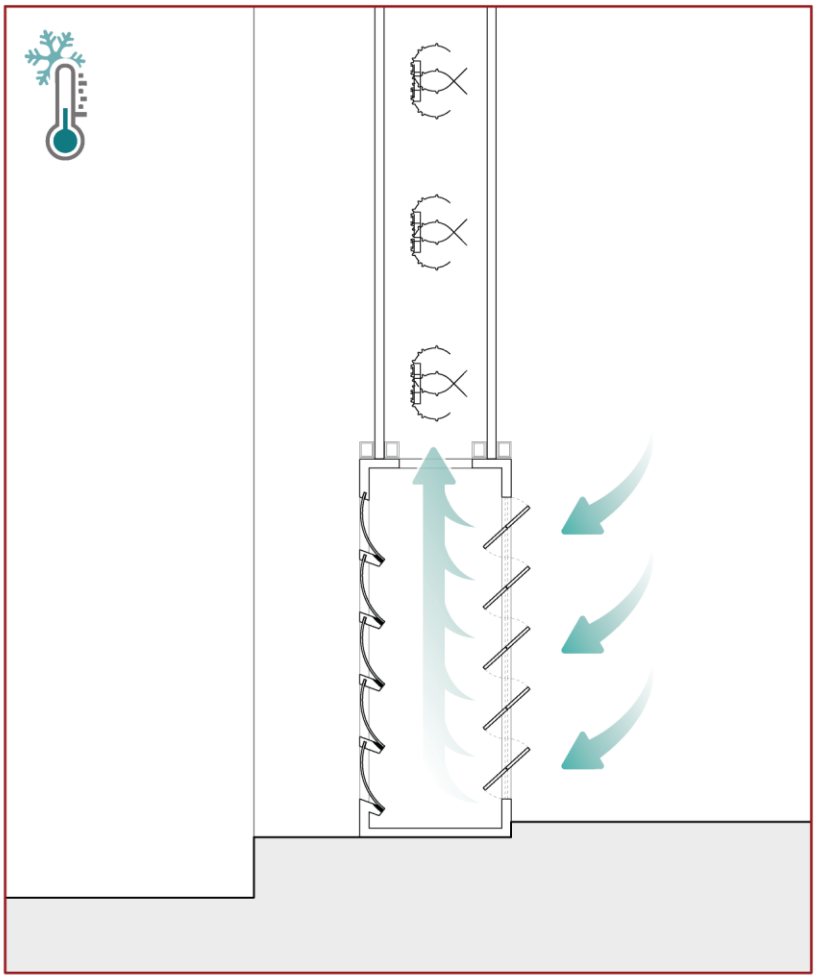
PRANCHA: DIAGRAMA DE VENTILAÇÃO	ESCALA: 1/50	PRANCHA: **01/03**
RESPONSÁVEL: TARCIANA ANDRADE	DATA: 28.06.2023	REV. 00

Anexo J – Conceito para fachada ventilada: detalhe D1 e D3.



DETALHE ESQUEMÁTICO D1

ESCALA _____ 1/5

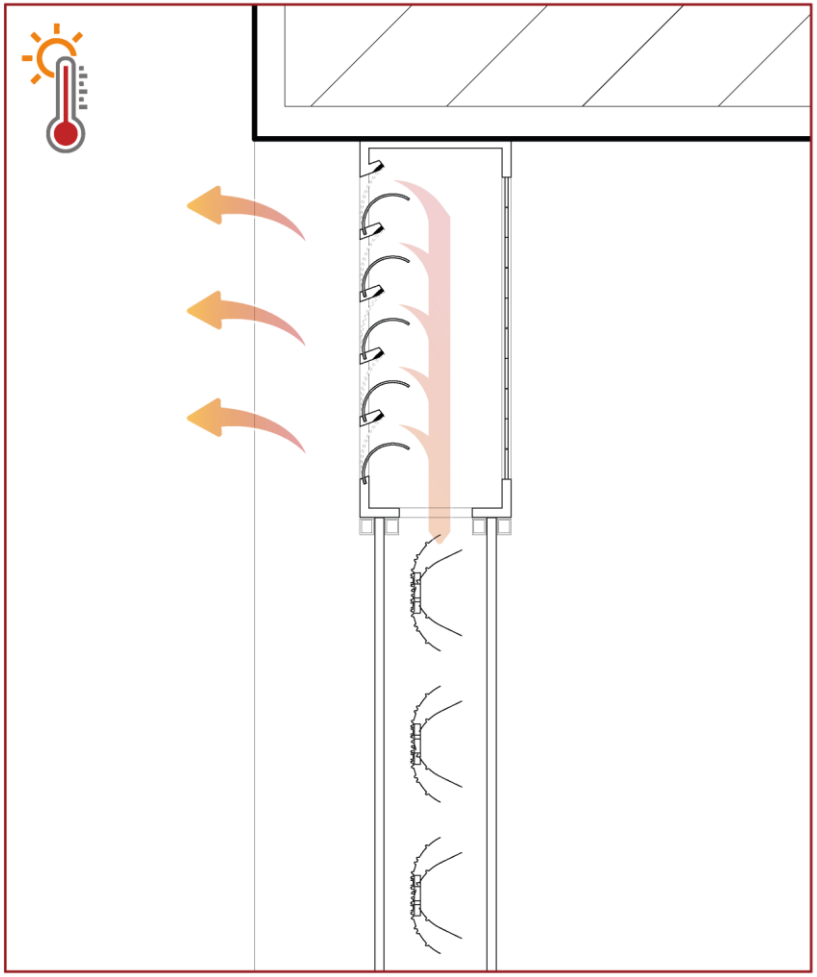


DETALHE ESQUEMÁTICO D3

ESCALA _____ 1/5

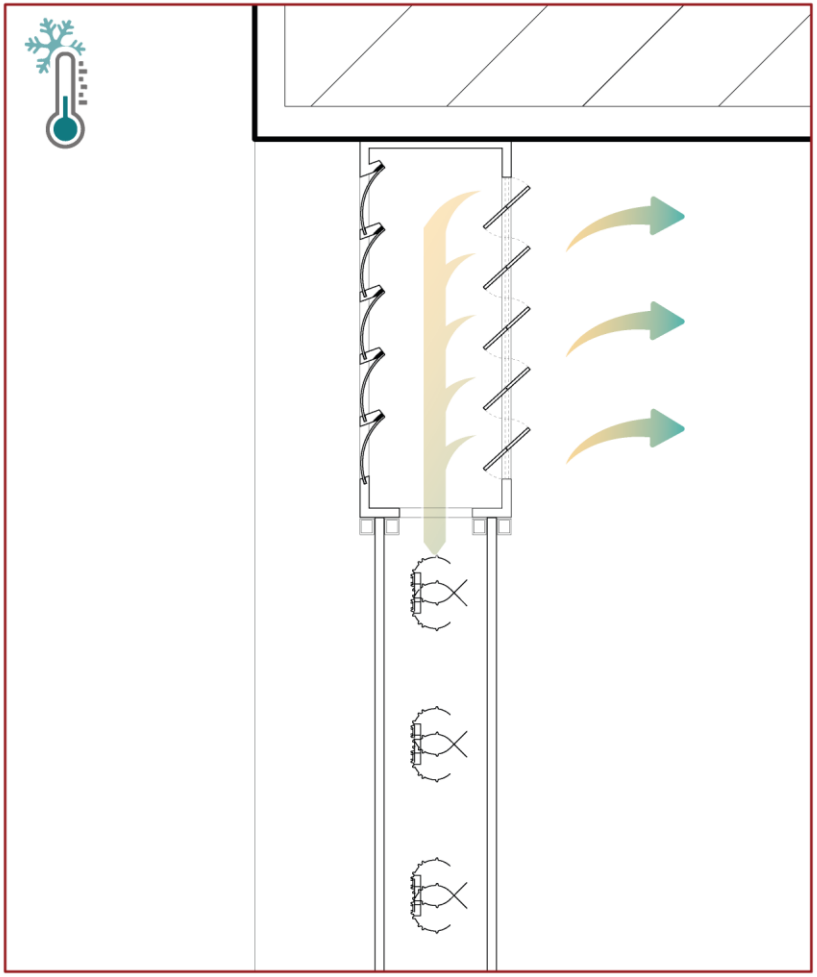
PROJETO: CONCEITO PARA FACHADA VENTILADA		
PRANCHA: DETALHE DO DIAGRAMA D1 E D3	ESCALA: 1/5 ; 1/5	PRANCHA: **02/03**
RESPONSÁVEL: TARCIANA ANDRADE	DATA: 28.06.2023	REV. 00

Anexo K – Conceito para fachada ventilada: detalhe D2 e D4.



DETALHE ESQUEMÁTICO D2

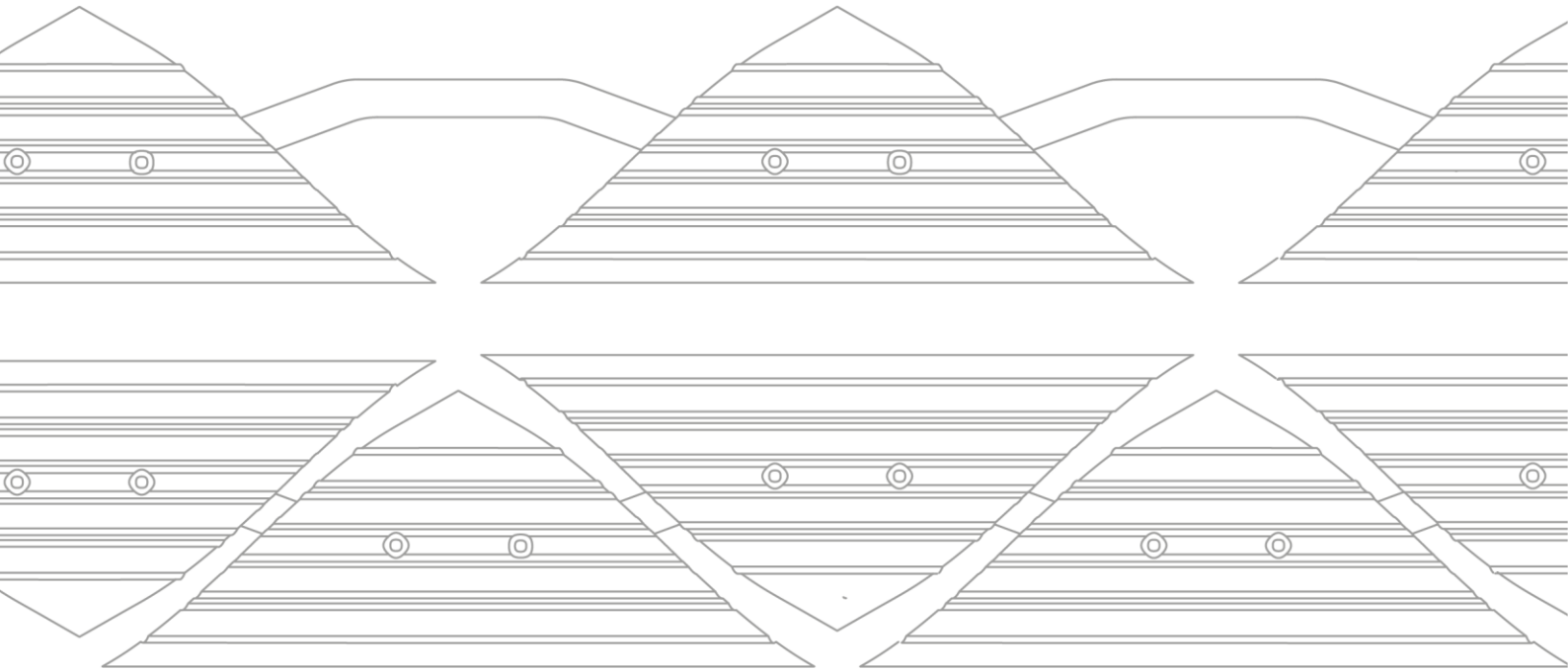
ESCALA _____ 1/5



DETALHE ESQUEMÁTICO D4

ESCALA _____ 1/5

PROJETO: CONCEITO PARA FACHADA VENTILADA		
PRANCHA: DETALHE DO DIAGRAMA D2 E D4	ESCALA: 1/5 ; 1/5	PRANCHA: **03/03**
RESPONSÁVEL: TARCIANA ANDRADE	DATA: 28.06.2023	REV. 00



“O grande livro, sempre aberto e
que devemos nos esforçar para ler,
é o da Natureza [...].”

Antoni Gaudí