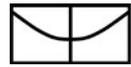


Alice Araujo Marques de Sá
Dissertação de Mestrado || UnB 2021

FERRAMENTAS DA BIOMIMÉTICA NO DESIGN

Aportes da natureza para a prática projetual





Universidade de Brasília

Instituto de Artes | Departamento de Design

Programa de Pós-Graduação em Design

ALICE ARAUJO MARQUES DE SÁ

Dissertação de Mestrado

FERRAMENTAS DA BIOMIMÉTICA NO DESIGN

Aportes da natureza para a prática projetual

BRASÍLIA

2021

ALICE ARAUJO MARQUES DE SÁ

FERRAMENTAS DA BIOMIMÉTICA NO DESIGN

Aportes da natureza para a prática projetual

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design, da Universidade de Brasília, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadora: Profa. Dra. Dianne Magalhães Viana

BRASÍLIA

2021

ALICE ARAUJO MARQUES DE SÁ

FERRAMENTAS DA BIOMIMÉTICA NO DESIGN

Aportes da natureza para a prática projetual

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design, da Universidade de Brasília, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Design.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Dianne Magalhães Viana
Departamento de Design – Universidade de Brasília – UnB
Presidente

Prof. Dr. Amilton José Vieira de Arruda
Departamento de Design – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Membro Titular

Profa. Dra. Nayara Moreno de Siqueira
Departamento de Design – Universidade de Brasília – UnB
Membro Titular

Profa. Dra. Ana Cláudia Maynardes
Departamento de Design – Universidade de Brasília – UnB
Membro Suplente

Aprovada em 06 de dezembro de 2021

SS111f Sá, Alice Araujo Marques de
Ferramentas da Biomimética no Design: aportes da
natureza para a prática projetual / Alice Araujo Marques de
Sá; orientador Dianne Magalhães Viana. -- Brasília, 2021.
184 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Design) --
Universidade de Brasília, 2021.

1. Biomimética. 2. Design Bioinspirado. 3. Ferramenta
Biomimética. 4. Design Sustentável. 5. Fachada Biomimética.
I. Viana, Dianne Magalhães , orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais e a todos que percebem a importância da natureza para a humanidade. Que possamos ser mais respeitosos diante dela, reconhecer seus ensinamentos e preservá-la para construir um futuro mais digno.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo o apoio, paciência e dedicação, mas principalmente pelo estímulo e assistência durante essa jornada trilhada na Pós-Graduação.

À professora Dianne Magalhães Viana, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, contando com sua parceria ao longo dessa trajetória.

Aos professores Amilton José Vieira de Arruda, Nayara Moreno de Siqueira e Ana Cláudia Maynardes, por sua valiosa e imprescindível participação na construção desse trabalho e na minha formação como designer.

Aos professores do Curso de Graduação e Pós-Graduação em Design da Universidade de Brasília, pelos conhecimentos teóricos e práticos transmitidos com entusiasmo e incentivo aos processos criativos de seus alunos.

Aos servidores técnicos do Departamento de Design, em especial ao Rodrigo A. de Souza, pela disponibilidade em sanar prontamente todas as dúvidas e necessidades, oferecendo um apoio essencial para o alcance das metas do curso de Mestrado.

Aos meus amigos e colegas, agradeço pelo companheirismo nos momentos de aprendizado e lazer que compartilhamos. Espero que (em breve) possamos nos reencontrar.

RESUMO

A biomimética é uma área que propõe desenvolver soluções para os desafios humanos, sobretudo no domínio das atividades criativas. Nesse contexto, são explorados conhecimentos fundamentados na biologia, considerando-se o estudo de formas, processos e relações sistêmicas encontradas na natureza. De fato, a intersecção desse campo com o design vem mostrando potencial para produzir criações sustentáveis e regenerativas. Tendo em vista tais pressupostos, a presente Dissertação apresenta, inicialmente, uma delimitação de conceitos bioinspirados e do recente campo da biomimética. Também foi realizada uma revisão sistemática de literatura sobre biomimética e design, nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*, complementada por uma análise do cenário internacional e nacional. Em seguida, abordaram-se o processo criativo e as ferramentas de design, sendo empreendido um levantamento sobre ferramentas biomiméticas direcionado para análise e discussão de suas aplicações em projetos criativos. Tomando por base os conhecimentos previamente reunidos e conjecturando-se acerca do uso de ferramentas biomiméticas na prática projetual do design, foi planejada uma investigação com o objetivo geral de descrever, analisar, discutir e comparar a aplicação de ferramentas biomiméticas em projetos de design voltados para sustentabilidade. Para tanto, optou-se pela abordagem de ‘estudo de casos múltiplos’, tendo sido selecionados seis projetos de produtos para fachadas de edificações que usaram as seguintes ferramentas biomiméticas: *Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades*, BioTRIZ, *Multi-Biomechanism Approach* (M-BA), Ferramenta de Solução Biomimética, Espirais Biomiméticas ou BioGen. Os instrumentos BioGen, M-BA e as Espirais Biomiméticas forneceram subsídios significativos para os respectivos projetos. Verificou-se que os instrumentos foram empregados, principalmente, nas etapas de planejamento e exploração; pesquisa biológica; criação conceitual, definição e reflexão do processo projetual. De modo geral, constataram-se uso limitado e escassez de informações sobre os procedimentos de aplicação das ferramentas biomiméticas nos casos examinados. No que se refere à sustentabilidade, notou-se que os recursos biomiméticos estimularam a inclusão de determinados aspectos: economia de energia, iluminação natural, sistemas com materiais inteligentes e funcionamento passivo. Igualmente, percebeu-se uma tendência de pesquisa biomimética norteada pelo estudo de formas e processos naturais (notadamente abstrações baseadas em vegetais). Presume-se que novos projetos biomiméticos serão orientados para níveis de maior complexidade, buscando-se inter-relações existentes nos ecossistemas. A metodologia de ‘estudo de casos múltiplos’ revelou-se adequada para pesquisas em design, especialmente no tocante à interface com a biomimética e outras áreas de bioinspiração. Recomenda-se que futuros trabalhos adotem abordagens metodológicas suplementares, no intuito de aprofundar as evidências obtidas nesta Dissertação. Por fim, julga-se que a biomimética oferece contributos relevantes para a capacitação e o treinamento de designers. Em suma, explorar os aportes da biomimética para a prática projetual em design oportuniza diversificados subsídios para criações inovadoras, potencializando-se fatores de sustentabilidade, bem como a reaproximação do ser humano com a natureza.

Palavras-chave: Biomimética; Design Bioinspirado; Ferramenta Biomimética; Design Sustentável; Fachada Biomimética.

ABSTRACT

Biomimicry is an area that proposes to develop solutions to human challenges, especially in the realm of creative activities. In this context, knowledge based on biology is explored, considering the study of natural forms, processes, and ecosystems. In fact, the intersection of this field with the design domain has shown the potential to produce sustainable and regenerative projects. Given these assumptions, the present work initially presents definitions of bioinspired concepts and of the recent field of biomimicry. A systematic literature review on biomimicry and design was also carried out in Web of Science, Scopus, and Google Scholar, including an analysis of the international and national (Brazilian) scenario. Then, the creative process and design tools were addressed, with a review being undertaken on biomimetic tools aimed at analyzing, and discussing their applications in creative projects. Based on the previously gathered knowledge and conjecturing about the use of biomimicry tools in the design practice, an investigation was carried out with the general objective of describing, analyzing, discussing, and comparing the use of biomimetic tools in design projects aimed at sustainability. Thus, the 'multiple-case study' approach was chosen, having selected six product designs for building façades that applied the following biomimetic tools: Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades, BioTRIZ, Multi-Biomechanism Approach (M-BA), Biomimetic Solution Tool, Biomimicry Design Spirals, and BioGen. The tools that proved to provide significant subsidies were BioGen, M-BA, and Biomimicry Design Spirals. It was found that the instruments were mainly used in the following stages of the design process: planning and exploration; biological research; conceptual creation, definition, and reflection. In general, there was limited use, as well as a lack of information on the procedures for applying biomimetic tools in the examined projects. Concerning sustainability, it was noted that biomimicry resources encouraged the inclusion of some aspects, such as: energy savings, natural lighting, use of smart materials, and passive systems. Likewise, a trend of biomimetic research guided by the study of natural forms and processes (mostly plant-based abstractions) was noticed. It is assumed that future biomimicry projects will be oriented towards levels of greater complexity, encompassing interrelationships found in ecosystems. The 'multiple case study' methodology proved to be suitable for design research, especially regarding the interconnection with the domain of biomimicry and with other areas of bioinspiration. It is recommended that future works adopt supplementary methodological approaches, to deepen the evidence obtained in this master's thesis. Finally, it is believed that biomimicry offers relevant contributions to the qualification and training of designers. In summary, exploring principles of biomimicry in the design practice provides diversified subsidies for innovative creations, enhancing sustainability factors and bringing humanity closer to nature.

Keywords: Biomimicry; Bioinspired Design; Biomimicry Tool; Sustainable Design; Biomimetic Facade.

RÉSUMÉ

Le biomimétisme est un domaine qui propose de développer des solutions aux défis humains, notamment dans le domaine des activités créatives. Dans ce contexte, les connaissances biologiques sont explorées, en considérant l'étude des formes, des processus et des relations systémiques trouvés dans la nature. En fait, l'intersection de ce domaine avec le design a montré le potentiel de produire des créations durables et régénératrices. Compte tenu de ces aspects, ce travail présente, dans un premier temps, une délimitation des concepts bioinspirés et du champ récent du biomimétisme. Une revue systématique de la littérature sur le biomimétisme et le design a également été réalisée dans les bases de données *Web of Science*, *Scopus* et *Google Scholar*, complétée par une analyse du scénario international et national (brésilien). Ensuite, le processus créatif et les outils de conception en design ont été abordés ; une recherche sur les outils biomimétiques a également été réalisée, visant à analyser et à discuter leurs applications dans des projets créatifs. Sur la base des connaissances et des conjectures précédemment recueillies sur l'utilisation des instruments biomimétiques dans la pratique du design, une recherche a été planifiée avec l'objectif général de décrire, analyser, discuter et comparer l'application des outils biomimétiques dans les projets de design visant le développement durable. Pour cela, l'approche dénommée « étude de cas multiples » a été sélectionnée et ont été choisis six conceptions de produits pour les façades de bâtiments qui utilisaient les outils biomimétiques suivants : Diagramme de Génération de Concept de Design pour Façades d'Inspiration Végétale, BioTRIZ, Approche Multi-Biomécanisme (M-BA), Outil de Solution Biomimétique, Spirales Biomimétiques ou BioGen. Les instruments BioGen, M-BA et Spirales Biomimétiques ont apporté un soutien important aux projets respectifs. Il a été constaté que les instruments ont été utilisés principalement dans les étapes de planification et d'exploration ; recherche biologique ; création conceptuelle, définition et réflexion du processus de conception. En général, il y a eu un usage limité et une insuffisance des informations sur les procédures d'application des outils biomimétiques dans les cas examinés. Concernant le développement durable, il a été noté que les ressources biomimétiques encourageaient la prise en compte de certains aspects : économies d'énergie ; éclairage naturel ; systèmes avec des matériaux intelligents et fonctionnement passif. Également, une tendance à la recherche biomimétique guidée par l'étude des formes et des processus naturels (notamment les abstractions végétales) a été remarquée. Il est supposé que les nouveaux projets biomimétiques soient orientés vers des niveaux de plus grande complexité, en recherchant les interrelations existantes dans les écosystèmes. La méthodologie des « études de cas multiples » s'est avérée adéquate pour la recherche en design, surtout en ce qui concerne l'interface avec le biomimétisme et d'autres domaines de la bioinspiration. Il est recommandé que les futures recherches adoptent des approches méthodologiques supplémentaires, afin d'approfondir les résultats obtenus dans ce travail. Il est possible de souligner que le biomimétisme offre des contributions pertinentes à la qualification et à la formation des designers. En bref, l'exploration des principes du biomimétisme en design offre des opportunités de contributions multiples à des créations innovantes, améliorant les aspects de développement durable, ainsi que le rapprochement des êtres humains avec la nature.

Mots-clés : Biomimétisme ; Design bio-inspiré ; Outil biomimétique ; Design durable ; Façade biomimétique.

RESUMEN

La biomimética es un área que se propone desarrollar soluciones a los desafíos humanos, especialmente en el campo de las actividades creativas. En este contexto, se explora el conocimiento basado en la biología, considerando el estudio de formas, procesos y relaciones sistémicas que se encuentran en la naturaleza. De hecho, la intersección de este campo con el diseño ha mostrado el potencial para producir creaciones sostenibles y regenerativas. A la vista de estos presupuestos, el presente trabajo expone, inicialmente, una delimitación de conceptos bioinspirados y del campo reciente de la biomimética. También se realizó una revisión bibliográfica sistemática sobre biomimética y diseño en las bases de datos *Web of Science*, *Scopus* y *Google Scholar*, complementada con un análisis del escenario internacional y nacional (brasileño). En seguida, se abordó el proceso creativo y las herramientas de diseño, realizándose una investigación sobre herramientas biomiméticas, con el objetivo de analizar y discutir sus aplicaciones en proyectos creativos. A partir de los conocimientos y conjeturas adquiridos previamente sobre el uso de herramientas biomiméticas en la práctica del diseño, se planificó una investigación con el objetivo general de describir, analizar, discutir y comparar la aplicación de herramientas biomiméticas en proyectos de diseño orientados a la sostenibilidad. Con este propósito, se eligió el enfoque de 'estudio de casos múltiples', y se seleccionaron seis diseños de productos para fachadas de edificios que utilizaban las siguientes herramientas biomiméticas: Diagrama de Generación de Conceptos de Diseño para Fachadas Inspiradas en Plantas, BioTRIZ, Enfoque de Biomecanismos Múltiples (M -BA), Herramienta de Solución Biomimética, Espirales Biomiméticas o BioGen. Los instrumentos BioGen, M-BA y Espirales Biomiméticas aportaron importantes contribuciones a los respectivos proyectos. Se verificó que los instrumentos se utilizaron, principalmente, en las etapas de planificación y exploración; investigación biológica; creación conceptual, definición y reflexión del proceso de diseño. En general, hubo un uso limitado y escasez de información sobre los procedimientos de aplicación de herramientas biomiméticas en los casos examinados. Con respecto a la sostenibilidad, se señaló que los recursos biomiméticos incentivaron la inclusión de ciertos aspectos: ahorro de energía, iluminación natural, sistemas con materiales inteligentes y operación pasiva. Igualmente, surgió una tendencia de investigación biomimética guiada por el estudio de formas y procesos naturales (en particular, abstracciones basadas en plantas). Se asume que los nuevos proyectos biomiméticos estarán orientados a niveles de mayor complejidad, buscando las interrelaciones que existen en los ecosistemas. La metodología del "estudio de casos múltiples" ha demostrado ser adecuada para la investigación en diseño, especialmente en lo que respecta a la interfaz con la biomimética y otras áreas de la bioinspiración. Se recomienda que las investigaciones futuras adopten enfoques metodológicos adicionales, con el fin de profundizar en la evidencia obtenida en este trabajo. Finalmente, se cree que la biomimética ofrece contribuciones relevantes para la calificación y formación de diseñadores. En resumen, explorar los principios de la biomimética en la práctica del diseño proporciona subsidios diversificados para creaciones innovadoras, mejorando los factores de sostenibilidad y acercando a la humanidad a la naturaleza.

Palabras clave: Biomimética; Diseño Bioinspirado; Herramienta Biomimética; Diseño Sostenible; Fachada Biomimética.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Características da natureza no espaço.....	21
FIGURA 2 - Características dos análogos naturais.....	22
FIGURA 3 - Características da natureza do espaço.....	22
FIGURA 4 - Princípios da biomimética.....	26
FIGURA 5 - Sistema Nucleário.....	28
FIGURA 6 - Módulos <i>Solar Ivy</i> e aplicação em fachada.....	28
FIGURA 7 - Comparação esquemática da ventilação no Edifício <i>Eastgate</i> e em colônias de cupins.....	29
FIGURA 8 - <i>Word cloud</i> com palavras-chave da base <i>Web of Science</i>	43
FIGURA 9 - Mapa de <i>co-citation</i> elaborado com dados da plataforma <i>Web of Science</i>	44
FIGURA 10 - Ciclos <i>cradle to cradle</i>	46
FIGURA 11 - Mapa de <i>coupling</i> gerado a partir de dados da plataforma <i>Web of Science</i>	47
FIGURA 12 - Mapa de coocorrência com títulos da plataforma <i>Web of Science</i>	50
FIGURA 13 - <i>Word cloud</i> da base <i>Scopus</i>	54
FIGURA 14 - Mapa de <i>co-citation</i> elaborado com dados da plataforma <i>Scopus</i>	55
FIGURA 15 - Mapa de <i>coupling</i> com dados da plataforma <i>Scopus</i>	56
FIGURA 16 - Mapa de coocorrência com dados da plataforma <i>Scopus</i>	59
FIGURA 17 - Instituições com maior número de publicações na base <i>Google Scholar</i>	61
FIGURA 18 - <i>Word cloud</i> da plataforma <i>Google Scholar</i>	65
FIGURA 19 - Mapa de coocorrências <i>Google Scholar</i> elaborado a partir dos títulos das publicações.....	66
FIGURA 20 - Instituições de autores brasileiros com publicação citada nas bases <i>Web of Science</i> , <i>Scopus</i> e <i>Google Scholar</i>	67
FIGURA 21 - Fases do processo criativo em design, conforme Munari.....	73
FIGURA 22 - Etapas do processo de design, segundo Stickdorn e Schneider.....	73
FIGURA 23 - <i>Double Diamond</i>	75
FIGURA 24 - Conjunto de recursos para criação em design.....	76
FIGURA 25 - Modelo <i>SAPPhIRE</i>	80
FIGURA 26 - Exemplos de <i>iSites</i>	82
FIGURA 27 - Fluxograma ilustrativo do processo BioGEN.....	84
FIGURA 28 - Ferramentas biomiméticas mais mencionadas na literatura.....	92

FIGURA 29 - <i>Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades</i>	99
FIGURA 30 - Detalhe da ferramenta DCGDPIF.....	99
FIGURA 31 - Detalhe de estruturas de plantas do gênero <i>Mesembryanthemum</i> para dispersão de sementes.....	100
FIGURA 32 - Ferramenta DCGDPIF aplicada em projeto de fachada.....	101
FIGURA 33 - Representação esquemática de sistema para resfriamento radiativo.....	108
FIGURA 34 - Exemplos de formas hexagonais na natureza.....	110
FIGURA 35 - Quadro para coleta de informações biológicas (à esquerda) e <i>framework</i> M-BA (à direita).....	112
FIGURA 36 - <i>Echinocactus grusonii</i>	114
FIGURA 37 - Módulo e padronagem do sistema criado com o M-BA.....	115
FIGURA 38 - Ferramenta de Solução Biomimética.....	118
FIGURA 39 - Ferramenta de Solução Biomimética preenchida por Camargo.....	120
FIGURA 40 - Organismos inspiradores identificados por Camargo.....	120
FIGURA 41 - Ilustrações de <i>Carpinus betulus</i> (à esquerda) e <i>Fagus sylvatica</i> (à direita).....	124
FIGURA 42 - Padrão Miura-ori.....	125
FIGURA 43 - Dobras em folhagens e proposta de sistema modular para fachadas.....	126
FIGURA 44 - Diagrama do Modelo de Exploração para o projeto de Muntinga.....	132
FIGURA 45 - Matriz de Análise de Pináculos de Muntinga.....	133
FIGURA 46 - Matriz de Percurso de Design de Muntinga.....	134
FIGURA 47 - Estrela-do-mar da espécie <i>Pisaster ochraceus</i>	136
FIGURA 48 - Costela-de-Adão (<i>Monstera deliciosa</i>) e lamelas internas do sistema STAR.....	137
FIGURA 49 - Lamelas externas e modelagens digitais do <i>STAR-system</i>	138

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base <i>Web of Science</i>	42
QUADRO 2 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base <i>Scopus</i>	52
QUADRO 3 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base <i>Google Scholar</i> (1990 a 2021)	63
QUADRO 4 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base <i>Google Scholar</i> (2018 a 2021)	64
QUADRO 5 - Informações coletadas nas bases <i>Web of Science</i> , <i>Scopus</i> e <i>Google Scholar</i>	68
QUADRO 6 - Categorias para análise dos casos e das ferramentas.....	96
QUADRO 7 - Caracterização do Caso 1- DCGDPIF.....	104
QUADRO 8 - Caracterização do Caso 2 - BioTRIZ.....	111
QUADRO 9 - Caracterização do Caso 3 - M-BA.....	117
QUADRO 10 - Caracterização do Caso 4 - FSB.....	122
QUADRO 11 - Caracterização do Caso 5 - Espirais Biomiméticas.....	129
QUADRO 12 - Caracterização do Caso 6 - BioGEN.....	142
QUADRO 13 - Síntese das características dos casos e das ferramentas biomiméticas.....	143

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA-CONCEITUAL	20
1.1 CONCEITOS DE BIOINSPIRAÇÃO	20
1.1.1 Bioinspiração	20
1.1.2 Biomorfismo	20
1.1.3 Biofilia	20
1.1.4 Bioutilização.....	23
1.1.5 Bioassistência e biodesign.....	23
1.1.6 Biotécnica	24
1.1.7 Biônica.....	24
1.2 BIOMIMÉTICA	25
1.3 SUSTENTABILIDADE E PRESERVAÇÃO AMBIENTAL	30
CAPÍTULO 2 - BIOMIMÉTICA E DESIGN: UMA REVISÃO DA LITERATURA	38
2.1 BIOMIMÉTICA E DESIGN: UM LEVANTAMENTO DA PRODUÇÃO INTERNACIONAL E NACIONAL	38
2.1.1 <i>Web of Science</i>	40
2.1.2 <i>Scopus</i>	51
2.1.3 <i>Google Scholar</i>	60
2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO INTERNACIONAL E NACIONAL	67
CAPÍTULO 3 - PANORAMA SOBRE FERRAMENTAS DE DESIGN E FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS	71
3.1 FERRAMENTAS EM DESIGN	71
3.2 FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS	77
3.2.1 Espirais Biomiméticas (<i>Biomimicry Thinking</i>).....	78
3.2.2 Diagrama de Princípios da Vida (<i>Life's Principles</i>).....	79
3.2.3 <i>GEMS of SAPPhIRE req sol e Idea-Inspire</i>	80
3.2.4 <i>Biomimicry Taxonomy Chart</i>	81
3.2.5 <i>Ask Nature e Design Analogy to Nature Engine</i>	81
3.2.6 <i>iSites</i>	82
3.2.7 Analogias Naturais	83
3.2.8 BioGen.....	83
3.2.9 BioTRIZ.....	84
3.2.10 Análise Tipológica	85
3.2.11 Teoria C-K.....	85
3.2.12 Análise do Ciclo de Vida	86
3.2.13 <i>BiomiMETRIC Assistance Tool</i>	86
3.2.14 <i>Ecosystem Services Analysis</i>	86
3.2.15 BIOS.....	87
3.2.16 <i>Biomimicry Card Decks</i>	87
3.2.17 <i>Engineering-to-Biology Thesaurus</i>	88
3.2.18 BIOS.....	88
3.2.19 <i>Unified Ontology for causal-function modeling in Biologically Inspired Design</i>	88
3.2.20 <i>Four-Box Method e T-Chart</i>	89
3.2.21 <i>Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades (DCGDPIF)</i>	89
3.2.22 Ferramenta de Solução Biomimética (FSB).....	90
3.2.23 <i>Multi-Biomechanism Approach (M-BA)</i>	90
3.3 LEVANTAMENTO DE FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS	91
CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS: UMA ANÁLISE SOBRE FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS EM PROJETOS DE DESIGN	94
4.1 ESCOLHA METODOLÓGICA	94

4.2 DELINEAMENTO DA INVESTIGAÇÃO E SEUS OBJETIVOS.....	95
4.2.1 Caso 1 - <i>Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades</i>	98
4.2.1.1 Apresentação do caso	99
4.2.1.2 Análise do caso	102
4.2.2 Caso 2 - BioTRIZ	105
4.2.2.1 Apresentação do caso	105
4.2.2.2 Análise do caso	109
4.2.3 Caso 3 - <i>Multi-Biomechanism Approach (M-BA)</i>	112
4.2.3.1 Apresentação do caso	113
4.2.3.2 Análise do caso	115
4.2.4 Caso 4 - Ferramenta de Solução Biomimética (FSB)	118
4.2.4.1 Apresentação do caso	119
4.2.4.2 Análise do caso	121
4.2.5 Caso 5 - Espirais Biomiméticas.....	123
4.2.5.1 Apresentação do caso	123
4.2.5.2 Análise do caso	126
4.2.6 Caso 6 - BioGen	130
4.2.6.1 Apresentação do caso	131
4.2.6.2 Análise do caso	139
4.2.7 Análise Comparativa dos Casos	143
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	152
REFERÊNCIAS	155
APÊNDICE A - LEVANTAMENTO <i>WEB OF SCIENCE</i>	169
APÊNDICE B - LEVANTAMENTO <i>SCOPUS</i>.....	170
APÊNDICE C - LEVANTAMENTO <i>GOOGLE SCHOLAR</i>.....	171
APÊNDICE D - LEVANTAMENTO DE FERRAMENTAS <i>GOOGLE SCHOLAR</i>	172
APÊNDICE E - CONJUNTO DE RECURSOS PARA CRIAÇÃO EM DESIGN	173
APÊNDICE F - FERRAMENTAS MAIS MENCIONADAS NA LITERATURA.....	174
ANEXO A - ESPIRAIS BIOMIMÉTICAS	175
ANEXO B - DIAGRAMA DE PRINCÍPIOS DA VIDA	176
ANEXO C - <i>BIOMIMICRY TAXONOMY CHART</i>.....	177
ANEXO D - <i>BIOTRIZ</i>.....	178
ANEXO E - FERRAMENTA DCGDPIF APLICADA EM PROJETO DE FACHADA	179
ANEXO F - QUADRO PARA COLETA DE INFORMAÇÕES BIOLÓGICAS (À ESQUERDA) E <i>FRAMEWORK M-BA (À DIREITA)</i>	180
ANEXO G - FERRAMENTA DE SOLUÇÃO BIOMIMÉTICA PREENCHIDA POR CAMARGO.....	181
ANEXO H - DIAGRAMA DO MODELO DE EXPLORAÇÃO	182
ANEXO I - MATRIZ DE ANÁLISE DE PINÁCULOS	183
ANEXO J - MATRIZ DE PERCURSO DE DESIGN	184

INTRODUÇÃO

O grande livro, sempre aberto e que devemos nos esforçar para ler, é o da Natureza

Antoni Gaudí i Cornet

A interdisciplinaridade é um dos principais referenciais para o desempenho de atividades criativas, pois promove a interconexão entre diversas esferas do conhecimento humano, oportunizando inovações. Na opinião de Cardoso (2012), a adoção dessa perspectiva, nos processos de ensino, aprendizagem e atuação em design, é fundamental para ampliar os recursos à disposição do projetista. De fato, nessa área, os profissionais estão em constante busca por configurações, diretrizes, ferramentas e métodos que viabilizem propostas mais adaptadas à sociedade e ao ambiente. Sendo assim, numerosas possibilidades devem ser perscrutadas, algumas das quais podem parecer distantes do cotidiano de muitos designers, a exemplo do meio natural (SÁ, 2018, SÁ; SIQUEIRA, 2018).

Pesquisas em design ganham cada vez mais destaque, pois os complexos problemas da atualidade não podem ser solucionados sem uma atividade investigativa prévia ou paralela. É importante fornecer subsídios para aprimorar a prática projetual com base em diversificados estudos sobre materiais, processos, teoria dos sistemas, percepção, estética, cognição, identidade cultural, economia política e sociodinâmica da cultura, entre outros (BONSIEPE, 2011; CARDOSO, 2012; PAZMINO, 2018).

Considerando, então, as interfaces do design com outros domínios do saber, compete relembrar que a biosfera dispôs de bilhões de anos para aperfeiçoar sua intrincada rede de organismos e sistemas, de modo que seus integrantes manifestassem formas eficientes, ajustadas às condições circundantes, visando sua sobrevivência. Uma multiplicidade de organismos – constituintes da esfera biótica do planeta que reúne seres microscópicos, macroscópicos, vegetais e animais – possui configurações e estratégias instaladas evolutivamente, as quais podem revelar soluções duradouras para desafios persistentes ou emergentes nos variados domínios da existência humana (ANTONIOLI, 2017; THIÉRY; BRETON, 2017).

Contudo, a humanidade vem alterando drasticamente sua relação com a natureza ao longo dos últimos séculos. De uma interação de pertencimento, dependente dos ciclos naturais, a espécie humana passou a exercer uma posição de superioridade e controle na escala filogenética, iniciada com a domesticação da flora e da fauna e que se estende até as tecnologias mais avançadas de recombinação de códigos genéticos no século XXI (DIAS, 2014; SANTOS et al., 2018).

Efetivamente, há inúmeros benefícios provenientes dessa trajetória humana, como: o desenvolvimento de novos materiais, produtos e processos; a conquista de mais autonomia e sobrevivência; e extensos deslocamentos e assentamentos que transformaram toda a Terra em *habitat* da espécie. Porém, muitos autores já desvelaram uma vertiginosa escalada da complexidade pós-moderna, induzida por uma sociedade de consumo caótica, inundada por uma enormidade de dados, calcada em modelos de hiperprodutividade disfuncionais, os quais engendram uma quantidade avassaladora de detritos (CARDOSO, 2012; FLUSSER, 2007; PAPANEK, 1985, 2007).

Principalmente após a Segunda Guerra Mundial, a natureza foi relegada a um papel passivo. Os componentes da biosfera foram reduzidos a recursos para concretizar produções humanas. O próprio termo ‘natureza’, que, em certas comunidades representava uma entidade poderosa e independente, foi largamente substituído por ‘meio ambiente’. Para alguns estudiosos, isso representou uma morte simbólica do vocábulo, que coincidiu com o enfraquecimento da relação homem-natureza (ESCOBAR, 1995). Observa-se um progressivo distanciamento do meio natural e uma postura de domínio e exploração, que desencadeiam devastações. Cabe evocar as mudanças climáticas que tanto ameaçam a estabilidade, a qualidade de vida e a própria existência de milhares de espécies que compartilham o planeta (ZARI, 2007, 2015). Tais tendências não apenas desequilibram as essências dos convívios nos nichos biológicos, como também restringem ou aniquilam potencialidades intrínsecas à natureza, mesmo que não se possa contar com perfeitos equilíbrios.

Com isso, exacerbam-se inquietações suscitadas pelo nefasto legado destinado às futuras gerações, pois se perdem princípios significativos para o bem-estar e o bem viver em um futuro próximo. Para mitigar esses efeitos, convergem os debates impulsionados pelos movimentos de preservação ambiental, os quais alertam quanto à necessidade de práticas voltadas para a eficiência no uso de recursos, redução do consumo e *upcycling* (CESCHIN; GAZIULUSOY, 2016; ESCOBAR, 1995; SANTOS et al., 2018; VEZZOLI; MANZINI, 2008). Não obstante tais vicissitudes, os seres humanos têm uma disposição inata para manter suas conexões com a natureza, sendo que seus contatos diretos e imersivos provocam, frequentemente, respostas biofílicas. Ou seja, reações cognitivas e fisiológicas positivas, inclusive na esfera da saúde¹ (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2010).

¹ Vale mencionar que nem todas as configurações e elementos naturais desencadeiam respostas favoráveis, agradáveis e restauradoras. Justamente, o conceito de ‘biofobia’ refere-se ao medo e às sensações negativas relacionadas à natureza. Nessa situação, são produzidas respostas fisiológicas mensuráveis a partir da exposição a certos organismos (exemplo: cobras e aracnídeos) e fenômenos naturais (exemplo: relâmpagos, trovões e incêndios). Entende-se que os seres humanos desenvolveram tal reação em seu percurso evolutivo, de modo a evitar cenários de

Nesse cenário atual, tem evoluído a biomimética, definida como o domínio do conhecimento que propõe desenvolver soluções para os desafios humanos, sobretudo na área criativa, a partir de fundamentações em estudos biológicos. Note-se que, segundo Benyus (1997), o biomimetismo representa uma reconexão essencial do ser humano com a natureza – considerada como modelo, medida e mentora². Ao se debruçar sobre o assunto, é possível perceber que gradativamente, os aportes da biomimética vêm sendo incorporados na área do design. Já se constata práticas inspiradas na natureza que almejam garantir sustentabilidade ambiental e aumento do interesse por tecnologias bioinspiradas (ASK NATURE TEAM, 2021; PAPANÉK, 1985; ROSSIN, 2010; SÁ; VIANA, 2020).

Diante do exposto, convém reconhecer que nas disciplinas do campo criativo, tal como o design, a adoção de uma postura ecológica pode contribuir para sua transformação, colaborando para avanços civilizatórios. Parece inadiável buscar qualidade e durabilidade de objetos e produtos, de maneira a evitar descartes desnecessários. Nesse sentido, é preciso reafirmar a importância de conscientizar os designers sobre os impactos de suas criações, antes mesmo que elas sejam implementadas no mundo real. Compreender a natureza e saber explorar seus recursos, são competências que merecem ser melhor estabelecidas na formação e na atuação desses profissionais (SOARES; ARRUDA, 2018; BROWNING; RYAN; CLANCY, 2014; MANZINI, 2017; PAPANÉK, 2007; SÁ, 2018; VEZZOLI; MANZINI, 2008). Admite-se, portanto, que a natureza constitui um grande repositório de conhecimento e inspiração para profissionais de design e que os aportes da biomimética devem ser investigados, dado o seu potencial para a conservação da biosfera. Em outras palavras, o embasamento em estudos de biomimetismo oferece uma agenda de pesquisa em design.

Tendo em vista os pressupostos anteriormente apresentados, empreendeu-se o presente trabalho com o intuito de examinar as interfaces do design e da biomimética a partir das seguintes questões norteadoras:

- Conhecimentos gerados pela biomimética e ferramentas biomiméticas têm sido aplicados em processos criativos?

risco e vulnerabilidade para assegurar sua sobrevivência. Em última instância, a biofobia é mais uma evidência da vigorosa conexão da espécie humana com a natureza (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2010).

² A biomimética caracteriza a natureza como: a) modelo, pois nela estão contidos diversos organismos e sistemas inspiradores para solucionar problemas humanos; b) medida, já que a natureza evidencia soluções equilibradas, de bom funcionamento e bem adaptadas por meio de seus padrões ecológicos; e c) mentora, visto que, com a imersão em conhecimentos naturais, é possível gerar novas formas de observar e valorizar a biosfera (BENYUS, 1997).

- Existe complementaridade entre ferramentas de design e ferramentas de biomimética em processos criativos?
- Em projetos de design, quais procedimentos vêm sendo realizados com ferramentas biomiméticas? Na formulação e execução dessas criações, quais são as vantagens e os limites desse enfoque? Comparativamente, quais aportes os recursos biomiméticos oferecem para projetos de design?
- O uso de ferramentas biomiméticas oportuniza sustentabilidade em projetos de design? Em quais projetos e de que modo?

No plano científico, a proposta se justifica pela escassez de pesquisas nacionais, sendo que, no âmbito internacional, verificam-se muitos esforços no sentido de integrar conhecimentos biomiméticos na abstração conceitual durante o planejamento e a execução de projetos mais adaptados às necessidades de criação e de consumo contemporâneos. Mais especificamente, essa Dissertação se inscreve na linha de pesquisa ‘Cultura e Materialidade’ do Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade de Brasília, na qual se focalizam, dentre outros temas, pesquisas sobre ambiente, consumo e demandas sociais, incluindo-se aplicações sustentáveis de projetos.

No escopo pessoal, este trabalho foi motivado pelo interesse da pesquisadora em ciências biológicas, o qual promoveu a realização de estudos sobre biomimetismo e suas aplicações em design. Entre 2017 e 2018, executou-se um Projeto de Iniciação Científica, intitulado ‘Design Inspirado na Natureza: aplicações de biomimética e biofilia em projeto de mobiliário’ (SÁ; SIQUEIRA, 2018). Tal experiência inicial estimulou um aprofundamento da temática, que culminou em Trabalho de Conclusão de Curso em Design, desenvolvido para obtenção das habilitações de Projeto de Produto e Programação Visual (SÁ, 2018).

Em suma, esta Dissertação está organizada em quatro capítulos. No Capítulo 1, serão brevemente delineados os referenciais teórico-conceituais que embasaram o presente trabalho. O Capítulo 2 apresentará uma revisão sistemática da literatura sobre biomimética e design. No Capítulo 3, serão reportados os levantamentos de ferramentas de design e ferramentas biomiméticas efetuados pela pesquisadora. No Capítulo 4, serão relatados objetivos e procedimentos metodológicos referentes ao estudo de ‘casos múltiplos’ desenvolvido durante o Mestrado, os quais serão descritos, analisados e discutidos. Nas Considerações Finais, serão apontados contribuições e desdobramentos.

CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA-CONCEITUAL

O primeiro lugar de que me recordo bem é um prado vasto e agradável com um lago de águas cristalinas. Algumas árvores frondosas se debruçavam nele, e juncos e ninfeias cresciam nas profundezas

Anna Sewell

Visando a fundamentar e contextualizar o presente trabalho, serão delimitados neste capítulo: noções bioinspiradas correlatas adotadas em projetos de design; o campo da biomimética; e aspectos de sustentabilidade e preservação ambiental.

1.1 CONCEITOS DE BIOINSPIRAÇÃO

1.1.1 Bioinspiração

Este termo abarca os desenvolvimentos criativos guiados por configurações das esferas biótica e abiótica. Ou seja, os projetos empregam características de organismos (ex. morfologia e comportamento), considerando as influências físico-químicas às quais eles estão submetidos em seus ecossistemas (ex. ventilação, água, luz, temperatura, pressão, formações geológicas, composição dos solos). É válido explicitar que, em função dessa amplitude, tendo em vista sua aplicação em design, a bioinspiração acaba por abranger as demais definições que serão explanadas a seguir (BAUMEISTER et al., 2014).

1.1.2 Biomorfismo

Designa a reprodução de formas naturais, mas não necessariamente inclui a abstração de princípios comportamentais, processuais e ecossistêmicos para atingir um objetivo, como no caso do biomimetismo. Essa perspectiva traduz uma aproximação primariamente visual e estilística, como por exemplo, as manifestações do movimento *Art Nouveau* e os projetos arquitetônicos de Antoni Gaudí. É necessário assinalar que a arquitetura e o design biomórficos podem suscitar intensas respostas emocionais positivas associadas aos padrões biofílicos (PAWLYN, 2011).

1.1.3 Biofilia

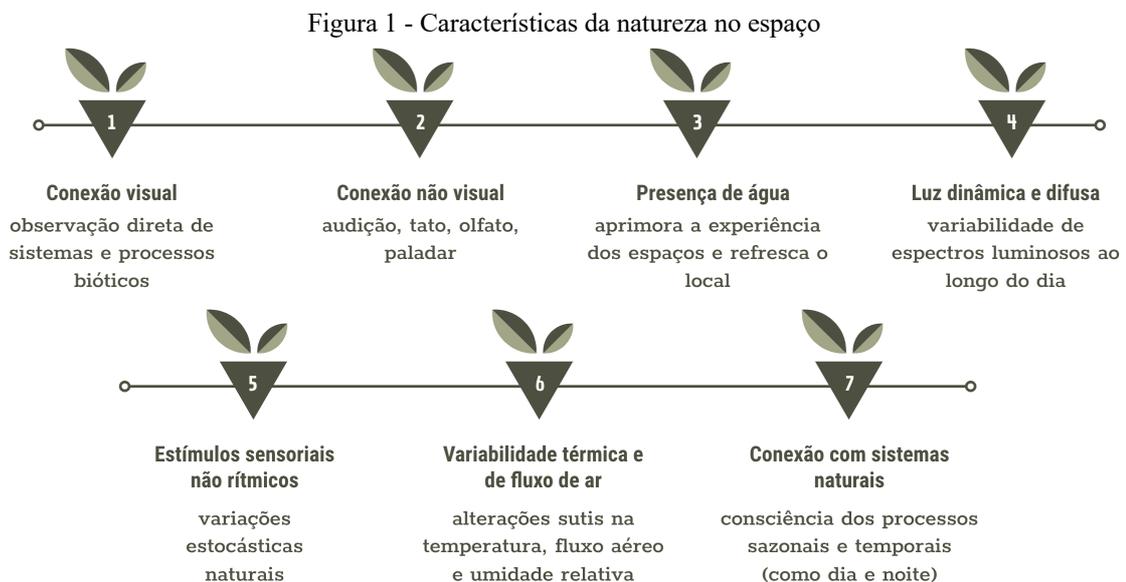
O vocábulo 'biofilia' foi difundido após a publicação da obra de Edward O. Wilson (1984). Essencialmente, essa expressão refere-se ao vínculo emocional de ordem inata entre ser humano e natureza, que propicia aprimoramentos de desempenho e saúde. Kellert e Wilson (1993) propuseram a Hipótese Biofílica, segundo a qual existiria uma preferência humana por características vinculadas

à configuração natural das paisagens, sobretudo aquelas que se assemelham à savana Africana, suposto continente de origem de nossa espécie (KELLERT, 2008). Nesse tipo de configuração espacial há, frequentemente, uma disponibilidade e abundância de recursos hídricos e de alimentação; além disso, existe a possibilidade de identificação de sinais de perigo, de proteção contra intempéries e predadores. Esses fatores são complementados pela liberdade de movimentação, pela capacidade de *wayfinding*³ e por sinais de habitabilidade também encontrados em tal tipo de ambiente. Acredita-se que esses elementos favoreceram a sobrevivência ao longo do tempo e, assim, são considerados, consciente ou inconscientemente, como sinais de beleza, conforto e boa disposição (BROWNING; RYAN; CLANCY, 2014; HSUAN-AN, 2018).

O design biofilico reconhece e se inspira nas qualidades da natureza para elaboração de projetos criativos que promovem a saúde, a produtividade pessoal e coletiva (BROWNING et al., 2012; HASE; HEERWAGEN, 2001; WILSON, 1984). De acordo com Browning, Ryan e Clancy (2014), os 14 princípios fundamentais da biofilia podem ser organizados em três eixos, a saber:

a) Natureza no espaço

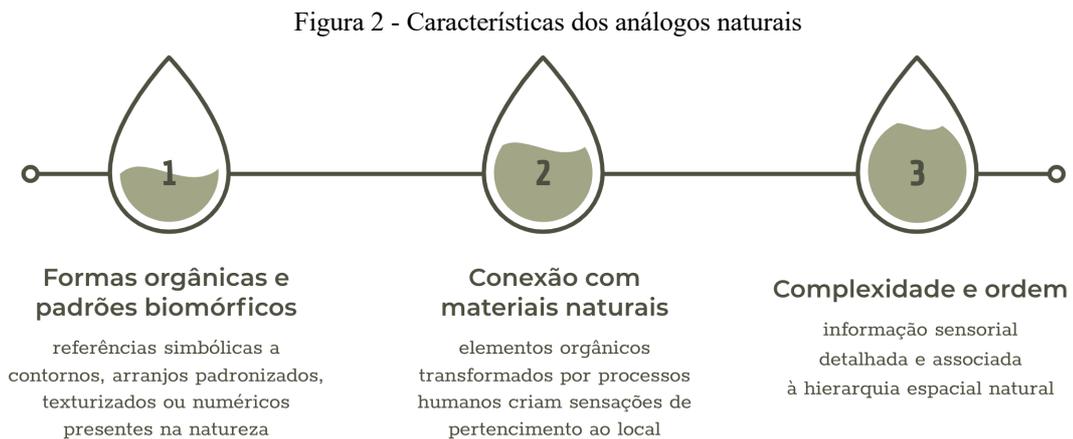
Envolve elementos naturais em um determinado local (ex. vegetação, animais, fluxos sonoros, olfativos, hídricos e aéreos). Tal como pode ser verificado na Figura 1, a percepção de movimentos intermitentes e as interações multissensoriais são preponderantes.



³ O termo traduz um conjunto de princípios de design que torna um determinado espaço navegável. Ou seja, uma pessoa consegue se orientar e chegar ao seu destino com sucesso, mesmo que esse percurso não tenha sido pré-estabelecido por ela. Três critérios influem em *wayfinding*: a) se o indivíduo consegue inferir ou descobrir sua posição atual; b) se uma rota ou local de destino pode ser encontrado; e c) se é possível assimilar a experiência de navegação (FOLTZ, 1998).

b) Análogos naturais

Correspondem às evocações orgânicas, não vivas e indiretas da natureza em materiais, cores, formas, sequências, padrões, objetos, obras de arte, ornamentos e construções, conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Adaptado de Browning; Ryan; Clancy, 2014.

c) Natureza do espaço

Contempla tanto o desejo de poder visualizar para além do ambiente circundante, como também o fascínio por cenários de mistério e refúgio. A identificação de potenciais riscos também é uma característica que estimula a escolha por locais protegidos e a busca por sensações de segurança. A Figura 3 exhibe as características desse eixo.

Figura 3 - Características da natureza do espaço



Fonte: Adaptado de Browning; Ryan; Clancy, 2014.

Em uma ótica sustentável, verificou-se que os espaços que incluem elementos de vegetação (ex. paredes e telhados verdes) e uma maior integração de aspectos paisagísticos demonstraram muitas vantagens, uma vez que as massas verdejantes auxiliam na redução das temperaturas do microclima local por meio da evapotranspiração, tendo potencial para absorção de dióxido de carbono, produção de oxigênio, absorção de águas pluviais e captura de poluentes do ar (KELLERT; HEERWAGEN; MADOR, 2013; SÁ, VIANA, 2021b).

Salienta-se que o design biofílico representa um investimento em saúde e produtividade, que pode favorecer a coletividade (BROWNING et al., 2012). Com ele, oportunizam-se criações arquitetônicas e de design inspiradoras, restauradoras do corpo e da mente, e, em última instância, integradas aos ecossistemas urbanos e naturais. Nesse sentido, seria importante estimular o amor e o cuidado para com os espaços, priorizando a criação de experiências multissensoriais que utilizam padrões biomórficos. Desse modo, a incorporação de elementos vivos do meio seria benéfica, incentivando a conexão com a harmonia estética de cada localidade (PAPANNEK, 1985, 2007).

1.1.4 Bioutilização

Trata-se da coleta de um produto ou de um organismo produtor, tal como se apresentam na natureza. A título de exemplo, é possível mencionar: a) corte de ripas de madeira para aplicação em revestimentos de pisos e paredes; e b) cultivo e coleta de plantas para emprego de seus princípios ativos e propriedades medicinais na produção de fármacos (BAUMEISTER et al., 2014).

1.1.5 Bioassistência e biodesign

Em contraposição ao conceito de bioutilização, Baumeister et al. (2014) propuseram a noção de “tecnologia bioassistida”, a qual pressupõe a domesticação e/ou aplicação de um organismo para cumprir determinada função (ex. purificar água utilizando bactérias e outros micro-organismos). Empregado por vezes como sinônimo de bioassistência, o vocábulo “biodesign” se refere à incorporação de organismos vivos ou de ecossistemas para aprimoramento de funções do produto final. O biodesign extrapola o mimetismo e concentra-se na integração direta de entes vivos, dissolvendo fronteiras entre o natural e o artificial, ou seja, estimula a sintetização de tipologias híbridas (MYERS, 2018). Cabe citar alguns projetos ilustrativos dessa concepção: a) a ponte Meghalaya, inteiramente composta por raízes (MYERS, 2018); b) o *Genetic Barcelona Project*, que investiga genes bioluminescentes de águas-vivas para criar árvores que se iluminem naturalmente, permitindo visibilidade noturna sem uso de redes de energia convencionais (ESTÉVEZ; NAVARRO-MATEU, 2017); e c) a fabricação de tecidos a partir do cultivo de micélios de fungos (ABREU, 2015).

Cumprе assinalar que, na opinião de Broeck (1989, *apud* SOARES; ARRUDA, 2018), o termo “biodesign” também pode remeter à aplicação da biônica na esfera de projetos em Desenho Industrial. Sob esse prisma, trata-se do estudo de elementos naturais, que são transpostos, por meio de analogias, para projetos na esfera humana, dando origem a novos artefatos, tecnologias e sistemas.

1.1.6 Biotécnica

Ressalta-se que tanto o termo “biônica”, o “biodesign” como o vocábulo “biomimética” podem ser considerados como derivados do conceito de “biotécnica”. Esse termo, utilizado pela primeira vez pelo Reverendo John George Wood, em 1877 descrevia, naquela época, os processos pelos quais o ser humano realizava seus empreendimentos construtivos a partir da observação de estruturas, muitas delas naturais (ARRUDA, 2015; 2018; SOARES; ARRUDA, 2018).

1.1.7 Biônica

É um termo de origem inglesa (*bionics*) formulado por Jack Steele no final da década de 1950. Em publicações de design, o emprego dessa palavra enquanto sinônimo do vocábulo biomimética é recorrente, principalmente nos primeiros trabalhos que tratam da inserção de aspectos naturais em projetos.

Porém, em outras áreas, esse termo possui significados diferentes, como nos campos da medicina, engenharia e eletrônica, em que a biônica é referida frequentemente em pesquisas sobre próteses, órteses e em robótica (DETANICO; TEIXEIRA; SILVA, 2010; GOMES, 2019; QUEIROZ; AGUIAR; ARAÚJO, 2017).

Com relação ao sentido utilizado em design (incorporação de princípios biológicos), compete mencionar o emprego dessa expressão, em “*Design for the Real World*” de Papanek (1985). Nessa publicação, o autor dedicou o oitavo capítulo à temática, definindo biônica como uma grande “árvore do saber”, por meio da qual se pretende utilizar protótipos biológicos para criação de sistemas sintéticos humanos. Percebe-se convergência com o biomimetismo. Mas, no caso da biônica, a relação com a natureza tende a priorizar a aplicabilidade de características formais, funcionais, materiais e evolutivas em sistemas técnicos, mecânicos e industriais, sem necessariamente adotar uma perspectiva sistêmica e integrada do meio natural (ARRUDA, 2018; SOARES; ARRUDA, 2018).

1.2 BIOMIMÉTICA

Segundo Palwyn (2011), a expressão “biomimetismo” figura na literatura científica desde 1962, tendo seu uso habitual no campo das ciências dos materiais identificado na década de 1980. Porém, é importante comentar que, antes mesmo do surgimento da palavra “*biomimicry*”, um vocábulo semelhante – “*biomimetics*” – já vinha sendo empregado nos anos 1950 e 1960, nomeadamente por Otto Schmitt (ARRUDA; FREITAS, 2018; QUEIROZ; AGUIAR; ARAÚJO, 2017). Após a disseminação das obras de Janine Benyus (1997), empreenderam-se mais esforços para delimitar a área da biomimética, a exemplo das contribuições de Baumeister et al. (2014); Helms, Vattam e Goel (2009); e Vincent et al. (2006).

De acordo com Pawlyn (2011), o biomimetismo deve ser compreendido como uma síntese entre as capacidades inventivas dos seres humanos combinadas com as melhores soluções biológicas. Nessa abordagem, ao invés de utilizar ou domesticar a natureza, a análise dos organismos almeja inspirações estimuladas por analogias e abstrações desses fatores da biosfera (BAUMEISTER et al., 2014; GOMES, 2019). Adicionalmente, compete esclarecer, que a noção de biomimética pode se articular com as ideias veiculadas pelos vocábulos anteriormente explicitados. Nesta Dissertação, optou-se pela perspectiva desenvolvida por Benyus (BAUMEISTER et al., 2014; BENYUS, 1997).

Mais do que um conceito, a biomimética é reconhecida como uma área do conhecimento que estuda formas, processos e relações sistêmicas naturais para a produção humana. Sua união com o design suscita resultados de impacto positivo, com potencial para a regeneração e para a sustentabilidade. Isso é evidente, pois propõe a adaptação ao contexto local, o cuidado com as diversas etapas da cadeia produtiva, o uso de elementos atóxicos, a eficiência no uso de recursos e o agenciamento da complexidade pela compactação modular (BAUMEISTER et al., 2014; ZARI; RECHT, 2020).

Nesse campo, compreende-se que os desfechos implementados pela natureza proporcionam respostas para problemas de função ou de desempenho, possibilitando escolhas adaptadas às metas de um projeto. Em outras palavras, observam-se a flora, a fauna e os ecossistemas com o propósito de oferecer soluções para necessidades e desafios nas variadas esferas da atividade humana; como, por exemplo, em ambientes, objetos, obras gráficas e eletrônicas (ARRUDA, 2015; ROSSIN, 2010).

Após um processo evolutivo que se estendeu por bilhões de anos, o sistema natural instaurou estruturas e funções frequentemente apropriadas a cada contexto, inclusive do ponto de vista da sustentabilidade, pois os recursos ambientais tendem a ser usados do modo mais

equilibrado possível ao longo do ciclo da vida (BENYUS, 1997; FOURNIER, 2011). De acordo com Benyus (1997), os ‘exemplos’ a serem seguidos são a miríade de organismos habitantes do planeta Terra, que sobreviveu por eras, mantendo uma estabilidade dinâmica, realizando trocas contínuas de recursos sem esgotar o seu capital ecológico. Baseados nessas premissas, estudiosos salientaram que o ato de simplesmente imitar ou copiar organismos, processos e sistemas reduz as possibilidades criativas de inserção do biomimetismo em atividades tecnológicas. Com efeito, almeja-se obter traduções, analogias e abstrações a partir da observação, pesquisa e compreensão do meio natural (ARRUDA, 2018; BAUMEISTER et al., 2014; BENYUS, 1997).

Por certo, para considerar a biosfera como um repositório de conhecimento acessível, é primordial ter em mente os princípios éticos que regem as práticas biomiméticas. As possibilidades ofertadas pela natureza devem ser aplicadas em projetos destinados ao bem viver coletivo. Os preceitos da biomimética restringem a criação de artefatos nocivos e de destruição, como as tecnologias bélicas (BENYUS, 1997).

Segundo Benyus (1997) e Baumeister et al. (2014), o design biomimético é guiado pelos ciclos vinculados à Terra (Figura 4). Mais especificamente, são estabelecidos fenômenos de funcionamento de nichos e biomas para orientar as criações. É perceptível que esses fatores são macroprocessos abstratos que raramente são cumpridos ou alcançados em sua totalidade. No infográfico a seguir, identificam-se os três pilares da biomimética: a) princípios éticos (*ethos*); b) proposta de (re)conexão com o meio natural; e c) emulação, isto é, a ‘transferência da natureza’ por meio de analogias para áreas como design, arquitetura e engenharia.

Figura 4 - Princípios da biomimética



Fonte: Adaptado de Baumeister et al., 2014.

Em complemento a essas diretrizes, existem três abordagens da integração de biomimética no processo criativo: a) evidência da forma - as configurações do produto emergem de características físico-biológicas; b) aproximação processual - o recurso emulado em design é alicerçado na análise e transformação de processos e comportamentos orgânicos; e c) ênfase sistêmica - considera a atividade de projeto a partir do estudo de inter-relações entre organismos e seu ecossistema (ANTONIOLI, 2017; BAUMEISTER et al. 2014).

A vida mostra suas facetas virtuosamente em cada organismo, utilizando os seus limites como uma força, ou seja, um mecanismo de focalização. Dessa maneira, é notável como a biosfera exibe sua poderosa capacidade inventiva em espaços restritos (BENYUS, 1997). Ademais, a natureza fabrica seus materiais em condições que respeitam a vida, mesmo que certos processos sejam extintos ou transformados ao longo do tempo. Ela utiliza recursos atóxicos, baixas temperaturas na composição de substâncias e viabiliza a realização de reações químicas na água em temperatura ambiente, sem aditivos químicos nocivos ou altas pressões. Todavia, é preciso destacar que a biomimética não deve se restringir ao mundo animal, ela compreende também o universo vegetal e as esferas microscópicas (BAUMEISTER et al., 2014).

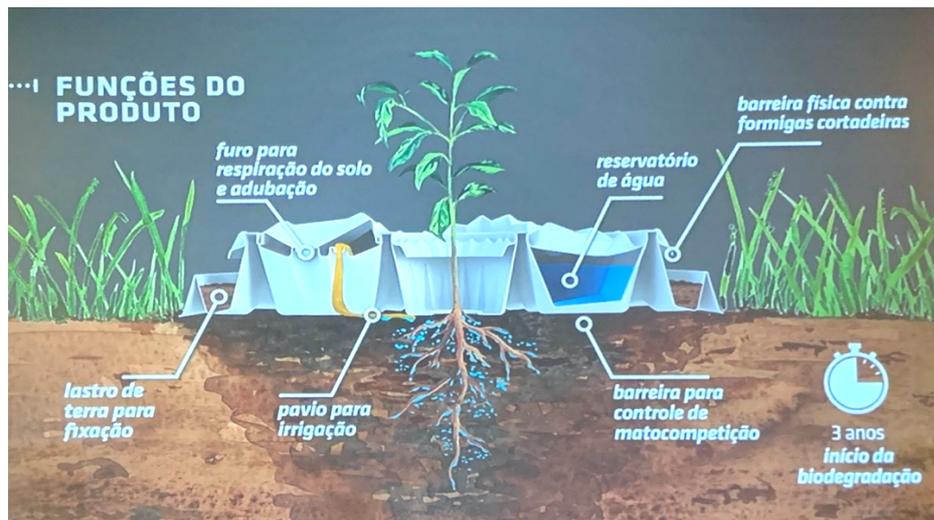
Segundo Mancuso (2019), a depender da aplicação, as plantas incorporam modelos mais resistentes e modernos, em comparação a certos animais. Elas são a representação viva de como a solidez e a flexibilidade podem ser combinadas. Sua característica modular é a quintessência da modernidade: uma organização cooperativa, distribuída, sem centros de comando, capaz de resistir a repetidos eventos catastróficos sem perder a funcionalidade e se adaptar com rapidez a enormes mudanças ambientais. Além disso, os vegetais consomem pouca energia, operam por movimentos passivos, são robustos, dotados de uma inteligência distribuída e comportam-se cooperativamente como colônias. Dessa forma, são modelos significativos para sistemas interdependentes fundamentados na amplitude da quantidade de elementos em áreas como design, computação e robótica (MANCUSO, 2019).

É interessante assinalar que grupos de estudo em biomimética têm evidenciado a relevância do uso de biomateriais, compósitos e componentes biodegradáveis e de baixo custo na materialização de projetos inseridos nas teorias de design inspirado na natureza (ARRUDA, 2019; DE PAUW; KANDACHAR; KARANA, 2012; PAWLYN, 2011). De fato, a ampla investigação do mundo biológico e seus respectivos domínios, reinos, filos, classes, ordens, famílias, gêneros e espécies vem apontando novas possibilidades criativas.

A seguir, serão descritas algumas aplicações de biomimética:

- a) Sistema Nucleário - projeto brasileiro vencedor do prêmio internacional de biomimética *Ray of Hope*, foi inspirado no acúmulo de fluidos das bromélias e no transporte de água por capilaridade nas raízes (Figura 5). É um produto que aumenta a eficiência das restaurações florestais, por meio de um sistema de manutenção pós-plantio que cria um coroamento permanente (inspirado na serapilheira) para proteger as mudas, garantindo economia de custos com mão-de-obra e irrigação (NUCLEÁRIO, S.d.; INSTITUTO PINDORAMA, 2019).

Figura 5 - Sistema Nucleário



Fonte: Nucleário (www.nucleario.com), acesso em 2021.

- b) *Solar Ivy* - proposto pela empresa nova-iorquina *Sustainably Minded Interactive Technology* (SMIT), é uma rede de geração de energia, inspirada em folhas de plantas trepadeiras que reúne componentes modulares configurados para disposição nas mais variadas superfícies de construções (Figura 6). As peças combinam placas solares com geradores piezoelétricos, produzindo energia tanto a partir da luz solar, quanto com a variabilidade dos fluxos aéreos. Esse produto gera áreas de sombreamento, o que melhora o conforto térmico dos espaços, podendo em última instância, diminuir a frequência de uso de aparelhos de ar condicionado (ASK NATURE TEAM, 2021).

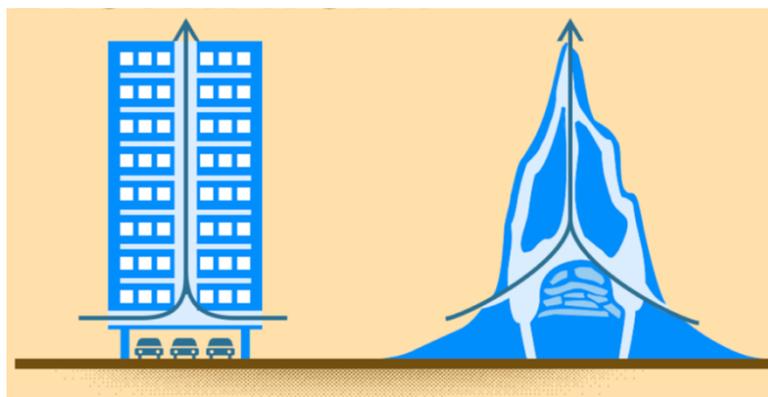
Figura 6 - Módulos *Solar Ivy* e aplicação em fachada



Fonte: Inhabitat (<https://inhabitat.com/>) acesso em 2021.

- c) Edifício *Eastgate* – é um *shopping center* e um complexo de escritórios, no Zimbábue, que foi projetado para utilizar estratégias de ventilação passiva em seu controle térmico (Figura 7). Ao invés de utilizar sistemas de ar condicionado – que geram muitas emissões de gases nocivos – a construção é inspirada na disposição interna das colônias de cupins. Esses animais regulam as temperaturas do interior dos cupinzeiros por meio de estruturas físicas em seu centro, feitas com o acúmulo de grãos de terra (ABBASLI; SELÇUK, 2016).

Figura 7 - Comparação esquemática da ventilação no Edifício *Eastgate* e em colônias de cupins



Fonte: *Biomimicry Institute* (www.biomimicry.org), acesso em 2021.

É importante refletir que, para atingir um futuro biomimético, é preciso ocorrer uma transformação ‘interna’ nos seres humanos, que se estenda para além de uma mudança de paradigma tecnológico (BENYUS, 1997). Acima de tudo, é indispensável adotar uma perspectiva de respeito e responsabilidade perante a biosfera. Aliás, Benyus (1997) complementou que o único modo de continuar a aprender com a natureza, e dela extrair as inúmeras possibilidades de analogias biomiméticas, seria preservar a esfera natural: fonte de onde nascem tantas boas ideias. Portanto, construir em uníssono com a natureza e aprender com ela, significa reformular a relação entre a humanidade, as tecnologias e o meio ambiente (ANTONIOLI, 2017).

Em síntese, como declarou Papanek (1985), a inserção de princípios e elementos da natureza em projetos não deve se limitar a estabelecer análogos visuais. Efetivamente, deve-se investigar as possibilidades dos múltiplos princípios biológicos, bem como a inter-relação de suas partes e sistemas. Na sua visão, a natureza desvela inúmeras possibilidades, ainda pouco exploradas pelos projetistas, sendo particularmente pertinente para criações em design. Assim, a biomimética ao oferecer diversificados subsídios para inovação, constitui-se em um enfoque interdisciplinar e multiprofissional potencializador da reaproximação do ser humano com a biosfera (PAPANEK, 1985; PAZMINO, 2018; SOARES; ARRUDA, 2018). Essa vital reconexão influi, por sua vez, na compreensão da pertinência da inserção de aspectos relativos à preservação ambiental nas áreas criativas, que será discutida nas próximas seções.

1.3 SUSTENTABILIDADE E PRESERVAÇÃO AMBIENTAL

Munido de um aparato físico limitado, o ser humano teve de expandir sua força e sua capacidade para executar variadas tarefas sem contar com recursos anatômicos apropriados, mas podendo empreender um percurso de aprendizagem acumulativa intergeracional. De modo geral, as espécies se adaptaram de maneira autoplástica⁴ ao seu *habitat*, seja por mudanças associadas à variação sazonal (ex. a camada de pelos protetora que cresce durante o inverno) ou até mesmo por alterações morfológicas acentuadas em processos evolutivos de diferenciação entre si. Mas, no caso dos seres humanos, observa-se uma trajetória aloplástica⁵, em que a espécie participou ativamente de seu próprio processo evolutivo (LARAIA, 1986; PAPANEK, 1985). É possível considerar que esse trabalho de projetar e ajustar as produções humanas tornou-se o papel primordial dos designers.

Todavia, a humanidade vem se distanciando da natureza ao romper barreiras ambientais e geográficas e ao adaptar seu “equipamento superorgânico externo” (sua produção artificial). Jackson alerta que a faceta negativa resultante desse desenvolvimento pode ser constatada nos meios fabris e na agricultura (BENYUS, 2011). Muitos desses prejuízos foram ocasionados pelo desejo humano (principalmente, no mundo ocidental) de romper os vínculos com a natureza, substituindo seus sistemas orgânicos e cíclicos por sistemas distintos e artificiais, acarretando perda constante de capital ecológico. No caso das atividades de cultivo, surgem muitos impactos como erosão e salinização dos solos (BENYUS, 2011).

Soma-se a esse cenário, uma percepção de que grande parte dos desafios enfrentados pela humanidade consiste nos impactos das mudanças climáticas. Dentre suas consequências mais perceptíveis, estão o esgotamento de recursos naturais e a degradação ambiental, que se refletem pela intensificação da desertificação, escassez de água doce e perda de biodiversidade. A elevação das temperaturas globais, o aumento do nível do mar e a acidificação dos oceanos estão afetando gravemente várias zonas da Terra com maiores malefícios para os países em desenvolvimento. Sendo assim, a sobrevivência de muitas comunidades, bem como dos sistemas biológicos do planeta estão em risco (ONU, 2016; SANTOS et al., 2018; VEZZOLI; MANZINI, 2008).

⁴ Significa adaptação ao ambiente pela modificação do próprio corpo de um determinado organismo (DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS, [entre 2009 e 2020]).

⁵ Em contraste à autoplastia, a aloplastia é um termo que reúne os radicais gregos: *állos* e *plástos* que significam, respectivamente, “diferente” e “processo de formação” ou “agente modelador”. A expressão corresponde à ideia de conferir forma a partir de intervenções externas à configuração original do corpo de um organismo (DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS, [entre 2009 e 2020]).

Baudrillard (1973) acautelou que, nesse cenário de ‘modernidade’ e ‘pós-modernidade’, passam a vigorar sistemas complexos caracterizados pela criação de objetos e equipamentos artificiais e efêmeros, que estimulam práticas consumistas e imediatistas que, por sua vez, não exigem decisões definitivas e duradouras. Identifica-se uma tendência de miniaturização de componentes, produção elevada e transformação de matéria em informação, em uma abstração que tudo permeia.

Em consonância com tais perspectivas, Dohmann (2013) acrescentou que o ser humano passou a viver uma conjuntura em que os objetos orbitam ao seu redor, em processos fluidos e instáveis, e configuram o núcleo das interações e comportamentos, inserindo-se em uma dinâmica ininterrupta de produção global. Nesse “objeto-centrismo”, ao invés de conquistar mais autonomia e liberdade com auxílio de suas criações, o ser humano iniciou uma “odisseia do artificial”. Assim, esses universos projetados modificam a percepção identitária de cada pessoa, seus modos de expressão e suas relações grupais.

Evidentemente, os elementos fabricados pelo ser humano são planejados e o design vem se desenvolvendo nesse campo específico das atividades humanas, o que impõe questionamentos éticos por parte dos projetistas. Todavia, persistem lacunas de normatizações públicas que especifiquem a responsabilidade pelas suas criações. A produção industrial converteu-se em uma intrincada rede de informações e, progressivamente, os projetos não são mais fruto do trabalho de um único autor, uma vez que dependem do desempenho de equipes que têm de unir componentes humanos e artificiais. Nessas circunstâncias de vigorosos avanços tecnológicos, é necessário que os designers estejam atentos aos compromissos éticos e ambientais (FLUSSER, 2007; PAZMINO, 2018).

Cabe lembrar que, desde meados do século XX, intensificaram-se, na área de design, discursos e práticas convergentes com os princípios elementares de consciência ecológica, principalmente em razão da influência de pensadores e profissionais como Buckminster Fuller (1981, 1998) e Victor Papanek (1985, 2007). Um engajamento mais sistemático pode ser verificado a partir das décadas de 1970 e 1980, com os primórdios do interesse da indústria por questões ambientais e sociais (CESCHIN; GAZIULUSOY, 2016; VEZZOLI; MANZINI, 2008). Quando orientado para a sustentabilidade, o processo de design é congruente com os questionamentos relativos aos sistemas de fabricação, uso e consumo (QUEIROZ; VIANA, 2014; MANZINI, 2017; MELO; ENGLER, 2019; SANTOS et al., 2018; VEZZOLI; MANZINI, 2008).

Desse ponto de vista, as metas de pesquisa visam a minorar impactos ambientais e sociais decorrentes da produção em design. A argumentação em prol da sustentabilidade

originou-se na proposta de reorganizar a capacidade econômica do modelo capitalista em função da degradação do ambiente, seja por restrição produtiva ou por seus efeitos. Outro ponto a ser considerado, é a necessidade de investigar a variável comportamental do uso de produtos, já que representa uma vertente importante na compreensão do design orientado para a sustentabilidade. Resultados mostraram que há uma falta de percepção da relação entre comportamento pessoal do consumidor e os impactos ambientais e sociais diretos (BHAMRA; LILLEY; TANG, 2011; MELO; ENGLER, 2019; QUEIROZ; VIANA, 2014; VEZZOLI; MANZINI, 2008).

Vale destacar aspectos tratados por Cardoso (2012) como o ciclo de vida de produtos. Para esse autor, a posse de um objeto deveria presumir a responsabilidade pelo zelo da integridade desse bem material. Ademais, um objeto que assume uma multiplicidade de funções acaba por obter uma sobrevida ao “resistir” a seu projeto original. Então, por meio da resignificação, reciclagem, reutilização e mudança de contexto, prolonga-se sua vida útil e posterga-se ou até mesmo evita-se seu descarte.

Edgar Morin (2007) refletiu sobre a degradação de sistemas naturais em consequência do impacto da produção industrial. Em sua opinião, o mundo globalizado encontra-se imerso em crises desencadeadas pelo desenvolvimento desenfreado que, na ausência de regulamentações suficientes, geram impactos perceptíveis. Morin (2007) enfatizou que os modelos atuais estão atingindo seus limites e a noção simplista de “desenvolvimento sustentável” é passível de críticas, uma vez que a expressão pode conduzir a posicionamentos passivos e soluções estáticas que não asseguram resultados desejáveis. É imperativo encontrar um novo caminho em razão do reconhecimento da inevitabilidade de uma vasta catástrofe. Nessa ótica, os sistemas inadequados devem se metamorfosear, durante sua desintegração, a partir da união com fatores complexos e soluções ativas, potencializando regenerações.

Além de Morin (2002, 2007), outros autores enfocaram o ‘desenvolvimento sustentável’ a partir de um ponto de vista crítico, como Escobar (1995), Labeyrie (2002) e Ribeiro (1991).

Durante o século XX, foi nítida a predominância de uma postura administrativa e associada à priorização de um viés econômico na conceituação do termo “desenvolvimento sustentável”. Nesse contexto, a figura do pesquisador-cientista transformou-se, por vezes, em uma figura de gestor-empresário, que visava aproveitar ao máximo os recursos terrestres para obter benefícios. Destacava-se a sustentação do crescimento econômico que se sobrepunha à sustentação do próprio ambiente, reduzindo a ecologia a uma forma de ‘eficiência’. Essa abordagem culminava na divulgação da necessidade de um crescimento imprescindível, como se a sociedade fosse permanentemente confrontada com o dilema entre crescer ou perecer. Tal visão

estimulou a ideia de redenção da humanidade via aperfeiçoamento tecnológico, que esteve, desde então, fortemente relacionada ao desenvolvimento sustentável (RIBEIRO, 1991).

É importante realçar que o vocábulo ‘desenvolvimento’ consiste em um dos conceitos basilares da cultura ocidental, e, acabou por se tornar um termo de uso extenso e de alta plasticidade. Quando não é devidamente especificado, seu significado pode ser esvaziado (RIBEIRO, 1991). Assim, é necessária uma observação cuidadosa do uso da expressão, pois, conforme assinalado por Escobar (1995), à primeira vista, o desenvolvimento sustentável seria caracterizado como a solução para todos os desafios, tal como uma ‘mão iluminada do Ocidente’ que erradicaria problemas sociais e ambientais, salvando a Terra e reconciliando a humanidade com a natureza em um só gesto de racionalidade. Dada essa percepção audaciosa, é preciso questionar como o desenvolvimento sustentável poderia ser conduzido e implementado de forma prática, no mundo real, para obter tais resultados.

Parece uma simplificação exacerbada acatar posturas ‘desenvolvimentistas’ e voltadas unicamente para a economia e a gestão, pois podem veicular uma reconciliação epistemológica e política entre economia e ecologia. Essa impressão ilusória é preocupante ao declarar que seria apenas necessária a realização de leves ajustes ao sistema de mercado para desencadear uma nova era de sustentabilidade, perfeito equilíbrio e respeito à natureza. Na verdade, o contexto real encontra-se muito distante disso, visto que as próprias configurações econômicas não podem acomodar os fatores ecológicos e de preservação ambiental sem uma reforma substancial (ESCOBAR, 1995). Para atingir a sustentabilidade em nível global, é preciso implementar um extenso *redesign* dos sistemas industriais e mercadológicos. Talvez seja preciso descobrir e projetar um sistema econômico e social que não seja norteados exclusivamente pela compreensão atual do vocábulo ‘desenvolvimento’ (ESCOBAR, 1995; MANZINI, 2008; MANZINI, 2017; VEZZOLI).

Levando em consideração essa discussão crítica sobre o desenvolvimento sustentável, é válido salientar que, mesmo com todas as questões supracitadas, as noções de sustentabilidade e de preservação ecológica têm se difundido cada vez mais. Nos setores de negócios e da indústria, é crucial compreender que, a longo prazo, somente as organizações que incluírem as necessidades amplas e latentes da sociedade (ex. proteção ambiental, segurança e saúde para as comunidades e o uso consciente dos recursos naturais) em suas metas institucionais, conseguirão se manter em níveis competitivos aceitáveis. Mas, para que possam ser efetivamente classificadas como sustentáveis, é vital que as empresas passem a incorporar valores de preservação do planeta em sua essência. Em outras palavras, é preciso que deixem de encarar a sustentabilidade como um

mero conjunto de requisitos a serem cumpridos (BROCCO, 2018; FILHO; ARRUDA; CLEMENTINO, 2019; FIKSEL, 2012).

Considerando esse enfoque, é pertinente construir um novo caminho para que seja possível transformar as criações e relações humanas, buscando um equilíbrio entre as dimensões: econômica, social, tecnológica e ambiental. Desse modo, poderá ser estabelecido um sistema produtivo balanceado, sustentável e adequado à biosfera.

Dentre as medidas que precisam ser abordadas para alcançar uma aproximação desse resultado estão a necessidade de integração de estratégias de planejamento nacionais e internacionais, considerando o reforço e enfrentamento resilientes, unidos à capacidade de adaptação a riscos relacionados às catástrofes naturais. Soma-se a isso, a pertinência de construir infraestruturas adaptadas, calcadas na promoção da industrialização inclusiva, e que, sobretudo, transformem as práticas de fomento à inovação. Outro aspecto relevante é o fortalecimento da pesquisa científica e a promoção do acesso universal à informação (ONU, 2016).

Também é primordial incluir uma pluralidade de perspectivas durante a tomada de decisão, além de construir pontes de comunicação baseada na ciência abrangendo diversos grupos ao redor do planeta e projetar instituições capazes de aceitar a diversidade de vivências e acatar medidas que salvaguardem a natureza. É preciso almejar um futuro em que os *habitats* humanos e das demais espécies sejam seguros e resilientes (ESCOBAR, 1995; ONU, 2016).

Outro fator que deve ser mencionado corresponde à complexidade dos desafios ecológicos, que compõem um intrincado universo com muitos participantes e que transcende os contextos culturais e locais para abarcar todas as nações e continentes. Também é preciso lembrar que apesar dos recursos naturais serem de uso comum ao redor do globo isso não significa que eles sejam igualmente compartilhados entre os países e comunidades. Ou seja, é importante constatar que existem grandes disparidades entre as regiões e países, e esse fator se torna importante ao discutir como partilhar a responsabilidade pela degradação e restauração dos ecossistemas.

Vale complementar as perspectivas apresentadas com as ideias defendidas por Benyus (1997). Ao se referir a sistemas complexos, a autora concorda que quanto menos estável é um sistema, mais ele está prestes a passar por mudanças. Entremeadada por períodos de estagnação, antes de ascender a um novo nível de criatividade após uma crise, ocorreu a evolução da própria biosfera. Assim, se a humanidade está prestes a atingir seus limites em termos do uso dos recursos da Terra, é possível buscar uma singular fase de solução de problemas, ao longo da qual as sociedades se adequariam ao seu planeta e não o inverso (BENYUS, 1997).

Uma postura de respeito se associa com a capacidade de assimilar a posição da espécie humana na escala filogenética. Ao reconhecer a importância da reconexão com a natureza, ressurgem o sentimento de curiosidade e de pertencimento de cada indivíduo. Maravilhar-se com as possibilidades contidas nas pequenas plantas que nascem sobre o concreto, na relação dinâmica entre as abelhas em suas colmeias e nos processos renováveis que regem os ecossistemas, pode incentivar o surgimento de projetos, produtos e serviços (BENYUS, 2011).

A sustentabilidade na natureza, tão discutida na obra de Benyus (1997), inspira criações, não somente pelas particularidades dos organismos, mas por sua capacidade de prosperar graciosamente na Terra. Sendo assim, a biomimética simboliza uma mudança de paradigma na relação do ser humano com a biosfera, ao propor uma alteração das relações extrativistas e exploratórias que alicerçam a sociedade industrial contemporânea. Ela é, sobretudo, um incentivo para a aprendizagem da sustentabilidade (BENYUS, 1997; BROCCO, 2018; RAMOS, 2018).

De modo geral, aplicar o design de forma consciente, como uma ferramenta de organização do mundo poderá direcioná-lo para a preservação ambiental. Papanek (1985) elucidou que o design requer uma aproximação ecológica e etológica dos múltiplos sistemas, processos e ambientes e não apenas uma simples atividade de produção de “objetos”. Por consequência, o designer deve analisar o passado, como também precisa pensar nos impactos e consequências futuras de seus atos e criações, o que remete à necessidade de suficiente familiarização com o design sustentável.

É relevante refletir sobre os produtos e serviços como elos significativos entre o ser humano e a biosfera. Quando são integrados, a natureza e o design são capazes de crescimento, adaptação e regeneração em resposta às necessidades humanas (PAPANEK, 1985). Consequentemente, projetar de forma antecipatória e abrangente corresponde a planejar considerando uma pluralidade de disciplinas e interfaces. E, é justamente na fronteira entre essas diferentes áreas do conhecimento que descobertas são feitas, em especial no que tange aos princípios do biomimetismo (PAZMINO, 2018).

Levando em consideração o que foi abordado anteriormente, acredita-se que um dos caminhos para atingir resultados fundamentados na consciência ecológica, sustentabilidade e preservação ambiental esteja na investigação de: biomimética, biofilia, *cradle to cradle*⁶ e *ecodesign*.

⁶ Engloba princípios de circulação e reaproveitamento sem gerar descartes (BRAUNGART; MCDONOUGH, 2013).

Desse modo, métodos de inspiração natural, como a biomimética e o *cradle to cradle*, convergem com as ideias de Cardoso (2012) e Papanek (1985) no que concerne ao design reversível, modular e durável. É interessante mencionar que Braungart e McDonough (2013) argumentaram que é fundamental manter ciclos renováveis de matérias biológicas e tecnológicas. Para que o design seja ecológico e socialmente responsável, é preciso dedicar-se aos princípios da natureza e fazer escolhas conscientes ao longo de todo o processo de criação. Assim sendo, é imprescindível: reduzir o consumo; evitar materiais tóxicos; minimizar o uso de embalagens; explorar a máxima diversidade com um mínimo de recursos; usar os objetos durante períodos mais prolongados; focar na qualidade; optar pela reciclagem; adotar recursos biocompatíveis; priorizar o uso de energia e materiais renováveis; facilitar a manutenção e o conserto de artefatos; projetar objetos facilmente desmontáveis ao final de sua vida útil e dar preferência para criações multifuncionais, modulares e configuradas de modo dinâmico (BENYUS, 1997; VEZZOLI; MANZINI, 2008).

Ainda nesse cenário, o *design for environment* (DFE), também conhecido como *ecodesign*, *sustainable design* e *life cycle design*, integra o ciclo de vida⁷ de produtos ao desenvolvimento sustentável (FIKSEL, 2012; SANTOS et al., 2018; VEZZOLI; MANZINI, 2008). Em outros termos, abrange tanto a gestão do capital produzido pelo ser humano como a gestão do capital natural. Fiksel (2012) realçou que as oportunidades para tal atuação envolvem também aqueles “serviços” que a humanidade acreditava serem abundantes e permanentes:

- Serviços de abastecimento: fornecimento de alimento, energia, água.
- Serviços de regulação: clima, decomposição de nutrientes.
- Serviços de suporte: polinização, purificação da água.
- Serviços culturais: incluindo aprendizagem e inspiração.
- Serviços de preservação: biodiversidade genética e proteção de opções futuras.

Os sinais de desgaste e deterioração de muitos desses setores já estão registrados em pesquisas e estudos em diversos campos do saber. Isso posto, ainda são insuficientes os projetos em

⁷ Conforme esclareceu Fiksel (2012), o termo “ciclo de vida” teve seu uso tão disseminado, que é necessário defini-lo no presente trabalho. O ciclo de vida em negócios é uma sequência de fases que incluem desde a criação do conceito de um produto até seu lançamento, manutenção e substituição por uma nova linha. Reúne também atividades como a engenharia de produção, o projeto do serviço, a manutenção e a retirada de linha dos objetos. Já o ciclo de vida dos produtos abrange a sequência de transformações de materiais e energia desde a matéria prima, passando pelas operações fabris de manufatura, distribuição, uso e eventual reciclagem dos elementos. Ambos esses ciclos se interconectam, e, por muitas vezes, são confundidos. Contudo, a segunda abordagem é a mais relevante tendo em vista a sua evidente relação com a contagem de pegada carbônica, com técnicas de *life cycle assessment* (LCA), com a delimitação de normas e a avaliação de *performance* em design (FIKSEL, 2012; VEZZOLI; MANZINI, 2008).

design que se sustentam nesses valores intangíveis, a despeito do fato de que os consumidores estão transformando suas escolhas em função de necessidades ecológicas inadiáveis. Mesmo sem retorno monetário a curto prazo, cresce o número de empresas que têm se ajustado a essas novas demandas.

Retomando a discussão sobre design inspirado na natureza, é incontornável atentar que muitos projetos de design bioinspirados não se inscrevem necessariamente no biomimetismo e, mesmo práticas propriamente biônicas, biomiméticas e biofílicas não obrigatoriamente transferem benefícios de conservação ambiental e sustentabilidade. Embora demonstrem um notável potencial para fazê-lo, sobretudo pela aproximação sistêmica do projetista, isso não está garantido (CESCHIN; GAZIULUSOY, 2016). Por conseguinte, os designers devem redobrar seus esforços para adequar seus projetos aos fluxos biológicos.

Em complemento ao que foi previamente exposto, é interessante enfatizar que a evolução das mais variadas espécies é um percurso contínuo. Logo, é importante adotar uma visão crítica sobre as “soluções encontradas na natureza” e compreender que não se tratam conformações perfeitas. Ademais, nem todos os elementos naturais são adequados para o contexto humano, já que é evidente que, em certos casos, a evolução aprimora sistemas previamente existentes e que, não necessariamente, são as melhores soluções para um determinado problema. Assim, é pertinente que os designers compartilhem de uma posição proativa ao considerar as configurações encontradas na natureza para que possam selecionar e implementar as analogias biológicas adequadas a seus projetos (ZARI, 2015).

Mesmo assim, a biomimética oportuniza uma reaproximação dos projetistas (e, potencialmente dos usuários) com os fatores naturais, transformando a sua relação com a preservação da natureza, ao passo que esse meio natural é vital como recurso garantidor da sobrevivência das gerações futuras e também configura um repositório de conhecimento que ainda pode trazer muitos benefícios para a humanidade, uma vez que pode inspirar novas descobertas biotecnológicas e novas criações bioinspiradas e biomiméticas.

Sobre a inserção dos saberes naturais e da consciência ecológica na formação de profissionais do design, vale registrar a análise de Cardoso (2012) que resume a discussão conduzida neste capítulo. Segundo esse historiador da arte, é importante fomentar a associação de estímulos inventivos, bem como uma atuação embasada em investigações ecológicas e sociais. Em síntese, é indispensável capacitar designers para atuar em cenários complexos, cultivando sua criatividade para o bem viver da sociedade e a sobrevivência do planeta.

CAPÍTULO 2 - BIOMIMÉTICA E DESIGN: UMA REVISÃO DA LITERATURA

A Terra fala a todos nós ... E se escutarmos, podemos entender

Hayao Miyazaki - O Castelo no Céu

Este capítulo propõe uma revisão da literatura sobre biomimética e design. O levantamento de trabalhos sobre essa temática, difundido em bases internacionais e nacionais, será complementado por uma análise comparativa da produção em ambos os cenários.

2.1 BIOMIMÉTICA E DESIGN: UM LEVANTAMENTO DA PRODUÇÃO INTERNACIONAL E NACIONAL

Preliminarmente, cabe frisar que recursos auxiliares vêm sendo cada vez mais utilizados por estudiosos e pesquisadores para o desenvolvimento de uma revisão da literatura especializada sobre um determinado assunto, ampliando o acesso aos conhecimentos e possibilitando o planejamento fundamentado de trabalhos que buscam oferecer contribuições inovadoras. Ademais uma revisão da literatura orientada por indicadores bibliométricos minimiza equívocos na seleção de documentos (MARIANO; ROCHA, 2017; PERISSÉ; GOMES; NOGUEIRA, 2001).

Dentre as múltiplas ferramentas de revisão sistemática, é possível empregar a ‘Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado’ (TEMAC), que, segundo Mariano e Rocha (2017), orienta-se em leis bibliométricas e abrange três etapas gerais: a) preparação da pesquisa; b) levantamento, apresentação e interconexão de dados; e c) detalhamento, modelo integrador e validação por evidências. Para os autores, esses recursos permitem a comparação em diversos contextos e favorecem a escolha de instrumentos e escalas de mensuração. Tendo em vista tais pressupostos, intencionou-se identificar interfaces da biomimética com o design no âmbito nacional e internacional.

Dado o caráter ainda recente do campo da biomimética, empreendeu-se uma revisão sistemática da literatura para identificar os principais autores, pesquisas e conceitos associados a esse domínio, bem como as suas interfaces com a área projetual, especialmente no que se refere ao design.

O levantamento foi feito nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*, cujos sistemas de busca foram ajustados para estabelecer os parâmetros condutores das consultas realizadas entre 17/03/2021 e 18/03/2021. Em um primeiro momento, iniciou-se a

pesquisa nas bases *Web of Science* e *Scopus* aplicando-se os descritores “*biomimicry*” AND “*design*”. Quanto à base *Google Scholar* – utilizada para exploração de publicações nacionais – foram adotados os termos “*biomimética*” AND “*design*”. O escopo temporal configurado para todas essas buscas correspondeu ao período entre 1990 e 2021. No que tange às bases internacionais, foi implementado um filtro por áreas de conhecimento.

Para obtenção das informações na plataforma *Google Scholar*, foi utilizado o *software Publish or Perish*, que conduz uma apuração consolidada por períodos específicos e palavras-chave extraíndo publicações da base de dados. Destaca-se que o *Google Scholar* não disponibiliza filtros automáticos como divisão por áreas do conhecimento, autores de relevância e instituições mais publicadas, tal como ocorre na *Web of Science* e na *Scopus*. Sendo assim, a extração de tais informações foi realizada manualmente após a obtenção do arquivo gerado pelo *Publish or Perish*. Nesse sentido, é válido esclarecer que os critérios dos levantamentos nessa plataforma excluíram somente livros, sendo que os demais trabalhos não foram obrigatoriamente revisados por pares (ex. documentos, anais de eventos, artigos, capítulos de livros etc.).

Na etapa subsequente, foram estabelecidas inter-relações entre os dados e as informações coletadas nos trabalhos. Em uma terceira etapa, com a descrição e o modelo integrador, foram indicadas as possibilidades de pesquisa, as abordagens e colaborações fundamentais a partir de análises de *citation*, *co-citation*, *coupling*, *co-ocurrence* e *word cloud*.

Vale elucidar que *citation*, equivale à análise da relevância dos autores pela quantidade de citações elencadas na base de dados. *Co-citation*, que neste trabalho abarca o período entre 1990 e 2021, verifica artigos, autores, documentos e periódicos frequentemente citados em conjunto. Diferentemente, o *coupling* estabelece a compreensão de que obras que citam pesquisas similares manifestam associações temáticas e construtivas, que, no presente estudo, compreenderam o período de 2018 a 2021. É comum a implementação de períodos mais longos para *co-citation*, já que evidencia as abordagens mais utilizadas na pesquisa de um determinado tema (panorama abrangente), e intervalos reduzidos para *bibliographic coupling*, que mostra pesquisas em voga (MARIANO, 2021; MARIANO; ROCHA, 2017).

As consultas centradas em palavras-chave correspondem a *co-ocurrence*, que destaca os termos citados em conjunto em resumos e títulos de artigos, mapeando as principais ênfases de pesquisa e suas interconexões. A *word cloud* ilustra um levantamento geral das palavras-chave contidas nos dados extraídos, elencando a frequência de uso de cada vocábulo visualmente por meio da cor, da representação numérica e do tamanho tipográfico (MARIANO, 2021; MARIANO; ROCHA, 2017).

Por conseguinte, para obter a visualização dos dados, foi utilizado o *software VOSViewer*, cujas configurações e parâmetros podem ser ajustados para originar agrupamentos por categorias (*clusters*) que contribuem com a interpretação das informações extraídas, delineando mapas de calor para cada um dos grupos de análise.

Ressalta-se que a base *Google Scholar* e sua combinação com *Publish or Perish* autoriza apenas a exportação de metadados cuja distribuição é inadequada para elaborar visualizações de *coupling* e *co-citation* com o *VOSViewer*. Nesse sentido, foram implementadas outras ferramentas para ilustrar as informações obtidas, como quadros e gráficos do *Microsoft Office Word*. Também foi utilizada a plataforma *TagCrowd* para a obtenção de nuvens de palavras-chave. A partir de tais levantamentos, foi possível obter o núcleo de autorias, referências e linhas de pesquisa essenciais. Com base nessa extração, foram realizadas a leitura e a análise dos trabalhos.

2.1.1 *Web of Science*

A pesquisa nessa base de dados foi iniciada com os descritores “*biomimicry*” AND “*design*”. Já o espaço-tempo estabelecido para o levantamento correspondeu aos anos de 1990 a 2021. Obteve-se 633 resultados gerais, sendo que o primeiro registro nessa plataforma datava de 1995. O artigo de Li et al. (1995) analisou aplicações estruturais de compósitos sintéticos e de fibras naturais de bambu⁸. O material produzido demonstrou comportamento mecânico similar às estruturas resistentes presentes na natureza. Diante disso, foi possível inferir que os resultados das pesquisas pioneiras em biomimética direcionavam-se ao estudo de micromateriais e estruturas em engenharia. Os estudos mais expressivos nas áreas de design e arquitetura ocorreram, em sua maioria, após as contribuições de Janine Benyus, por volta de 1997 em diante.

A etapa seguinte consistiu em implementar um filtro por áreas do conhecimento para especificar as pesquisas coletadas. Desde logo, foram excluídas categorias divergentes como, por exemplo, medicina, odontologia, física e química. Mediante tal recurso, reduziu-se o escopo para 196 trabalhos. Utilizando-se um novo filtro, para delimitar o escopo temporal da pesquisa, foram obtidos 78 resultados correspondentes ao intervalo de 2018 a 2021 para aplicação em *coupling*. Por meio da análise desse material, identificou-se Maibritt Pedersen Zari como a

⁸ O bambu é uma gramínea que possui propriedades de interesse para as áreas do design, arquitetura e engenharia, destacando-se no contexto de projetos sustentáveis. Trata-se de um vegetal caracterizado por sua variabilidade de espécies, rápido crescimento, boa relação custo-benefício, grande resistência mecânica, como também por suas belas texturas e colorações (LIBRELOTTO, FERROLI, 2018; PALOMBINI et al., 2018a; VERSCHLEISSER, 2008).

autora com mais trabalhos publicados ($n = 8$), seguida por Donnison, Faludi, Jones, Niewiarowski e Pauw, que possuíam três contribuições cada um.

Os três países com maior número de publicações foram respectivamente: Estados Unidos ($n = 68$), Reino Unido ($n = 19$) e Turquia ($n = 15$), sendo que o Brasil ocupava a 25ª posição nesse *ranking*, com um total de 2 artigos. Os periódicos com mais publicações sobre os assuntos foram: *Wit Transactions on Ecology and the Environment* ($n = 9$), *Scientific Reports* ($n = 6$), *Architectural Science Review* ($n = 5$) e *Procedia Social and Behavioral Sciences* ($n = 5$).

Dentre as universidades com maior número de publicações sobre design e biomimética estavam: *University of California System* ($n = 8$), *Victoria University of Wellington* ($n = 8$), *University System of Georgia* ($n = 7$), *Delft University of Technology* ($n = 6$) e *University of Akron* ($n = 6$). As áreas de conhecimento com maior número de contribuições foram engenharia; ciência da tecnologia; ciências ambientais; ecologia; e arquitetura, respectivamente. Assinala-se que a base de dados *Web of Science* não apresentou uma categoria específica para filtrar publicações em design, mostrando, portanto, que os trabalhos de interesse – norteadores de pesquisas futuras – ainda se encontram em áreas conexas.

As principais contribuições de artigos que alcançaram 30 ou mais citações, estão expostas no Quadro 1.

Quadro 1 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base *Web of Science*

Título	Autores	Citações	Principais Contribuições do(s) Autor(es)
<i>Biomimetics: lessons from nature - an overview</i>	Bhushan (2009)	691	Evidenciou abordagens biomiméticas em escala microscópica, inspiradas em propriedades morfológicas e físico-químicas para o desenvolvimento de materiais, aparelhos e superfícies. Reuniu um conjunto de elementos naturais inspiradores. Também foram apontadas aplicações em produtos.
<i>Biomimicry in textiles: past, present and potential. An overview</i>	Eadie; Ghosh (2011)	81	Destacaram características da natureza relevantes para o campo de fibras têxteis bioinspiradas, como: diversidade de fibras (resistência, estrutura); superfícies funcionais (aderência, hidrofobicidade); isolamento térmico e sistemas ópticos (cores estruturais e materiais fotônicos).
<i>Microstructured barbs on the North American porcupine quill enable easy tissue penetration and difficult removal</i>	Cho et al. (2012)	69	Retrataram aplicações fundamentadas nas estratégias defensivas da espécie <i>Erethizon dorsatum</i> (estruturas dorsais pontiagudas). As descobertas demonstraram boa adesão e reduziram a força necessária para penetração em tecidos, podendo ser adotadas em produtos hospitalares (ex. agulhas).
<i>Design and fabrication of multi-material structures for bioinspired robots</i>	Cutkosky; Kim (2009)	63	Estudaram processos de prototipagem rápida multimaterial em design de robôs biomiméticos. Foram discutidos usos de estruturas rígidas, flexíveis e sensores em robótica, cujas configurações baseadas na natureza demandam menos controle ativo em comparação com procedimentos tradicionais.
<i>Integrating backcasting and eco-design for the circular economy the BECE framework</i>	Mendoza et al. (2017)	61	Realçaram que aspectos da economia circular podem mitigar impactos na degradação ambiental e apresentaram o <i>framework Backcasting and Eco-Design for the Circular Economy</i> aplicável em design. Investigações alicerçadas em conhecimentos da natureza foram apreciadas (biomimética, <i>cradle to cradle</i> , capitalismo natural, design regenerativo).
<i>Evolution of reaction center mimics to systems capable of generating solar fuel</i>	Sherman et al. (2014)	51	Mapearam reações artificiais baseadas em fotossíntese para produzir combustíveis mediante processos fotoquímicos. Foram destacadas pesquisas de sistemas fotoelétricos capazes de usar a luz para converter água em oxigênio e hidrogênio.
<i>Templates and anchors for antenna-based wall following in cockroaches and robots</i>	Lee et al. (2008)	46	Salientaram que fatores da natureza estimulam inovações em robótica e neuromecânica. Um projeto de antena para o controle de tarefas (como a angulação de robôs em relação às paredes) baseada na capacidade locomotora e de navegação de <i>Periplaneta americana</i> foi ilustrado.
<i>Biomimetic self-cleaning surfaces: synthesis, mechanism and applications</i>	Xu et al. (2016)	43	Focalizaram a capacidade autolimpante de organismos classificando-a em categorias baseadas no uso ou na ausência de água. Foi constatado que materiais inspirados nessas características podem ser aplicáveis em: medicina, construção aeroespacial, produção de energia solar e tratamento de água.
<i>Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation</i>	Zari (2010)	39	Examinou o design regenerativo e biomimético em nível sistêmico para mitigar causas e efeitos das mudanças climáticas. Notou-se a importância de: energias renováveis, sistemas responsivos, adaptação ao contexto local, ciclos de <i>feedback</i> e autonomia. Foram mencionados usos de princípios biomiméticos a curto, médio e longo prazo.
<i>A model based on Biomimicry to enhance ecologically sustainable design</i>	Gamage; Hyde (2012)	35	Aferiram e resumiram aplicações de biomimetismo em projetos de preservação ambiental em design e arquitetura. As seguintes ferramentas foram exploradas: BioTRIZ, análise tipológica, <i>nature studies analysis</i> (NSA) e espirais biomiméticas.
<i>Sticking to the story: outstanding challenges in gecko-inspired adhesives</i>	Niewiarowski et al. (2016)	34	Descreveram as particularidades das estruturas pilosas encontradas em patas de <i>geckos</i> e seu potencial para a criação de adesivos sintéticos dispensando o uso de produtos químicos e colas. Frisaram que a pesquisa em micromateriais biomiméticos possibilita gerar produtos duradouros, autolimpantes, reutilizáveis e de alta resistência.
<i>Ecosystem services analysis for the design of regenerative built environments</i>	Zari (2012)	31	Indicou o uso de aspectos biomiméticos para embasar diretrizes na área de construção tendo em vista a redução da perda de biodiversidade e o estímulo à preservação e restauração ambiental. Evocou a abordagem em nível sistêmico para projetos de design regenerativo.
<i>Biomimicry as a problem-solving methodology in interior architecture</i>	El-Zeiny (2012)	30	Ilustrou a combinação de biomimetismo e design em projetos de interiores. Também descreveu elementos essenciais da biomimética e exibiu <i>cases</i> de criações arquitetônicas e de novas superfícies. As potencialidades e limites de criações biomiméticas foram discutidos.

Fonte: A autora, 2021.

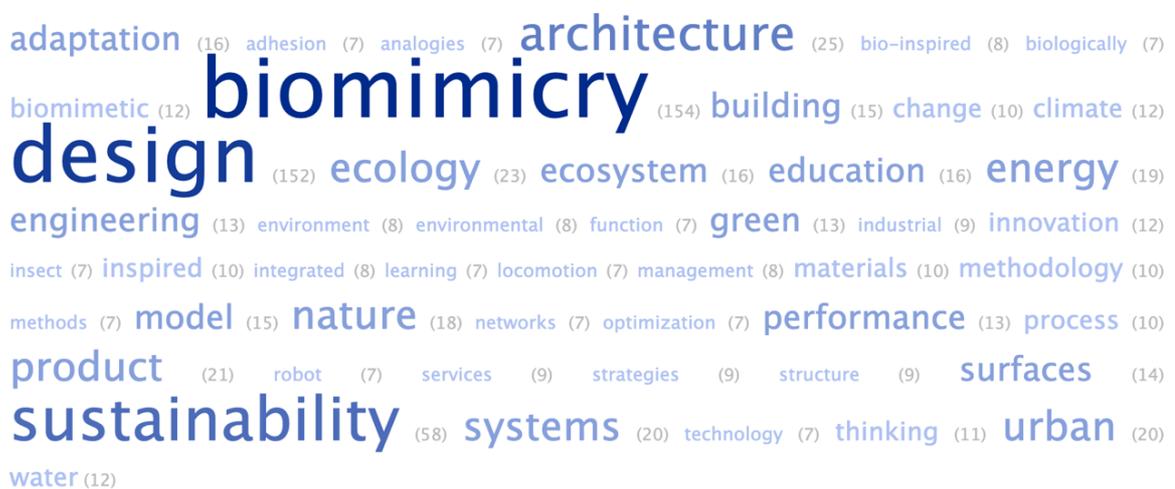
Os trabalhos que contaram com a participação de pesquisadores brasileiros na *Web of Science* focalizaram dois temas principais: as propriedades específicas de artrópodes e a bioprospecção.

Em *Space and Energy: relationships among architects from nature*, Titotto, Oliveira e Ferrante (2015), averiguaram características de vespeiros e cupinzeiros. Os autores exploraram combinações desses elementos naturais com estruturas arquitetônicas, de tal forma a obterem resultados ecológicos e sustentáveis de baixo consumo energético. Também admitiram que a transferência das formas construídas pelos insetos para criações humanas pode aprimorar sistemas de circulação aérea em espaços de convivência.

Por outro enfoque, em *Ecology and Bioprospecting*, Beattie, Hay, Magnusson, Nys, Smeathers e Vincent (2011) conceituaram a bioprospecção como a exploração da biodiversidade e seus respectivos recursos que possuem valor comercial e social. Os benefícios de tal iniciativa equivalem à descoberta de princípios ativos, novos materiais, sequências genéticas, estruturas, materiais e comportamentos, passíveis de oferecer uma vasta base de conhecimentos e criações em design. Dentre seus princípios, estão a preservação ambiental, o manejo sustentável de recursos e o desenvolvimento econômico consciente.

É oportuno mencionar que a próxima etapa do levantamento abrangeu a aplicação de estratégias para visualização de dados visando a formular novas interpretações acerca dos estudos. Para tal, foi composta uma *word cloud* com as palavras-chave das 196 publicações. A Figura 8 expõe as cinquenta palavras de maior frequência organizadas de acordo com a cor e as dimensões tipográficas, indicando as principais linhas de pesquisa (entre 1990 e 2021).

Figura 8 - *Word cloud* com palavras-chave da base *Web of Science*

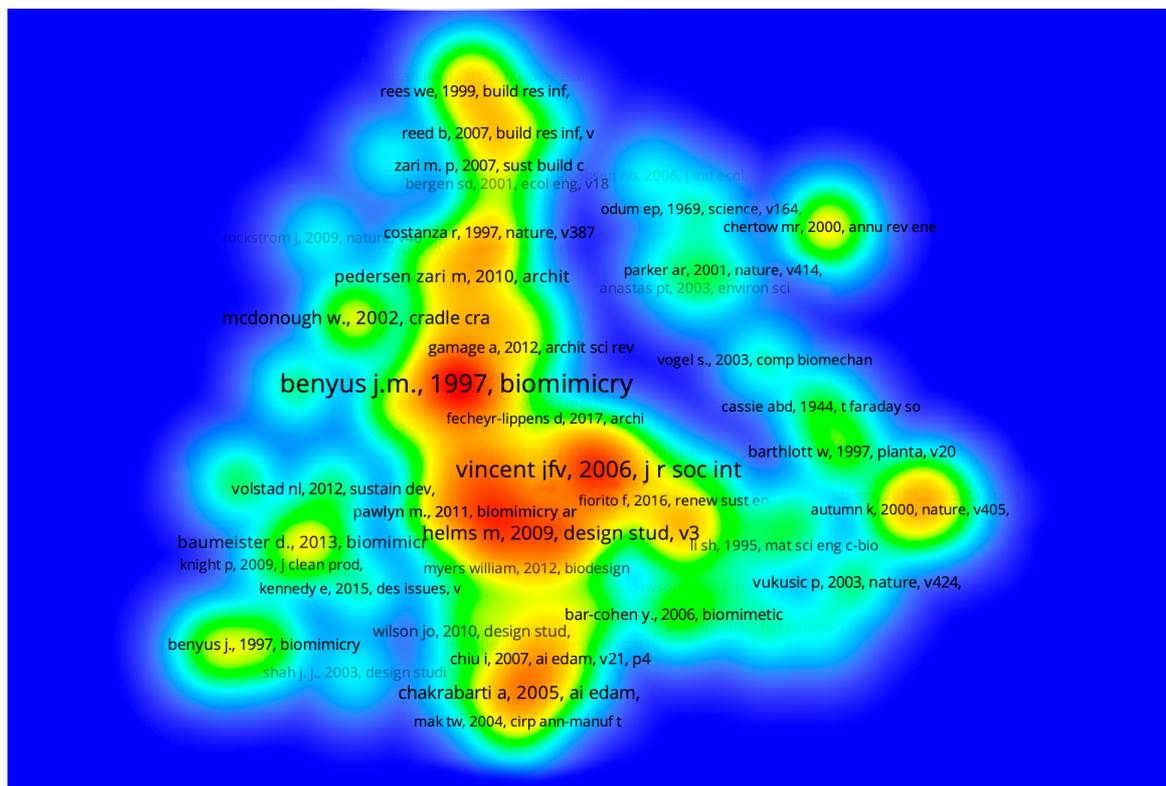


Fonte: A autora, 2021.

Como se pode observar, a sustentabilidade é a principal temática de investigação em biomimética no que se refere aos projetos de design e arquitetura. Sendo assim, as palavras-chave com números mais expressivos de citação foram, respectivamente: “*biomimicry*” ($n = 154$), “*design*” ($n = 152$), “*sustainability*” ($n = 58$), e “*architecture*” ($n = 25$). Observando os termos expostos na figura é possível identificar a importância da abordagem adaptativa em nível sistêmico; isto é, a aplicação de biomimética fundamentada nas complexas inter-relações entre organismos e seu ecossistema, que mesclam prática e ensino em diversas áreas criativas (ZARI, 2017). Tal campo de pesquisa é importante, pois pode proporcionar soluções sustentáveis, uma vez que os projetistas terão uma perspectiva holística de processos, materiais e agentes, examinando as etapas do ciclo de vida dos produtos.

Para conhecer as principais abordagens em projetos biomiméticos direcionados para o design, foi criado um mapa de zonas de calor de *co-citation*, que estabelece a inter-relação entre estudos mais citados, suas contribuições e enfoques teóricos. Assim, artigos e trabalhos coletados nessa análise apresentam semelhanças de abordagens em cada um dos núcleos de concentração, principalmente os que compõem as áreas de coloração vermelha e alaranjada (MARIANO; ROCHA, 2017). Quanto maior o tamanho dos nomes de autores no mapa, mais citações eles possuem. A Figura 9 mostra a divisão em *clusters*, ou principais vertentes de pesquisa.

Figura 9 - Mapa de *co-citation* elaborado com dados da plataforma *Web of Science*



Fonte: A autora, 2021.

O núcleo representado por Benyus (1997) mostrou a maior convergência no mapa de *co-citation*⁹. Isso pode ser entendido pelo fato de constituir uma das principais publicações sobre biomimética, a qual contribuiu para consolidar o tema como guia de projetos e pesquisas. Em sua obra, Benyus conceituou a natureza como agente “modelo, medida e mentor”, capaz de gerar sistemas complexos de alta eficiência e economia, propiciando a descoberta de soluções a partir das transferências de conhecimentos naturais para o contexto humano, principalmente no que diz respeito ao descarte, fluxos de energia, economia de recursos e gerenciamento de problemas.

Vincent et al. (2006) localizam-se em outro núcleo. Em seu artigo, os autores ressaltaram que a biomimética requer ferramentas e processos ordenados. Uma resposta para esse impasse, é o uso da matriz heurística TRIZ, que pode ser adaptada para processos biológicos (BioTRIZ). Com isso, utiliza-se o conhecimento proveniente de sistemas naturais, transferindo-se configurações para conceber inovações em sistemas tecnológicos, principalmente com a inclusão de aspectos energéticos e estruturais.

Nesse mesmo *cluster*, encontra-se a publicação de Helms, Vattam e Goel (2009) acerca das abordagens bioinspiradas que integram sistemas de analogias para desenvolver soluções em engenharia. Este estudo concluiu que os projetistas empregam frequentemente duas abordagens em projetos bioinspirados: uma centrada no problema e outra na solução. Elas diferem entre si posto que a primeira é uma abordagem ‘normativa’ na área e a segunda tende a emergir na prática e em estudos de campo.

Essa obra também alertou quanto aos equívocos comuns em práticas biomiméticas, os quais devem ser evitados ao longo do processo de criação, como por exemplo: definição vaga e demasiado ampla de problemas de projeto; combinação inadequada entre proposta de design e seleção de elemento biológico; uso de analogias naturais superficiais; simplificação inapropriada de funções biológicas complexas; uso de soluções pré-formuladas sem exame do contexto de projeto; e preferência pela primeira solução encontrada, sem análise de outras alternativas tanto para inspiração biológica como para detalhamento de propostas em design (HELMS; VATTAM; GOEL, 2009).

Ainda próximo a esse *cluster* encontra-se a publicação de Pawlyn (2011), que destacou as interconexões entre biomimética e arquitetura, buscando projetos tecnológicos de construções sustentáveis, que também possuíssem um caráter restaurador dos ambientes e

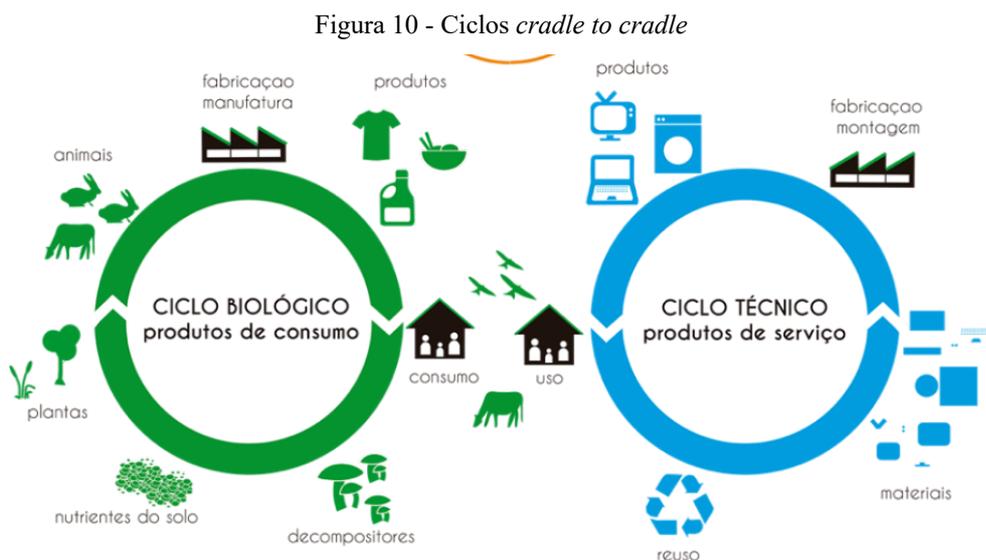
⁹ Vale lembrar que *co-citation* corresponde à frequência com que duas publicações são citadas em conjunto por outros documentos. Assim, quanto maior o número de cocitações de um documento, maior o seu destaque na literatura e mais provável é a sua relação semântica (MARIANO; ROCHA, 2017).

atuação consciente e sistêmica. Por meio de variados exemplos e *cases*, o autor enfatizou a importância da eficiência estrutural, do uso consciente de recursos, da compreensão dos processos de fabricação, da análise e implantação de sistemas lixo-zero, da geração de energia e da economia de água.

Na porção inferior central do mapa, situam-se Chakrabarti et al. (2005), cujo artigo concluiu que os sistemas naturais têm sido insuficientemente adotados como fonte de inspiração para projetos; ao contrário dos sistemas artificiais. Uma vez que as analogias expressam poderosos meios para gerar inovações, a biomimética é um caminho significativo a ser trilhado, principalmente no desenvolvimento de produtos.

Além dessas importantes contribuições, vale mencionar alguns outros trabalhos, como o aporte fundamental do manual *Biomimicry Resource Handbook*, de Baumeister et al. (2014), no qual foram agrupadas as principais etapas de aplicação de métodos e ferramentas biomiméticas para conduzir projetos criativos.

Outra obra que complementa muito adequadamente a área do biomimetismo corresponde à publicação *Cradle to Cradle* de Braungart e McDonough (2010), situada à esquerda no mapa. Os autores sublinharam a integração do design e da ciência para favorecer benefícios sociais duradouros. Nessa obra, defenderam o uso de materiais seguros, água e energia vinculados à economia circular, de forma a eliminar o conceito de lixo e descarte. A Figura 10 exhibe os ciclos propostos por esses autores.

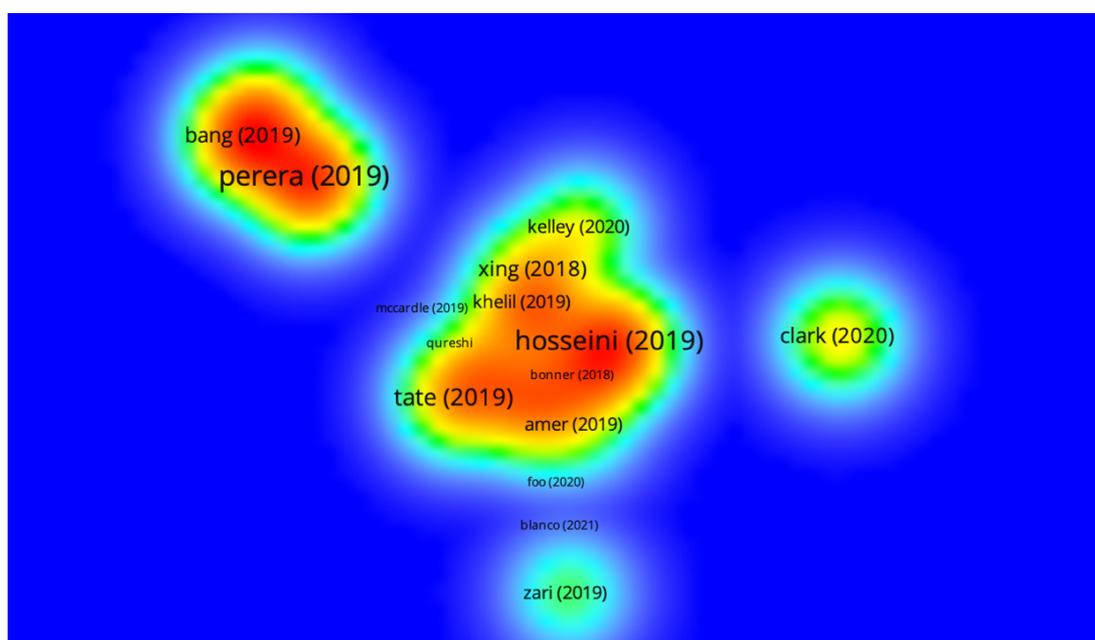


Fonte: *Flock Circular* (www.flockcircular.com.br/cradle-to-cradle/), acesso em 2021.

Convém comentar que o título desse trabalho remete à expressão “do berço ao berço” e propõe a reinvenção do ciclo de vida dos produtos e processos. Braungart e McDonough (2010) demonstraram que o design pode ser reconfigurado como uma atuação de impacto positivo, uma força regenerativa que melhore a qualidade de vida, conferindo valores significativos às inovações.

A Figura 11 ilustra a análise de *coupling*¹⁰ e as “frentes” de pesquisa de maior relevância no período de 2018 a 2021.

Figura 11 - Mapa de *coupling* gerado a partir de dados da plataforma *Web of Science*



Fonte: A autora, 2021.

A área de coloração rubra, no centro do mapa, agrupa os trabalhos de Hosseini et al. (2019); Tate et al. (2019), Xing et al. (2018) e Amer (2019).

O artigo de Hosseini et al. (2019) alcançou a segunda maior área de concentração. Essa publicação reuniu uma revisão da literatura sobre fachadas arquitetônicas cinéticas que atuam como uma interface complexa permeável entre os ambientes internos e externos. Os autores exploraram a capacidade desses elementos para funcionar como uma camada protetora responsiva às variações climáticas. Foram investigadas interfaces com conhecimentos naturais, mais especificamente com propostas para promover eficiência energética, conforto térmico e visual considerando fatores do

¹⁰ O “*bibliographic coupling*” admite que quando dois documentos citam uma mesma terceira publicação (ou mais) é um indicador de que esses trabalhos possuem semelhanças no que tange sua abordagem temática. Essa é uma análise empregada no TEMAC para obter um panorama da produção recente sobre uma determinada área de pesquisa (MARIANO; ROCHA, 2017).

microclima. Foi proposto um processo de projeto para orientar o desenvolvimento de fachadas cinéticas a partir de uma abordagem morfológica e interdisciplinar. Cabe ressaltar que, dentre os critérios estabelecidos estavam características originárias do biomimetismo combinadas com tecnologias paramétricas e de eficiência energética.

Tate et al. (2019) estudaram a interação entre a biomimética e a economia circular a partir de analogias atinentes ao ecossistema. Tendo isso em vista, foram considerados os fluxos de energia e matéria, primordialmente fundamentados em reciclagem e reaproveitamento entre os variados níveis tróficos. Na opinião dos autores a inserção de conhecimentos biomiméticos em novas abordagens econômicas e empresariais pode propiciar inovações na esfera organizacional do meio de negócios. Um exemplo disso está na inspiração em relações de mutualismo encontradas na natureza, como as micorrizas, referência escolhida para o trabalho de Tate et al. (2019). A publicação contribuiu para evidenciar a biomimética como uma área que pode contribuir com os planos estratégico, administrativo e organizacional das empresas.

Xing et al. (2018) combinaram o estudo de plantas, mais especificamente de células vegetais, ao desenvolvimento de fachadas e tecnologias para revestimentos de construções, resultando em uma proposta conceitual de biodomo. Segundo os autores, o resultado dessa mescla poderia alavancar melhorias no isolamento térmico e na eficiência energética. Assim, em sua pesquisa, Xing et al. (2018) priorizaram o estudo de analogias baseadas em plantas para gerar propostas arquitetônicas – principalmente por seu caráter sésil, que faz com que os vegetais tenham de se adaptar às condições circundantes mesmo estando fixos em um local, que é uma característica também partilhada por construções. Foi gerado um *framework* para o processo de criação de projetos biomiméticos.

Amer (2019) incorporou noções biomiméticas em uma disciplina universitária para o ensino de arquitetura. Para a autora, a bioinspiração pode promover soluções diferenciadas e sustentáveis. Constatou-se que os estudantes perceberam a importância da responsabilidade contida na atuação profissional em arquitetura e urbanismo no que concerne a preservação da saúde das comunidades humanas e das demais espécies. Evitar configurações que ocasionem a síndrome do edifício doente, projetar para a adaptabilidade e integrar eficiência energética, são pontos-chave para uma boa prática nessa área. Na disciplina ministrada, foram abordados os seguintes tópicos: inter-relações entre biomimética e arquitetura; metodologia de projeto; gestão da iluminação natural; fachadas inspiradas em plantas; sistemas solares macroscópicos (naturais e tecnológicos), além de atividades de pesquisa, desenho, prototipagem digital

paramétrica (com *softwares Rhino e Grasshopper*) e a matriz de geração de conceito de design biomimético (*design concept generation*).

Além do *front* de pesquisa centrado em projetos de arquitetura e design exemplificado pela publicação de Hosseini, et al. (2019), à esquerda no diagrama, encontram-se outros trabalhos importantes como a publicação de Perera e Coppens (2018). Os autores investigaram conceitos de novos materiais bioinspirados pela ótica da engenharia química. Foram apresentados materiais alicerçados na estrutura da madrepérola; em adesivos fortes e reutilizáveis que mimetizam patas de *geckos*; e superfícies antibacterianas baseadas em pele de tubarão. Perera e Coppens (2018) salientaram que buscar inspirações em padrões e microestruturas naturais pode oportunizar um processo de reinvenção de materiais e processos, dos quais resultarão criações que, mesmo sem se assemelharem diretamente ao organismo mimetizado, ainda assim possuem um vínculo inerente com a natureza em suas propriedades e funcionalidades.

Ainda na Figura 11, existem dois outros núcleos, compostos por Clark (2020) e Zari (2019) que trataram, respectivamente, de: a) importância de pesquisas sobre biomineralização marinha para processos de acompanhamento e previsão de impactos das mudanças climáticas e para a criação de novos biocompósitos; b) avaliação de como o meio urbano pode gerar serviços ecossistêmicos e proporcionar regeneração da biodiversidade. Ponderou-se que, tais serviços, fortemente associados à presença de florestas e espaços verdes urbanos, criam ambientes mais saudáveis para a convivência humana e aumentam a resiliência dessas áreas frente às mudanças climáticas.

Um exame global dessa figura permite perceber que, de modo geral, as pesquisas mais recentes e proeminentes na área da biomimética envolvem os seguintes aspectos: aplicações arquitetônicas, economia circular, enfoque de projeto apoiado em interações de ecossistemas, microestruturas e desenvolvimento de novos materiais.

Após a conclusão de *co-citation*, *coupling* e *word cloud*, efetuou-se outra análise com base nos títulos e resumos. A Figura 12 expõe o diagrama de *co-ocurrence* que exhibe as interconexões entre elementos.

temas vinculados à exploração de metodologias, ferramentas e processos em design para gerar novas criações bioinspiradas, inclusive no âmbito do ensino.

Em resumo, o levantamento da produção sobre biomimética e design, na *Web of Science*, se caracteriza pelo desenvolvimento de práticas sustentáveis, que estimulam a gestão eficiente de recursos e a preservação da biodiversidade, além de serem aplicáveis em projetos criativos relacionando abordagens sistêmicas.

2.1.2 *Scopus*

A pesquisa na base *Scopus*, resultou na extração de 761 artigos. Ao examinar as publicações, identificou-se o primeiro trabalho sobre o tema datado de 1994. Nele, Turner (1994) discorreu sobre o potencial de biossensores em desenvolvimentos tecnológicos como: eletrodos metalizados, biossensores piezoelétricos, termístores de enzimas, biossensores de fase orgânica e biossensores baseados em tecidos. No artigo, a biomimética é mencionada brevemente como um dos possíveis usos desses biossensores, pois o autor apontou a união crescente entre a biologia e a engenharia na criação de tecnologias desse gênero. Depreendeu-se, que, antes de 1997, as investigações sobre o assunto eram voltadas para abordagens microscópicas e estruturais.

Posteriormente, foi utilizado um filtro por áreas do conhecimento, que restringiu a pesquisa pela adição dos seguintes critérios temáticos: arte, arquitetura, ecologia, pesquisa científica, engenharias, ciências sociais, ambientais e multidisciplinares. Devido às opções disponíveis na base *Scopus*, o processo de delimitação por filtros não buscou eliminar categorias, contrariamente ao procedimento feito na *Web of Science*, na qual foram deliberadamente excluídas categorias divergentes como medicina, odontologia, física e química.

Assim, a quantidade de estudos decresceu para 235 resultados, utilizados para as análises de *citation* e *co-citation*. Em seguida, foram extraídos os dados das publicações do período de 2018 a 2021, totalizando-se 78 trabalhos para a análise de *coupling*. Todas as informações dessa base foram salvas no formato *comma-separated values* (CSV) para serem inseridas na visualização em mapas de calor e de linhas.

Tal como na base *Web of Science*, a autora de maior frequência de publicação foi Maibritt Pedersen Zari ($n = 9$); seguida por Nagel ($n = 6$); Eggermont, Fiorentino, Rose, Shelley, Shyam e Vincent ($n = 3$). Quanto aos países com maior número de publicações, identificaram-se Estados Unidos ($n = 106$), Reino Unido ($n = 24$) e Canadá ($n = 12$), sendo que o Brasil ocupou a 15ª posição, com três artigos.

Investigaram-se os periódicos com maior taxa de trabalhos sobre biomimética e design, sendo que as três revistas de maior ocorrência foram: *Wit Transactions on Ecology and the Environment* ($n = 9$), *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics* ($n = 7$) e *Architectural Science Review* ($n = 4$). As universidades com predominância na publicação sobre o tema foram: *Victoria University of Wellington* ($n = 10$), *Arizona State University* ($n = 7$), *James Madison University* ($n = 7$) e *Georgia Institute of Technology* ($n = 6$).

No que se refere às áreas de conhecimento com preponderância em publicações na base *Scopus*, destacaram-se engenharia, ciências ambientais e ciências sociais. De forma semelhante à base *Web of Science*, a *Scopus* não indicou a área específica de design. Uma vez mais, verificou-se a dispersão dos artigos em áreas correlatas.

O Quadro 2 apresenta os trabalhos com 30 citações ou mais.

Quadro 2 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base *Scopus*

Título	Autores	Citações	Principais Contribuições do(s) Autor(es)
<i>Biomimicry for optimization, control, and automation</i>	Passino (2005)	238	Descreveu as contribuições da biomimética no desenvolvimento de algoritmos e na otimização de processos de automação. Esse tipo de aplicação pode viabilizar projetos de sistemas complexos no âmbito do desenvolvimento de critérios de controle e de tomada de decisões.
<i>The form and function of spider orb webs. Evolution from silk to ecosystems</i>	Blackledge et al. (2011)	104	Empreenderam uma revisão sobre formas e funções das teias de aranha. Resgataram aspectos morfológicos, expressões matemáticas estruturais e especificidades do animal. Sugeriram a inspiração nesses organismos para a criação de adesivos, sensores, materiais resistentes e estruturas leves para construção.
<i>Mapping the biosphere: exploring species to understand the origin, organization and sustainability of biodiversity</i>	Wheeler et al. (2012)	99	Formularam uma proposição de base de dados para mapear a biodiversidade e integrar conhecimentos biológicos em modalidade <i>open access</i> . Apresentaram recomendações para o desenvolvimento do projeto, que poderá impulsionar pesquisas científicas e criações inovadoras em design.
<i>Structure, function, and neural control of pectoral fins in fishes</i>	Westneat; Thorsen; Walker; Hale (2004)	70	Condensaram informações sobre a conformação anatômica, óssea, muscular e neural de peixes. Os resultados destacados podem ser futuramente inseridos em projetos de veículos aquáticos autônomos para locomoção em zonas submersas.
<i>Biomimetic design [...]</i>	Zari (2010)	47	Previamente apresentadas no Quadro 1.
<i>A model based on biomimicry [...]</i>	Gamage; Hyde (2012)	40	Previamente apresentadas no Quadro 1.
<i>Batoid fishes: inspiration for the next generation of underwater robots</i>	Moored; Fish; Kemp (2011)	38	Comprovaram o potencial de peixes batóides para inferências biomiméticas no design de veículos submarinos. Foram analisadas: performance de navegação, movimentos ondulatórios e propulsão. Configurações de nadadeiras artificiais que mesclam estruturas em <i>tensegrity</i> e polímeros eletroativos foram apuradas.
<i>Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation</i>	Aziz; El Sherif (2016)	34	Frisaram a relevância da integração de projetos biomiméticos, arquitetônicos e de design com novas tecnologias e sistemas computacionais. Corroboraram que o uso de <i>softwares</i> CAD facilita o desenvolvimento de formas complexas, inerentes à emulação da natureza. Foram repertoriadas aplicabilidades estruturais de biomimética (ex. superfícies mínimas e geometrias complexas).
<i>Architecture follows nature: Biomimetic principles for innovative design</i>	Mazzoleni (2013)	30	Investigaram interfaces da biomimética com a esfera arquitetônica ao apresentar criações que incluíram analogias naturais, principalmente provenientes de animais. As características adaptativas e evolutivas dos organismos e o estudo da própria pele humana foram transpostos para o cenário de produção de fachadas para edificações.
<i>Ecosystem services [...]</i>	Zari (2012)	30	Previamente apresentadas no Quadro 1.

Fonte: A autora, 2021.

Os artigos formulados com a contribuição de pesquisadores brasileiros que estavam inseridos na base *Scopus* abordaram, principalmente, os seguintes assuntos: uso de teorias biomiméticas como recurso para a educação, investigações sobre a biodiversidade e a bioprospecção.

No artigo *Biomimicry Applied in Engineering Education: a case study in PUC-SP*, Raggi, Munhoz e Noriega (2018) analisaram produções resultantes do curso “biomimética: inovação inspirada pela natureza”. Nessa iniciativa, foram utilizados procedimentos baseados tanto na biomimética, como no CDIO (*conceive, design, implement and operate*). A programação do *workshop*, organizado naquela ocasião, reuniu tanto uma sessão de apresentação teórica como uma maratona de prototipagem. Os autores admitem que o fator limitante da atividade consistiu, principalmente, na curta duração destinada ao desenvolvimento dos projetos, uma vez que o curso ocorreu em apenas em cinco dias. Apesar disso, a combinação entre as ferramentas e princípios engendrou propostas de produtos inovadores, formulados em cenários transdisciplinares. Essas criações foram elaboradas com *softwares* como AutoCAD, *SolidWorks* e Arduino.

A segunda publicação contou com a contribuição de um brasileiro (M. R. de Carvalho) dentre os autores de múltiplas nacionalidades que colaboraram no projeto *Mapping the Biosphere* (2012). O artigo expôs a proposta de uma base de dados para mapear a biodiversidade. Ademais, seria possível integrar diversos conhecimentos biológicos às diferentes áreas de produção humana, tendo em vista que a plataforma seria *open access*. Foram enumeradas recomendações para concretizar o projeto, que poderá impulsionar pesquisas científicas e áreas como o design e a arquitetura (WHEELER et al., 2012).

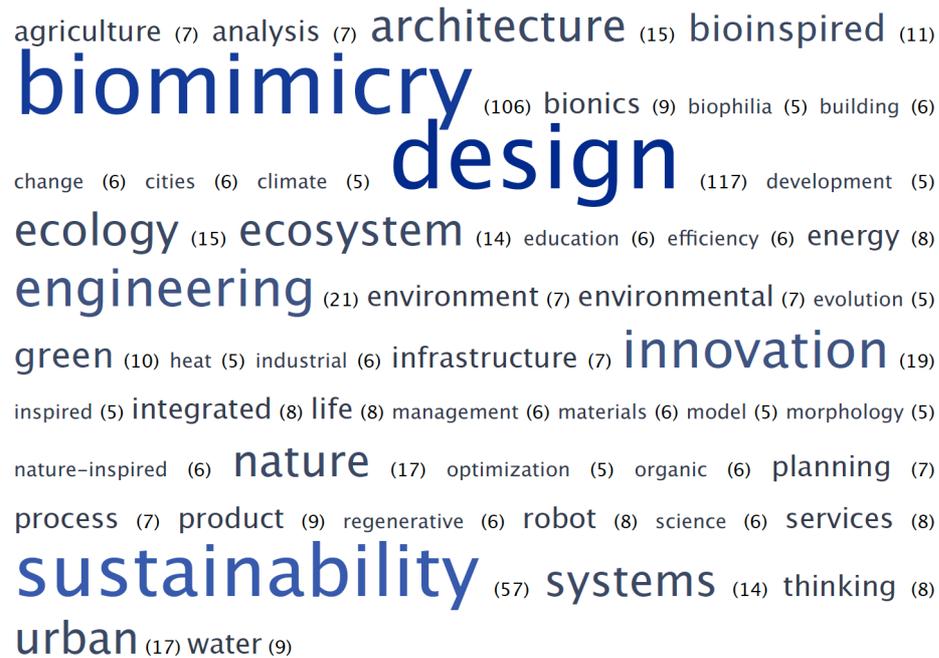
O terceiro estudo presente na plataforma *Scopus* é o mesmo trabalho que foi captado na base *Web of Science*, descrito anteriormente. *Ecology and Bioprospecting* destacou os benefícios da bioprospecção, que podem ser aplicados em áreas criativas como catalisadores de inovações. Os projetos configurados a partir das perspectivas inseridas nesse âmbito integram princípios éticos que esclarecem a importância da preservação ambiental e do consumo consciente (BEATTIE et al., 2011).

O mesmo artigo ainda exemplificou como o uso de recursos provenientes de organismos marinhos, de vegetais, artrópodes e anfíbios suscita descobertas na área farmacêutica e na engenharia de materiais e superfícies. Outras áreas de investigação corresponderam à concepção de adesivos, superfícies de coloração estrutural, crioprotetores e biomineralização. É interessante assinalar que o trabalho apresentou políticas de bioprospecção no Brasil, implantadas em 2004 pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade. Outra questão abordada focalizou desafios emergentes no gerenciamento de dados somados aos conflitos provocados pela falta de uma

estrutura institucional governamental que conduza e medeie os procedimentos entre os *stakeholders* envolvidos nos processos de bioprospecção (BEATTIE et al., 2011).

A Figura 13, formulada na plataforma *TagCrowd*, aponta as cinquenta palavras de maior ocorrência, destacadas segundo coloração e dimensões tipográficas.

Figura 13 - *Word cloud* da base *Scopus*

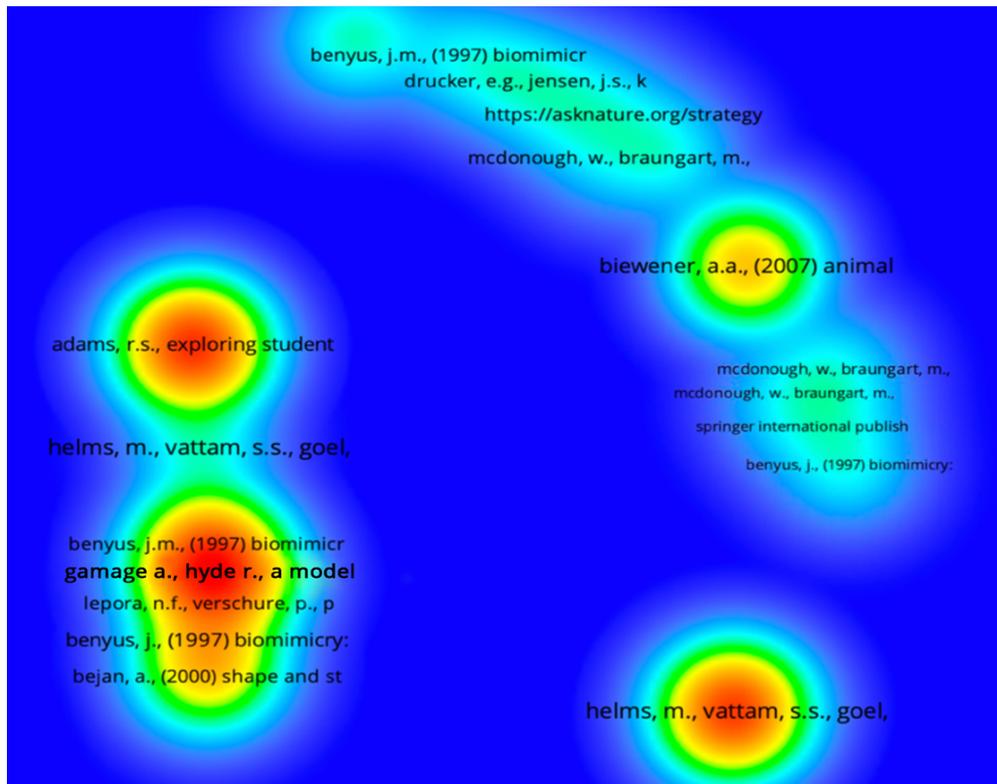


Fonte: A autora, 2021.

A ilustração indica a predominância dos termos “design” ($n = 117$), “*biomimicry*” ($n = 106$), “*sustainability*” ($n = 57$), “*engineering*” ($n = 21$), “*innovation*” ($n = 19$), “*nature*” ($n = 17$), “*urban*” ($n = 17$) e “*architecture*” ($n = 15$). Infere-se, pela observação da figura, que predomina a atuação em design biomimético direcionada para a ecologia e a conservação ambiental. Verificaram-se também interfaces com arquitetura, urbanismo e engenharia no âmbito de elaboração de produtos, serviços e sistemas bioinspirados e direcionados para propostas regenerativas.

De maneira semelhante aos procedimentos estabelecidos para *Web of Science*, foi construído um mapa de *co-citation*. Nesse diagrama há quatro grupos em realce (áreas avermelhadas e alaranjadas), tal como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Mapa de *co-citation* elaborado com dados da plataforma *Scopus*



Fonte: A autora, 2021.

O primeiro núcleo de destaque, situado à esquerda, é composto pelo trabalho exploratório de Adams et al. (2009). Nele, o autor averiguou a habilidade de estudantes para construir soluções interdisciplinares em circunstâncias hipotéticas de desastres naturais e sociais, como terremotos, tornados e maremotos. Acredita-se que essa aproximação possa ser adotada como um recurso de pesquisa e ensino, reunindo a investigação de organismos e processos naturais orientada para atividades benéficas para a sociedade.

Já o *cluster* de maior concentração da figura, está localizado na porção inferior esquerda. Neste conjunto, vale mencionar o trabalho de Gamage e Hyde (2012). Esse estudo reforçou a convicção da necessidade de um olhar ecológico que perpassasse os processos criativos. Os autores salientaram o potencial do design como percurso sistemático de solução de problemas, baseado no estudo da natureza. O artigo exemplificou a discussão com algumas aplicações em arquitetura e projetos construtivos. As abordagens diretas e indiretas da biomimética foram comentadas, bem como os modelos de transferência de conhecimentos naturais para projetos. Nesse enquadramento, foram mencionadas ferramentas como: BioTRIZ, Espirais Biomiméticas, Análise Tipológica e Análise do Estudo da Natureza. Por fim, os autores propuseram um modelo teórico biomimético que auxilia na identificação de estratégias para a integração funcional e para adaptações ambientais de sistemas naturais.

Tal como esperado, a obra de Benyus (1997) encontra-se em posição de destaque no *cluster* de maior concentração. Essa publicação apresenta a área da biomimética por meio de vários eixos de discussão, desde práticas de cultivo de alimentos, passando pela produção de materiais, pela a gestão e compartilhamento de conhecimento, até elaborar especulações sobre um futuro bioinspirado em que o ser humano poderá viver em maior harmonia com a natureza.

Bejan (2000) localiza-se na mesma área de concentração da autora anterior. Ele considerou que a biomimética otimiza sistemas em engenharia, principalmente no que concerne o estudo de formas geométricas, estruturas e sistemas de fluxos naturais.

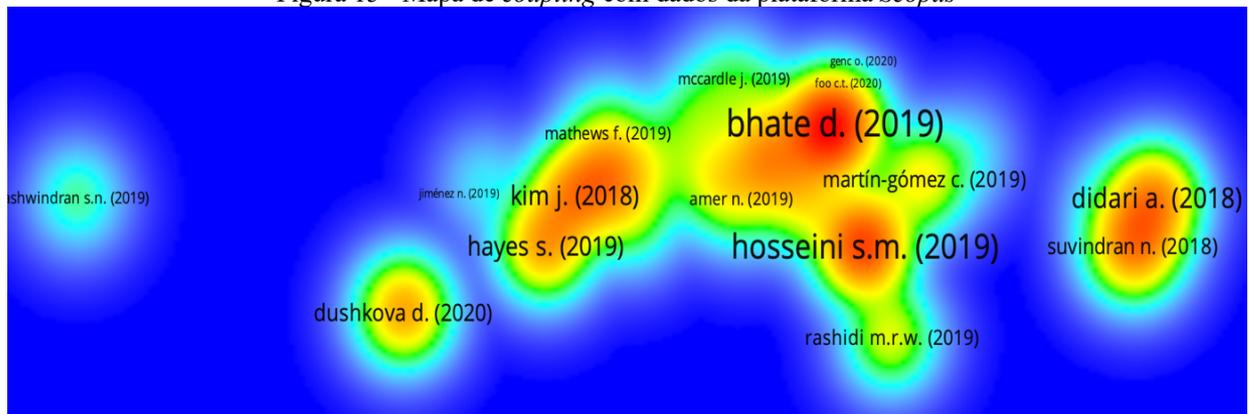
O artigo de Lepora, Prescott e Verschure (2013) englobou reflexões sobre o estado da arte em biomimética (*biomimetics*). Revelou comparações entre os principais periódicos da área e as principais conferências sobre o assunto. Ademais, enfatizou a tendência de crescimento de pesquisas nesse campo e reuniu palavras-chave e mapas de coocorrência que ilustram os principais campos de investigação.

À direita do mapa, está a publicação de Helms, Vattam e Goel (2009) intitulada “*Biologically inspired design: process and products*” que foi previamente mencionada na seção 2.1.1 *Web of Science*. Convém retomar que esse artigo contribuiu para o desenvolvimento de conhecimentos sobre as abordagens de projetos biomiméticos e os potenciais desafios que precisam ser considerados e superados ao desenvolver criações nessa área.

Por fim, vale apontar o trabalho de Biewener e Patek (2007), que está em um núcleo menor, próximo à porção superior direita da figura. Nesta obra, os autores examinaram a locomoção de animais, à luz de sistemas biomecânicos e fisiológicos. Esta publicação pode contribuir no desenvolvimento de objetos bioinspirados, principalmente nas áreas de robótica e de transportes.

Posteriormente, foi realizado um levantamento de *coupling* (2018 a 2021), conforme ilustrado pela Figura 15.

Figura 15 - Mapa de *coupling* com dados da plataforma *Scopus*



Fonte: A autora, 2021.

O foco de maior distinção no mapa de calor é a publicação de Bhate et al. (2019), na qual os autores debateram a relevância da biomimética na pesquisa e desenvolvimento no campo de materiais celulares (*cellular materials*). Bhate et al. (2019) buscaram realizar uma revisão de procedimentos tradicionais de projeto no âmbito da seleção de materiais celulares, os quais foram posteriormente classificados em três categorias de design (mosaico/*tesselation*, conectividade e tipo de elemento). Foi demonstrado, com base em exemplos visuais, que o estabelecimento de analogias com elementos naturais pode contribuir em todas as categorias supracitadas. Os autores implementaram a aproximação biomimética a partir do uso das ferramentas do *Biomimicry Thinking* (Biomimicry 3.8) e de buscas na plataforma *Ask Nature* e em outras fontes de literatura científica.

A publicação de Hosseini et al. (2019) alcança a segunda maior área de concentração. Conforme discutido anteriormente na seção 2.1.1 da *Web of Science*, esse artigo concentrou-se no estudo de fachadas arquitetônicas cinéticas responsivas a estímulos internos e externos. Esses artefatos podem contribuir para uma melhor adaptação das construções à variabilidade de condições climáticas além de aprimorar a percepção de conforto térmico.

O *cluster* posicionado à esquerda comporta as publicações de Kim e Park (2018) e Hayes et al. (2019). Os primeiros autores exploraram o design de construções inspiradas na natureza. Para tanto, realizaram um estudo da relação entre natureza e cultura envolvendo conhecimentos de teorias da composição da paisagem, de práticas em ilustração, incluindo também características das construções tradicionais coreanas. Kim e Park (2018) igualmente abordaram as certificações ambientais para a arquitetura sustentável. Mais adiante, foram exploradas características de formas e estruturas naturais que forneceram inspiração para construções, a saber: seção hexagonal; teias de aranhas; disposição de elementos em flores; estruturas curvas de conchas; sistemas de tensegridade baseados em configurações musculoesqueléticas. Esses autores ainda mencionaram exemplos de arquitetura moderna bioinspirada, como as criações de Toyo Ito, Wolf Hilbertz e Mick Pearce.

Hayes et al. (2019) adotaram teorias socioecológicas e de resiliência para orientar a construção de infraestruturas no setor de transportes, principalmente tendo em vista as consequências da aceleração das mudanças climáticas. Os autores consideraram que é importante reconhecer a necessidade de integrar recursos adaptativos que possam ser incorporados ao longo da vida útil de um projeto de infraestruturas e transportes, focando em multifuncionalidade, complexidade, regeneração e resiliência. Para Hayes et al. (2019), a biomimética pode ser um caminho para solucionar esses desafios dada a sua capacidade para

gerar propostas mais resilientes e adaptadas a cada contexto. Nessa publicação foram citados alguns processos e ferramentas para desenvolver criações nessa área, como as abordagens de projeto “Desafio do Design para a Biologia” e “Biologia para o Design” além do Diagrama de Princípios da Vida. Os autores também frisaram a pertinência de incluir métricas para acompanhamento da performance ecológica.

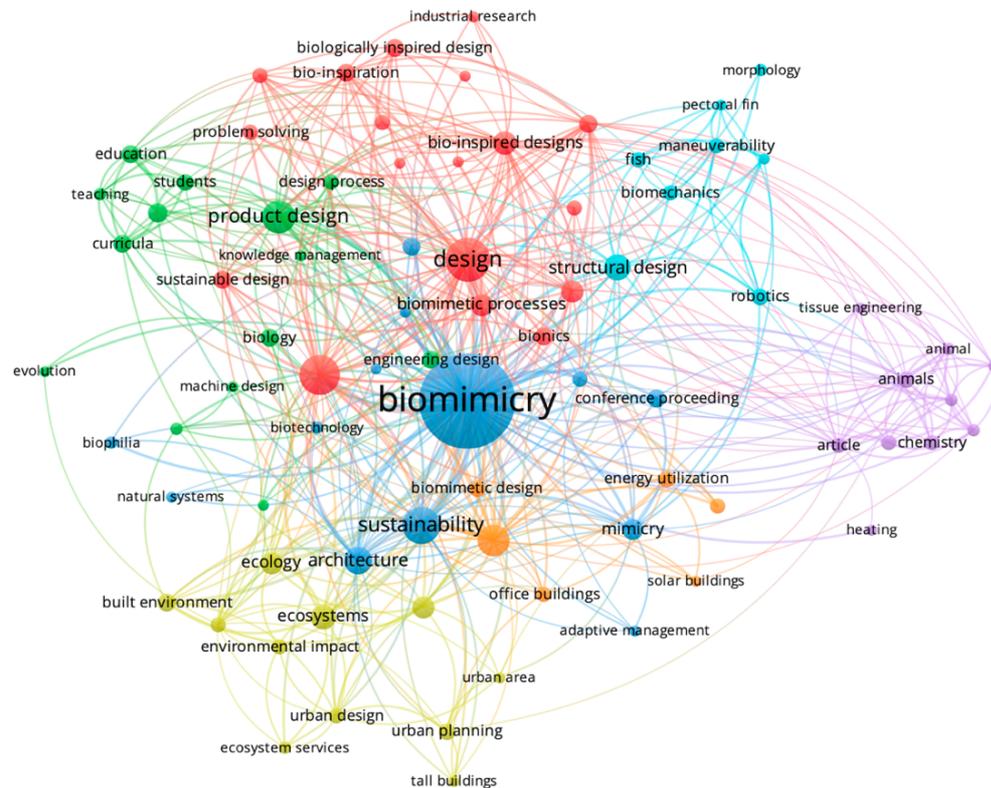
Didari e Mengüç (2018) integram um núcleo que orbita em torno de pesquisas sobre micro e nanoestruturas naturais. Seu estudo tratou de projetos de nanomateriais biomiméticos que proporcionam resfriamento radiativo (resfriamento radiante ou *radiative cooling*) inspirados em borboletas *Morpho didius*. Na natureza, as colorações de insetos são vibrantes e não desbotam. De fato, essas cores são originadas por nanoestruturas de diferentes formatos, que refratam a luz resultando em tonalidades específicas. Tal conformação possibilitou, no caso das borboletas, um aprimoramento em termos de sistema de comunicação e da produção de feromônios associados à regulação de temperaturas.

Dushkova (2020) investigou como soluções baseadas na natureza podem viabilizar o aperfeiçoamento em políticas e práticas de planejamento urbano, incluindo abordagens de serviços ecossistêmicos e aproximações sociais para formular propostas mais sustentáveis e que promovam o bem-estar. O artigo retratou estudos de caso de infraestruturas urbanas situadas na cidade de Leipzig relacionadas a soluções baseadas na natureza. Esse estudo considerou fatores de: preservação, melhorias no ambiente convivial, restauração do ecossistema, regeneração de áreas urbanas negligenciadas, cocriação, acessibilidade e promoção de saúde no projeto de espaços verdes urbanos multifuncionais. Vale destacar que apenas os projetos verdes situados em locais apropriados e de fácil acesso demonstraram efeitos positivos a longo prazo.

Em síntese, o levantamento feito na base *Scopus* permitiu elencar as principais áreas das pesquisas recentes em biomimética e design: sistemas de prototipagem e modelagem digital CAD; arquitetura biomimética e bioinspirada; fachadas cinéticas/adaptativas; configurações complexas; pesquisas em materiais (micro e nanoestruturas naturais e materiais celulares); percepção humana no espaço; e resiliência em infraestruturas de mobilidade e transporte.

Em consonância com o exposto, construiu-se um mapa (Figura 16) para ilustrar as interconexões entre os termos de maior frequência, tendo como base os títulos e *abstracts*.

Figura 16 - Mapa de coocorrência com dados da plataforma *Scopus*



Fonte: A autora, 2021.

De forma equivalente à base *Web of Science*, as palavras de maior iteração foram: “*biomimicry*”, “*design*”, “*sustainability*”. Nesse mapa, destacaram-se áreas como design de produto, arquitetura, design estrutural e o estudo de ecossistemas. Dessa maneira, constata-se similaridades entre esses resultados e aqueles obtidos na *word cloud*.

Quanto aos *clusters* e sua respectiva setorização em cores, é preciso mencionar que conjunto em vermelho está voltado para a solução de problemas no âmbito do design bioinspirado. O grupo em verde mostra a área de design de produto e os processos de educação e formação em design juntamente com o estudo de elementos da biologia. Nos grupos de coloração azul e roxa, é possível observar uma maior proximidade a temas como o mimetismo, a sustentabilidade e investigações morfológicas e estruturais de organismos. No agrupamento em laranja, há termos direcionados para projetos que envolvem o estudo do espaço, do uso de energias renováveis e de economia de recursos em construções. As palavras em amarelo, relacionadas à esfera urbana, também evidenciam a área da ecologia e da abrangência e do estudo de serviços ecossistêmicos.

2.1.3 *Google Scholar*

A busca na base *Google Scholar* teve por objetivo a realização de um levantamento da produção nacional sobre biomimética e design. Os dados foram extraídos com o uso do *software Publish or Perish*, resultando em um total de 774 publicações. Cumpre reforçar que as duas bases de busca já analisadas registravam publicações anteriores a 1997. Dessa maneira, os trabalhos enfatizavam o uso da biomimética essencialmente nas engenharias e na ciência dos materiais.

Diferentemente, na plataforma *Google Scholar*, o primeiro trabalho identificado foi de 2005. Notou-se, nesse documento, uma proximidade direta ao domínio criativo, porquanto sua publicação foi feita após a difusão das perspectivas de Janine Benyus. De fato, “A Biomimética e sua Influência no Design e na Arquitetura e Urbanismo” foi um trabalho apresentado durante o XVII Salão de Iniciação Científica, no qual Panizzutti e Martin comentaram algumas das possibilidades de mesclar conhecimentos naturais em simbiose com as áreas criativas, apoiando-se em estudos de caso sobre unidades biológicas que podem estimular propostas estruturais em pequena e larga escala para elaborar objetos e espaços que sejam adequadamente inseridos no meio ambiente, limitando possíveis prejuízos (SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2005).

Em uma etapa subsequente, foi realizada uma filtragem manual dos trabalhos auferidos, uma vez que a base *Google Scholar* e o *software Publish or Perish* não disponibilizavam ferramentas automáticas distribuídas por áreas de conhecimento, tal como ocorreu nas consultas às bases *Web of Science* e na *Scopus*. Em consequência disso, a extração das informações foi realizada manualmente, tendo sido descartadas publicações provenientes de outros campos do conhecimento, como: administração, física, medicina, odontologia e química. Também foram excluídos trabalhos em italiano e em espanhol, dado que o critério da análise de literatura nesta base concentrava-se em estudar publicações brasileiras. Dessa forma, restaram registros de design, arquitetura, engenharia, sustentabilidade, preservação ambiental, arte e comunicação, reunindo-se um total de 213 publicações.

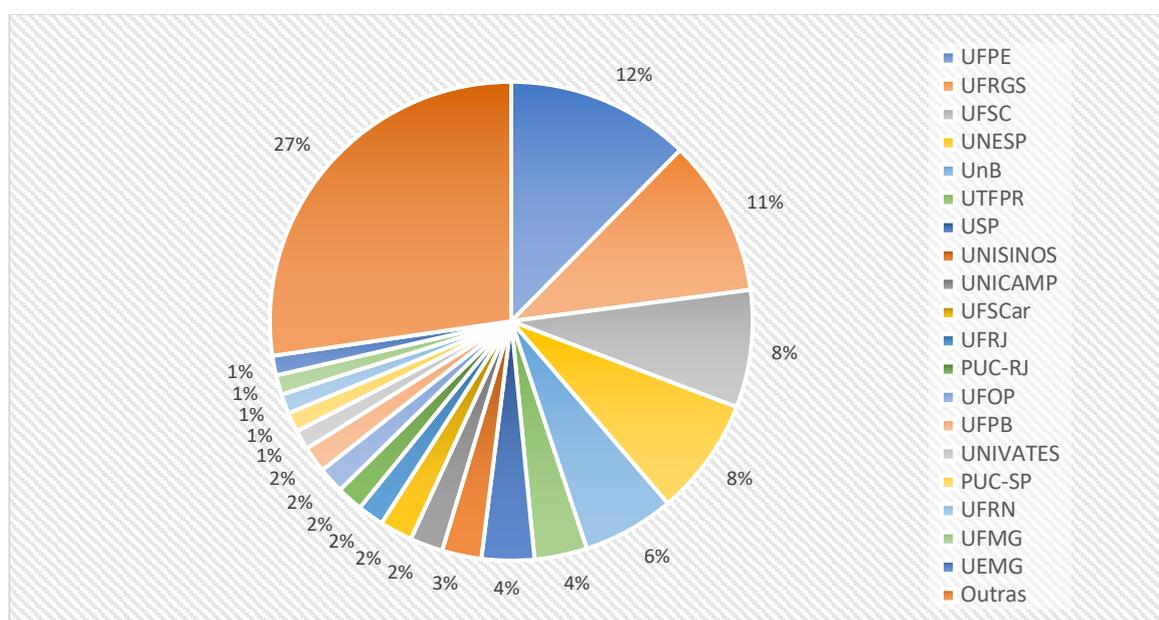
Julga-se fundamental atentar que, como a biomimética é uma temática recente – particularmente quando associada ao design – há um número limitado de publicações nacionais em periódicos. Por conseguinte, para o presente levantamento da literatura nacional, foram incluídas todas as contribuições científicas recentes, com exceção de livros na íntegra. Dessa maneira, foram examinados periódicos, teses de doutorado, dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de curso, artigos publicados em anais de eventos e capítulos de livro.

Em uma etapa consecutiva, empreendeu-se o levantamento de trabalhos de 2018 a 2021, adotando-se, mais uma vez, o *software Publish or Perish*. Tendo em vista as

singularidades da plataforma, foi inviável gerar mapas de calor de *co-citation* e *coupling*. Não obstante, foram construídos quadros, gráficos, mapas de coocorrência e de palavras-chave no intuito de ilustrar os dados coletados, viabilizando suas análises.

Identificou-se que o autor com maior frequência de publicação foi Amilton José Vieira de Arruda ($n = 11$), seguido por Theska Laila de Freitas Soares ($n = 9$), Breno Tenório Abreu ($n = 6$) e Felipe Luis Palombini ($n = 5$). Os estados com maior número de publicações foram, em ordem decrescente: São Paulo, Rio Grande do Sul, Pernambuco e Santa Catarina. Os periódicos com maior taxa de publicações em biomimética e design foram: *Mix Sustentável* ($n = 11$); *Design & Tecnologia* ($n = 5$) e *Educação Gráfica* ($n = 3$). A Figura 17 mostra as principais instituições¹¹ que pesquisaram e publicaram sobre design e biomimética, destacando-se a Universidade Federal de Pernambuco ($n = 28$), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul ($n = 24$) e a Universidade Federal de Santa Catarina ($n = 18$). Foram consideradas como “outras”, todas as instituições que possuíam três ou menos publicações.

Figura 17 - Instituições com maior número de publicações na base *Google Scholar*



Fonte: A autora, 2021.

¹¹ Cabe esclarecer que, para contabilizar as instituições e regiões, foram considerados os vínculos institucionais de cada autor e a sua respectiva localização no território brasileiro.

As áreas do conhecimento que prevaleceram nos trabalhos obtidos no *Google Scholar* foram design, arquitetura e engenharia. Verificou-se um nítido destaque da área de design (que foi uma das palavras-chave utilizadas na busca), a despeito da falta de filtros de pesquisa por áreas do conhecimento no *software* utilizado.

Tal evidência do campo de design contrastou com os resultados previamente encontrados nas bases *Web of Science* e *Scopus*, posto que essa área não figurava como uma opção disponível para seleção e filtragem diretamente nas plataformas utilizadas para o levantamento internacional. Ocorreu, portanto, uma dispersão das publicações em outras áreas do conhecimento. Os anos com o maior volume de publicação foram: 2019 ($n = 42$), 2017 ($n = 30$), 2020 ($n = 23$) e 2014 ($n = 20$).

Como apenas um trabalho atingiu a quantidade mínima de citações estipulada para os levantamentos nas bases anteriores ($n \geq 30$) foi realizada uma nova delimitação, que abarcou trabalhos com cinco ou mais citações no período de 1990 a 2021 (Quadro 3).

Quadro 3 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base *Google Scholar* (1990 a 2021)

Título	Autores	Citações	Principais Contribuições do(s) Autor(es)
Economia circular no contexto europeu: conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos	Ribeiro; Kruglianskas (2014)	39	Abordaram a relação da economia circular (EC) com a gestão do ciclo de vida, a ecologia industrial, o design regenerativo e a biomimética. Destacaram que a EC trata os resíduos como recursos, prevê sistemas resilientes e possui perspectiva sistêmica que distingue os fluxos de produção. A EC também propõe o reuso, a substituição de partes e a preferência por substâncias atóxicas.
A biomimética como método criativo para o projeto de produto	Detanico; Teixeira; Silva (2010)	14	Realçaram a relevância de noções biológicas no apuro do arcabouço criativo de designers, em etapas conceituais e de geração de alternativas. Mencionaram fatores da biomimética e ilustraram aplicações em conjunto com modelos matemáticos e geométricos para gerar produtos baseados em analogias naturais.
Sustentabilidade em desenvolvimento de produtos: uma proposta para a classificação de abordagens	Magnago; Aguiar; Paula (2012)	14	Classificaram 15 abordagens de sustentabilidade no ambiente empresarial. Elucidaram quando empregá-las e como combiná-las em equipes de Processo de Desenvolvimento de Produtos. Nesse cenário, foram considerados aspectos de responsabilidade ambiental, social e a geração de valor econômico. A biomimética foi mencionada como um campo associado ao Capitalismo Natural e às <i>Zero Emission Research and Initiatives</i> .
A importância de fibras e fios no design de têxteis destinados à prática desportiva	Filgueiras; Fangueiro; Raphaelli (2008)	14	Apresentaram o progresso na ciência de materiais na confecção de vestimentas e artigos esportivos. Explanaram que o uso de fibras e superfícies biomiméticas podem aprimorar a eficiência dos atletas. Exibiram tecidos inspirados em pele de tubarão para uso em esportes aquáticos.
Aplicação de estruturas de bambu no design de objetos: como construir objetos leves, resistentes, ecológicos, e de baixo custo	Verschleisser (2008)	10	Concentrou-se no estudo do bambu e na aplicação de suas propriedades em estruturas em <i>tensegrity</i> para a produção de construções leves e resistentes. Também tratou da perspectiva de Buckminster Fuller e de outros especialistas na investigação de atributos naturais em cenários de projetos arquitetônicos combinando fatores de aproveitamento energético e propriedades estruturais.
Biônica e biomimética no contexto da complexidade e sustentabilidade em projeto	Queiroz; Araújo; Aguiar (2017)	9	Apresentaram um histórico do uso de aportes naturais em projetos humanos. Ilustraram os fundamentos da biônica e da biomimética. Caracterizaram o <i>Biomimicry Thinking</i> e seus três eixos: <i>ethos</i> , (re)conexão e emulação. Tais fatores regem as duas dinâmicas de projeto: “desafio de biologia” e “biologia para o design”. Estudos de caso como <i>Speedo</i> , <i>Whale Power</i> , <i>Bionic Car</i> e <i>Sahara Forest Project</i> foram evidenciados.
Design de superfície: proposta de procedimento metodológico para criação de estampas têxteis com referência em elementos naturais	Oliveira (2012)	8	Averiguou três procedimentos de design de produto baseados na natureza. Implementou experimentações na criação de estampas com profissionais e estudantes de design. Concluiu-se que explorar conceitos naturais, práticas de desenho manual e prototipagem computadorizada oportuniza novas possibilidades na criação em design gráfico e de produto.
A relação entre a biomimética e a geodésica de Buckminster Fuller no planejamento de construções sustentáveis	Soares (2016)	6	Inter-relacionou a biomimética com as criações geodésicas de Buckminster Fuller. Ressaltou as vantagens construtivas oferecidas pela geometria natural e pela geodésica como: tensegridade, leveza, força estrutural, distribuição de temperaturas, ventilação e facilidade de montagem. Os conceitos foram ilustrados por construções como: Ecocamp Patagônia e Domos da Amazon.
Como a biônica e biomimética se relacionam com as estruturas naturais na busca de um novo modelo de pesquisa projetual	Arruda (2015)	6	Abrangeu uma revisão sobre biomimética e a evolução do uso do respectivo termo. Considerou que tal campo focaliza o trabalho com analogias em design e enfatiza fatores como sustentabilidade e integração. Assim, há uma diferenciação com relação à biônica, que privilegia interpretações formais e funcionais da natureza. Citou exemplos de criações biomiméticas como o <i>fastskin</i> e as obras de Santiago Calatrava.
Formas naturais e estruturação de superfícies mínimas em arquitetura	Allgayer (2009)	5	Explorou como as superfícies mínimas em arquitetura se relacionam com características da natureza. Foi elaborado um processo que utilizou modelos paramétricos para representar as criações, associando a evolução do projeto à aferição da gramática da forma emergente. Notou-se que é possível obter estruturas bioinspiradas eficazes sem comprometer a linguagem de inspiração.
Estudo morfológico da planta <i>Salvinia molesta</i> : uma contribuição para a biônica e o design de produto	Steigleder (2010)	5	Investigou a morfologia da planta <i>Salvinia molesta</i> para projetos de impermeabilização de superfícies. Conduziu análises microscópicas de varredura eletrônica e gerou modelos 3D para caracterizar elementos desse vegetal: microestruturas, ceras e tricomas. Foram propostas aplicações das características de fácil limpeza e manutenção dos materiais gerados a partir da planta para revestimentos de fachadas e automóveis.
<i>Strategic design, sustainability and multiple approaches for textile experimentation</i>	Bergmann; Magalhães (2019)	5	Realçaram possibilidades da redução dos impactos ambientais no campo têxtil com o uso de materiais disruptivos tanto no setor de vestuário quanto em design de interiores. Sugeriram processos de reciclagem e apresentaram experimentações de <i>upcycling</i> com resíduos de revestimento para o solo. O trabalho foi direcionado para apreciação de fatores da biotecnologia (bioluminescência, microbiologia e novos materiais).

Fonte: A autora, 2021.

A consulta na base de dados *Google Scholar* evidenciou as principais abordagens das pesquisas no cenário nacional. Variadas propostas abrangem assuntos como a sustentabilidade e a preservação ambiental, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de produtos, economia circular e projetos bioinspirados e biomiméticos. Os principais organismos investigados foram vegetais e seres marinhos. No que concerne aos projetos, destacaram-se aplicações em design, arquitetura, engenharia, ciência dos materiais, arte sustentabilidade e moda.

Visto que a construção do mapa de *coupling* para o *Google Scholar* foi inviabilizada pela organização dos metadados da plataforma, foi preciso elaborar um novo quadro para distribuir as informações das pesquisas mais recentes (2018 a 2021). De modo a estabelecer um critério de seleção dos trabalhos levantados com o *Publish or Perish*, foram escolhidos aqueles que continham duas ou mais citações (Quadro 4).

Quadro 4 - Artigos mais citados e suas principais contribuições - base *Google Scholar* (2018 a 2021)

Título	Autores	Citações	Principais Contribuições do(s) Autor(es)
Novas estratégias da biomimética: as analogias no biodesign e na bioarquitetura	Arruda; Freitas (2018)	4	Organizaram uma revisão bibliográfica e demonstraram as origens, as definições e os princípios da biomimética. Exemplificaram aplicações no biodesign e na bioarquitetura, como: Ornitóptero, <i>Velcro</i> , <i>Fastskin</i> , <i>Bionic Car</i> e as obras de Santiago Calatrava. Definiram analogias biomiméticas, organizadas em categorias: orgânica, classificatória, anatômica e darwiniana.
Materiais e biônica: sob a ótica da análise de elementos finitos baseada em imagens de microtomografia de raios X	Palombini et al. (2018a)	3	Conduziram estudos sobre o arranjo morfológico em microestruturas de materiais naturais por meio do uso de tecnologias 3D não invasivas como análise por elementos finitos e microtomografia de raios X. Empreenderam a simulação digital de um ensaio mecânico em bambu. Tal combinação de técnicas resultou em imagens de alta precisão com potencial para melhorar o entendimento da funcionalidade estrutural dos materiais.
Os instrumentos legais de gestão ambiental e sua relação com os princípios da economia circular	Stival; Barros; Veiga (2020)	2	Destacaram que a EC prioriza a resiliência pela estimulação de: diversidade, uso de energias renováveis, não geração de resíduos, pensamento sistêmico e conversão de resíduos em nutrientes. Elencaram alguns dos escassos instrumentos legais existentes para a gestão ambiental que incluem princípios da EC no Brasil.
<i>Design-Aided Science</i> : o designer como promotor de tecnologias 3D para inovação em pesquisa científica	Palombini et al. (2018b)	2	Discutiram acerca das interfaces entre o design e a ciência para concretizar resultados inovadores à luz da aplicação de tecnologias 3D. Refletiu-se sobre o <i>modus operandi</i> dos designers e cientistas e como eles podem atuar em uma rede colaborativa transdisciplinar baseada no conceito de <i>Design-Aided Science</i> . Foram descritas tecnologias úteis nesse contexto como microtomografia de raios X, análise por elementos finitos e manufatura aditiva.
As contribuições da impressão 3D para a validação dos conceitos no estudo das estruturas retráteis	Anaf; Harris (2018)	2	Examinaram o desenvolvimento de geometrias metamórficas próximas às encontradas no meio natural. Realizaram protótipagens e simulações digitais para estudar tais estruturas dinâmicas apresentando um processo para a construção de domos geodésicos retráteis para sistemas de cobertura.

Fonte: A autora, 2021.

Nas publicações mais recentes, coletadas no *Google Scholar*, predominam o detalhamento sobre origens, princípios e produtos de biomimética nas áreas de design e arquitetura. Investigações fundamentadas na exploração de geometrias naturais também sobressaem, bem como vertentes de pesquisas que englobam o uso de *softwares* paramétricos

de prototipagem digital para elaboração de projetos baseados em formas curvas, orgânicas e fluidas. Nesse contexto de recursos digitais, também são utilizados processos não invasivos para analisar as propriedades de microestruturas de materiais naturais, como a microtomografia de raios X e a análise por elementos finitos. Outro campo de interesse que merece ser mencionado envolve a pesquisa acerca da relação entre princípios da economia circular e sua inserção na legislação direcionada para a gestão ambiental.

Na sequência, realizou-se uma análise complementar que gerou uma *word cloud* com as palavras-chave das 213 publicações. A Figura 18 exibe os cinquenta termos de maior frequência.

Figura 18 - *Word cloud* da plataforma *Google Scholar*

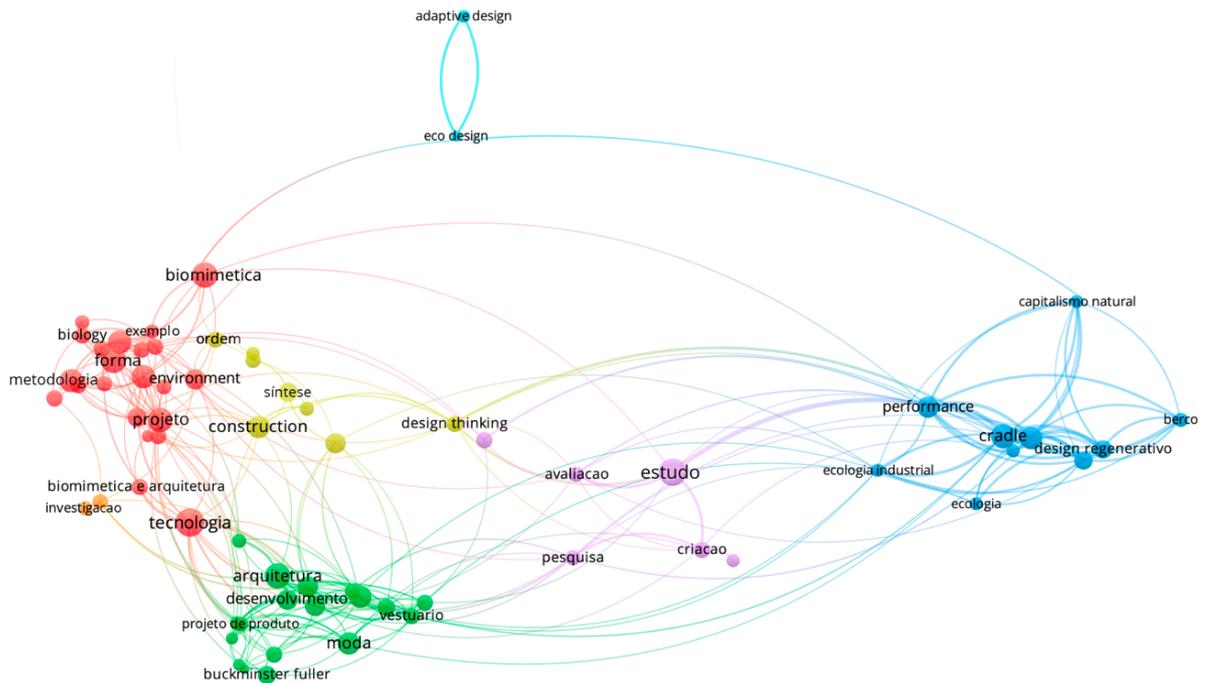


Fonte: A autora, 2021.

À luz das informações contidas nas obras selecionadas para integrar os Quadros 3 e 4 e a Figura 18, já exibidos, constatou-se que o estudo e as aplicações de biomimética em design são orientadas à preservação ambiental e ao desenvolvimento de projetos e produtos sustentáveis. Com efeito, é visível que as palavras-chave de maior expressividade são, respectivamente: “design”. ($n = 75$), “biomimética”, ($n = 66$), “sustentabilidade”, ($n = 28$), “desenvolvimento”, ($n = 27$), “projeto” ($n = 24$), “produtos” ($n = 20$) e “natureza” ($n = 19$). Infere-se também que é recorrente o uso de tecnologias e ferramentas digitais na formulação de propostas e soluções nessa área. Outra tendência na pesquisa nacional diz respeito à atuação nas áreas de arquitetura, construção, design, além de cenários de desenvolvimento de novos materiais e abordagens de economia circular.

É pertinente recordar que a única aplicação disponível no *software VOSViewer* para a base *Google Scholar* foi o delineamento do mapa de coocorrências dos vocábulos presentes em títulos e resumos. A Figura 19 ilustra as conexões em rede das principais palavras identificadas, sendo que aquelas mais frequentes se sobressaem nos círculos de maiores dimensões no diagrama.

Figura 19 - Mapa de coocorrências *Google Scholar* elaborado a partir dos títulos das publicações



Fonte: A autora, 2021.

Preliminarmente, ao analisar essa figura, notam-se grupos ordenados por diferentes colorações. No *cluster* em vermelho, há um destaque para investigações relacionadas a ferramentas e projetos biomiméticos, que exploram formas orgânicas, particularidades ambientais e recursos de tecnologia para seu desenvolvimento. No grupo em amarelo, observa-se um predomínio de recursos construtivos e de *design thinking*. Já no conjunto em verde, há um destaque para criações em arquitetura, o desenvolvimento de projetos de produto e a geração de propostas no setor de moda e vestuário. Os termos em roxo concentram-se na área de pesquisas e avaliações. Por fim, os *clusters* em azul orbitam em torno de conceitos voltados para o design regenerativo, a ecologia e a sustentabilidade.

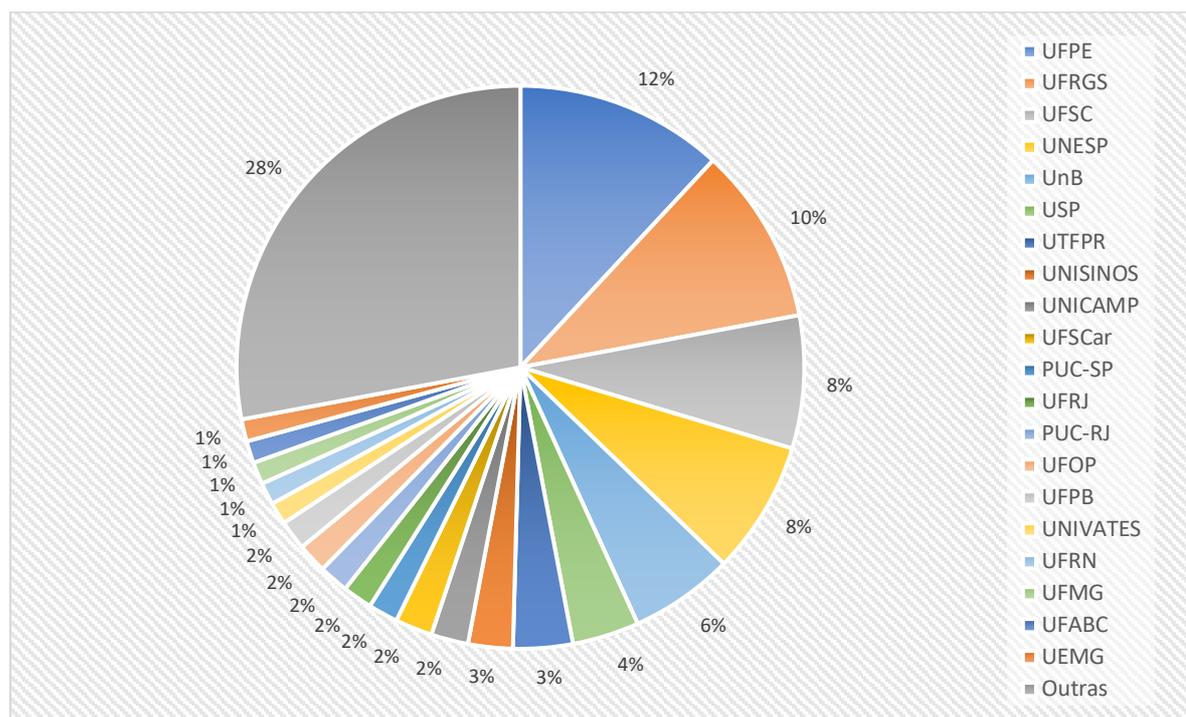
Em suma, verificou-se que a aplicação dos conhecimentos naturais possui relevância em diversas esferas criativas e está fortemente associada à pesquisa, ao campo da preservação ambiental, ao uso responsável de recursos e ao desenvolvimento de novas tecnologias e produtos.

2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO INTERNACIONAL E NACIONAL

A extração de dados nas bases consultadas possibilitou formular interpretações sobre o desenvolvimento de pesquisas nacionais e internacionais em biomimética e design. Tendo isso em vista, a quantidade de informações obtidas foi distribuída em múltiplos recursos de organização e visualização.

A Figura 20 exibe as instituições brasileiras que mais publicaram sobre os temas contabilizando os estudos previamente citados, que compõem os quadros da *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*. Por conseguinte, constata-se que as organizações de destaque são, respectivamente, a Universidade Federal de Pernambuco, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Universidade Federal de Santa Catarina.

Figura 20 - Instituições de autores brasileiros com publicação citada nas bases *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*



Fonte: A autora, 2021.

O Quadro 5 apresenta os parâmetros quantitativos de cada base consultada permitindo comparar as produções.

Quadro 5 - Informações coletadas nas bases *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*

Categorias	Web of Science	Scopus	Google Scholar
Resultados Etapa 1	633	761	774
Resultados Etapa 2	196	235	213
Registro mais antigo	1995	1994	2005
Locais com maior número de publicações	Estados Unidos (<i>n</i> = 68) Reino Unido (<i>n</i> = 19) Turquia (<i>n</i> = 15)	Estados Unidos (<i>n</i> = 106) Reino Unido (<i>n</i> = 24) Canadá (<i>n</i> = 12)	São Paulo (<i>n</i> = 45) Rio Grande do Sul (<i>n</i> = 38) Pernambuco (<i>n</i> = 30) Santa Catarina (<i>n</i> = 24)
Autor mais publicado	Zari (<i>n</i> = 8) Donnison, Faludi, Jones, Niewiarowski, Pauw (<i>n</i> = 3)	Zari (<i>n</i> = 9) Nagel (<i>n</i> = 6) Eggermont, Fiorentino, Rose, Shelley, Shyam, Vincent (<i>n</i> = 3)	Arruda (<i>n</i> = 11) Soares (<i>n</i> = 9) Abreu (<i>n</i> = 6)
Periódicos que mais publicaram	<i>Wit Trans. on Ecology and the Environ.</i> (<i>n</i> = 9) <i>Scientific Reports</i> (<i>n</i> = 6) <i>Arch. Sci. Review</i> <i>Proc. Soc. and Behav. Sci.</i> (<i>n</i> = 5)	<i>Wit Trans. on Ecology and the Environ.</i> (<i>n</i> = 9) <i>Int.l J. of Design Nat. and Ecodyn</i> (<i>n</i> = 7) <i>Arch. Sci. Review</i> (<i>n</i> = 4)	Mix Sustentável (<i>n</i> = 11) Design & Tecnologia (<i>n</i> = 5) Educação Gráfica (<i>n</i> = 3)
Documento mais citado	(BHUSHAN, 2009) <i>Biomimetics [...]</i> (<i>n</i> = 691)	(PASSINO, 2005) <i>Biomimicry for optimization, control, and automation</i> (<i>n</i> = 238)	(RIBEIRO; KRUGLIANSKAS, 2014) <i>Economia circular no contexto europeu [...]</i> (<i>n</i> = 39)
Publicações com 30 ou mais citações	13	10	1
Instituições que mais publicaram	<i>Univ. of California System</i> (<i>n</i> = 8) <i>Victoria Univ. of Wellington</i> (<i>n</i> = 8) <i>Univ. System of Georgia</i> , (<i>n</i> = 7) <i>Delft University of Technology</i> <i>Univ. of Akron</i> (<i>n</i> = 6)	<i>Victoria Univ. of Wellington</i> (<i>n</i> = 10) <i>Arizona State University</i> (<i>n</i> = 7) <i>James Madison University</i> (<i>n</i> = 7) <i>Georgia Institute of Tech.</i> (<i>n</i> = 6)	UFPE (<i>n</i> = 28) UFRGS (<i>n</i> = 24) UFSC (<i>n</i> = 18) UNESP (<i>n</i> = 18)
Anos com maior número de publicações	2019 (<i>n</i> = 27) 2016 (<i>n</i> = 26) 2020 (<i>n</i> = 24)	2019 (<i>n</i> = 30) 2020 (<i>n</i> = 25) 2017 (<i>n</i> = 24)	2019 (<i>n</i> = 42) 2017 (<i>n</i> = 30) 2020 (<i>n</i> = 23)
Palavras-chave mais frequentes no TagCrowd	<i>Biomimicry, design, sustainability, architecture, ecology, urban, systems</i>	<i>Design, biomimicry, sustainability, engineering, innovation, nature, urban</i>	Design, biomimética, sustentabilidade, desenvolvimento, projeto, produto
Palavras-chave mais frequentes em coocorrências	<i>Biomimicry, design, sustainability, architecture, nature, innovation</i>	<i>Biomimicry, design, sustainability, product design, structural design, architecture</i>	Biomimética, estudo, tecnologia, arquitetura, <i>cradle</i> , forma, projeto

Fonte: A autora, 2021.

A base com o maior número de publicações, na primeira etapa, foi o *Google Scholar* com um total de 774 trabalhos. Pondera-se que isso provavelmente ocorreu por ser uma base multilíngue que reúne os trabalhos de forma mais abrangente, ao passo que a *Web of Science* e a *Scopus* possuem critérios de organização de trabalhos mais restritos e específicos para a área acadêmica. A menor quantidade de resultados correspondeu à *Web of Science*. Acredita-se que isso tenha acontecido visto que essa é uma base de língua inglesa, e não uma plataforma multilíngue.

A segunda etapa foi realizada automaticamente para *Web of Science* e *Scopus*, por meio de filtros por áreas de conhecimento. Já para o *Google Scholar*, conforme foi previamente

mencionado, tal separação em categorias foi feita manualmente pois não há recursos na plataforma, nem no *software Publish or Perish*, que viabilizem tal seleção.

Os registros mais antigos nas bases internacionais incluem trabalhos anteriores às publicações de Benyus. Sendo assim, essas obras apresentam perspectivas da biomimética associadas à engenharia e à ciência dos materiais, com investigações físico-químicas e estruturais. Diferencialmente, o trabalho mais antigo da base *Google Scholar*, datado de 2005, já evidencia as conexões de princípios naturais em cenários projetuais de design e arquitetura, porquanto foi publicado após a difusão das oportunidades proporcionadas pela integração de conhecimentos naturais em áreas criativas. Em virtude dessas considerações, conclui-se que, no Brasil, há um nítido destaque para a produção em design e biomimética nos estados do Sudeste, Sul e Nordeste. No cenário internacional, as investigações são lideradas por países de língua inglesa, notadamente os Estados Unidos, o Reino Unido e o Canadá.

É visível que a biomimética é uma área recente, que se encontra em plena expansão, com grande potencial para novas investigações acadêmicas, principalmente em design. Com efeito, ainda há uma quantidade reduzida de trabalhos por autores, como ilustra o Quadro 5.

Com relação aos documentos mais citados, constata-se que o artigo intitulado “*Biomimetics: lessons from nature - an overview*”, captado na busca na *Web of Science*, propôs uma revisão de pesquisas e aplicações diretamente relacionadas à biomimética e ao design. Já a publicação com mais citações na base *Scopus* tratou do desenvolvimento de sistemas fundamentados em fatores biomiméticos para controle e tomada de decisões em automação. O trabalho mais citado no *Google Scholar* apresentou o biomimetismo de maneira breve, em complementando estudos e desdobramentos sobre biosfera, economia circular e sustentabilidade.

No *Google Scholar*, verificaram-se poucos estudos com 30 ou mais citações, dado que nessa base, há apenas um trabalho que corresponde a esse critério. Acredita-se que isso se deve ao fato de que o maior volume das publicações extraídas dessa base ainda é recente (datam do período entre 2015 e 2020). Logo, esse número tende a crescer nos próximos anos.

As instituições de notoriedade sobre o tema foram predominantemente americanas. Contudo, dentre as universidades que mais publicaram há o claro destaque da *Victoria University of Wellington* (neozelandesa) e da *University of California System*. No Brasil, há uma inconfundível preponderância das instituições públicas em quantidade de publicações por instituição.

Averiguou-se que o ano com maior profusão de trabalhos foi 2019, tanto nas bases de dados internacionais quanto na base onde foi realizado o levantamento de literatura nacional. Em complemento, é válido comentar que, em todas as bases, foi observada uma redução na

quantidade de publicações comparativamente entre os anos 2019 e 2020. Presume-se que isso tenha ocorrido em razão das restrições de atividades impostas pela pandemia de Covid-19, especialmente no que concerne os impactos nas áreas acadêmicas e investigativas, como por exemplo, no caso de pesquisas de campo e atividades laboratoriais. Além disso, alguns periódicos atrasaram a produção de edições nesse mesmo período ou priorizaram a publicação de estudos sobre o cenário pandêmico em detrimento de outras temáticas.

A leitura do conjunto de artigos expandiu a compreensão das características enraizadas na biomimética e a transferência de tais conhecimentos para situações de projeto em design. Verificou-se por meio da revisão sistemática da literatura que as dinâmicas entre as duas áreas ocorrem com maior intensidade na etapa de projeto conceitual, na geração de alternativas e na formulação de estruturas e materiais. Depreendeu-se ainda que muitas dessas pesquisas e aplicações estão vinculadas aos campos do projeto de produto, da arquitetura e das engenharias.

Conforme apresentado, os conceitos biológicos estão sendo utilizados principalmente em atividades criativas e no design e vinculam-se a três categorias: a) o aprimoramento da eficiência e das configurações formais de objetos com o uso de *softwares* especializados; b) a aplicação de ferramentas biomiméticas como recursos pertencentes ao leque de processos em design, por meio da incorporação de particularidades naturais para a criação de objetos, sistemas e espaços; c) o fator de sustentabilidade, preservação ambiental e regeneração, que foi o mais recorrente no levantamento de estudos.

CAPÍTULO 3 - PANORAMA SOBRE FERRAMENTAS DE DESIGN E FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS

*A sutileza humana jamais descobrirá
uma invenção mais bela, mais simples
ou mais direta do que a natureza, pois
nela nada falta e nada é supérfluo*

Leonardo Da Vinci

No intuito de prosseguir com o embasamento da investigação sobre estudo de casos múltiplos, será apresentado um panorama descritivo de ferramentas de design e ferramentas biomiméticas, neste terceiro capítulo da Dissertação. Ao final, propõe-se um levantamento específico sobre ferramentas biomiméticas.

3.1 FERRAMENTAS EM DESIGN

A designação de ferramentas equivale aos instrumentos utilizados de forma sistemática para empreender uma ação, concretizar um objetivo. Trata-se do conhecimento utilizado para realizar um trabalho, seja em um meio físico-palpável ou abstrato-teórico. Esses recursos estimulam a geração de ideias e a solução de problemas associados às atividades criativas. As ferramentas podem ser utilizadas isoladamente ou ser combinadas entre si. Esses recursos também podem estar integrados em métodos ou processos (BAXTER, 2000; LINS, 1993; WEBER, 2010). Bomfim (1995) evidenciou que as ferramentas correspondem a instrumentos físicos ou conceituais, provenientes de múltiplos campos científicos, que orientam um controle de *inputs* para a obtenção de *outputs*. Elas podem se apresentar em uma miríade de configurações, a exemplo de tabelas, matrizes, diagramas, listas e quadros. Baxter (2000) complementou tal definição ao concluir que ferramentas são processos que reúnem uma pluralidade de recomendações e etapas para estimular a geração de ideias, analisar problemas e estruturar atividades projetuais para o desenvolvimento de propostas criativas (BAXTER, 2000; WEBER, 2010).

Um modelo ou *framework* é um conjunto de abordagens teóricas que seguem um certo padrão ou estrutura para otimizar alguma ação, e que no caso da presente pesquisa, associa-se à facilitação de produções em design. Tais abordagens são embasadas por sistemas, conceitos ou pela própria literatura. Em pesquisa, esses instrumentos correspondem a ordenações de variáveis e a definição de suas inter-relações para representar um processo, seja em sua totalidade ou alguma de suas etapas específicas (CAMBRIDGE, 2021; SANTOS; VEGA, 2016).

As técnicas são recursos auxiliares que podem estar inseridas no uso de ferramentas, processos e métodos, para facilitar o percurso criativo ou a visualização de algum elemento proposto, seja na pesquisa, no desenvolvimento, na prototipagem ou na entrega do projeto. Podem ou não se apresentar como elemento instrumental, isto é, também podem ser conhecimentos, experiências, habilidades apoiadas na intuição e na prática. Em design, muitas das técnicas correspondem a recursos de expressão visual, como práticas de desenho e observação, renderização, simulação e modelagem digital (WEBER, 2010).

Conforme afirmou Papanek (1985), a capacidade de proposição de ideias vai para além da esfera racional, abrangendo o inconsciente e as relações associativas da mente. Não se deve perder de vista que a possibilidade de combinar livremente as habilidades multidisciplinares é indispensável para indivíduos que atuam em design e áreas afins. Em outros termos, a quantidade de conhecimento de uma pessoa, a qualidade da sua memória e a sua capacidade associativa enriquecem o processo criativo (PAPANEK, 1985; GOMES, 2019).

Em design, é comum a adoção de processos criativos longos, que incluem uma subdivisão de etapas (em fases menores e mais simples) para viabilizar o desenvolvimento de propostas complexas. A partir disso, as informações essenciais são devidamente coletadas, e em seguida, combinadas e aplicadas como base para contextualizar o projeto e aproximá-lo dos resultados pretendidos.

Diversos autores estipularam etapas que podem ser seguidas e adaptadas a cada cenário projetual. De acordo com Munari (2011), um problema ou desafio de design é resultante de uma necessidade da esfera humana. Esse requisito inicial delimita o escopo da investigação a ser empreendida pelos projetistas. Segundo o autor, após o estabelecimento de tal problemática, ocorre sua subdivisão.

Assim, tão logo é iniciado o estágio de captação de dados e informações, é implementada uma fase para analisar e formular ideias relacionadas à temática escolhida e ao que foi definido como o problema de projeto. Em seguida, são acrescentados e combinados os materiais e a tecnologia selecionados por sua disponibilidade e compatibilidade com o contexto projetual. A partir de então, é instaurado o momento de experimentação. Nele, os materiais e as técnicas disponíveis são examinados para formular e selecionar alternativas. Aquelas que simultaneamente se destacam e que mais se adequam aos objetivos previamente estipulados serão selecionadas para embasar a construção de modelos demonstrativos (MUNARI, 2011).

Posteriormente, tais modelos passam por reiterados testes que podem suscitar oportunidades para ajustes e modificações nas propostas até então configuradas. Dessarte, são

realizados desenhos construtivos para comunicar as especificações necessárias para a fabricação de um protótipo. Finalmente, esse mesmo protótipo pode ainda passar por novas fases de testes até ser considerado apto para constituir um novo produto, seja ele físico, digital ou até mesmo um serviço (MUNARI, 2011). A Figura 21 mostra a integralidade desse processo de criação:

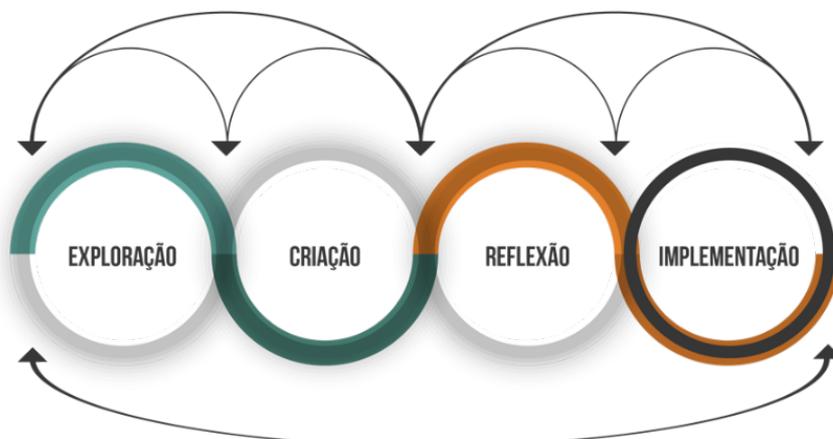
Figura 21 - Fases do processo criativo em design, conforme Munari



Fonte: Adaptado de Munari, 2011.

Outros processos de criação em design são descritos de forma semelhante, com algumas variações. Um exemplo disso é ilustrado na obra de Stickdorn e Schneider (2011). Os autores esclarecem, de forma didática, que o percurso criativo é repleto de iterações, que podem ocorrer em todas as suas fases, como ilustra a Figura 22.

Figura 22 - Etapas do processo de design, segundo Stickdorn e Schneider



Fonte: Adaptado de Stickdorn e Schneider, 2011.

Stickdorn e Schneider (2011) propõem quatro grandes etapas para atuar em design. Na primeira, voltada para a exploração, é capital compreender o público-alvo, os usuários e os *stakeholders*; identificar o problema real vivenciado por essas pessoas e compreender as motivações que impelem seus comportamentos. Coletar dados qualitativos e quantitativos durante esse intervalo faz com que os projetistas tenham o embasamento necessário para dar continuidade às suas criações.

O segundo grande momento na trajetória definida pelos autores abarca a criação. Ele representa o processo contínuo de geração de alternativas vinculado à análise crítica sobre o que já foi produzido. Explorar ao máximo o campo conceitual, a cocriação, a interdisciplinaridade e as múltiplas possibilidades emergentes, além de estudar as possíveis falhas e erros no produto, são os pilares dessa etapa (STICKDORN; SCHNEIDER, 2011).

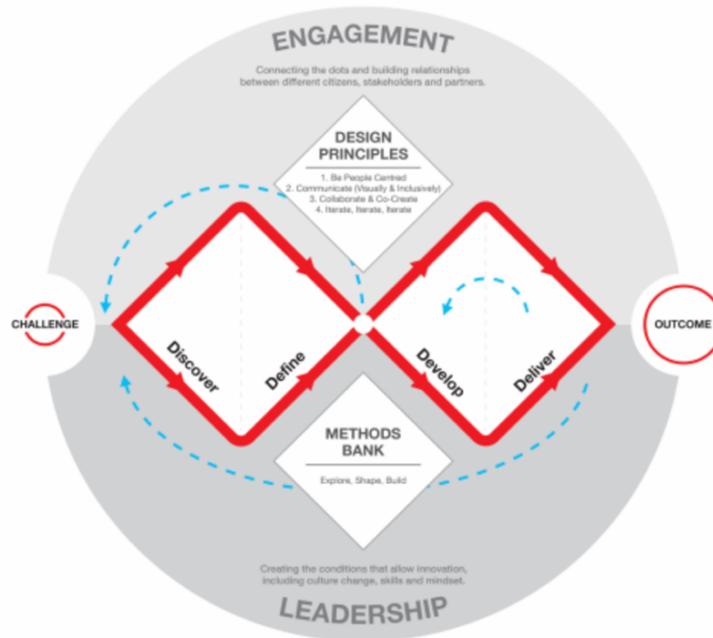
O estágio seguinte trata da reflexão. Durante esse período, as ideias e conceitos previamente explorados são transferidos para um cenário de prototipagem e testes, no intuito de obter *feedbacks* para realizar os devidos ajustes. Salienta-se que é importante efetuar a prototipagem em circunstâncias que se aproximem ao máximo da realidade em que o produto ou serviço será implementado. Nesse sentido, é possível incluir fatores do próprio ambiente ou até mesmo *stakeholders* e grupos focais para contribuir no desenvolvimento dessa etapa (STICKDORN; SCHNEIDER, 2011).

Finalmente, a fase de implementação demanda que um processo de mudanças seja aceito pois ela pressupõe a inserção de um novo produto ou serviço no mercado. Nesse momento, a comunicação é imprescindível e deve incluir aspectos emocionais relativos ao produto ou serviço para incentivar mais engajamento com as criações. Todos esses elementos permitem criar uma experiência de usuário adequada e estimulante. Caso seja preciso realizar novos ajustes, é possível retornar para qualquer uma das etapas precedentes, a depender das definições e necessidades do projeto em questão (STICKDORN; SCHNEIDER, 2011).

Tal como foi comentado, é evidente que há diversos exemplos de métodos de design que denotam variações desses macroprocedimentos relativos às Figuras 21 e 22. Apesar de serem divulgados com nomenclaturas distintas, mantêm a mesma essência, tendo fases de expansão em contraste com fases de convergência, tal como pode ser verificado nas contribuições de autores como Baxter (2000) e Gui Bonsiepe (1984). Esse tipo de ordenação geral encoraja o designer a completar o máximo de etapas que contribuem na aproximação de seus esforços de uma conclusão bem sucedida do projeto, para que seus objetivos pré-estabelecidos sejam atingidos.

Um exemplo adicional é o *framework Double Diamond* (Figura 23) do *British Design Council* (WHAT, 2019). As principais etapas nesse modelo são: descobrir, definir, desenvolver e entregar. Tais fases estão vinculadas a princípios de design centrado no usuário, prezam por colaboração e cocriação, além de fazerem parte de um processo não-linear.

Figura 23 - *Double Diamond*



Fonte: *British Design Council* (www.designcouncil.org.uk), acesso em 2021.

É notório que há uma variedade crescente de ferramentas e recursos destinados e adaptados para momentos específicos na prática projetual em design. Esses instrumentos viabilizam a experimentação, a geração de propostas e vinculam-se à pesquisa, à coleta de dados, à observação do contexto e ao uso. Atentando para isso, convém mencionar algumas ferramentas de uso frequente em projetos de design:

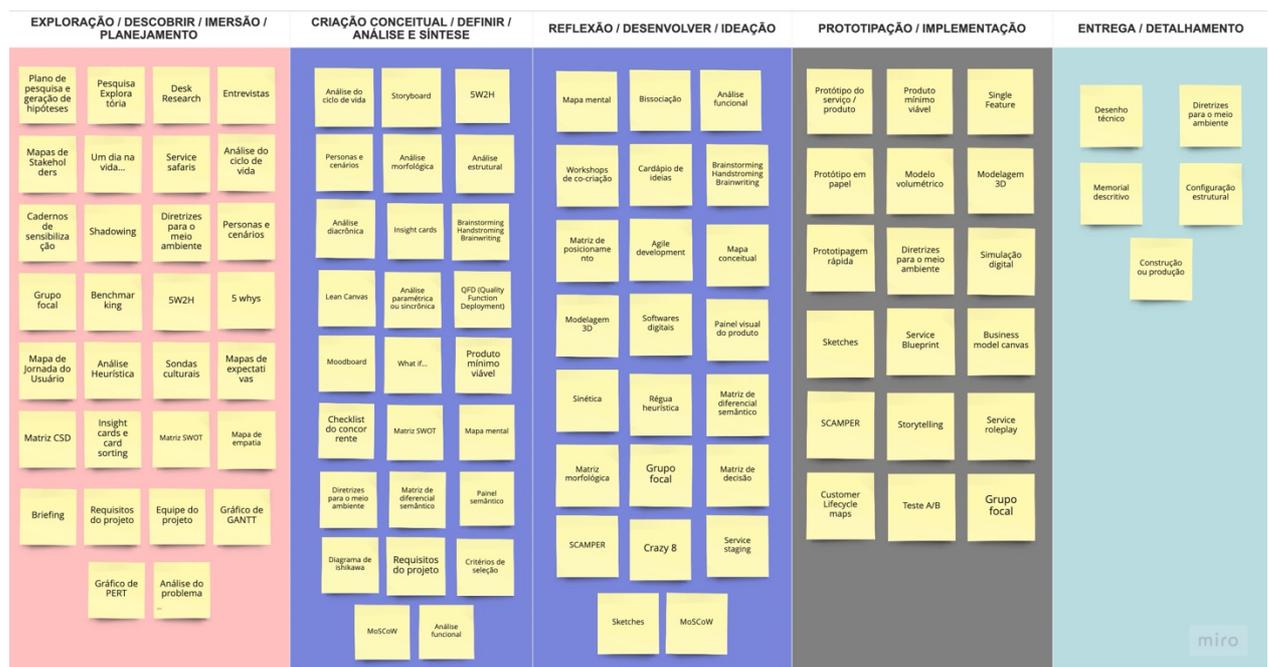
- a) Organização e desenvolvimento de alternativas: *brainstorming*, *handstorming*, mapas conceituais, mapas mentais, análise morfológica, bissociação, sinética, criação de modelos;
- b) Avaliação de ideias e propostas: Matriz S.W.O.T., análise paramétrica; análise funcional;
- c) Criação do contexto visual: painéis visuais (*moodboards*), *sketches*;
- d) Simulação e testes: modelagem digital paramétrica, prototipagem rápida e impressão 3D.

Os exemplos anteriormente apontados representam apenas uma pequena parte do conjunto de ferramentas utilizadas em design. De fato, esse grupo é muito amplo, principalmente ao se considerar as diversas possibilidades de atuação contidas nesse campo. Além disso, é evidente a tendência do design para atuação em contextos multidisciplinares e interdisciplinares, visto que os designers assumem constantemente papéis de mediação. Nesse sentido, é comum que ferramentas criadas em outros campos do conhecimento também sejam adotadas em cenários de design (CARDOSO, 2012; SILVA et al., 2019).

Outro ponto que precisa ser esclarecido refere-se ao momento de uso de cada ferramenta. Muitos autores classificaram esses recursos de acordo com a fase do projeto a que se destinam (ex. ideação, análise, implementação). Efetivamente, há instrumentos que apresentam uma maior eficiência em determinadas etapas criativas. Mas, é pertinente salientar que alguns desses instrumentos podem ser utilizados em outras etapas do processo de design (ou até em mais de uma delas) a depender do contexto do projeto. Logo, é compreensível que a classificação desses elementos também varie entre os estudiosos de design.

Tendo isso em vista, foi elaborada a Figura 24 (reproduzida em sua versão ampliada no Apêndice E) para apresentar outras ferramentas aplicáveis em design, que podem ser adotadas tanto para nortear a produção de produtos e de serviços, distribuídas em cinco fases gerais do processo de criação (STICKDORN; SCHNEIDER, 2011; WEBER, 2010).

Figura 24 - Conjunto de recursos para criação em design



Fonte: A autora, 2021.

É perceptível a existência de um vasto universo de processos que podem ser explorados em design. Uma pluralidade de ferramentas e recursos está à disposição dos profissionais criativos e os auxiliam em sua atuação. Por meio deles, são estabelecidas relações de sintonia com o contexto; verifica-se a disponibilidade de materiais e a possibilidade produtiva. Além disso, as ferramentas contribuem para estabelecer uma interação com os *stakeholders* e usuários centralizada na empatia.

3.2 FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS

Conforme abordado previamente, constata-se que a biomimética é uma área de grande potencial quando combinada com o design e que se encontra em expansão. Mesmo com tal crescimento, é preciso levar em conta que, pela recente formalização de seus princípios e de sua inserção em áreas como o design, muito se discute sobre a aplicabilidade, a divulgação e a adequação dos subsídios que orientam as práticas de inspiração na natureza. Ou seja, ainda não é possível falar de metodologias biomiméticas consolidadas, mas apenas de métodos, processos, ferramentas e técnicas (AL-OBAIDI et al., 2017; QUEIROZ; AGUIAR; ARAÚJO, 2017). Sendo assim, ao longo desta Dissertação, serão empregados esses termos para referência aos numerosos recursos criados para auxiliar projetistas de design, arquitetura e engenharia na exploração de interfaces e possibilidades contidas nos conhecimentos biológicos.

Destaca-se que tal dificuldade de consenso sobre uma metodologia biomimética representa, possivelmente: a) carência de esclarecimento detalhado sobre os procedimentos utilizados na criação de produtos biomiméticos que circulam no mercado; b) dificuldades de trabalhar em grupos interdisciplinares e multiprofissionais, que envolve principalmente barreiras no âmbito da comunicação; e, c) disparidade no nível de conhecimento da natureza e da assimilação de sua complexidade por parte dos integrantes das equipes criativas (WANIECK et al., 2017).

Em complemento a isso, Chakrabarti et al. (2017) alertaram que para utilizar informações de sistemas biológicos na geração de novos produtos e construções, é imprescindível que o usuário-projetista compreenda tais sistemas. Entretanto, pode haver uma discrepância na assimilação de informações biológicas entre os membros de uma equipe. Desse modo, abordagens compreensivas que incluam sistemas e subsistemas naturais e combinem informação textual e outros recursos de representação (vídeos, imagens, sistemas interativos) podem fornecer *insights* para transpor tal cenário e auxiliar na compreensão por parte de todos os integrantes de equipes de design.

De acordo Wanieck et al. (2017), mais de 40 ferramentas já foram criadas para facilitar e dar suporte a estudos e projetos biomiméticos. Cumpre comentar que, em seu estudo, os

autores constataram que algumas das ferramentas nesse conjunto analisado ainda não haviam sido delineadas na literatura científica, isto é, tinham sido divulgadas em outros suportes e plataformas. Alguns desses instrumentos foram localizados via pesquisas exploratórias (ex. *desk research* na internet), sendo que outros foram apresentados apenas informalmente para a rede de contatos de Wanieck et al. (2017). Os autores também sugeriram uma classificação das ferramentas analisadas, em função dos seguintes eixos:

- a) Classe - abstração; aplicação, análise, transferência
- b) Tipo - base de dados/estática, lista/catálogo, taxonomia, tesouro¹², ontologia, algoritmo método
- c) Etapas do processo¹³
- d) Abordagem - *problem-based*, *solution-driven* ou ambos
- e) Acessibilidade - *open-source*, limitado, comercial
- f) Distribuição - *online*, *software*, meio impresso
- g) Campo do conhecimento - biologia, tecnologia ou ambos
- h) Dimensão - independente, requer um passo anterior, facilita uma próxima etapa
- i) Sustentabilidade (sim ou não)
- j) Comprovação do conceito (sim ou não)

A seguir, serão brevemente apresentados procedimentos e ferramentas biomiméticos. Evidentemente o conjunto, aqui reportado, corresponde a uma pequena porcentagem de todos os recursos disponíveis para projetos em biomimética, principalmente devido à contínua expansão da produção técnica e acadêmica na área.

3.2.1 Espirais Biomiméticas (*Biomimicry Thinking*)

O recurso conta com múltiplas nomenclaturas na literatura, a saber: *biomimicry thinking*; *biomimicry design*; *top-down approach* e *bottom-up approach*; *biology-push* e *technology-pull*; *problem-based* e *solution-driven* (abordagem baseada no problema / baseada na solução); *challenge to biology* e *biology to design*; *biomimetics by induction* e *biomimetics by analogy*; oportunidade biomimética e oportunidade de design (BAUMEISTER et al., 2014; COHEN; REICH, 2016;

¹² Também conhecido como *thesaurus*, corresponde a um acervo, criado para uma determinada área do conhecimento, que ordena vocábulos e conceitos (descritores) inter-relacionados (MICHAELIS, 2021).

¹³ Segundo Wanieck et al. (2017), as etapas do processo de criação consideradas para esse critério de análise, são: 1) análise do problema; 2) abstração técnica do problema; 3) transferência para a biologia; 4) identificação dos potenciais modelos biológicos; 5) análise e seleção dos modelos biológicos de interesse; 6) abstração das estratégias naturais identificadas; 7) transposição para o design e a tecnologia; 8) teste e implementação.

FERRARI; CANCEGLIERI, 2019; QUEIROZ; AGUIAR; ARAÚJO, 2017). Trata-se de uma abordagem de projeto – muito difundida na obra de Baumeister et al. (2014) – que propicia a identificação de organismos visando a reconhecer e adaptar propostas criativas, além de incluir etapas relativas a todo o desenvolvimento da trajetória de design.

A ferramenta disponibiliza dois percursos para a prática biomimética (Anexo A): a Espiral do Design para Biologia (ou ferramenta *top-down*) e a Espiral da Biologia para o Design (perspectiva *bottom-up*) (BAUMEISTER et al., 2014). A primeira aproximação, a Espiral do Design para Biologia (parte superior do Anexo A) considera o desenvolvimento de um *briefing* de design, em que são estabelecidos os desafios a serem solucionados. Em seguida é realizada a identificação das funções pretendidas. Integra-se o Diagrama dos Princípios da Vida nas considerações de projeto para buscar formas, processos e fenômenos naturais que proporcionem soluções. Após a pesquisa, abstraem-se as estratégias por meio de *brainstorming* e suas particularidades são transformadas em funções de design para construir os projetos pretendidos. Na etapa de produção, são integradas características do elemento natural selecionado. Por fim, mensuram-se os resultados por meio de uma nova aplicação do Diagrama para identificar possíveis aprimoramentos ao projeto.

A ferramenta da Biologia para o Design (parte inferior do Anexo A) propõe um processo semelhante, mas em uma ordenação diferente. Inicia-se com a pesquisa livre de elementos naturais, por meio de buscas na literatura ou por observações no mundo real, que, em seguida são transformadas em projetos de design (DE PAUW; KANDACHAR; KARANA, 2012; VERSOS; COELHO, 2011). É indubitável que esse percurso requer uma maior familiaridade com conhecimentos biológicos para ser implementado.

3.2.2 Diagrama de Princípios da Vida (*Life's Principles*)

O Diagrama de Princípios da Vida (BAUMEISTER et al., 2014), reproduzido no Anexo B, fornece padrões abstraídos de estratégias encontradas em organismos para guiar as decisões ao longo da produção em design. Através de objetivos fundamentados nos padrões de operação de sistemas naturais da Terra, as criações são elaboradas e avaliadas quanto à meta principal de reintegração do ser humano ao meio natural. Durante todo o percurso criativo, considera-se a natureza como modelo, medida e mentora a partir da distribuição dos fatores-guia da ferramenta em seis categorias, definidas a seguir:

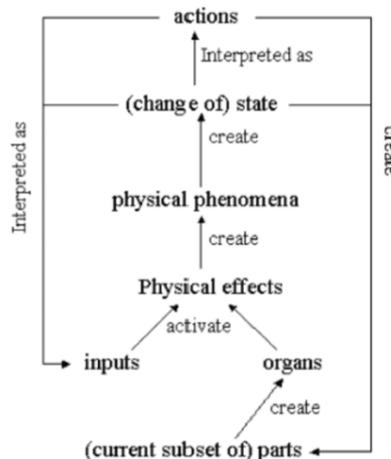
- a) Evoluir para sobreviver
- b) Adaptar-se às condições de mudança
- c) Estar em sintonia com o local e ser responsivo
- d) Usar química ecológica
- e) Ser eficiente na escolha de recursos
- f) Integrar desenvolvimento e crescimento

Em síntese, o Diagrama de Princípios da Vida é um modelo que reflete a adaptação de 3,8 bilhões de anos do mundo natural. É preciso insistir no fato de que ele fornece pontos estratégicos a serem considerados durante o desenvolvimento de projetos. Por meio dele, é possível estabelecer prioridades, guiar a tomada de decisões e avaliar se as criações são sustentáveis e adequadas ao contexto.

3.2.3 *GEMS of SAPPhIRE req sol e Idea-Inspire*

O modelo de causalidade *SAPPhIRE* também conhecido como *GEMS of SAPPhIRE req-sol* auxilia na descrição estrutural e funcional de sistemas naturais e técnicos. Esse recurso é composto por uma macrofase de exploração de requisitos e por outra de investigação de soluções. O instrumento define a pesquisa e experimentação a partir desses aspectos, oportunizando inovações por meio da ampliação e estímulo à geração de ideias e propostas para projetos. As etapas centrais de *GEMS of SAPPhIRE* (Figura 25) permitem: a) atividades de geração, avaliação, modificação e seleção; b) estudos de ação, fenômenos, *inputs*, efeitos e mudanças de estado; c) análises de requisitos; e d) construção de soluções (SRINIVASAN et al., 2011).

Figura 25 - Modelo *SAPPhIRE*



Fonte: Srinivasan et al., 2011.

GEMS of SAPPhIRE também consiste nos fundamentos que estruturam o *software* interativo *Idea-Inspire*. Este recurso digital compreende uma base de dados multimodal de sistemas biológicos e de sistemas técnicos, fornecendo analogias pertinentes para projetos em design. Tal ferramenta, foi elaborada para auxiliar na busca por sistemas biológicos, em sua compreensão pela equipe de projetistas e na transferência desses conhecimentos para cenários de ideação (CHAKRABARTI et al., 2017; SRINIVASAN et al., 2011).

A plataforma *Idea-Inspire* parte da adoção de dois modelos, um baseado em *function-behaviour-structure* e um outro *SAPPhIRE*. A busca na plataforma é decomposta em verbos, substantivos e adjetivos. Cada sistema é representado utilizando apenas um modelo *SAPPhIRE* ou seja, quando um projeto abrange sistemas de maior complexidade, é necessário aplicar mais de um modelo *SAPPhIRE* para sua representação, combinando estruturas e funcionalidades mais simples (CHAKRABARTI et al., 2017).

3.2.4 *Biomimicry Taxonomy Chart*

O *Biomimicry Taxonomy Chart* (Anexo C) revela-se útil para traduzir a problemática de projeto em termos biológicos, visto que organiza as terminologias associadas a organismos, princípios naturais e suas funções. Originalmente formulado pela *Biomimicry Guild*, é o principal sistema de classificação da plataforma *Ask Nature*. A adoção desse instrumento pode auxiliar na construção de uma ponte linguística entre designers, arquitetos, engenheiros e biólogos, para que colaborem no desenvolvimento de projetos biomiméticos. É sobretudo importante assinalar que, ao partir de mais questionamentos sobre as funções no campo natural, ao invés de iniciar o projeto com ideias pré-concebidas centradas no “mundo humano”, amplia-se o espaço potencial para a concepção de alternativas por meio da exploração de pensamentos abstratos vinculados à biosfera (BAUMEISTER et al., 2014).

3.2.5 *Ask Nature e Design Analogy to Nature Engine*

Dentre os instrumentos voltados para práticas biomiméticas, estão os repositórios digitais *Ask Nature* e *Design Analogy to Nature Engine*. Em cada uma das plataformas são organizados conhecimentos biológicos adaptáveis para projetos em design, arquitetura e engenharia. Ambos apresentam a possibilidade de busca por funções de organismos e por diversos exemplos de aplicações já existentes, como produtos e construções (ASK NATURE TEAM, 2021; GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2021). Por conseguinte, são

plataformas em constante atualização, que contribuem para inserir conhecimentos naturais em várias áreas de produção humana.

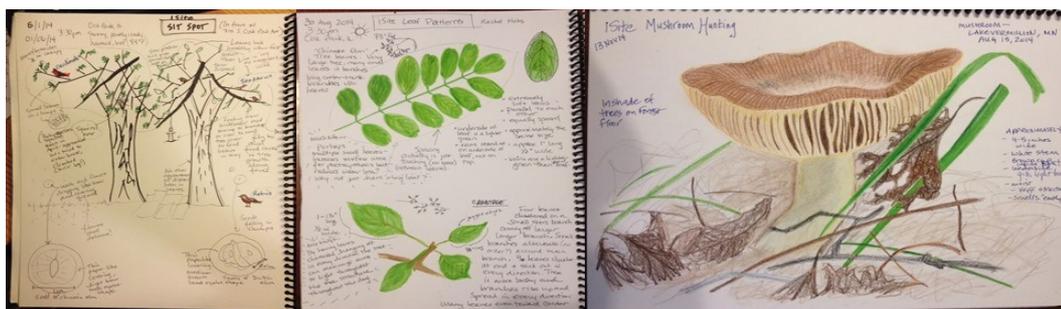
É interessante ressaltar que a *Ask Nature*, disponibilizada em 2008, possui uma ordenação de mais de 1700 “estratégias biológicas” a partir de um modelo taxonômico que as distribui em grupos, subgrupos, funções e estratégias. Além de ilustrar organismos e suas particularidades, a plataforma *Ask Nature* também vincula *cases* reais que adotaram a inspiração natural para gerar novos produtos e serviços (CHAKRABARTI et al., 2017).

Com relação à base *DANE*, introduzida em 2012, vale explicitar que se trata de uma ferramenta calcada em modelos *structure-behaviour-function* e que ordena características de elementos da natureza e de produtos. Os sistemas pertencentes à essa base são interligados hierarquicamente para representar conjuntos complexos (CHAKRABARTI et al., 2017).

3.2.6 *iSites*

É um procedimento utilizado em combinação com as Espirais Biomiméticas para conduzir observações na natureza (Figura 26). Favorece a redescoberta e a reconexão com o meio natural além de possibilitar a identificação de soluções vinculadas aos organismos existentes no local. Esse recurso é semelhante a um diário de observação, em que são registrados os aspectos que capturam a atenção dos designers (sejam eles: sons, imagens, odores ou sensações) por meio de palavras, ilustrações e/ou fotografias.

Figura 26 - Exemplos de *iSites*



Fonte: *Think Biomimicry* (www.thinkbiomimicry.com), acesso em 2021.

A ferramenta estimula a sensibilização dos projetistas à natureza, podendo servir de repositório imagético e textual para estimular novos projetos. Além disso, os *iSites* contribuem para o desenvolvimento das habilidades de observação e concentração. Instigam a curiosidade e aprimoram a percepção de conexão com o local em que se vive. A busca pelo entendimento sobre como os organismos e fatores do meio ambiente se inter-relacionam e modificam-se são refletidas no uso desse instrumento (BAUMEISTER et al., 2014).

3.2.7 Analogias Naturais

Explorar analogias no processo criativo remete à observação e a análise de soluções pré-existentes. Nesse cenário, o projetista empreende constatações visando a transposição de conhecimentos e referenciais para um contexto diferente, mais especificamente, para o campo de design (SILVA et al., 2019). As analogias são originárias da proposta denominada *synectics*, que compreende a realização de repetidas dinâmicas associativas para caracterizar um problema sob múltiplas perspectivas. Essa mescla entre elementos diversos de teoria, psicologia e técnica, proporciona um crescente número de ideias que podem convergir para resultados inovadores, principalmente em biônica e biomimética (FREITAS; ARRUDA, 2018; ARRUDA, 2018). Os autores focalizam os tipos principais de analogias: direta, pessoal, simbólica e fantástica. No que tange ao biomimetismo, Steadman (1988), Soares e Arruda (2018) ressaltam que existem as seguintes analogias inseridas no universo da natureza:

- a) Orgânica - resgate do equilíbrio entre humanidade, arte e sistemas mecânicos.
- b) Classificatória - examina procedimentos da botânica e zoologia para uso em design.
- c) Anatômica - comparações morfológicas com elementos funcionais.
- d) Darwiniana - construção de artefatos através de semelhanças com processos evolutivos.
- e) Sensorial - transferência de conceitos entre sistemas de controle e transmissão de informação dos organismos vivos.
- f) Morfológica - inter-relações das geometrias e padrões naturais (incluindo configurações estruturais em nível macro ou microscópico).
- g) Funcional - investigações de processos físicos, metabólicos e mecânicos naturais.
- h) Simbólica - casos de emulação abstratos e bioinspirados majoritariamente combinados com interpretações autorais.

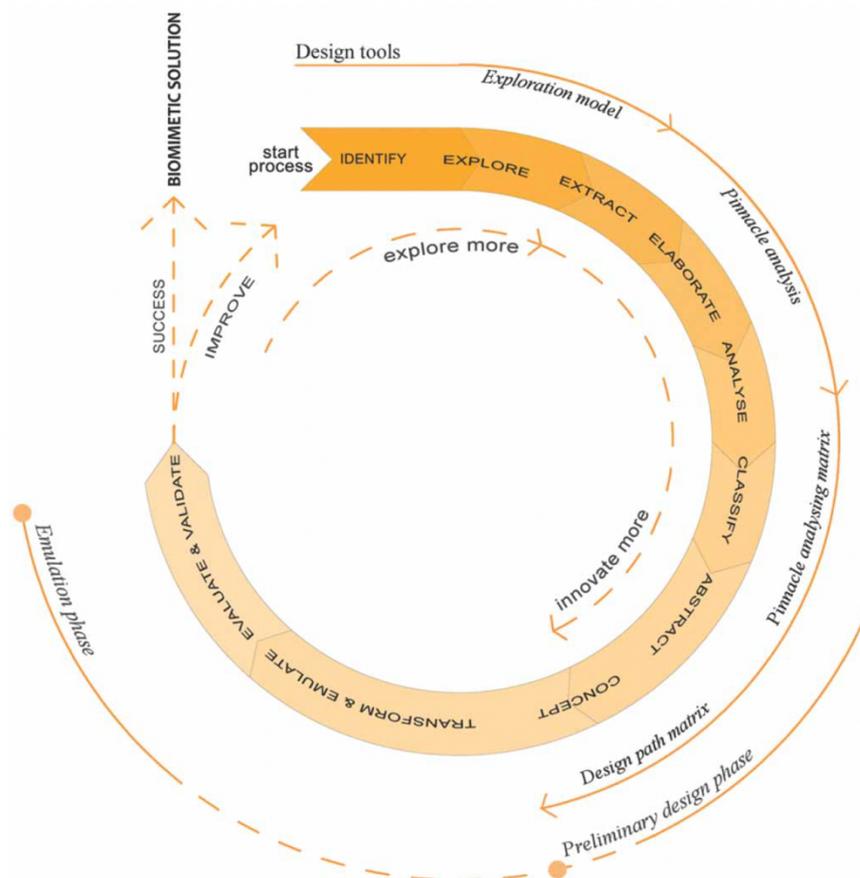
Algumas técnicas auxiliares que podem contribuir para a aplicação desse instrumento podem ser citadas, como: representações fotográficas, descrições verbais dos elementos analisados, esquematização gráfica (desenhos) e criação de modelos (SOARES; ARRUDA, 2018).

3.2.8 BioGen

Esse método (Figura 27) para a concepção bioinspirada pode ser utilizado nas mais variadas áreas criativas. Ele abarca etapas gerais semelhantes ao percurso criativo em design desde formulação do problema até as fases de implementação e avaliação. O BioGen

ênfatisa principalmente o momento de desenvolvimento conceitual das alternativas, ou seja, as fases preliminares de design. O método conta com ferramentas auxiliares que contribuem para o desenvolvimento dos projetos, como o diagrama do Modelo de Exploração, a Matriz de Análise de Pináculos e a Matriz do Percurso de Design. É um processo centrado em atividades que apresenta uma abordagem abstrata e baseada no problema (BARDANAH; KADRI, 2015; FAYEMI, 2016).

Figura 27 - Fluxograma ilustrativo do processo BioGen



Fonte: Badarnah; Kadri, 2014.

3.2.9 BioTRIZ

Essa ferramenta é originária da adaptação da Teoria para Resolução de Problemas Inventivos (TRIZ), para uso em projetos biomiméticos. Em outras palavras, trata-se de uma matriz heurística expansível, que permite estabelecer interconexões entre elementos de contradição técnica e princípios inventivos (VOLSTAD; BOKS, 2008).

Nesse instrumento (Anexo D), há seis categorias principais: a) campo ou energia; b) informação; c) substância; d) estrutura; e) espaço; e f) tempo (CUNHA, 2015; GAMAGE;

HYDE, 2012). O recurso também conta com uma base de dados biológicos em uma linguagem adaptada para projetistas de forma a facilitar o processo de disponibilização de informações.

A BioTRIZ estimula o estabelecimento de objetivos desejáveis para o projeto. Durante sua aplicação, o designer observa os parâmetros e características que pretende aprimorar nas colunas da matriz, e, a partir de uma etapa de seleção, escolhe a classe de atributos a que eles pertencerão. Em seguida, questiona-se como será possível melhorar tais critérios e parâmetros. Nesse momento, pode ponderar sobre os custos de oportunidade ao fazer suas escolhas com o auxílio dos fatores de contradição presentes nas colunas e linhas da matriz. O designer obtém uma perspectiva sobre quais são os principais impactos sobre a sua proposta de aprimoramento por meio da relação de contradições evidenciada pela matriz. Caso a geração de alternativas não seja efetiva, é sempre possível reformular e ajustar o problema de projeto, optando por uma nova combinação de fatores (GAMAGE; HYDE, 2012; SÁ; VIANA, 2021a).

3.2.10 Análise Tipológica

O instrumento norteia aplicação do biomimetismo e de projetos regenerativos. Em linhas gerais, o *framework* concentra-se em três perspectivas de emulação, respectivamente, de organismos, comportamentos (ou processos) e ecossistemas. Gamage e Hyde (2012) acrescentaram que essa divisão pode ser aprofundada com a adição de cinco outros fatores para o estudo e abstração e que correspondem à investigação de: forma, materiais, construção, processos e funções.

3.2.11 Teoria C-K

A teoria C-K é muito utilizada em projetos biomiméticos. Ela combina a associação de conhecimentos e o pensamento criativo para gerar inovações. Esse modelo é composto por dois espaços conceituais, a saber: espaço do conhecimento (K) e espaço do conceito (C).

Os conceitos são empregados para gerar questionamentos e pesquisas que respondam às questões de projeto que, por sua vez, irão estimular novas indagações dando prosseguimento ao fluxo e resultando em atributos para conceber ainda mais conceitos e propostas. Segundo esse modelo, as atividades de criação podem ser delineadas a partir de quatro critérios operadores principais $K \rightarrow C$ (pesquisa e geração de alternativas), $C \rightarrow C$ (organização de conceitos em estrutura de árvore), $C \rightarrow K$ (análise e validação de conceitos) e $K \rightarrow K$ (mecanismos de dedução ou experimentação). O uso deste instrumento pode contribuir para reduzir a fixação em ideias específicas por parte da equipe criativa, aprimorando o conhecimento e a criatividade (FAYEMI, 2016; NAGEL et al., 2016).

3.2.12 Análise do Ciclo de Vida

Em primeiro plano, a Análise do Ciclo de Vida (ACV, *Life Cycle Assessment* ou LCA) refere-se a uma operação quantitativa para a avaliação do impacto ambiental. Por certo, é um processo que sistematiza um levantamento de informações, desde a origem e extração dos recursos até o descarte do material na ponta da cadeia produtiva. Assim, engloba o extenso conjunto de interações ao longo de todo o ciclo de vida de um produto. Desse modo, para lidar com a escala crescente de complexidade, são utilizados *softwares* e bancos de dados específicos para essa área (MAGNAGO; AGUIAR; PAULA, 2012; SANTOS et al., 2018; VEZZOLI; MANZINI, 2008).

3.2.13 *Biomimetric Assistance Tool*

Trata-se de um instrumento quantitativo que incorpora aspectos da Análise do Ciclo de Vida. Com esse enfoque, avalia a *performance* de propostas em design biomimético e facilita a tomada de decisões no decorrer do processo criativo, principalmente no que tange à sustentabilidade. Essa ferramenta está fundamentada nos seguintes pilares: a) eficiência e frugalidade; b) preservação e resiliência; e c) circularidade e abordagem sistêmica. Nota-se que todos esses critérios estão vinculados aos fatores do Diagrama de Princípios da Vida. A *Biomimetric* reúne recursos de avaliação utilizados em *softwares* de LCA, e bases de dados como a *Ecoinvent*, proporcionando a medição dos impactos tanto sobre o meio ambiente quanto sobre a saúde humana. Soma-se a isso, a viabilidade de informações como a pegada carbônica resultante dos projetos (TERRIER; GLAUS; RAUFFLET, 2019).

3.2.14 *Ecosystem Services Analysis*

O recurso viabiliza a investigação das diferenças mensuráveis presentes no ecossistema de um determinado local antes e após a urbanização na área. Nessa conjuntura, emergem metas para o desenvolvimento sustentável baseadas nas necessidades de uma determinada região onde se aplicou o instrumento. Métricas como a taxa pluvial ao ano e a retenção de água em um espaço são dados que fornecem uma análise consistente e podem ser inseridos nesse recurso. Zari (2017) admitiu que, após a análise do cenário original (pré-urbanização) e daquele resultante (pós-urbanização), avaliam-se as possibilidades de design, *redesign*, adaptação e evolução ao longo do tempo de: relações, comportamentos e sistemas no local.

3.2.15 BIOS

A ferramenta de Ferrari e Canciglieri (2019) favorece o desenvolvimento de produtos biomiméticos considerando critérios de sustentabilidade. O BIOS é estruturado em três eixos: “Projeto Informacional”; “Projeto Conceitual” e “Projeto Detalhado”. Cada um deles possui subcategorias associadas. No “Projeto Informacional” identifica-se a oportunidade de criação¹⁴; define-se o problema; são selecionadas ferramentas auxiliares para o design (ex. *brainstorming*, mapas mentais) e elabora-se o *briefing*. Na fase de “Projeto Conceitual” são utilizados recursos que representam critérios de “certificação sustentável”, mais especificamente, quadros com fatores de concepção e composição de produtos, além da Escala de Likert. Dessa maneira, as propostas ideadas são avaliadas em termos de seu atendimento aos parâmetros predefinidos. Em seguida, são geradas soluções, tendo em vista o estudo de elementos biomiméticos e sua relação com os aspectos sustentáveis previamente estipulados. Adiante, no “Projeto Detalhado”, seleciona-se a alternativa mais adequada ao contexto (verificação de qualidade e proposta de valor para o mercado). Essa etapa também inclui a transformação da solução/alternativa em um produto (conceito, *layout*, ergonomia, *user interface* e *user experience*) e o detalhamento técnico do mesmo. Ao cumprir essas etapas, encaminha-se o artefato para a produção (FERRARI, 2017; FERRARI; CANGIHLIERI, 2019).

3.2.16 *Biomimicry Card Decks*

Os conjuntos de cartas são recursos muito difundidos em design, principalmente por serem uma estratégia associada à *gamificação* que oportuniza uma maior interação entre os membros de uma equipe de projeto. Essas ferramentas comumente exibem vocábulos e definições vinculados a etapas do percurso criativo. Também podem reunir conhecimentos de áreas específicas em cada carta, ou até mesmo apresentar definições de novas ferramentas e dinâmicas criativas que podem ser adotadas no momento de projeto. É essencial que as cartas sejam interpretadas e combinadas pelos designers para se adequarem ao contexto.

Em biomimética, existem instrumentos semelhantes que facilitam o acesso a conhecimentos para equipes de projetistas, como: *Biomimicry Resource Cards*, *Life's Principles Play Deck*, *Life's Principles Leadership Cards*, *Biomimicry GoFish*, *Biomimicry +*

¹⁴ A etapa de identificação de oportunidade na ferramenta BIOS estabelece dois percursos criativos semelhantes à definição das “Espirais Biomiméticas”: a “oportunidade biomimética” é iniciada com a identificação de problemas na esfera humana; e a “oportunidade de design”, parte diretamente de conhecimentos naturais (FERRARI; CANGIHLIERI, 2019).

Packaging Innovation Toolkit (BIOMIMICRY 3.8, 2016); *IDEO Nature Cards* (NATURE, 2021), *Jeu du Vivant* (JEU, 2021), *Biomimicards* (CIRCULAB, 2021). Frequentemente, os baralhos de cartas biomiméticas e bioinspiradas se estruturam a partir de princípios naturais ou organismos inspiradores. São compostos por breve descrição desses aspectos biológicos e os ilustram com fotografias ou desenhos esquemáticos. Alguns conjuntos também exibem *cases* (aplicações de design biomimético) e cartas direcionadas para fases de aplicação e mensuração. Muitos dos *decks* estão disponíveis em suportes físicos (impressos); outros deles estão acessíveis via plataformas digitais (ex. *Biomimicards* e *Jeu du Vivant*). Algumas dessas ferramentas virtuais disponibilizam a funcionalidade adicional de sorteio aleatório de cartas para cada dinâmica de geração de ideias.

3.2.17 *Engineering-to-Biology Thesaurus*

O tesouro emprega um modelo funcional para retratar o universo biológico em design. Esse instrumento possui uma abordagem que parte do estudo da natureza (*biology to design*), de onde são extraídos elementos que, posteriormente, poderão inspirar novas criações. Os termos biológicos incluídos nesse tesouro estão correlacionados ao campo de projeto, a partir de sua junção com funções semelhantes ou com algum vocábulo proveniente do léxico da Base Funcional, que contribui para a respectiva modelagem funcional e a representação abstrata dos sistemas. Em suma, é uma ferramenta para mapeamento e correlação de terminologias entre dois campos distintos que evidencia conexões por meio de sinônimos (FU et al., 2014; NAGEL et al., 2016; NAGEL; STONE; MCADAMS, 2010).

3.2.18 BIOPS

Esse tesouro também conhecido como *Biologically-Inspired Problem Solving* é uma plataforma digital desenvolvida pelo instituto *Fraunhofer*. Nele, são reunidas pesquisas funcionais-tecnológicas e modelos biológicos. Além disso são disponibilizados *links* que permitem acesso às bases de dados e patentes relacionadas aos elementos previamente mencionados (FAYEMI, 2016).

3.2.19 *Unified Ontology for causal-function modeling in Biologically Inspired Design*

A ferramenta – também conhecida como UNO-BID – teve sua construção embasada em uma combinação do modelo *SAPPhIRE* com o recurso digital *DANE*, visto que se constatou uma forte complementaridade entre os dois. O UNO-BID combina os modelos funcionais e

causais em uma única abordagem, ou mais especificamente, em uma única ontologia, adequada para a construção de um *framework* para design biologicamente inspirado. Levando em conta suas especificidades, é notório que esse instrumento pode contribuir para as fases de desenvolvimento preliminar e conceitual em design biomimético (FAYEMI, 2016; ROSA; CASCINI; BALDUSSU, 2014).

3.2.20 *Four-Box Method e T-Chart*

A ferramenta *Four-Box* é uma matriz aplicável na etapa de formulação de problemas. Nela estão incluídos os seguintes campos: ambiente operacional, função, especificações relacionadas e critérios de performance. O instrumento tem por objetivo contribuir para o delineamento dos requisitos de projeto partindo da inserção de conteúdo descritivo em cada um dos campos na matriz. Estudos mostram que tal recurso pode ser adotado rapidamente e de modo eficaz em equipes de projetistas tanto na etapa de formulação do problema quanto no momento de avaliação de analogias de design bioinspirado (FAYEMI, 2016, HELMS, GOEL, 2014).

O *T-Chart* permite a comparação e avaliação das analogias por meio da análise de duas representações diferentes estruturadas em *four-box*, sendo uma voltada para a descrição e representação do problema e outra vinculada ao modelo biológico (FAYEMI, 2016, HELMS, GOEL, 2014).

3.2.21 *Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades (DCGDPIF)*

A proposta de López et al. (2017) dedicou-se à investigação do reino vegetal para aplicação na esfera projetual de fachadas. Esse recurso está estruturado no formato de um quadro, que compreende múltiplas fases do processo criativo. Cumpre mencionar que, mesmo com essa abrangência, a ferramenta enfatiza principalmente a definição das etapas preliminares, da pesquisa biológica e do desenvolvimento conceitual. No quadro são preenchidas informações atinentes às características climáticas do local em que se pretende aplicar o projeto. Além disso, na etapa de pesquisa biológica, o(s) organismos(s) escolhidos são especificados com a adição de dados que evidenciam suas características (respondendo às perguntas: o que, por que e como). Então, são adicionados aspectos relativos ao “fazer criativo” nos campos de ideias de aplicação, inovação e geração de conceito de design.

Resumidamente, o DCGDPIF conta com três eixos, um concentrado em informações bioclimáticas, outro direcionado à pesquisa de elementos da natureza (analítico e científico) e

um terceiro voltado para a arquitetura e o design (dedutivo e criativo), sendo abarcadas etapas de análise, síntese e avaliação do projeto.

3.2.22 Ferramenta de Solução Biomimética (FSB)

Esse recurso combina conhecimentos biomiméticos com parâmetros dos sistemas e instrumentos de certificação ambiental para construções *LEED* e *AQUA-HQE*¹⁵. A ferramenta de Camargo (2016) visa: gerar propostas de design para termorregulação que aliem sustentabilidade ao meio construído estimulando economia e eficiência. Tal instrumento está vinculado às etapas de pesquisa biológica e aos estágios iniciais do desenvolvimento conceitual de alternativas. A FSB é estruturada em um quadro, que, ao ser preenchido destaca quais percursos de projeto mais atendem aos critérios das certificações, isto é, que demonstram maior potencial para sustentabilidade.

3.2.23 *Multi-Biomechanism Approach* (M-BA)

O *framework* (à direita, no Anexo F), de abordagem baseada no problema, auxilia na inclusão da multifuncionalidade em projetos, dado que, para Kuru et al. (2020), é nítido que a natureza representa uma fonte inesgotável de exemplos multifuncionais de relevância para aplicação na esfera da produção humana. Levando isso em conta, há quatro etapas principais no M-BA: identificar o problema; investigar e selecionar organismos; adotar a multifuncionalidade; desenvolver alternativas de design biomimético.

¹⁵ *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)* é uma ferramenta de certificação ambiental criada para estimular a adoção de práticas sustentáveis em arquitetura, considerando o percurso desde o projeto da edificação, construção, até seu uso e manutenção. O *AQUA-HQE* (Alta Qualidade Ambiental / *Haute Qualité Environnementale*) é outra certificação para o campo da construção. Esse selo está associado a práticas e sistemas que consideram fatores, tais como: gestão patrimonial, economia de recursos, redução de poluição e resíduos (FUNDAÇÃO VANZOLINI, 2021; GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL, 2021).

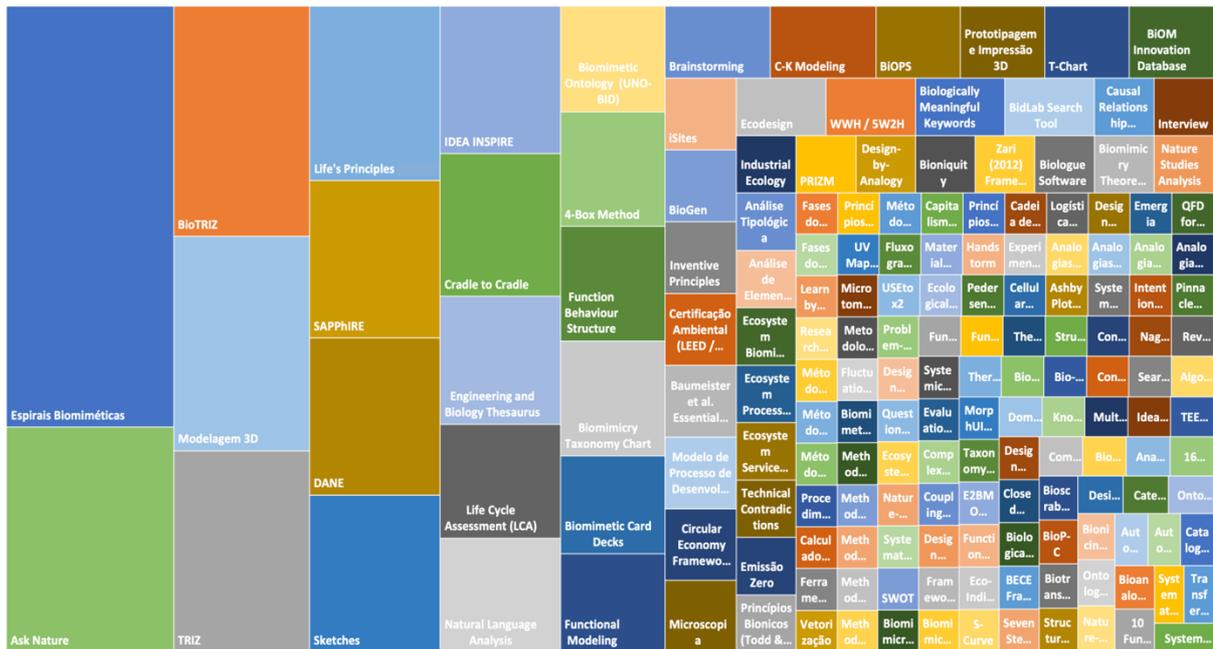
3.3 LEVANTAMENTO DE FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS

Considerando o grupo de instrumentos apresentados anteriormente, foi realizada uma nova exploração da literatura visando: evidenciar quais ferramentas foram mais adotadas em projetos biomiméticos. Para tanto, foram reunidas as informações atinentes às ferramentas previamente encontradas nos trabalhos provenientes da pesquisa realizada com o auxílio do TEMAC (descrita no Capítulo 2). Como resultado disso, os processos e recursos mencionados e/ou adotados nos trabalhos foram organizados e contabilizados. Vale retomar que as publicações selecionadas para aquele levantamento foram obtidas nas bases de dados: *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*. Compete mencionar que esse conjunto de publicações está ilustrado nos apêndices A, B e C respectivamente.

Contudo, constatou-se que nem todos os trabalhos auferidos mencionavam as ferramentas biomiméticas ou de design utilizadas para atingir seus resultados de projeto. Assim, um conjunto limitado de informações foi obtido. Para sanar essa escassez de detalhamento sobre ferramentas biomiméticas, optou-se por empreender uma nova busca por trabalhos, desta vez apenas na base *Google Scholar*. Esse levantamento foi conduzido para verificar outras contribuições de interesse que pudessem não ter sido incluídas ainda. Foram utilizados os descritores “*biomimicry*”, “*method*” e “*tool*” diretamente na plataforma *Google Scholar*. Dois intervalos para a seleção foram determinados: de 1990 a 2021, para coletar as publicações mais citadas; e um segundo período, de 2018 a 2021, em que foram escolhidos qualitativamente os trabalhos que mais se relacionavam com o escopo da presente pesquisa em design. Este levantamento foi conduzido no dia 20/03/2021.

As publicações que ainda não haviam sido coletadas e que foram consideradas relevantes para o contexto desta Dissertação foram distribuídas no Apêndice D. Os dados podem ser visualizados na Figura 28 (versão ampliada no Apêndice F). De acordo com a área ocupada na imagem, essa ilustração mostra quais recursos foram mais frequentemente mencionados e/ou adotados em projetos biomiméticos.

Figura 28 - Ferramentas biomiméticas mais mencionadas na literatura



Fonte: A autora, 2021.

Em linhas gerais, dentre os grupos ferramentais mais numerosos, destacaram-se as ‘Espirais Biomiméticas’¹⁶ ($n = 42$). Esse é um resultado esperado, uma vez que fazem parte de uma proposta de projeto muito disseminada pelo *Biomimicry Institute* (2021) e por Baumeister et al. (2014) além de serem um recurso listado na maioria das plataformas digitais sobre o assunto. Vale comentar sobre outras ferramentas frequentemente divulgadas por integrantes do grupo de pesquisa e consultoria *Biomimicry 3.8* e do *Biomimicry Institute*, como: o Diagrama de Princípios da Vida ($n = 14$), a plataforma online *Ask Nature* ($n = 22$) e os *iSites* ($n = 3$). Esses instrumentos são muito conhecidos dada a sua recomendação como diretrizes para auxiliar na elaboração dos projetos submetidos ao *Biomimicry Global Design Challenge*¹⁷.

Na ilustração, também se encontra em destaque a matriz heurística BioTRIZ ($n = 19$), que contribui na geração de soluções que agregam parâmetros de contradição nos requisitos de projeto (VOLSTAD; BOKS, 2008). Relembra-se que esse recurso foi originalmente derivado da ferramenta TRIZ ($n = 16$).

¹⁶ Vale salientar que nessa categoria de “espirais biomiméticas” foram contabilizadas abordagens semelhantes, que apresentam outras nomenclaturas, como por exemplo: “*top-down approach*”, “*bottom-up approach*”; “*challenge to biology*” e “*biology to design*”.

¹⁷ O *Biomimicry Global Design Challenge* é um desafio internacional para equipes de projetistas, que ocorre anualmente, criado pelo *Biomimicry Institute*. Seu principal objetivo consiste em abordar questões críticas de sustentabilidade com soluções inspiradas na natureza, além de criar um caminho para que mais produtos biomiméticos tenham impacto no mercado (BIOMIMICRY INSTITUTE, 2020).

É possível visualizar, na área em ocre à esquerda da figura, a ferramenta *SAPPhIRE* ($n = 12$). Esse modelo descritivo de funções favorece a geração de alternativas; sua avaliação crítica; além da realização de ajustes, estudos de ação, fenômenos, *inputs*, efeitos e mudanças de estado (SRINIVASAN et al., 2011). O uso desse instrumento consiste na base para a organização da ferramenta digital *Idea-Inspire* ($n = 11$).

Outro recurso para o desenvolvimento de propostas biomiméticas que obteve um grande número de menções na literatura foi a plataforma *DANE* ($n = 12$). Tal como a *Ask Nature*, essa ferramenta consiste em um repositório digital destinado à classificação e disponibilização de conhecimentos biológicos e técnicos para equipes de projeto (GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2021).

Instrumentos direcionados especificamente para a análise de aspectos sustentáveis também foram evidenciados no levantamento. Dentre eles está o *ecosystem for biomimetic design* que emula a complexidade das funções e dos processos contidos em um ecossistema natural, para produzir criações mais eficientes e eficazes. Esse modelo promove, inclusive, a perspectiva holística por parte dos projetistas, pois é uma aproximação mais profunda da biomimética; portanto, oportuniza empenhar ações para reduzir os impactos das mudanças climáticas por meio da otimização de recursos (ZARI, 2017). Nessa esfera também podem ser citadas ferramentas como: Análise do Ciclo de Vida (ACV), *Cradle to Cradle*, *BioMIMETRIC Assistance Tool* e recursos de certificação ambiental (ex. *LEED*, *AQUA-HQE*).

O presente estudo também incluiu ferramentas e técnicas para visualização e materialização que podem ser adotadas em projetos de design biomimético. Neste grupo estão recursos de renderização bidimensional como *sketches* e *iSites*, além de técnicas para simulação tridimensional, como prototipagem digital e física, modelagem paramétrica, estudos digitais de desempenho, observações em microscopia eletrônica de varredura e análise de elementos finitos.

Em síntese, grande parte das ferramentas se concentraram na prática criativa e de design propriamente ditas, ou seja, estavam voltadas para as etapas de pesquisa biológica, desenvolvimento conceitual e geração de alternativas. Outros grupos de destaque consistiram em processos orientados para a perspectiva ecossistêmica, para a sustentabilidade e para técnicas de modelagem 3D e prototipagem.

CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS: UMA ANÁLISE SOBRE FERRAMENTAS BIOMIMÉTICAS EM PROJETOS DE DESIGN

O objetivo do meu trabalho: o estudo da natureza,
o amor pela arte da natureza e a necessidade
de expressar o que se sente no coração

Émile Gallé

Inicialmente, serão detalhados no presente capítulo, objetivos e procedimentos metodológicos adotados na condução da investigação sobre uso de ferramentas biomiméticas em projetos de design. Em seguida, serão descritos, analisados e comparados os casos selecionados para essa pesquisa, discutindo-se esses trabalhos à luz da literatura reportada na primeira parte da Dissertação.

4.1 ESCOLHA METODOLÓGICA

É primordial explicar acerca da opção pela abordagem de estudo de casos múltiplos. De acordo com Yin (2001), o método de estudo de caso viabiliza a investigação de fenômenos contemporâneos complexos, inseridos em um contexto real, principalmente quando as fronteiras do fenômeno e do contexto não estão bem definidas. Nessas circunstâncias, o pesquisador tem controle restrito, não sendo possível manipulação direta. Essencialmente, o estudo de caso busca esclarecer um conjunto de ações e decisões, seus resultados e impactos, a partir de indagações do tipo “por que” e “como”. Concentra-se em um cenário específico, descrevendo-se um fenômeno ou um acontecimento de maneira pormenorizada para alcançar uma compreensão aprofundada do objeto de estudo. Por meio da análise e interpretação dos dados coletados, o estudioso pretende desvendar novas relações e interconexões (WIMMER, 1996; SÁ, 2010).

De modo geral, essa escolha é mais indicada quando se pretende investigar novos conceitos e/ou verificar qualitativamente como elementos pertencentes a uma teoria são aplicados no mundo ‘real’. Além do estudo de caso único, é possível eleger a modalidade de estudo de casos múltiplos que propicia comparações, o que pode oferecer evidências mais fortes do que um caso isoladamente estudado (NETO, ARRUDA, 2017).

Cabe ao pesquisador definir quantos e quais casos deverão compor seu estudo, sendo que a seleção dos cenários de investigação precisa ser feita criteriosamente para permitir resultados semelhantes entre casos (replicação literal), ou prever resultados contrastantes entre eles (replicação teórica) com base em teorias e hipóteses. Uma multiplicidade de fontes pode ser empregada nessa abordagem metodológica, ponderando-se o imperativo de uma postura crítica, uma vez que as

informações contidas nesses registros podem não garantir completa acurácia, como também podem não representar a totalidade do evento (MILES; HUBERMAN, 1994; YIN, 2001).

4.2 DELINEAMENTO DA INVESTIGAÇÃO E SEUS OBJETIVOS

Realizou-se uma pesquisa de natureza exploratória e descritiva que teve por objetivo geral: descrever, analisar, discutir e comparar o uso de ferramentas biomiméticas em projetos de design voltados para sustentabilidade. Estabeleceram-se como objetivos específicos:

- selecionar, descrever e analisar projetos de design que empregaram ferramentas biomiméticas;
- identificar vantagens e limites do uso de ferramentas biomiméticas em projetos de design voltados para sustentabilidade; e
- comparar as ferramentas biomiméticas adotadas nos projetos de design selecionados.

Considerando os requisitos do método escolhido, foram estipulados critérios para seleção dos casos. Isso posto, buscou-se um cenário semelhante e, para tanto, identificaram-se trabalhos com similaridade quanto ao ‘objeto’ do projeto, sendo que em cada um deles foi aplicada uma ferramenta biomimética distinta.

No total, integraram o arcabouço da investigação apresentada nesse capítulo, seis projetos – orientados para o desenvolvimento de fachadas¹⁸ geradas a partir do uso de instrumentos criativos de biomimética¹⁹. Tais recursos foram apontados nos itens 3.2 e 3.3 desta Dissertação. Embora na fronteira entre os campos da arquitetura e do design, compete clarificar que esse tipo de cenário criativo (fachadas biomiméticas) revelou mais documentos acessíveis²⁰ e com detalhamento suficiente para sustentar as análises, além de mostrar mais variabilidade de ferramentas biomiméticas.

¹⁸ Nesta Dissertação, ‘fachada’ será considerada como sinônimo das seguintes expressões: *façades*, *building skins* e *building envelopes* e seus respectivos correspondentes em língua portuguesa. O conceito corresponde a todas as faces de uma construção, (sem distinção entre frontispício, paredes ou teto). Trata-se de uma interface entre o meio externo e o ambiente interno que contribui na promoção de funções de suporte, controle, acabamento e na distribuição de serviços. Assim, as fachadas desempenham um papel fundamental como agente moderador determinante da qualidade e do controle sobre as condições de um local. Seu projeto pode afetar de forma decisiva tanto a performance no uso de energia em construções, como aprimorar a sensação de conforto interno (LÓPEZ et al., 2017).

¹⁹ Verificou-se que existem numerosos projetos de fachadas biomiméticas e bioinspiradas na literatura. Alguns exemplos de criações arquitetônicas, que incluem os aportes de conhecimentos da natureza, são: *Council House 2*, *Eastgate Building* e *One Ocean Thematic Pavillion* (LÓPEZ et al. 2017; PAWLYN, 2011; VOGEL et al. 2019). Além disso, vale mencionar os módulos *Solar Ivy*, os quais podem ser utilizados em fachadas (Capítulo 1, Figura 6).

²⁰ Cabe lembrar que o trabalho de Hosseini et al. (2019), que se encontra destacado como a segunda publicação de maior relevância nos mapas de *coupling* das bases *Web of Science* e *Scopus*, tratou da temática de fachadas arquitetônicas biomiméticas, cinéticas e responsivas a estímulos do ambiente.

Constatou-se ainda que trabalhos com objetos pertencentes a uma escala menor (comparativamente com as edificações), produzidos unicamente na área do design, tinham muitas diferenças entre si, tanto em termos de organismos ‘inspiradores’, como de problemas de projeto e resultados, sem mencionar o fato de que nem sempre descreviam o uso das ferramentas biomiméticas satisfatoriamente. Por conseguinte, empreendeu-se uma pesquisa que possui uma perspectiva multidisciplinar, envolvendo aspectos do campo arquitetônico (fachadas biomiméticas), cuja ênfase foi o processo projetual (apresentado no item 3.1 desta Dissertação). Dessarte, a investigação foi organizada a partir de dados publicados na literatura científica, veiculada na base *Google Scholar*. É indispensável elucidar, também, que o caráter documental desta investigação foi imposto pelas restrições sanitárias ocasionadas pela pandemia da Covid-19 durante a realização do curso de Mestrado.

Para descrição e comparação dos casos e das ferramentas, foram adotados os seguintes parâmetros (Quadro 6), adaptados e expandidos a partir das categorias para análise e classificação de ferramentas biomiméticas propostas por Wanieck et al. (2017).

Quadro 6 - Categorias para análise dos casos e das ferramentas

Categorias de Análise	Informações
Tipo	Quadro, matriz, tesouro, base de dados, diagrama, tabela, taxonomia, ontologia, processo/ <i>framework</i>
Abordagem	Baseada no problema (design) / baseada na solução (biologia)
Tipo de acesso e distribuição	<i>Online</i> / impressa
Acessibilidade	Gratuita, limitada, comercial
Usada em sua totalidade?	Sim / não
Dependência de outras ferramentas	Sim / não
Etapa do processo criativo	Etapa 1: planejamento / exploração Etapa 2: criação conceitual / definição Etapa 3: reflexão / desenvolvimento Etapa 4: prototipação / implementação Etapa 5: entrega / detalhamento
Etapa final do caso	Descrição da etapa
Organismo(s) selecionado(s)	Descrição do organismo selecionado
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Descrição do(s) princípio(s) natural(is) utilizado(s)
Princípios da vida utilizados	Adaptar-se às condições de mudança / ser responsivo e estar em sintonia com o local / usar química ecológica / ser eficiente na escolha de recursos / integrar desenvolvimento e crescimento / evoluir para sobreviver
Princípios biofilicos utilizados	Conexão visual / conexão não visual / presença de água / luz dinâmica e difusa / estímulos sensoriais não rítmicos / variabilidade térmica e de fluxo de ar / conexão com sistemas naturais / padrões biomórficos / materiais naturais / complexidade e ordem / panorama / refúgio / mistério / risco
Sustentabilidade	Sim / não
Métricas de desempenho no caso	Sim / não

Fonte: A autora, 2021.

A seguir, serão enfocados os casos que compõem o presente estudo. Primeiramente, será apresentada a ferramenta biomimética adotada pelos projetistas, sendo que cada uma delas já foi brevemente introduzida no Capítulo 3. Em seguida, o caso será descrito e apreciado em função do uso da ferramenta. Ao final de cada caso, será lançado um quadro síntese. É imperativo explicar, igualmente, que as figuras ilustrativas das ferramentas serão reproduzidas no formato e na língua originais das publicações. Dessa maneira, intenciona-se facilitar análises com outros trabalhos já divulgados na literatura especializada, assim como futuras pesquisas análogas.

4.2.1 Caso 1 - *Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades*

Essa ferramenta biomimética auxilia na criação de produtos arquitetônicos alicerçados no estudo de vegetais. López et al. (2017) justificaram esse interesse específico, pois as plantas são fundamentalmente definidas pela ausência de ampla movimentação no espaço precisando, mesmo assim, se adaptar às condições do meio circundante. Os autores estabeleceram um paralelo entre tais características e o contexto das construções e edifícios, uma vez que também estão fixos em um espaço e encontram-se submetidos às variações climáticas locais (LÓPEZ et al., 2017).

A Figura 29 mostra que o instrumento *Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades* (DCGDPIF) possui três eixos: um vinculado a características bioclimáticas, outro relacionado à natureza (etapa analítico-científica), em que se identificam estratégias adaptativas de vegetais e suas particularidades, funções, processos e adaptações; e um terceiro campo referente à arquitetura (etapa dedutivo-criativa), orientada para a abstração e a transformação de ideias em propostas de produtos para fachadas. Já a busca por organismos inspiradores está ordenada em dois núcleos de investigação: mecanismos dinâmicos²¹ e estratégias estáticas²², tal como pode ser verificado na Figura 30. Ambas as classificações são subdivididas de acordo com a escala de observação (macro e microscópica). As informações climáticas, inseridas na porção em azul à esquerda²³, referem-se a ambos os eixos (natureza e arquitetura). Nessa coluna, é ressaltada a importância de considerar o contexto bioclimático local e suas características tanto durante a pesquisa biológica como no projeto do artefato.

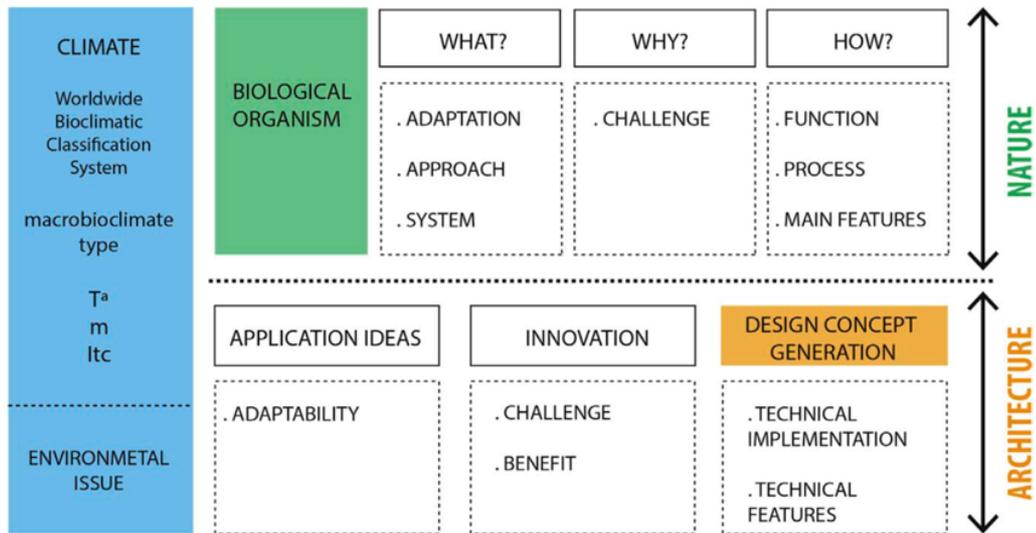
Mesmo que a ferramenta inclua fatores para implementação e detalhamento técnico, suas indicações ainda são muito sucintas. Dessa forma, considera-se que a ênfase do DCGDPIF reside na estruturação das etapas preliminares conceituais do projeto, desde a definição dos objetivos e a pesquisa biológica até a geração de alternativas.

²¹ Organismos classificados como “mecanismos dinâmicos” respondem a estímulos externos pelo desencadeamento de pequenas movimentações em sua estrutura, como tropismos e nastias. Exemplos desses mecanismos, na escala macroscópica, são as folhas de *Mimosa pudica* e, na escala microscópica, é possível citar o movimento estomático (LÓPEZ et al., 2017).

²² Correspondem a “estratégias estáticas”, as propriedades multifuncionais encontradas em estruturas e superfícies vegetais, como: capacidade de reflexão de luz; existência de camadas superhidrofóbicas ou superhidrofílicas. São exemplos na escala macroscópica as espécies *Fenestraria rhopalophylla* e *Cerastium tomentosum* e, na escala microscópica, a espécie *Colocasia esculenta* (LÓPEZ et al., 2017).

²³ É conveniente esclarecer as siglas na área em azul da ferramenta: T^a representa o valor da temperatura média anual em graus Celsius; m equivale à temperatura média do mês mais frio do ano; I_{tc} (*Compensated Thermicity Index*) é um índice bioclimático que quantifica a intensidade de frio no inverno (um fator limitante para certas atividades), integrando compensações ao índice térmico simples. O cálculo do I_{tc} permite que sejam feitas comparações entre as localidades (FERNANDEZ; FERNANDEZ, 2017).

Figura 29 - Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades



Fonte: López et al., 2017.

Figura 30 - Detalhe da ferramenta DCGDPIF

CLIMATE Worldwide Bioclimatic Classification System macrobioclimate type	DYNAMIC MECHANISMS		STATIC STRATEGIES	
	macro-scale	micro-scale	macro-scale	micro-scale
	structural system	structural system	structural system	structural system
	environmental issue	environmental issue	environmental issue	environmental issue
	plant example	plant example	plant example	plant example

Fonte: López et al., 2017.

4.2.1.1 Apresentação do caso

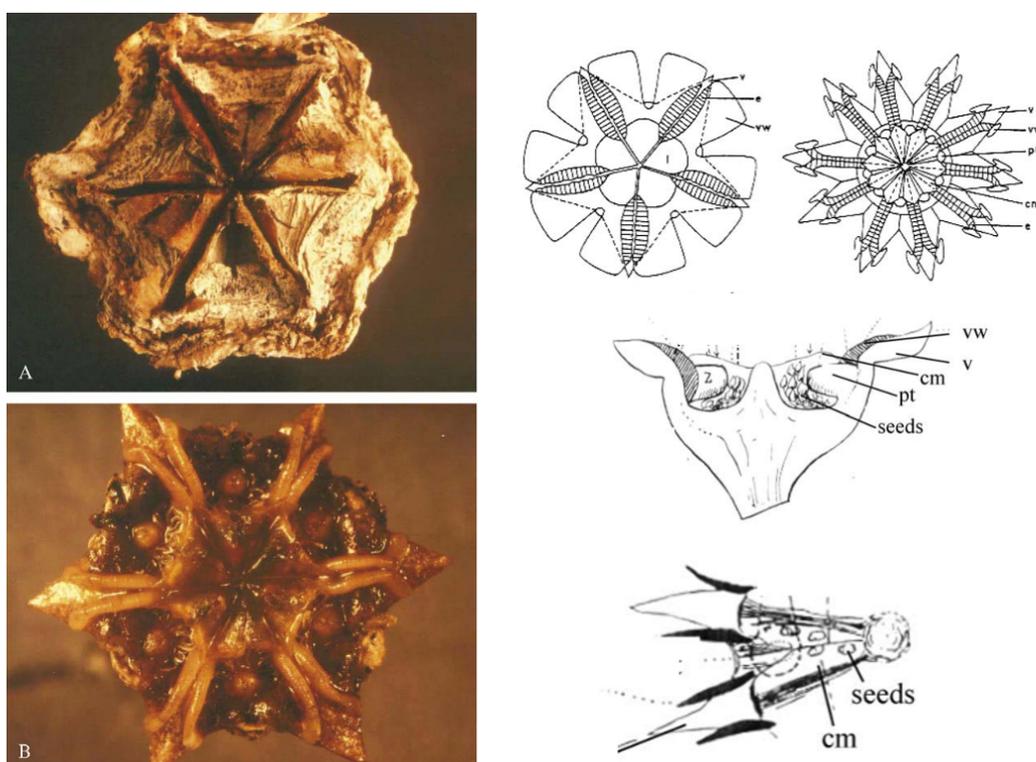
A publicação de López et al. (2017) abarcou duas demonstrações da ferramenta DCGDPIF. Para fins desta Dissertação, será analisado apenas o primeiro cenário voltado para a elaboração de fachadas adaptativas a partir de mecanismos dinâmicos. López et al. (2017) planejaram um sistema para edifícios, estabelecidos em regiões chuvosas, que integrasse mecanismos responsivos às variações do ambiente externo. A delimitação espacial adotada consistiu em regiões europeias de clima mediterrâneo. Assim, no eixo em azul do DCGDPIF, foram registradas informações como: temperatura média anual (T^a); temperatura mínima no mês mais frio do ano (m) e *compensated thermicity index* (Itc). Nessa etapa, priorizou-se a presença de água da chuva como aspecto norteador.

Em seguida, os itens pertencentes ao eixo da natureza foram preenchidos, assinalando-se os organismos de interesse para o projeto, suas adaptações e funções. Nesse cenário, foram determinados os mecanismos naturais, sua classificação e o desafio biológico enfrentado pelo vegetal, nesse caso, equivalente à dispersão de sementes. Foi perceptível que os organismos

mais adequados para o projeto seriam plantas do gênero *Mesembryanthemum* (Figura 31). Adaptados a regiões mediterrâneas, esses vegetais possuem um sistema de “válvulas” para a dispersão de sementes (classificação: mecanismo dinâmico/escala macroscópica).

Isso posto, determinou-se que a função inspiradora seria representada pelo mecanismo de abertura dessas plantas, que é desencadeado mediante a presença de água da chuva. Nessa situação, as cápsulas portadoras das sementes de *Mesembryanthemum* absorvem a umidade e incham, fazendo com que válvulas em formato de estrela se abram e contribuam para a dispersão das sementes. Assim, a característica principal (campo “*main feature*” na Figura 29) do sistema equivale às propriedades de hidrocoria²⁴ e higroscopia²⁵ (LÓPEZ et al., 2017).

Figura 31 - Detalhe de estruturas de plantas do gênero *Mesembryanthemum* para dispersão de sementes



Fonte: Parolin (<https://www.sciencedirect.com/>) acesso em 2021.

A etapa subsequente foi destinada ao preenchimento dos campos de “arquitetura”, onde se empreendeu a definição de analogias e abstrações dos conhecimentos biológicos para a criação de produtos. Consequentemente, os autores iniciaram o desenvolvimento das alternativas conceituais para fachadas dinâmicas adaptativas (LÓPEZ et al., 2017).

²⁴ Disseminação de sementes, frutos e esporos mediante a ação da água (ALLABY, 2010).

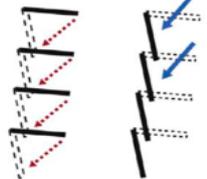
²⁵ Material ou substância que absorve vapor de água/umidade do ambiente (GORSE; JOHNSTON; PRITCHARD, 2020).

Um sistema inteligente que realizaria movimentos de abertura e fechamento desencadeados pela presença de água da chuva foi proposto. López et al. (2017) salientaram que a principal vantagem dessa alternativa, em comparação aos sistemas pré-existentes (e não biomiméticos), estaria na economia de elementos construtivos e de energia. Por certo, o sistema integraria mecanismos passivos (que não necessitam de energia para sua operação), cuja configuração seria alterada devido às variações nos materiais inteligentes responsivos à umidade externa presentes nos componentes do produto.

Na etapa seguinte, os autores concentraram seus esforços no campo de design conceitual, incluindo as principais ideias para a aplicação técnica. Complementou-se essa etapa com uma ilustração esquemática do sistema adaptativo. López et al. (2017) ponderaram que a movimentação dos componentes poderia ser realizada por meio de rolagem ou dobraduras. Com tal conclusão, foi encerrada a demonstração de uso do instrumento DCGDPIF.

Em linhas gerais, o caso sugeriu a criação de um mecanismo inteligente, que integraria movimentos de abertura e fechamento, para fachadas arquitetônicas localizadas em áreas chuvosas. Esse produto poderia reduzir o número de elementos construtivos nas aberturas e operaria de forma autônoma. O sistema permaneceria aberto em condições de seca (ventilação natural) e, em condições de maior umidade e chuva, passaria a se fechar automaticamente. A Figura 32 (versão ampliada no Anexo E) reproduz o quadro elaborado pelos autores para essa aplicação.

Figura 32 - Ferramenta DCGDPIF aplicada em projeto de fachada

CLIMATE	Mesembryanthemums	WHAT?	WHY?	HOW?
Mediterranean $T^{\circ} < 25^{\circ}C$ $m < 10^{\circ}C$ $l_{tc} < 580$		ADAPTATION behavioural	CHALLENGE dispersing seeds for a distance of yards	FUNCTION opening
ENVIRONMENTAL ISSUE Rainwater		APPROACH dynamic mechanism macro-scale		PROCESS when rain falls the capsules absorb moisture and swell, causing a star-shaped set of valves to open
		SYSTEM valve mechanism		MAIN FEATURES hygroscopicity
		APPLICATION IDEAS	INNOVATION	DESIGN CONCEPT GENERATION
		ADAPTABILITY dynamic adaptive envelope	CHALLENGE opening-closing system with independent activation	TECHNICAL IMPLEMENTATION 
		APPLICATION Smart opening - closing system with rainwater	BENEFIT saving construction elements saving energy waste in activation systems	
				TECHNICAL FEATURES motion such as folding, curling or rolling

Fonte: López et al. (2017).

4.2.1.2 Análise do caso

O quadro DCGDPIF de López et al. (2017), anteriormente exposto, foi classificado como um recurso de abordagem baseada no problema, dado que parte da demanda pela criação de artefatos para fachadas. O instrumento está disponível de forma gratuita, diretamente no artigo digital. Julga-se que a ferramenta não foi utilizada em sua totalidade, pois os autores conduziram uma breve demonstração, descrevendo seus resultados resumidamente. Essa exposição abrangeu as etapas de definição do contexto de projeto, análise climática, pesquisa biológica e geração de alternativas preliminares. Visto que a ferramenta não abrange todas as etapas do processo criativo, salienta-se que ela facilita a condução das etapas de implementação e detalhamento técnico.

No que tange ao problema de projeto contido na essência da ferramenta, pressupõe-se que o mesmo poderia ser flexibilizado para abranger o desenvolvimento de outras propostas que estivessem sujeitas à ação das intempéries e das variáveis climáticas (ex. criações de objetos e projetos em urbanismo).

A ferramenta DCGDPIF foi elaborada para a investigação exclusivamente do universo vegetal, incluindo suas estratégias adaptativas aos diferentes tipos de climas. Tal característica a distingue dos demais instrumentos criativos, e, de fato, os autores justificam essa escolha ao frisarem que as plantas e edificações partilham condições semelhantes.

No entanto, pondera-se que descartar reinos e filos, logo no início da pesquisa biológica, pode eliminar oportunidades valiosas para a geração de ideias. Assim, seria pertinente ampliar o escopo da ferramenta para que fossem considerados outros elementos naturais, uma vez que há muitos organismos potencialmente inspiradores para fachadas. Uma opção adicional, seria manter apenas o aspecto de “limitação de movimento no espaço”, que é uma condição enfrentada por múltiplas espécies, como critério para a investigação natural. Partindo dessa premissa, seria possível identificar outros organismos dotados de conformações similares àquelas encontradas no reino vegetal, frutos de evolução convergente, por exemplo (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2010). Nesse momento de investigação biológica, seria possível complementar a ferramenta com os seguintes recursos: bases de dados biomiméticas, observações e/ou *iSites*, contato direto com biólogos e pesquisas na literatura.

Cabe mencionar que López et al. (2017) apresentaram sua ferramenta à comunidade de projetistas e à academia. Ou seja, o modo sintético com que demonstraram esse recurso em sua publicação deve-se, provavelmente, ao fato de que tal descrição representa apenas uma parcela

da publicação desses autores. Efetivamente, um panorama geral sobre a inter-relação de pesquisas com base na botânica e criações arquitetônicas adaptativas também foi apresentado em seu artigo.

Levando isso em consideração, acredita-se que o processo de preenchimento do quadro pelos autores poderia ser detalhado em maior profundidade. Ademais, verificou-se a preferência pelo fator de “água da chuva” como a única condicionante ambiental da criação. Ou seja, López et al. (2017) optaram por não incluir categorias possivelmente relevantes ao projeto, por eles mesmos definidas no trecho de apresentação da ferramenta DCGDPIF, tais como: luz, escuridão, congelamento, movimento do ar e qualidade do ar.

Outrossim, foi enfatizada a importância de mensurar *performance* e satisfação dos ocupantes. No entanto, esses pontos não foram aprofundados na demonstração, já que a proposta ilustrada envolveu as primeiras fases do processo criativo, encerrando-se no início da geração de alternativas conceituais. Nessa última etapa relatada, ilustrou-se a proposta de produto com uma representação esquemática sintética (porção inferior direita na Figura 32). Isso significa que o desenho não determinou a geometria integral do sistema (ex. peças, encaixes ou materiais), além de não haver um consenso sobre qual seria o tipo exato de movimentação realizada pelo produto. Desse modo, seriam essenciais mais especificações e a provável realização de simulações digitais, prototipagem e testes. Tais constatações, conduziram à classificação do caso como aplicação incompleta da ferramenta biomimética.

Entende-se que o *Design Concept Generation Diagram for Plant Inspired Façades* seja uma ferramenta de fácil incorporação em equipes criativas, pois o quadro está disponibilizado em sua integralidade na publicação de López et al. (2017), e que as instruções para seu uso são claras e didáticas. Igualmente foi possível notar que o DCGDPIF abarca critérios semelhantes ao recurso 5W2H, muito utilizado em design (*what, why, where, when, who, how, how much*).

Um elemento distintivo do DCGDPIF está em sua inclusão de fatores bioclimáticos, que propiciam o surgimento de criações sustentáveis, mais adaptadas à localidade selecionada, sobretudo no que tange à economia energética e de recursos, podendo, em última instância, aprimorar a sensação de conforto no ambiente. Sem dúvida, para que o sistema seja realmente sustentável, é preciso considerar outras variáveis não especificadas pelos autores, como, por exemplo, os seus materiais e componentes; além de estimar custos relativos à produção, manutenção e descarte; e mensurar o desempenho do sistema. Além disso, o uso de elementos abundantes no espaço (ex. temperatura, umidade e água da chuva) para gerar autonomia do sistema projetado, pode contribuir para o aspecto sustentável. Outras vantagens da ferramenta

DCGDPIF estão contidas no estudo de organismos pela perspectiva dos mecanismos dinâmicos e das estratégias estáticas, em escalas diferentes de observação e análise (microscópica/macrocópica), que pode favorecer a compreensão e a sistematização das informações coletadas.

É interessante assinalar que a ferramenta pode ser útil para equipes que, porventura, não possuam aprofundado conhecimento biológico, ou que estejam submetidas a restrições de prazo, pois a DCGDPIF é de fácil compreensão e rápida aplicação em projetos. Em contraponto, uma limitação da ferramenta repousa justamente no foco em formas e processos da botânica, visto que não se constataram abordagens baseadas em particularidades dos ecossistemas, tal como sugerido por autores como Baumeister et al. (2014). Considerando as informações obtidas na literatura consultada, é possível admitir que esse seria um aprimoramento que favoreceria as possibilidades criativas do DCGDPIF.

O Quadro 7 mostra as principais informações coletadas sobre o Caso 1.

Quadro 7 - Caracterização do Caso 1 - DCGDPIF

Categorias de Análise	Informações
Tipo	Quadro
Abordagem	Baseada no problema (design)
Tipo de acesso e distribuição	<i>Online</i>
Acessibilidade	Gratuita
Usada em sua totalidade?	Não
Dependência de outras ferramentas	Sim
Etapa do processo criativo	Etapa 1: planejamento / exploração Etapa 2: criação conceitual / definição Etapa 3: reflexão / desenvolvimento
Etapa final do caso	Desenhos esquemáticos preliminares
Organismo(s) selecionado(s)	Sementes do gênero <i>Mesembryanthemum</i>
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Dispersão de sementes; hidrocoria; higroscopia
Princípios da vida utilizados	Ser responsivo e estar em sintonia com o local; ser eficiente na escolha de recursos
Princípios biofilicos utilizados	Luz dinâmica e difusa; conexão com sistemas naturais; variabilidade térmica e de fluxo de ar
Sustentabilidade	Sim
Métricas de desempenho no caso	Não

Fonte: A autora, 2021.

4.2.2 Caso 2 - BioTRIZ

A BioTRIZ é composta por uma matriz heurística que reúne seis categorias gerais ordenadoras: energia, informação, substância, estrutura, espaço e tempo (CUNHA, 2015; VINCENT et al., 2006). Ao se selecionar fatores de contradição nessa ferramenta, é possível analisar uma situação de projeto e escolher os parâmetros (fundamentados em princípios naturais) que demonstram uma melhor adequação aos objetivos propostos, de forma estimular a geração de ideias.

Segundo Craig et al. (2008), quando são comparados projetos provenientes de ferramentas criativas tradicionais e aqueles que incluem fatores da natureza como a BioTRIZ, percebe-se que, se há ênfase apenas em processos humanos, são priorizados majoritariamente fatores energéticos no desenvolvimento e aprimoramento de criações tecnológicas. Em contrapartida, quando se investiga o universo natural, é nítida a prevalência dos campos “informação” e “estrutura”, associados ao desenvolvimento e adaptação de organismos e sistemas biológicos.

Uma particularidade definidora da BioTRIZ é sua orientação para princípios gerais da natureza. Em outras palavras, não são investigados organismos específicos, mas a ferramenta permite a avaliação e a integração de princípios naturais abrangentes. Supõe-se que tal recurso possa facilitar a condução de projetos, inclusive em situações em que as equipes não disponham de um conhecimento biológico aprofundado. Nesse sentido, é válido complementar a investigação com a consulta em bases de dados biomiméticas e em literatura especializada. Em um cenário ideal, recomenda-se incluir especialistas (ex. biólogos) nessas equipes para auxiliar na transposição dos conhecimentos naturais para a esfera de design (HELMS et al., 2009; SRINIVASAN et al., 2011; VINCENT et al., 2006).

4.2.2.1 Apresentação do caso

Em seu trabalho, Craig et al. (2008) compararam o uso da ferramenta biomimética BioTRIZ, com as matrizes PRIZM e TRIZ²⁶. O objetivo central foi a concepção de uma

²⁶ A ferramenta TRIZ é um sistema para solução de problemas composto por recursos complementares. O mais conhecido dentre eles, é a tabela de 39 *features* (parâmetros e variáveis) e a lista de 40 Princípios Inventivos (PI), ambos associados a sistemas técnicos e de engenharia. Se o problema de projeto for definido a partir de termos escolhidos nessa tabela (expressando, portanto, fatores de contradição), é possível identificar na TRIZ, princípios que podem contribuir para a solução dos desafios de design. Já o instrumento PRIZM, corresponde a uma versão condensada da TRIZ. No PRIZM, as *features* e os Princípios Inventivos foram ordenados em seis “campos operacionais”. É importante mencionar que o PRIZM embasou a formulação da ferramenta BioTRIZ (CRAIG et al., 2008).

estrutura para superfícies de edifícios que possibilitasse o resfriamento passivo da massa térmica (*thermal mass*). Cumpre comentar que, na presente Dissertação, foram consideradas somente as informações atinentes ao uso da ferramenta biomimética.

Craig et al. (2008) estudaram o fenômeno do resfriamento radiativo (resfriamento radiante ou *radiative cooling*), que traduz o processo de perda de calor sensível em uma construção mediante trocas térmicas entre o edifício e a atmosfera. Nesse contexto, é importante considerar o balanceamento entre a radiação²⁷ de ondas longas (infravermelho) e a de ondas curtas. Tendo isso em vista, o principal desafio consistiu em unir a superfície construída à atmosfera, simultaneamente desacoplando-a da insolação direta e da massa de ar aquecida próxima à edificação. Para atingir esse resultado, os componentes convectivos e os condutores do balanço total de calor do sistema precisaram ser considerados na separação da radiação de ondas curtas e daquela de ondas longas. Uma vantagem em optar por esse gênero de resfriamento está na sua economia de energia, uma vez que, ao compor um sistema passivo e autônomo, há uma menor dependência do sistema de condicionamento térmico ativo dos espaços (CRAIG et al., 2008).

Em telhados convencionais, o componente isolante interrompe o aquecimento da construção pelo contato com o sol e com os elementos convectivos. Contudo, esses sistemas impedem que a massa térmica do edifício esteja em contato com a atmosfera. Assim, a possibilidade de usufruir do resfriamento radiativo nesses casos é reduzida (CRAIG et al., 2008).

Craig et al. (2008) admitiram a escassez de análogos diretos no universo biológico para o sistema de resfriamento radiativo. Desse modo, os autores ampliaram o escopo da pesquisa, para obter outras referências inspiradoras, incluindo características de organismos como a seleção espectral refletora de infravermelhos, mecanismos para mitigar a convecção e capacidade de contornar a retenção de calor corpórea. Foram evidenciados alguns seres vivos de interesse nessa perspectiva, a exemplo de organismos que utilizam a seleção espectral para refletir a radiação solar, como folhas, ovos de pássaros e conchas de gastrópodes do deserto. Os projetistas mencionaram, igualmente, as particularidades da vascularização das orelhas de lebres e seu papel para expulsão do calor para a atmosfera. Outros modelos de interesse foram

²⁷ Geralmente, a temperatura do céu é inferior àquela no nível do solo, principalmente em condições de céu limpo ou em climas secos. O resfriamento ocorre com mais efetividade quando o aquecimento do Sol (por radiação de ondas curtas) e o contato com superfícies aquecidas e com a massa de ar circundante (transferência de calor com elementos de condução e convecção) são evitados ou reduzidos. É preciso mencionar que o céu emite a radiação de ondas longas de cima para baixo, enquanto as construções emitem a mesma radiação de baixo para cima. Logo, nas situações em que o último caso se sobressai ao primeiro, há resfriamento radiativo (CRAIG et al., 2008).

identificados na literatura, como: folhas de árvore-da-seda, asas de libélulas, sistema vascular de golfinhos e mecanismo de controle térmico de mamangavas.

Após a formulação do problema de projeto, os autores elaboraram um modelo qualitativo de telhado para fundamentar o desenvolvimento das criações. O modelo consistiu em três subsistemas: uma superfície branca externa, uma camada de isolamento intermediária e a massa térmica do edifício. Retomando o que foi previamente exposto, os autores buscaram unir a massa construída à atmosfera, ao mesmo tempo em que pretenderam separá-la da ação da temperatura ambiente imediatamente externa. Concluiu-se que o desafio a ser aprimorado nesse sistema para coberturas e telhados estava no componente de isolamento (CRAIG et al., 2008).

Em seguida, foi iniciada a seleção dos parâmetros que melhor descreviam o problema de projeto na lista de Altshuller. Todos os quatro critérios escolhidos por Craig et al. (2008) pertenciam ao campo principal de “Energia”, sendo: temperatura; intensidade de iluminação; uso de energia por um objeto estacionário; e perda de energia. Os resultados foram obtidos quando os autores investigaram 12 conflitos possíveis a partir da combinação dos quatro parâmetros previamente escolhidos.

Com o uso da BioTRIZ, Craig et al. (2008) apontaram os seguintes princípios inventivos (PI):

- Campo operacional de substância – PI nº 32 – mudança de coloração.
- Campo operacional estrutura – PI nº 3 – qualidade local e PI nº 5 – fusão.
- Campo operacional energia – PI nº 9 – protensão e PI nº 37 – expansão térmica.
- Campo operacional informação – PI nº 22 – *blessing in disguise* e PI nº 25 – *self-service*.

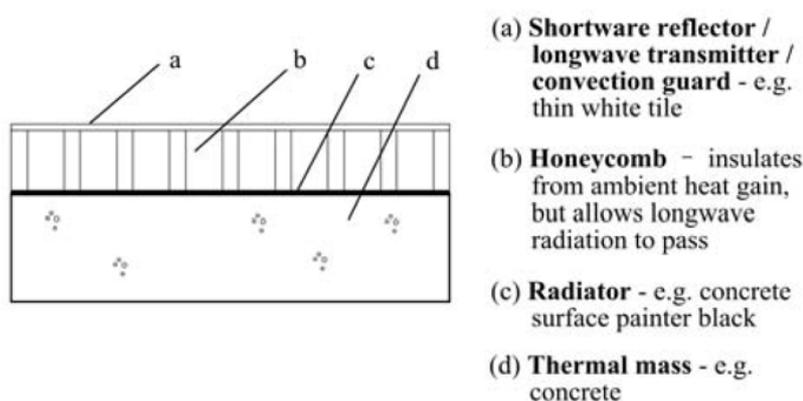
Assim, foram evidenciados possíveis caminhos de projeto para o sistema de resfriamento em cada campo operacional²⁸. Os autores selecionaram o campo estrutural para guiar seu projeto, pois propostas baseadas nos princípios inventivos desse campo seriam de fácil implementação, uma vez que seria preciso realizar apenas alguns ajustes específicos no produto. Consequentemente, seria dispensável adotar um completo *redesign* do sistema de coberturas ou aplicar materiais menos acessíveis. Nesse cenário, Craig et al. (2008) ainda incluíram os princípios inventivos nº 2 “extração”, que recomenda a retirada da parte indesejada

²⁸ Os Princípios Inventivos (associados aos campos operacionais) são diretrizes criativas gerais. Sua interpretação pela equipe de designers, é vital para que os resultados reflitam as características indicadas e atendam aos objetivos e requisitos pré-estabelecidos para um projeto (CRAIG, 2008).

do isolante; e o nº 3 “qualidade local”, que destaca a mudança do isolamento de uma configuração uniforme para uma “não-uniforme”.

Após uma extensa análise, os autores optaram por substituir o componente de isolamento térmico convencional por um sistema de defletores em formato de malha hexagonal com células vazadas, semelhantes a um favo de mel. Essa estrutura de caminhos verticais espaçados, em material transparente, permitiria que a massa térmica da construção ficasse em contato com a atmosfera, que, por sua vez, viabilizaria a passagem da radiação de ondas longas. Esse sistema (Figura 33) possibilitaria a estagnação do ar em seu interior durante o resfriamento radiativo, formando uma camada isolante de infravermelhos – aumento de resistência à transferência de calor por condução e convecção (CRAIG et al., 2008).

Figura 33 - Representação esquemática de sistema para resfriamento radiativo



Fonte: Craig et al., 2008.

Os autores pensaram que é mais provável que o processo de resfriamento radiativo ocorra durante o período noturno, quando o radiador estiver mais frio do que a massa da construção. Desse modo, o calor seria conduzido para cima até a atmosfera, passando pelas células da grelha hexagonal. Essa mesma malha e o “suporte de convecção” externo dificultariam a transferência de calor por condução, de fora para dentro, deixando passar apenas a radiação de ondas longas no sentido de dentro para fora, resfriando a construção. Considera-se que o sistema terá um bom desempenho se houver mais resfriamento noturno do que ganhos de calor no período diurno (CRAIG et al., 2008).

A última etapa no trabalho de Craig et al. (2008) consistiu em estabelecer uma estimativa de desempenho do sistema com simulações dinâmicas no *software TRNSYS*²⁹. Foram realizados cálculos relativos ao sistema desenvolvido com a BioTRIZ, conjecturando-se que o mesmo estivesse situado em uma construção na cidade de Riyadh, na Arábia Saudita (clima quente e árido). Concluiu-se que o telhado com a malha hexagonal permaneceria, aproximadamente, 4,5°C mais fresco ao longo de um ano do que um telhado convencional submetido às mesmas condições. Também vale comentar que a nova proposta de telhado ficaria 2,4°C mais fria do que a temperatura ambiente média, enquanto que telhados comuns estariam a 2,1°C acima dela. Essa queda nítida de temperatura representaria economia em termos energéticos para o resfriamento ativo (ex. ar condicionado) dessa construção (CRAIG et al., 2008).

Apesar desta Dissertação não incluir a análise das demais ferramentas empregadas por Craig et al. (2008), salienta-se que elas não indicaram possibilidades de ajustes estruturais como estratégia de projeto. Apenas a BioTRIZ estimulou esse percurso projetual. Ou seja, este instrumento biomimético sugeriu uma abordagem alternativa que, segundo os autores, revelou um resultado potencialmente inovador para a área.

4.2.2.2 Análise do caso

A BioTRIZ é uma ferramenta aplicável em projetos cujos requisitos e objetivos já tenham sido previamente estabelecidos. Assim, é classificada como um instrumento de abordagem baseada no problema. A matriz expansível digital está disponível para aquisição³⁰.

Craig et al. (2008) utilizaram essa ferramenta de forma completa, abarcando todas as suas etapas. No entanto, compete salientar que a BioTRIZ é um recurso que parte da definição de projeto, orienta a geração de ideias e estimula a reflexão e o desenvolvimento de propostas conceituais. Dessa maneira, é necessário que ela seja complementada com outras técnicas e ferramentas nas etapas posteriores à sua aplicação. A etapa final do projeto, relatada pelos autores, equivaleu à exibição de desenhos esquemáticos preliminares e incluiu uma estimativa de desempenho do sistema.

Ao escolherem usar as matrizes BioTRIZ, PRIZM e TRIZ, os autores trabalharam exclusivamente com princípios naturais e técnicos de caráter abrangente. Vale lembrar que a

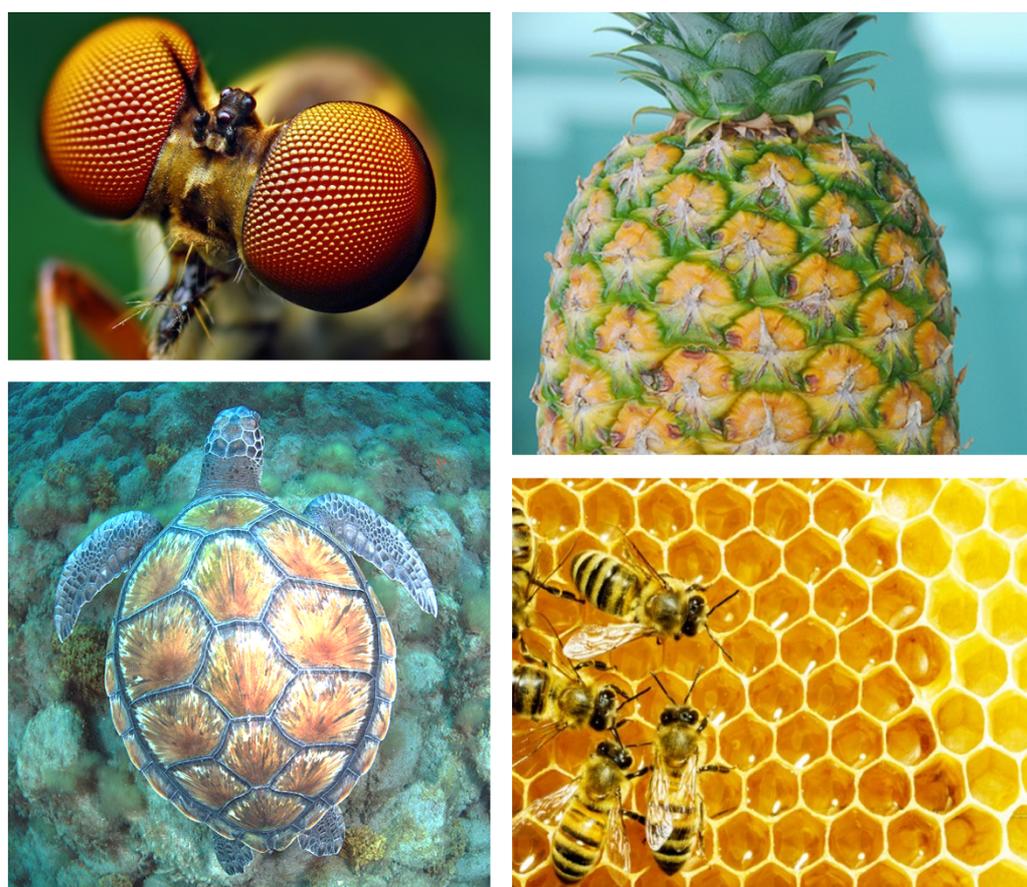
²⁹ *TRNSYS* é um *software* que simula o comportamento de sistemas transientes (sistemas dinâmicos), como: fluxo de tráfego e processos biológicos. Pode ser adotado para avaliar o desempenho de sistemas de energia térmica e elétrica. Esse recurso é muito usado nas áreas de engenharia, energia renovável e construção (TRNSYS, 2019).

³⁰ Na plataforma www.biotriz.com.

matriz bioinspirada não prevê a pesquisa por organismos específicos, como ocorre em outras ferramentas biomiméticas. Com efeito, a ela estão associados diversos fatores da natureza que, precisam ser interpretados pelos designers para que possam desvelar caminhos para o desenvolvimento de projeto.

É pertinente discutir a preferência pela malha em formato hexagonal. Tal estrutura geométrica é comumente encontrada na natureza, em estruturas como o favo do mel, em olhos de insetos, em frutas e no casco de tartarugas (Figura 34). Trata-se de uma configuração resistente que requer o uso reduzido de material para sua composição. Mas, conforme foi mencionado anteriormente, não foi assinalado um organismo inspirador cuja observação resultou na extração dessa forma para uso na esfera técnica. Outrossim, a aplicação da BioTRIZ conduziu Craig et al. (2008) a essa conclusão por meio da descrição de princípios inventivos no campo “estrutura”.

Figura 34 - Exemplos de formas hexagonais na natureza



Fonte: Addison, 2020 (<https://abettermandotblog.wordpress.com/>); Geometry in Nature, 2012 (<http://geoinnature.blogspot.com/>); Writer, 2019 (<https://dailynews.co.zw>).

O caso demonstrou benefícios associados ao uso da ferramenta BioTRIZ. O instrumento proporcionou um caminho de projeto que não havia sido indicado pelas demais matrizes TRIZ e PRIZM, unicamente vinculadas às áreas de tecnologia. Dessa forma, é possível reconhecer que a BioTRIZ estimula a adoção de novas perspectivas pelos projetistas, principalmente no que tange a consideração de critérios dos campos “informação” e de “estrutura” que podem favorecer propostas inovadoras e potencialmente mais sustentáveis.

Na apresentação dos resultados da BioTRIZ não houve um detalhamento aprofundado acerca das peças do sistema. A alternativa final foi ilustrada em uma representação esquemática e sintética (Figura 33), que poderia ser desenvolvida posteriormente pelos autores. Alguns recursos materiais para a composição do produto foram mencionados, contudo os autores frisaram que essas determinações foram relatadas a título de exemplo.

Também foram realizadas estimativas de desempenho do sistema. Houve uma preocupação pela efetividade do produto e por atender critérios de sustentabilidade, ao verificar se o sistema passivo proposto demonstraria um diferencial efetivo em comparação a criações convencionais e já disponíveis no mercado. Acredita-se que na continuidade deste projeto seria interessante efetivar mais desenvolvimentos formais e funcionais, incluindo-se especificações do produto, desenhos técnicos, mais simulações digitais em *softwares* e testes no contexto real.

O Quadro 8 condensa as informações atinentes ao Caso 2.

Quadro 8 - Caracterização do Caso 2 - BioTRIZ

Categorias de Análise	Informações
Tipo	Matriz
Abordagem	Baseada no problema (design)
Tipo de acesso e distribuição	Online
Acessibilidade	Comercial
Usada em sua totalidade?	Sim
Dependência de outras ferramentas	Sim
Etapa do processo criativo	Etapa 1: planejamento / exploração Etapa 2: criação conceitual / definição Etapa 3: reflexão / desenvolvimento
Etapa final do caso	Desenhos esquemáticos preliminares e estimativa de desempenho
Organismo(s) selecionado(s)	Não especificou (malha hexagonal)
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Estrutura; qualidade local; extração
Princípios da vida utilizados	Ser responsivo e estar em sintonia com o local; ser eficiente na escolha de recursos; integrar desenvolvimento e crescimento
Princípios biofílicos utilizados	Padrões biomórficos; complexidade e ordem
Sustentabilidade	Sim
Métricas de desempenho no caso	Sim

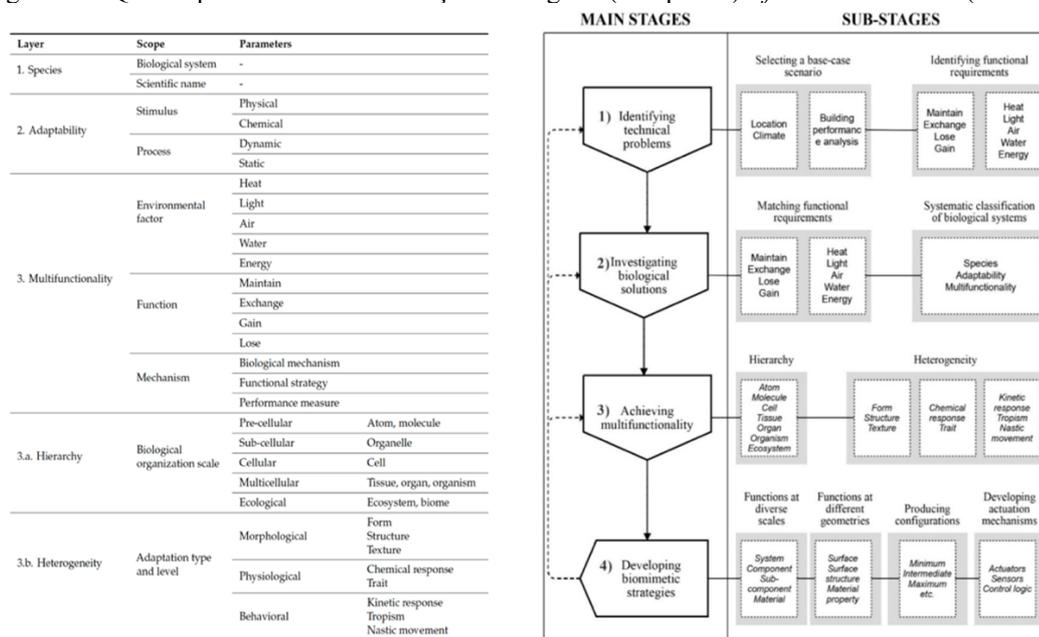
Fonte: A autora, 2021.

4.2.3 Caso 3 - *Multi-Biomechanism Approach* (M-BA)

O instrumento pretende incluir a multifuncionalidade biológica para o aprimoramento de projetos, sobretudo na produção de fachadas adaptativas. A exploração de princípios da natureza – classificados segundo atributos como adaptabilidade, hierarquia, heterogeneidade, anisotropia e redundância – pode promover novos caminhos para a criação de produtos multifuncionais. Tal como apresentado por Kuru et al. (2020), esse recurso destaca a aplicação de noções de hierarquia³¹ e heterogeneidade³² da natureza para atingir a multifuncionalidade por meio da diferenciação de funções em variadas escalas e geometrias em cenários projetuais.

O *Multi-Biomechanism Approach* é composto por quatro etapas principais: 1) identificar o problema técnico; 2) selecionar a solução biológica; 3) atingir multifuncionalidade; e 4) desenvolver uma estratégia biomimética. Cada uma delas é associada a, pelo menos, dois subestágios. O *framework* (Figura 35, versão ampliada no Anexo F) é complementado por ferramentas auxiliares como uma base de dados de soluções biológicas inspiradoras (formulada por Kuru et al., especificamente para uso em conjunto com a M-BA) e um quadro que orienta a coleta e a inserção de informações sobre organismos na referida base.

Figura 35 - Quadro para coleta de informações biológicas (à esquerda) e *framework* M-BA (à direita)



Fonte: Kuru et al., 2020.

³¹ Hierarquia é a capacidade de seres vivos de incorporar funções e estruturas em uma perspectiva multinível, ou multicamadas. Essa característica pode ser adotada em design por meio da inserção de estruturas em diferentes escalas em um produto, cada qual destinada a uma funcionalidade diferente (KURU et al. 2020).

³² Heterogeneidade traduz a diferenciação geométrica de elementos em estruturas multidimensionais, abarcando diferentes funções com um leque de formas. Representa a combinação de diferentes morfologias de componentes em uma criação (KURU et al., 2020).

4.2.3.1 Apresentação do caso

O projeto de Kuru et al. (2020) visou a criação de um produto para fachadas baseado em estudos biomiméticos e multifuncionais. No *framework*, a etapa inicial indica a seleção de um “caso-base”³³ pré-existente, que estaria em um contexto semelhante àquele que se pretende implementar o produto a ser criado. Assim, os autores escolheram como sítio do projeto, a cidade de Sidney, na Austrália, caracterizada por seu clima temperado, quente e úmido. A construção escolhida como referência foi um prédio escolar. Em seguida, foi realizada uma simulação dessa edificação no programa *EnergyPlus*³⁴ para analisar os fatores técnicos e delimitar os requisitos para o projeto.

Kuru et al. (2020) perceberam que a construção enfrentava problemas associados ao calor excessivo, ficando evidente a necessidade de considerar resfriamento, equilíbrio de ganhos térmicos e de iluminação no local do futuro projeto. Conforme indicado no M-BA, esses requisitos funcionais foram reformulados em uma linguagem simplificada, correspondendo, respectivamente, a: “perder/ ganhar calor”; “ganhar/trocar ar” e “perder/manter luz”.

A próxima etapa compreendeu a investigação de soluções biológicas. Para tanto, foi empreendida uma pesquisa na base de dados criada por Kuru et al. (2020), no intuito de selecionar organismos relevantes para atender aos problemas de projeto. Essa busca foi fundamentada no termos-chave previamente determinados tendo em vista a regulação de ar, luz e calor. Os autores evidenciaram que as suculentas e as espécies *Echinocactus grusonii* e *Pinus coulteri* cumpriam todos os requisitos.

Analisando as opções coletadas, concluiu-se que o *Echinocactus grusonii* (Figura 36) era o organismo mais adequado para inspirar as etapas subsequentes do projeto. Essa espécie tem uma boa capacidade de armazenar líquidos, além de possuir uma vantajosa proteção contra o excesso de calor e luz do sol. Assim, os autores concluíram que esse vegetal proporciona duas adaptações morfológicas em distintos níveis hierárquicos (órgão e tecido) e possui uma textura global heterogênea (auréolas e espinhos). Algumas adaptações desta planta envolvem: a) capacidade de inchar e encolher mudando a proporção do volume do caule; b) recursos para

³³ Vale esclarecer que, de acordo com Kuru et al. (2020), o caso-base corresponde a uma construção elaborada com os recursos convencionais de design e arquitetura, mas que partilha do contexto em que se pretende implementar a futura criação. Portanto, ele tem por serventia a análise de requisitos a serem aprimorados e pode também servir para implementar a análise comparativa de desempenho ao final do percurso de criação do produto biomimético (na quarta fase do M-BA).

³⁴ O *EnergyPlus* é um *software* para simulação de cargas térmicas e análise energética de construções e seus sistemas. Nele, é possível considerar fatores associados a: aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e uso de água em edificações (ENERGYPLUS, 2021; MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009).

sombreamento próprio ao longo do caule, proporcionados pela textura de auréolas, gomos/costelas e espinhos; e c) mecanismo de abertura dos estômatos para evapotranspiração (KURU et. al., 2020). Foi realizado um novo preenchimento do quadro para coleta de informações biológicas com os dados sobre o vegetal escolhido.

Figura 36 - *Echinocactus grusonii*



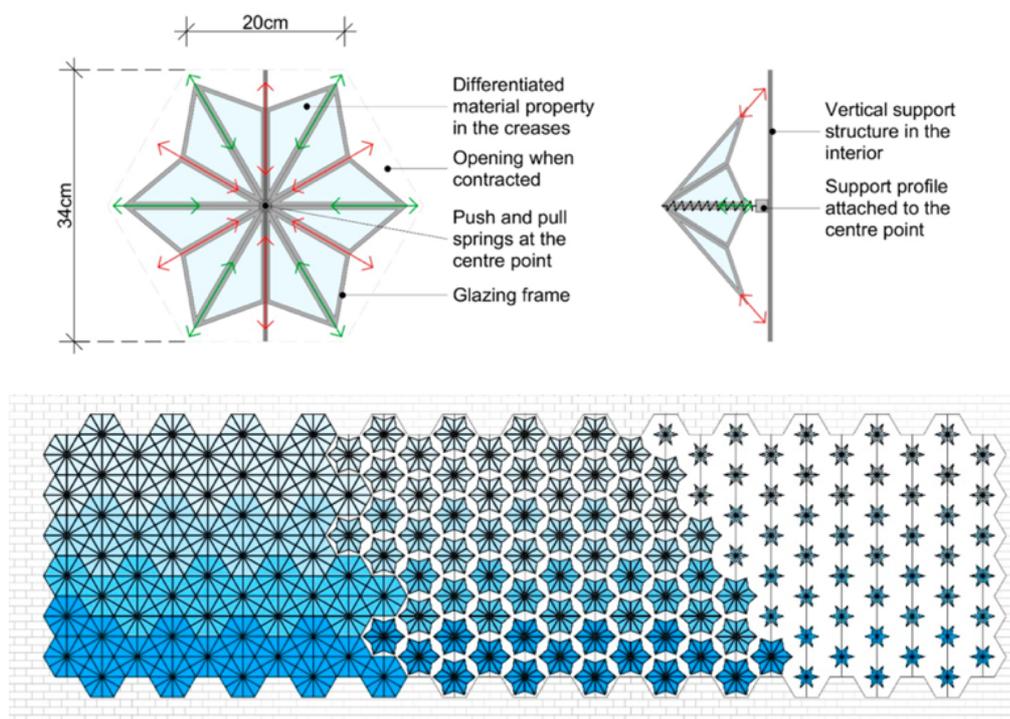
Fonte: Wikimedia Commons, 2021. Acesso em (<https://pt.wikipedia.org/wiki/>).

A etapa consecutiva compreendeu a geração de ideias baseadas na multifuncionalidade do *Echinocactus grusonii*. Os autores ponderaram que as características desse vegetal, como as aberturas de estômatos e a conformação do caule em gomos, poderiam ser combinadas para aplicação em um produto que possibilitasse a regulação de calor e luz em edifícios (KURU et al., 2020).

O último estágio da ferramenta M-BA estimulou o desenvolvimento do design biomimético, incluindo a consolidação da ideia formulada na etapa anterior, que foi analisada e aprofundada por Kuru et al. (2020). O conjunto de gomos do cacto foi transformado em um componente modular para viabilizar o controle térmico por meio de modificações na sua estrutura. O formato arredondado e marcado por seções (auréolas autossombreadáveis) presentes no vegetal, foi transformado em uma superfície geométrica envidraçada e fotocromática. Essa conformação, em conjunto com tais materiais, permitiria mudanças de opacidade no sistema, aprimorando a regulação de luz e o controle dos ganhos de calor por radiação. Com relação aos estômatos, verificou-se que foram transformados em mecanismos de abertura e fechamento para regulação do fluxo térmico e aéreo (KURU et al., 2020).

O produto final (Figura 37) combinou todas essas funções, integrando ao design a hierarquia e heterogeneidade biológicas. Ele correspondeu a uma estrutura multifacetada de módulos dobráveis, cujos mecanismos de expansão e contração seriam ativados pelas diferenças na temperatura externa. Esse sistema funcionaria com a aplicação de materiais inteligentes com memória de forma, que alterariam suas dimensões a depender da exposição à radiação solar (KURU et. al. 2020).

Figura 37 - Módulo e padronagem do sistema criado com o M-BA



Fonte: Kuru et al., (2020).

A última fase do trabalho de Kuru et al. (2020) correspondeu a uma análise comparativa do desempenho de seu produto. Os autores resgataram as informações obtidas na modelagem da construção do “caso-base” identificado na primeira fase do M-BA. Relembra-se que a avaliação demonstrava temperaturas excessivas no local, afetando o conforto no edifício e os gastos energéticos para seu resfriamento. Então, o design biomimético foi simulado digitalmente, ao se substituir as janelas do edifício do “caso-base” pelo sistema modular multifacetado. O *software EnergyPlus* demonstrou que após essa substituição, houve uma clara redução no percentual de horas de desconforto nesse ambiente. Os valores médios para as temperaturas internas também foram reduzidos. Kuru et al. (2020) concluíram que com o uso desse sistema biomimético seria possível melhorar o conforto térmico em edificações educacionais em Sidney.

4.2.3.2 Análise do caso

O *Multi-Biomechanism Approach* é um processo/*framework* de abordagem baseada no problema. Essa ferramenta está disponível para acesso *online* de forma gratuita na publicação digitalizada de Kuru et al. (2020), sendo que a base de dados complementar pode ser consultada

no site *Bioinspiration*³⁵. Cumpre notar que, por ocasião da análise do Caso 3, tal base ainda apresentava um conjunto reduzido de elementos naturais inspiradores, comparativamente às plataformas *DANE* e *Ask Nature*. Isso se deve, provavelmente, à formulação recente da ferramenta M-BA (2020). Assim, acredita-se que a base de dados, vinculada ao instrumento M-BA, possa estar em curso de adaptação e ampliação.

Tendo isso em vista, julga-se que uma possibilidade relevante seria complementar a ferramenta com outras bases de dados biomiméticas. Eventualmente, se essa última solução for escolhida, é importante que seja mantido o fator de multifuncionalidade em evidência (nas palavras-chaves e questões norteadoras do projeto) para não descaracterizar o *framework*.

Kuru et al. (2020) compuseram sua exposição de forma clara e didática, ilustrando o produto final com algumas gravuras esquemáticas. Conforme o exposto, a aplicação do M-BA implica na complementação desse recurso com outras ferramentas e técnicas criativas, como a base de dados biológica e o quadro para coleta e sumarização de informações de organismos (ambos formulados por Kuru et al., 2020). Pelo que foi constatado, os autores implementaram as etapas disponíveis na ferramenta M-BA em seu projeto. Como se trata de um recurso focado nas fases iniciais e intermediárias do processo criativo, seria possível aprofundar o projeto nas etapas subsequentes. Algumas possibilidades de aprimoramento seriam: realizar outras simulações em programas de modelagem paramétrica; detalhar mais aprofundadamente os componentes; conduzir prototipagens dos módulos; e aplicar o sistema em um edifício-teste.

O projeto de Kuru et al. (2020) foi considerado de caráter sustentável dadas as preocupações dos autores com fatores de eficiência no uso de recursos e economia energética. Por certo, o processo de criação considerou a adequação do produto às características do clima local. Além disso, o sistema gerado não necessita de energia para seu funcionamento, principalmente pelo uso de materiais inteligentes com memória de forma, responsivos às variações do meio externo. Outro aspecto que corrobora essa classificação está no próprio resfriamento da edificação gerado com a aplicação do produto, que foi verificado no momento em que Kuru et al. (2020) mensuraram a *performance* de sua criação. Consequentemente, com a aplicação desse projeto em um contexto real, seria nítida a economia de energia resultante. Nessa perspectiva, é preciso enfatizar que, para ser verdadeiramente sustentável, seriam necessárias análises aprofundadas da implementação do produto (ex. definição de materiais, estimativa de ciclo de vida e pegada carbônica associada, custos e insumos necessários para manutenção).

³⁵ <https://www.bioinspiration.net/biomechanisms>

A ferramenta M-BA facilitou a condução do projeto de Kuru et al. (2020) e proporcionou resultados com potencial para melhorar a ventilação, o conforto térmico e luminoso em edificações. No âmbito da construção de fachadas com M-BA, seria oportuno complementar essa ferramenta com a atenção a outras normas e critérios de sustentabilidade e qualidade dos espaços, a exemplo de sistemas de certificação ambiental.

Observou-se que o principal fator distintivo do instrumento M-BA é sua ênfase na multifuncionalidade e no estudo de diferentes escalas, pela perspectiva da hierarquia e heterogeneidade. Essas características nem sempre são integradas e destacadas em outras ferramentas biomiméticas. Nessa ótica, vale mencionar que existem múltiplos projetos biomiméticos que priorizam a adaptabilidade ambiental, mas que trabalham com a transposição de uma única função natural. Incorporar a multifuncionalidade representa potencial para melhor adaptação e mais resiliência do produto gerado. Supõe-se que o M-BA possa ser adotado em projetos pertencentes exclusivamente ao campo do design, realizando-se alguns ajustes em suas etapas.

Cumprir comentar que mesmo que o *Multi-Biomechanism Approach* não tenha delimitado o foco da pesquisa biológica (como em outros casos), foi perceptível a preferência pelo estudo de vegetais, nomeadamente, de cactos.

O Quadro 9 expõe o panorama geral das informações do Caso 3.

Quadro 9 - Caracterização do Caso 3 - M-BA

Categorias de Análise	Informações
Tipo	Processo / <i>framework</i> , quadro e base de dados
Abordagem	Baseada no problema (design)
Tipo de acesso e distribuição	<i>Online</i>
Acessibilidade	Gratuita
Usada em sua totalidade?	Sim
Dependência de outras ferramentas	Sim
Etapa do processo criativo	Etapa 1: planejamento / exploração Etapa 2: criação conceitual / definição Etapa 3: reflexão / desenvolvimento Etapa 4: prototipação / implementação
Etapa final do caso	Simulação digital e estimativa de desempenho
Organismo(s) selecionado(s)	<i>Echinocactus grusonii</i>
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Regulagem de temperaturas, luz e sombreamento
Princípios da vida utilizados	Luz dinâmica e difusa; ser responsivo e estar em sintonia com o local; ser eficiente na escolha de recursos; adaptar-se às condições de mudança; integrar desenvolvimento e crescimento
Princípios biofílicos utilizados	Conexão com sistemas naturais; padrões biomórficos; complexidade e ordem; variabilidade térmica e de fluxo de ar
Sustentabilidade	Sim
Métricas de desempenho no caso	Sim

Fonte: A autora, 2021.

4.2.4 Caso 4 - Ferramenta de Solução Biomimética (FSB)

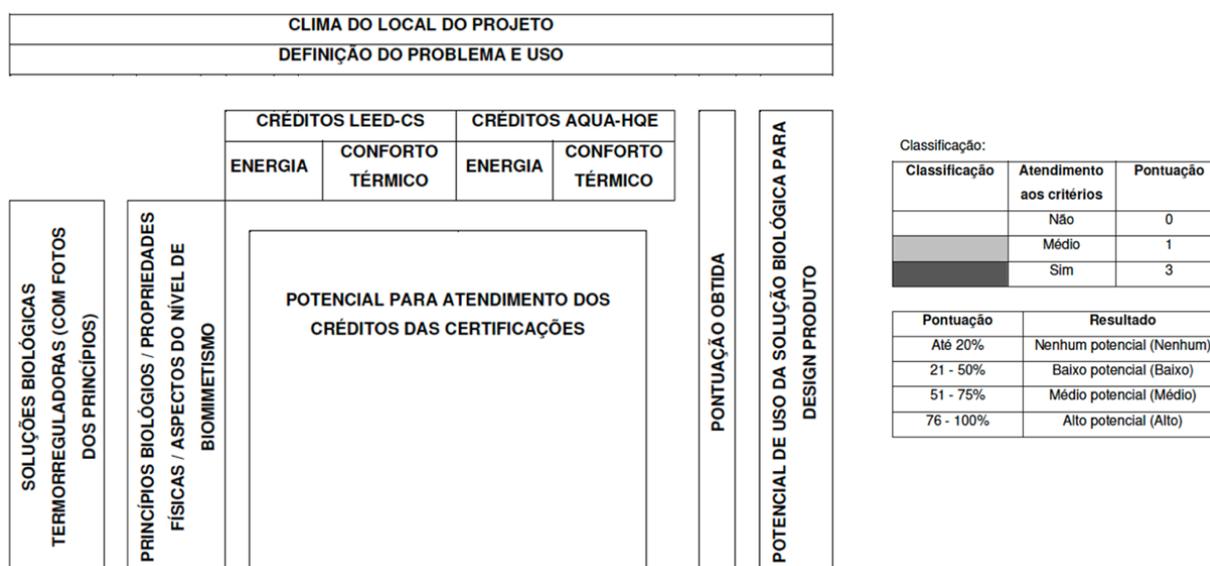
O recurso combina requisitos técnicos de sistemas de certificação ambiental (*LEED* e *AQUA-HQE*) com noções biológicas para propiciar criações alicerçadas no conceito de termorregulação. Nesse sentido, busca propor o design de produtos arquitetônicos biomiméticos sustentáveis, que incorporem aspectos de eficiência energética e conforto térmico.

A ferramenta é destinada às fases de exploração de elementos naturais e ao desenvolvimento conceitual de alternativas. É recomendável utilizar a FSB em conjunto com as seguintes ferramentas auxiliares: o quadro de organismos inspiradores formulado por Camargo (2016), e a plataforma *Ask Nature*.

O instrumento FSB é representado por um quadro (Figura 38) onde são inseridas as seguintes informações: clima do local de implantação do projeto; definição do problema de design e requisitos de uso; dados e ilustrações de organismos inspiradores; e critérios associados a *LEED* e *AQUA-HQE*. Também são considerados fatores, tais como: redução no consumo de energia, preocupação com a qualidade do ar interno e promoção de ventilação natural, que culminam na formulação de alternativas para termorregulação (CAMARGO, 2016).

Atribui-se a algumas categorias do quadro, uma pontuação de atendimento aos critérios de certificação. Ao concluir o preenchimento da ferramenta, é realizada a somatória dos valores obtidos, e, a partir de seu percentual identificado, opta-se pela proposta que demonstre maior potencial para a sustentabilidade e para a certificação ambiental. A partir de então, a equipe de projetistas pode orientar o desenvolvimento das etapas subsequentes do projeto, integrando outras técnicas e ferramentas conforme necessário (CAMARGO, 2016).

Figura 38 - Ferramenta de Solução Biomimética



Fonte: Camargo, 2016.

4.2.4.1 Apresentação do caso

O projeto de Camargo (2016) teve por principal objetivo o desenvolvimento de um produto biomimético para fachadas que atuasse como isolante térmico (promovendo a geração de construções mais eficientes energeticamente), que fosse sustentável e que utilizasse critérios de certificação ambiental como norteadores do processo criativo (CAMARGO, 2016, p. 109). O trabalho delimitou que a zona de interesse seria aquela de clima temperado (temperaturas médias no inverno: 8° a 19°C; e no verão: 16° a 27°C).

Utilizou-se a ferramenta FSB para encontrar organismos que atenderiam aos requisitos do projeto. Diante de tal contexto, foram selecionadas algumas espécies a partir do quadro de elementos naturais inspiradores de Camargo (2016). Em seguida, para reduzir o escopo de pesquisa, foi gerado um novo quadro composto de 14 organismos³⁶ cujos elementos de inspiração natural foram analisados.

Esses organismos foram estudados sob a ótica dos princípios de certificação ambiental *LEED* e *AQUA-HQE* (Figura 39). A cada um deles foi atribuída uma nota que traduzia o seu potencial para o design do produto em questão, tendo em vista o cumprimento (ou não) dos critérios fixados para certificação ambiental. Os elementos naturais de maior pontuação revelaram características pertinentes para geração de melhores práticas em edificações. No caso da demonstração de Camargo (2016), os seguintes organismos (Figura 40, versão ampliada no Anexo G) foram destacados: cacto (sombreamento por forma e volumetria), gazela-de-thomson (sistema circulatório e respiratório para fuga), pinguim imperador (calefação, organização grupal e estrutura de penas) e numbat (pelagem para resfriamento no verão e aquecimento no inverno).

³⁶ Os 14 organismos investigados pela autora foram: cupim, carrapato, hipopótamo, aves *caprimulgidae*, tenrecídeos, cacto, estrela-do-mar, gazela-de-thomson, aloé-aljava, abelhas, esquilo, pinguim imperador, numbat e plantas do gênero *Lysichiton* (CAMARGO, 2016).

Figura 39 - Ferramenta de Solução Biomimética, preenchida por Camargo

CLIMA DO LOCAL: Clima temperado / Temperaturas médias: Inverno - 8° a 19°C e Verão - 16° a 27°C											POTENCIAL DE USO DA SOLUÇÃO BIOLÓGICA PARA INSPIRAÇÃO NO DESIGN DE PRODUTO
DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E USO: Eficiência energética através de um produto para ISOLAMENTO térmico nas fachadas											
Soluções biológicas	Princípios biológicos / Propriedades físicas	Aspectos do nível de biomimetismo	PRINCÍPIO ATENDE PROBLEMA E USO PROPOSTO	CRÉDITOS LEED-CS / AQUA-HQE							
				ENERGIA			CONFORTO TÉRMICO				
				Performance mínima de energia	Concepção térmica	Redução do consumo de energia para os sistemas de condicionamento de ar, ventilação e exaustão	Desempenho mínimo da qualidade do ar interno	Aumento da ventilação	Conforto térmico - Projeto	Implementação de medidas arquitet. para otimização do conforto higrotérm. de verão e de inverno	
Hipopótamo	Secreção da pele / aumento da espessura da camada ou alteração para baixa absorvidade	Sistema orgânico Técnicas de sobrevivência Resposta por autoproteção	X								BP
Cacto	Obstáculo para sombra	Forma e volumetria Estrutura	X								MP
Estrela-do-mar	Armazenamento de água	Técnica de sobrevivência Resposta ao clima por refrigeração Adaptação à limitada oferta de recursos	X								BP
Gazela-de-thomson	Forma da vascularização e circulação	Sistema circulatório e respiratório Técnica de sobrevivência Interação com outras criaturas Resposta ao clima por refrigeração	X								MP
Pinguins Imperadores	Organização em grupo / Camadas de ar intermediárias / baixa condutibilidade	Estrutura Técnica de sobrevivência Interação com outras criaturas Administração e coordenação do grupo Resposta ao clima por calefação	X								MP
Plantas gênero <i>Lysichiton</i>	Termostato natural	Estrutura Adaptação a diferentes níveis de luz e sombra									
Numbat	Organização e forma da pelagem / baixa absorvidade, condutibilidade e aumento da espessura da camada	Forma e volumetria Estrutura Resposta ao clima por calefação e refrigeração	X								MP

Fonte: Adaptado de Camargo, 2016.

Figura 40 - Organismos inspiradores identificados por Camargo



Fonte: Badgett, 2021 (<https://www.gardeningknowhow.com/>); Wild Kratts, 2020 (<https://www.wildkratts.com/>); Natural World Safaris, (<https://www.naturalworldsafaris.com/>); Kidadl Team, 2021 (<https://kidadl.com/>).

Nesse momento, foi concluída a aplicação da ferramenta. Camargo (2016) ponderou que os próximos passos consistiriam em: selecionar o conceito norteador da proposta para finalizar o projeto conceitual; realizar o desenvolvimento aprofundado das alternativas de design com base na abstração dos princípios naturais escolhidos; detalhar o produto, além de empreender simulações e testes. Também seria possível acompanhar a produção e o lançamento do produto no mercado.

4.2.4.2 Análise do caso

A FSB é um instrumento de abordagem baseada no problema, pois parte de uma demanda para o design de artefatos para edificações, permitindo combinar características naturais com sistemas de certificação ambiental para promover criações sustentáveis. Tal recurso está disponível para acesso gratuito na configuração que foi divulgada na Dissertação de Camargo (2016). Cumpre comentar que foi assinalado pela autora que tal ferramenta ainda se encontra em fase de ajustes, assim, é recomendável buscar informações a respeito de sua possível atualização.

Nitidamente, o quadro FSB não foi aplicado em sua totalidade, conforme explicou Camargo (2016), dado que o foco de sua Dissertação estava relacionado ao estudo das certificações ambientais e à apresentação do percurso de criação da própria ferramenta. Assim, a demonstração da FSB foi breve e integralmente abstrata. O desenvolvimento das etapas criativas envolveu as primeiras aproximações em termos da investigação biológica com a respectiva inserção das informações no quadro FSB. Assim, a aplicação da ferramenta nesse caso, careceu de completude, não havendo determinação sobre qual(is) organismo(s) seriam escolhidos dentre aqueles assinalados no momento inicial da busca (ou se todos seriam considerados para a criação). Por conseguinte, não houve conclusões ou propostas formais, visuais ou funcionais para o produto.

Tal como mencionado inicialmente, a FSB é um recurso aplicável em uma fase específica no desenvolvimento de produtos, isto é, para o desenvolvimento conceitual preliminar (formulação e análise de ideias). Desse modo, estão previstas etapas anteriores e posteriores à sua aplicação, bem como o uso de outras ferramentas criativas diversas.

Observou-se a ênfase de Camargo (2016) sobre a flexibilidade desse instrumento, ajustável a cada contexto de projeto, podendo ser ampliado, principalmente no que tange à lista de organismos inspiradores. Isso posto, seria pertinente realizar mais testes de seu uso em projetos para variados climas, que contassem com equipes multiprofissionais. Ainda nessa

perspectiva, Camargo (2016) ressaltou que a ferramenta poderia ser complementada com critérios de outros sistemas de certificação ambiental. Também evidenciou que o quadro FSB poderia servir de base para a criação de uma plataforma ou aplicativo que facilitasse o acesso e o uso desse recurso biomimético por arquitetos e designers.

Vale comentar que a FSB foi elaborada para o nicho de projetos de fachadas arquitetônicas. Nessa perspectiva, é interessante perceber semelhanças entre esse instrumento e as ferramentas DCGDPIF (Caso 1) e M-BA (Caso 3), no que se refere aos fatores bioclimáticos enfocados pelos recursos. Mas, conforme clarificado por Camargo (2016), o principal diferencial da FSB está em sua preocupação com sistemas de certificação ambiental para oportunizar a sustentabilidade.

Acredita-se que, com poucas adaptações, seria possível utilizar esse instrumento em outros cenários de projeto para edificações (para além da temática de termorregulação). No entanto, para que essa ferramenta pudesse ser aplicada em outros contextos de criação em design, seriam necessários ajustes, no intuito de conservar sua estrutura geral e, ao mesmo tempo, adotar outros critérios e normas de avaliação de produtos em escalas diferentes (ex. fatores de Análise do Ciclo de Vida – Capítulo 3).

O Quadro 10 disponibiliza as principais características relativas ao Caso 4.

Quadro 10 - Caracterização do Caso 4 - FSB

Categorias de Análise	Informações
Tipo	Quadro
Abordagem	Baseada no problema (design)
Tipo de acesso e distribuição	<i>Online</i>
Acessibilidade	Gratuita
Usada em sua totalidade?	Não
Dependência de outras ferramentas	Sim
Etapa do processo criativo	Etapa 2: criação conceitual / definição
Etapa final do caso	Pesquisa preliminar de organismos e preenchimento do quadro FSB
Organismo(s) selecionado(s)	Não especificou a escolha final
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Não especificou a escolha final
Princípios da vida utilizados	Não especificou a escolha final
Princípios biofílicos utilizados	Não especificou a escolha final
Sustentabilidade	Sim
Métricas de desempenho no caso	Sim

Fonte: A autora, 2021.

4.2.5 Caso 5 - Espirais Biomiméticas

As Espirais Biomiméticas (Anexo A) constituem uma das principais ferramentas adotadas por projetistas quando pretendem realizar projetos de inspiração natural. No caso descrito a seguir, Ahmar e Fioravanti (2014) utilizaram a abordagem “*challenge to biology*”, que se inicia com a definição do problema de design, para em seguida, investigar soluções a partir de pesquisas biológicas (ex. em literatura, plataformas biomiméticas, observações *in loco* ou pelo contato direto com especialistas e biólogos).

O processo é composto pelas seguintes etapas: definir o contexto, identificar a função, integrar os Princípios da Vida, descobrir modelos naturais, abstrair estratégias biológicas, realizar *brainstorming*, emular princípios em design e mensurar os resultados com base no Diagrama dos Princípios da Vida (Capítulo 3 e Anexo B).

4.2.5.1 Apresentação do caso

A temática central explorada por Ahmar e Fioravanti (2014) tratou da termorregulação em edifícios, incluindo o desafio de reduzir o consumo de energia. Os autores buscaram tal economia conjuntamente com a manutenção de um padrão mínimo de iluminação natural no ambiente. O cenário escolhido para o projeto foi a cidade do Cairo, no Egito. O espaço selecionado como base para a criação correspondeu a uma construção de escritórios, com salas de 24 m² voltadas para o Sul, compostas de revestimento de vidro, com capacidade para quatro pessoas.

Os autores focalizaram seus estudos no reino vegetal, entendendo que existem múltiplas semelhanças entre as condições enfrentadas pelas plantas e edifícios. Certamente, ambos são fixos a um local específico e, portanto, estão sujeitos às variações no clima circundante, precisando se adaptar e garantir sua “sobrevivência” sem a realização de largas movimentações pelo espaço (AHMAR; FIORAVANTI, 2014).

Após a definição desse contexto, foram estabelecidos os principais requisitos funcionais necessários ao produto a ser elaborado. Tais critérios foram estruturados com base em termos provenientes do universo biológico. Então, mais claramente, a questão norteadora foi: “como as plantas regulam o calor?” (AHMAR; FIORAVANTI, 2014, p. 596). Levando em conta tais determinações, empreendeu-se a pesquisa de organismos utilizando palavras-chave associadas ao questionamento previamente estabelecido. Esses termos, foram selecionados por sua capacidade de descrição tanto de sistemas de trocas de calor específicos ao design e à arquitetura, quanto para definir os elementos e sistemas encontrados na natureza. Ahmar e Fioravanti (2014) elegeram as seguintes palavras-chave para essa etapa:

- a) Radiação: tamanho, forma, localização de aberturas, elementos de sombreamento, morfologia geral da envoltória, capacidade do material em refletir a luz;
- b) Condução: resistência térmica, capacidade térmica, espessura e organização do material;
- c) Convecção: ventilação, tamanho, forma, localização de aberturas, sistema de (des)umidificação;
- d) Evaporação: ventilação, sistema de (des)umidificação, permeabilidade da envoltória, uso de *Phase-Change Materials*.

Como resultado dessa investigação, foram encontrados três grupos de elementos inspiradores, a saber: folhas, cascas de árvores e suculentas. Em seguida, um quadro para ordenar e resumir as características de cada um desses grupos foi construído, contendo uma breve descrição de cada elemento biológico, seu princípio natural e palavras-chave associadas. Também foram delineadas hipóteses sobre a aplicação desses conhecimentos no design do produto para fachadas (AHMAR; FIORAVANTI, 2014).

O próximo passo consistiu na seleção de organismos específicos para inspirar o projeto. Ahmar e Fioravanti (2014) escolheram as espécies *Carpinus betulus* (carpino) e *Fagus sylvatica* (faia) tendo em vista as particularidades das dobras presentes nas folhas desses vegetais. Essa morfologia foliar (Figura 41) contribui para o sombreamento das plantas e minimiza o superaquecimento por radiação solar.

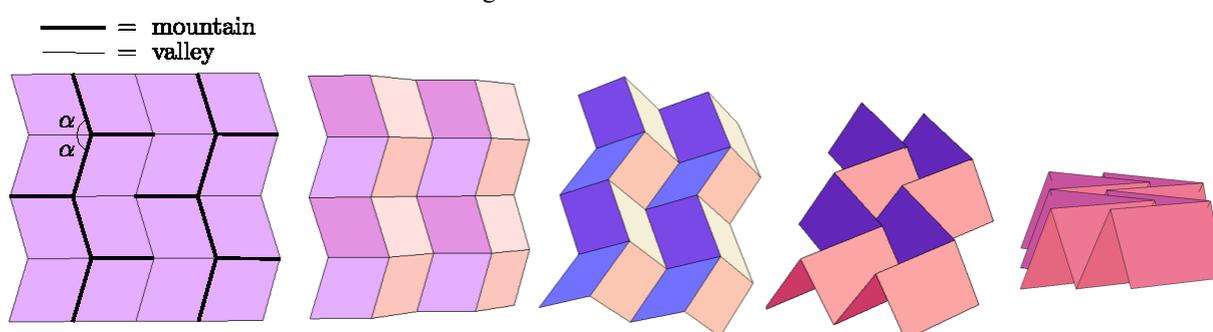
Figura 41 - Ilustrações de *Carpinus betulus* (à esquerda) e *Fagus sylvatica* (à direita)



Fonte: Wikimedia Commons, 2021. Acesso em (<https://pt.wikipedia.org/wiki/>).

Transpondo essas observações para o universo do design, imaginou-se que esses padrões de folhagens, aplicados às fachadas, poderiam sombrear porções do edifício de forma eficiente, principalmente a partir de componentes modulares com lâminas e dobras dispostas em ângulos orientados adequadamente em relação ao sol. Os autores conjecturaram que essa inspiração biológica seria de fácil transposição em termos de modelagem de componentes em programas de simulação digital. Vale comentar que o uso de dobraduras em design é corrente, sobretudo por proporcionar diferentes configurações com boa resistência. Com efeito, as padronagens criadas com base nas folhas de carpino e faia se assemelharam ao padrão “Miura-ori”, ilustrado na Figura 42 (AHMAR; FIORAVANTI, 2014).

Figura 42 - Padrão Miura-ori

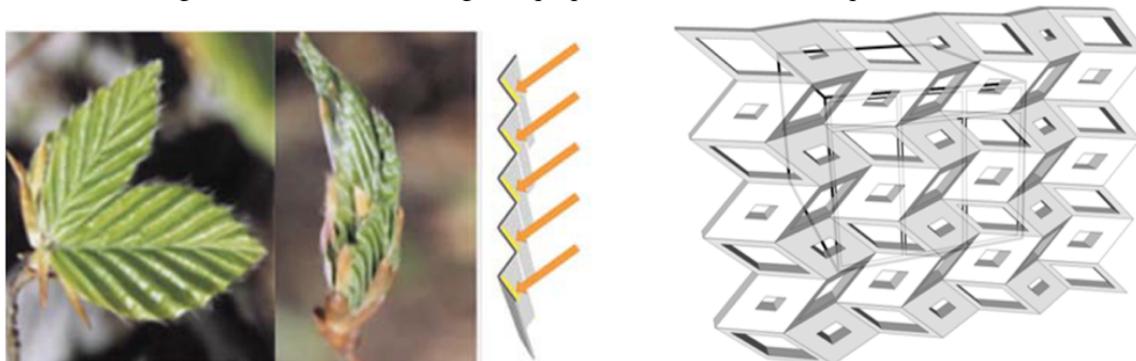


Fonte: Ginepro, Hull, 2014 (<https://www.semanticscholar.org/paper/Counting-Miura-ori-Foldings-Ginepro-Hull/3e5cc622fb6062be07265736f29c8558a810c4a3>).

A alternativa de design gerada correspondeu a uma tela perfurada composta por módulos geométricos acoplada à fachada original da construção, atuando como uma segunda camada. Ahmar e Fioravanti (2014) estabeleceram que o tamanho de cada uma dessas aberturas dependeria da incidência de radiação solar em cada superfície. Estabeleceu-se que as faces dos componentes voltadas para cima seriam sólidas ou com pequenas aberturas, já aquelas que estivessem voltadas para baixo, seriam dotadas de aberturas maiores, de diferentes tamanhos. Em resumo, o sistema proposto contaria com uma camada dupla na superfície da edificação, uma interna original (em revestimento de vidro) e outra externa, com módulos biomiméticos. O produto foi modelado no *software Galapagos*³⁷ para mensurar e definir as aberturas. Após alguns testes, optou-se pela proposta de melhor *performance*, ilustrada na Figura 43.

³⁷ *Galapagos* é um *software* para modelagem generativa integrado ao *Rhinoceros / Grasshopper*. Seu funcionamento é calcado em sistemas e algoritmos evolutivos, fundamentados na lógica de bases genético-moleculares. Assim, a escolha e combinação de parâmetros e variáveis (“genes” e “cromossomos”) influenciam na formação de alternativas de projeto (“populações”). As propostas mais adequadas “sobrevivem” e são selecionadas, de forma análoga à esfera biológica. Programas dessa natureza viabilizam a criação de geometrias complexas (BARROS; CARLO, 2017).

Figura 43 - Dobras em folhagens e proposta de sistema modular para fachadas



Fonte: Ahmar e Fioravanti, 2014.

Os autores estimaram o desempenho do sistema com o *software* DIVA³⁸, considerando os seguintes fatores: insolação anual, autonomia de luz natural diurna, áreas com excesso de iluminação e cargas térmicas para resfriamento necessárias durante um ano. Os resultados obtidos indicaram que o conceito de autossombreamento de folhas, aplicado no sistema modular biomimético, demonstrou uma redução do calor absorvido por radiação no interior do espaço. Após o posicionamento da malha biomimética na fachada, houve uma redução significativa da insolação no ambiente e da energia dispendida para resfriamento do espaço. Os requisitos mínimos de uso de luz natural foram atingidos proporcionando uma melhor distribuição da iluminação interna além de uma economia em termos de uso da iluminação artificial. Ahmar e Fioravanti (2014) ressaltaram que o modelo digital criado pode ser utilizado em outros cenários construtivos em que se opte por empregar a malha geométrica biomimética.

4.2.5.2 Análise do caso

A Espirais Biomiméticas, por compreenderem todas as etapas do percurso criativo, foram classificadas como um processo ou *framework*. Com relação à abordagem “*challenge to biology*”, adotada no caso analisado, salienta-se sua definição fundamentada no problema. As Espirais estão disponíveis para acesso gratuito em literatura especializada *online* e em *websites* como *Biomimicry 3.8* e *Biomimicry Toolbox*. Também podem ser encontradas mediante aquisição de publicações impressas, como o *Biomimicry Resource Handbook* de Baumeister et al. (2014).

Notou-se que o instrumento foi utilizado desde a etapa de definição do problema até a prototipagem e simulação digital do produto. No entanto, determinou-se que a ferramenta não

³⁸ DIVA é um *plug-in* para o *software* *Rhinoceros* que possibilita modelar, simular e mensurar fatores de iluminação, energia e radiação solar (DIVA, 2021).

foi aplicada em sua totalidade pois não incluiu o Diagrama de Princípios da Vida. Com efeito, conforme indicado na publicação de Baumeister et al. (2014), um dos momentos importantes no uso das Espirais Biomiméticas está na etapa de aplicação do Diagrama de Princípios da Vida para estabelecer os requisitos do projeto, guiar a pesquisa biológica e, ao final do processo, para a verificação do desempenho e adequação do produto.

Sob essa ótica, também fica clara a necessidade de complementação das Espirais Biomiméticas com outros instrumentos (ex. Diagrama de Princípios da Vida, *iSites*, pesquisas na *Ask Nature*, *Biomimicry Card Decks*). Cumpre comentar que os autores não especificaram quais foram os procedimentos para a realização da investigação biológica. Portanto, não foi possível concluir se tal pesquisa foi conduzida com o auxílio de biólogos, ou se contou, por exemplo, com observações *in loco*, consultas a bases de dados biomiméticas ou literatura especializada. Cogita-se que algumas fases do processo de projeto podem ser posteriormente aprofundadas pelos autores: detalhamento de componentes; testagem e aplicação em uma construção real.

É oportuno destacar que o Caso 5 partiu de uma problemática de projeto diretamente relacionada com fatores de contradição: o desafio de Ahmar e Fioravanti (2014) consistiu em reduzir o gasto energético e a carga térmica para resfriamento, mantendo, simultaneamente, a iluminação natural interna adequada. Nessa perspectiva, percebe-se que além das Espirais Biomiméticas, poder-se-ia empregar a ferramenta BioTRIZ, visto que se trata de um instrumento voltado para a exploração de fatores de contradição. Provavelmente, os resultados obtidos seriam distintos daqueles formulados pelos autores, dado que a BioTRIZ prioriza princípios gerais da natureza e não uma investigação de organismos específicos.

A escolha pela investigação de plantas foi determinada, segundo o relato dos autores, no começo da pesquisa biológica, e esteve vinculada à argumentação sobre semelhanças entre vegetais e edifícios em função da sua fixação em um único espaço. Assim, é interessante retomar as considerações expressas na análise do Caso 1, uma vez que ambos os projetos partem da mesma premissa. Com efeito, adotar uma perspectiva mais específica, como a de Ahmar e Fioravanti (2014), pode facilitar a condução da pesquisa por elementos naturais inspiradores, notadamente por equipes que não tenham familiaridade suficiente com noções biológicas ou que tenham limitação de prazo para encerramento do projeto.

Todavia, excluir tantos outros organismos elimina oportunidades de desenvolvimento criativo. Logo, seria interessante iniciar tal etapa partindo-se do questionamento geral de “como a natureza regula o calor”, ao invés de decidir pela frase norteadora “como as plantas regulam o

calor”. Uma vez mais, caso a característica de fixação no espaço seja considerada essencial, supõe-se que ela possa ser utilizada como diretriz para uma busca que inclua outros reinos e filos.

A investigação de Ahmar e Fioravanti (2014) concentrou-se nos aspectos morfológicos de folhagens, definindo, assim, que o estudo foi predominantemente realizado no “primeiro nível biomimético”, que enfatiza as formas naturais (EL-ZEINY, 2012).

O referido estudo aplicou simulação digital da *performance* térmica da proposta, sendo que a última etapa reportada pelos autores foi uma estimativa de desempenho utilizando *software* DIVA. Adicionalmente, na modelagem 3D foram ilustrados exemplos simplificados do sistema. Assim, em fases posteriores deste projeto poder-se-ia definir mais precisamente a morfologia do produto, os materiais de sua composição e seu sistema de instalação em fachadas.

No que concerne à sustentabilidade, os benefícios desse projeto advêm majoritariamente da redução nos gastos energéticos para manter o conforto térmico e visual no espaço com a implantação de uma camada dupla na fachada. É importante enfatizar que esse sistema só poderá ser considerado indubitavelmente ecológico ou sustentável se forem contabilizados, por exemplo, os gastos energéticos e insumos necessários para a produção de seus componentes, para sua instalação e manutenção, além de se prever como reintegrar os materiais aos ciclos produtivos e/ou ao ambiente de forma não prejudicial.

Presume-se que a principal vantagem das Espirais Biomiméticas seja sua fácil compreensão e sua abordagem ampla, que possibilita orientar todo o processo de criação, nos mais variados contextos de projeto. Esse recurso igualmente permite múltiplas adaptações e a inserção de ferramentas complementares em várias de suas etapas (ex. Diagrama de Princípios da Vida, *Ask Nature*). Isso confere maior liberdade aos projetistas e estimula-os a produzir propostas eficientes e bem adaptadas.

Quanto às limitações, é possível apontar que as Espirais Biomiméticas e o Diagrama dos Princípios da Vida não incluem fatores consolidados para mensuração da sustentabilidade. Mesmo que possuam uma estrutura completa em termos do processo criativo, os fatores associados à sustentabilidade nesses instrumentos são recomendações gerais. Tal avaliação, indicada ao final do processo “*challenge to biology*”, é de ordem teórica na maioria dos cenários de uso dessa ferramenta. Sendo assim, acredita-se ser importante que os projetistas busquem outros recursos que ofereçam uma estimativa mais precisa. Alternativas mais adequadas, eficientes e sustentáveis, poderiam ser selecionadas para implementação, tal como no trabalho de Ahmar e Fioravanti (2014) que adotaram *softwares* especializados para obter essas informações.

O Quadro 11 reúne as informações coletadas sobre o Caso 5.

Quadro 11 - Caracterização do Caso 5 - Espirais Biomiméticas

Categorias de Análise	Informações
Tipo	Processo / <i>framework</i>
Abordagem	Baseada no problema (design)
Tipo de acesso e distribuição	<i>Online</i>
Acessibilidade	Gratuita
Usada em sua totalidade?	Não
Dependência de outras ferramentas	Sim
Etapa do processo criativo	Etapa 1: planejamento / exploração Etapa 2: criação conceitual / definição Etapa 3: reflexão / desenvolvimento Etapa 4: prototipação / implementação
Etapa final do caso	Simulação digital e estimativa de desempenho
Organismo(s) selecionado(s)	<i>Carpinus betulus</i> e <i>Fagus sylvatica</i>
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Regulagem de temperaturas, luz e sombreamento
Princípios da vida utilizados	Ser responsivo e estar em sintonia com o local; ser eficiente na escolha de recursos; adaptar-se às condições de mudança; integrar desenvolvimento e crescimento
Princípios biofílicos utilizados	Luz dinâmica e difusa; conexão com sistemas naturais; padrões biomórficos; complexidade e ordem
Sustentabilidade	Sim
Métricas de desempenho no caso	Sim

Fonte: A autora, 2021.

4.2.6 Caso 6 - BioGen

A ferramenta BioGen, também conhecida como “*the living envelope method*,” foi criada por Badarnah (2012). Trata-se de um *framework* que pode ser incorporado em múltiplos contextos de projeto, alcançando variados campos do conhecimento, como design e arquitetura (BADARNAH, 2012; BADARNAH; KADRI, 2014).

O BioGen está estruturado nas seguintes etapas: a) identificação do problema e seus requisitos; b) investigação biológica; c) seleção de organismos ou sistemas naturais de interesse (chamados de “pináculos”); d) elaboração e análise das funções e particularidades referentes aos pináculos encontrados; e) análise, classificação e abstração dessas noções biológicas em estratégias para o campo do design; f) combinação das estratégias relevantes; g) estimativa de desempenho da criação; e h) avaliação e validação da proposta. Caso seja necessário, é possível implementar iterações desse processo para explorar outros pináculos ou para aprimorar o próprio produto gerado (BADARNAH, 2012; BADARNAH; KADRI, 2014).

Embora a ferramenta abranja a maioria das fases relativas ao design de um produto, é preciso realçar que este é um recurso que enfatiza a etapa de pesquisa biológica e de transferência desses conhecimentos para o desenvolvimento conceitual de alternativas (fase preliminar). Badarnah e Kadri (2014) admitem que esse direcionamento foi estabelecido uma vez que esse seria o momento mais desafiador do processo de design biomimético. Assim, as fases de mensuração, testagem, validação e implementação, embora estejam incluídas no BioGen, não constituem seu foco principal, pois a maioria dos projetistas já possui familiaridade com os procedimentos necessários para essas etapas.

O instrumento BioGen prevê o uso de ferramentas auxiliares, sobretudo aquelas formuladas por Badarnah (2012). Assim, durante o momento de investigação biológica emprega-se o instrumento do Modelo de Exploração³⁹, e, na pesquisa e abstração de conhecimentos da natureza são utilizadas, respectivamente, a Matriz de Análise de Pináculos⁴⁰ e a Matriz de Percurso

³⁹ O Modelo de Exploração é um diagrama ramificado (semelhante a um mapa mental) em que são organizadas as palavras norteadoras de um projeto a partir de categorias. Os níveis de ordenação desses termos são, respectivamente: 1) desafio de design; 2) funções e processos relacionados ao contexto; 3) vocábulos representativos de fatores que influenciam as funções e os processos previamente definidos; 4) pináculos ou elementos naturais inspiradores (BADARNAH, 2012). Desse modo, ao invés de iniciar a categorização diretamente pela pesquisa biológica, pretende-se obter uma ampla perspectiva sobre o cenário técnico e natural a ser investigado.

⁴⁰ A Matriz de Análise de Pináculos é uma ferramenta na qual são inseridas e analisadas as características dos pináculos provenientes da pesquisa biológica. Os pináculos que possuem certo grau de semelhança são agrupados, formando “pináculos imaginários” que condensam múltiplas características compatíveis com o desafio de design a ser solucionado. Esse tipo de organização convergente de elementos naturais inspiradores pode contribuir principalmente em projetos multifuncionais. Badarnah e Kadri (2014) destacaram que essa a organização em pináculos imaginários seria análoga à evolução convergente.

de Design⁴¹. Variadas fontes são utilizadas para a realização da pesquisa biológica. Dentre elas, estão: a troca direta de informações com biólogos e especialistas; consultas em livros e artigos científicos; e buscas em bases de dados biomiméticas, como *Ask Nature* ou *DANE* (BADARNAH, 2012; BADARNAH; KADRI, 2014; MUNTINGA, 2013).

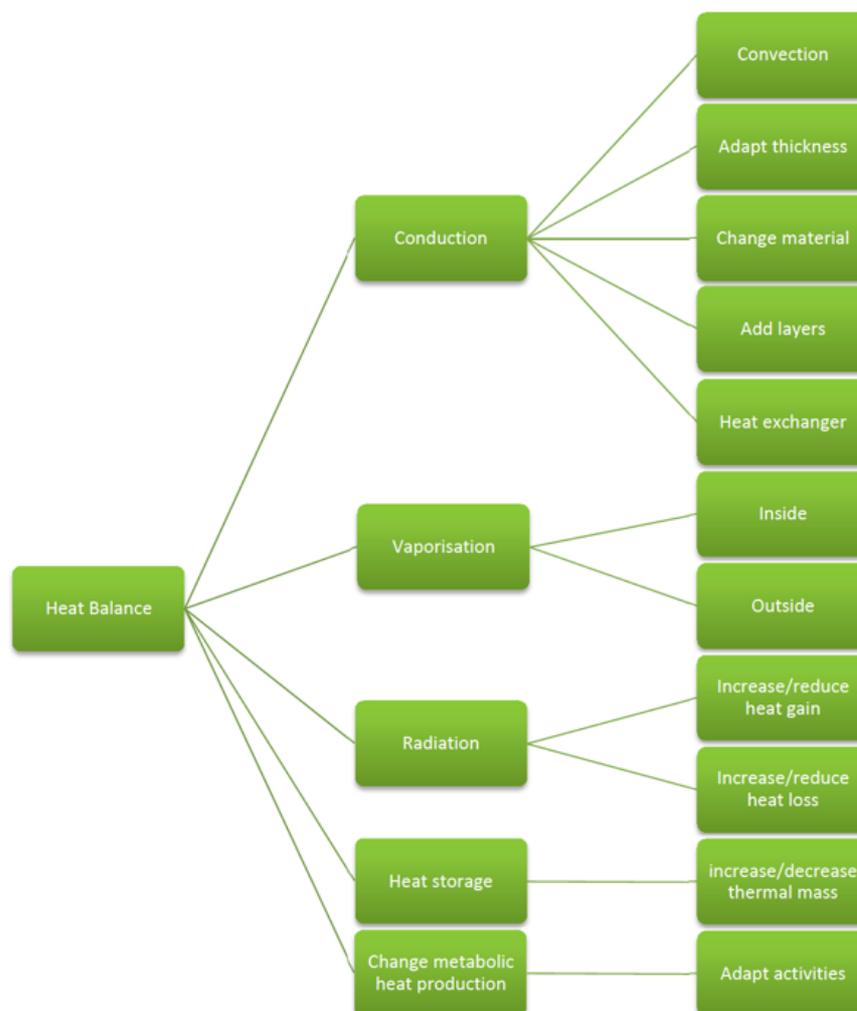
4.2.6.1 Apresentação do caso

O projeto de Muntinga (2013) teve por principal objetivo a aplicação da ferramenta BioGen para compreender e analisar como a natureza regula o calor e transpor esses conhecimentos para a criação de um produto para fachadas.

Tendo por base as etapas determinadas por Badarnah (2012), Muntinga (2013) iniciou seu projeto a partir da criação do “Modelo de Exploração” (Figura 44, versão ampliada no Anexo H). O preenchimento desse diagrama pela autora ocorreu a partir do conceito de equilíbrio térmico (*heat balance*). Tal assunto foi relacionado aos processos de condução, vaporização, radiação, absorção de calor e mudanças na taxa metabólica. No terceiro nível do instrumento, Muntinga (2013) reuniu fatores mais específicos, diretamente relacionados com aqueles do nível precedente. Vale observar que foram preenchidos apenas três níveis do Modelo de Exploração, optando-se por inserir os pináculos apenas nos passos subsequentes.

⁴¹ A Matriz de Percurso de Design, ou “*design path matrix*”, é composta pelos pináculos imaginários estabelecidos no uso prévio da Matriz de Análise de Pináculos. Esse instrumento ilustra a superposição dos pináculos imaginários evidenciando as características de maior relevância, para o projeto, nas zonas em que há uma concentração de linhas coloridas. Assim, as características predominantes dos pináculos e suas interconexões podem ser observadas (BADARNAH; KADRI, 2014).

Figura 44 - Diagrama do Modelo de Exploração para o projeto de Muntinga



Fonte: Muntinga, 2013.

Em seguida, foi feita a pesquisa biológica, cuja fonte principal foi a plataforma *Ask Nature*. Muntinga (2013) organizou as informações em um quadro, composto por 24 organismos e sistemas inspiradores relacionados ao desafio de projeto sobre regulação térmica. Tais elementos naturais foram classificados de acordo com cada termo representativo de processos – assinalados no segundo nível do Mapa de Exploração. Nesse quadro, também foram lançadas uma breve descrição das particularidades dos organismos selecionados e ilustrações. A autora foi minuciosa em sua pesquisa biológica, empreendendo outras classificações dos organismos encontrados, a exemplo da exploração e ordenação dos elementos naturais nas seguintes categorias: frequência de adaptação, frequência de uso de funcionalidades e características morfológicas relacionadas à passagem do calor.

Os organismos identificados foram redistribuídos em quadros com análises preliminares da viabilidade de aplicação desses elementos naturais como proposta de design. Nesse momento, Muntinga (2016) reduziu o escopo para facilitar as próximas etapas do projeto. A retirada ou

manutenção dos organismos foi baseada no atendimento aos seguintes critérios: flexibilidade, uso de energia, complexidade e viabilidade.

O próximo passo, indicado pelo BioGen, aprofundou a classificação, a abstração e o desenvolvimento conceitual com o preenchimento da Matriz de Análise de Pináculos. Muntinga (2013) decidiu retirar as categorias “*challenges*”, “*structural features*” e “*other features*”, de modo que o instrumento ficasse mais ajustado ao contexto de seu projeto. Consequentemente, para o caso analisado, a Matriz de Pináculos (Figura 45, versão ampliada no Anexo I) foi composta pelos seguintes fatores: processos, pináculos, fluxo, adaptação, escala, contexto ambiental, características morfológicas e materiais. Como é possível constatar na referida ilustração, a autora condensou os organismos coletados em cinco pináculos imaginários.

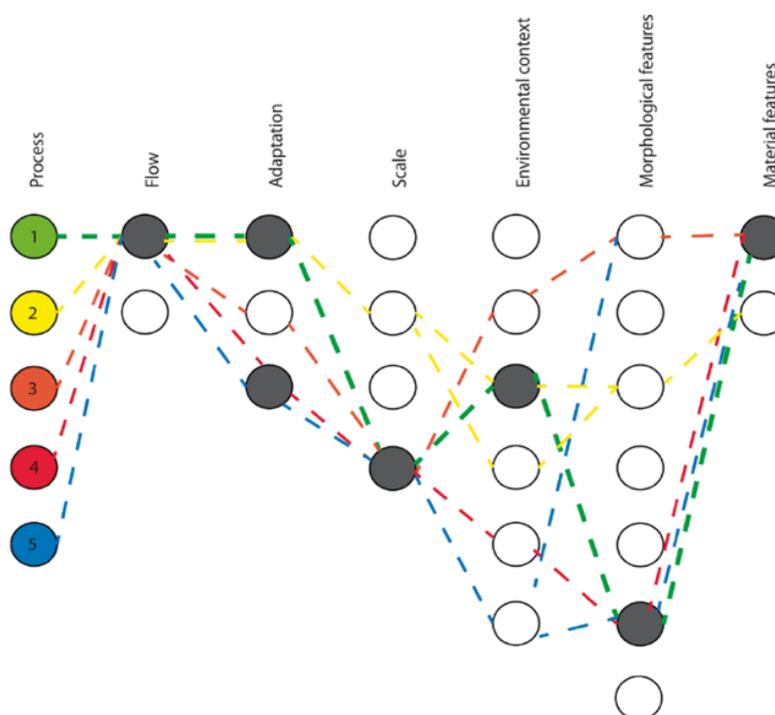
Figura 45 - Matriz de Análise de Pináculos de Muntinga

Process	Pinnacles	Flow		Adaptation	Scale			Environmental context				Morphological features					Material features						
		Active	Passive		Physiological	Nano	Micro	Meso	Macro	Arid	Tropical	Moderate	Continental	Polar	Aquatic	Modular & Compact	Filaments	Adjacent	Branching	Fluffy	Conduits	Cluster	Conductive
Conduction	Elephants	X		X				X		X									X	X	X	X	
	Pelicans		X	X				X			X								X	X	X		
	Termites	X		X				X	X										X	X	X		
	Bird	X	X					X		X	X				X				X			X	
	Seal	X	X			X				X		X	X			X			X	X	X	X	
	Rabbits	X		X				X		X	X				X				X			X	
	Reindeers	X		X				X		X	X				X				X			X	
	Humans	X			X			X		X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	
	Whales	X	X			X								X					X	X	X	X	X
	Imaginary pinnacle 1	X	X					X		X										X	X	X	X
Evaporation	Nightjars	X	X	X		X			X	X				X	X				X			X	
	Bees	X			X			X		X	X										X		
	Humans	X	X			X		X	X	X	X					X			X				
	Ants	X	X			X		X	X	X	X					X			X				
	Datura flower	X	X			X				X	X					X						X	
	Imaginary pinnacle 2	X	X			X			X	X						X						X	
Radiation	Dragonfly	X			X			X	X	X				X								X	
	Cactuses		X	X				X	X						X						X	X	
	Mangroves	X		X			X			X					X							X	
	Penguins	X		X	X			X				X			X						X	X	
	Alligators	X	X			X			X									X	X	X	X		
	Toco Toucan	X	X			X			X								X			X	X	X	
	Flowers	X		X	X			X		X	X				X					X		X	
	Imaginary pinnacle 3	X		X				X	X					X								X	
Change metabolic rate	Humans	X			X	X	X	X	X	X	X	X								X		X	
	Bears	X			X	X	X			X										X		X	
Imaginary pinnacle 4	X			X	X	X			X										X		X		
Store heat	Starfish	X			X			X				X		X					X		X	X	
	Imaginary pinnacle 5	X			X			X				X		X					X		X	X	

Fonte: Muntinga, 2013.

O próximo passo do uso do BioGen, consistiu em reunir os pináculos imaginários gerados na etapa anterior e inseri-los nas colunas da Matriz de Percurso de Design (Figura 46, versão ampliada no Anexo J). Caso a autora seguisse estritamente as recomendações previstas nessa ferramenta, o projeto seria fundamentado na regulação ativa do fluxo de calor, os mecanismos seriam concebidos na escala macroscópica, o contexto ambiental corresponderia ao clima moderado e a adaptação biomimética seria realizada pela exploração de características relacionadas a formas, materiais e processos naturais.

Figura 46 - Matriz de Percurso de Design de Muntinga



Fonte: Muntinga, 2013.

Com base nessas indicações – obtidas mediante uso da Matriz de Percurso de Design e pelas preferências pessoais de Muntinga (2013) – foram selecionados os organismos de relevância para dar continuidade ao desenvolvimento das alternativas conceituais. Assim, foi estabelecido que seriam considerados, para o projeto, exclusivamente os princípios de condução, radiação e armazenamento de calor, visto que eram compatíveis com o cenário dos Países Baixos, local escolhido para implementação do produto a ser criado. Dessa maneira, tal especificação implicou em um descarte dos fatores de evaporação e de “mudanças na produção de calor pelo metabolismo”, uma vez que não eram adequados ao contexto de trabalho.

Na sequência, a autora gerou sete alternativas⁴² conceituais para o design do produto, baseadas nos seguintes elementos: sistema vascular de animais; penas de aves, pelagem adaptável às estações, comportamento de pinguins, sistema de abertura e fechamento de folhas e pétalas; e o conceito de “*variable thermal mass*”⁴³ associado às estrelas-do-mar.

Muntinga (2013) fez algumas estimativas do desempenho de cada uma das propostas, visando selecionar aquela mais eficiente e adaptada ao contexto de aplicação. Os fatores para avaliação foram: flexibilidade, gasto energético, custos de implementação, tempo de resposta, usabilidade ao longo do ano e, principalmente, a influência do aspecto biomimético em cada caso. Após essa avaliação, optou-se por mesclar algumas das alternativas elaboradas para o desenvolvimento das etapas consecutivas, evidenciando-se o conceito de massa térmica, pois ele apresenta uma boa funcionalidade mesmo no verão. Certamente, ambas as ideias estavam direcionadas para a produção de um sistema para superfícies de edifícios, composto de tubulações que utilizariam o ar externo para resfriar os fluidos no interior do sistema, contribuindo para amenizar as temperaturas internas.

Assim, surgiu o sistema STAR (Solução para um Sistema de Resposta Térmica Adaptativa) inspirado nas estrelas-do-mar da espécie *Pisaster ochraceus* (Figura 47). Cumpre comentar que esses animais possuem a capacidade de modificar sua massa corporal por meio da absorção de água do mar em suas cavidades celomáticas, antes de serem expostos às altas temperaturas da maré baixa. Desse modo, quando uma estrela-do-mar fica sob o sol durante a maré baixa, a água fria do oceano ajuda a manter a temperatura corporal sob controle. Uma vez de volta à água, esse equinodermo pode liberar o líquido previamente absorvido (MUNTINGA, 2013).

⁴² Dentre as ideias criadas pela autora, destacaram-se: 1) sistema para bombeamento de água nas superfícies de edifícios; 2) barreiras externas para absorção e liberação de calor; 3) camadas móveis adicionais à fachada; 4) estratégias de mudança na área de superfície com elementos móveis; 5) mecanismo passivo de materiais inteligentes para gerar aberturas e fechamentos dependendo das condições externas; 6) sistema de circulação de água na fachada como elemento de massa térmica variável; 7) sistema de bombeamento de fluidos em pequenos tubos na camada interna da fachada para resfriamento das paredes e irradiação do calor absorvido para fora (MUNTINGA, 2013).

⁴³ O conceito de “*variable thermal mass*” será traduzido aqui como equivalente à expressão “massa térmica variável”. Cabe explicitar que “*thermal mass*” e “massa térmica” são expressões sinônimas à “capacidade térmica”.

Figura 47 - Estrela-do-mar da espécie *Pisaster ochraceus*



Fonte: Bryant, 2014 (<http://nathistoc.bio.uci.edu/Echinos/Pisaster.htm>).

Tomando isso por base, o produto proposto contou com a substituição da água por *Phase-Change Materials* (PCM) e *Phase-Change Slurries* (PCS)⁴⁴, que possuem melhor desempenho do que a água. Esses materiais foram escolhidos por serem bombeáveis e por sua capacidade de armazenar e liberar calor quando passam por mudanças de fase (MUNTINGA, 2013). O sistema STAR contou com tubulações preenchidas com PCS, distribuídas em lamelas internas e externas à construção, que absorveriam o calor durante o dia. Pela noite, o PCS seria bombeado para o exterior, diretamente para os brises (ou lamelas) na fachada, passando por um processo de resfriamento natural e passivo em função do contato com as temperaturas externas. Quando estivesse completamente resfriado, o fluido seria novamente bombeado para o topo visando a armazenar o calor na manhã seguinte (MUNTINGA, 2013).

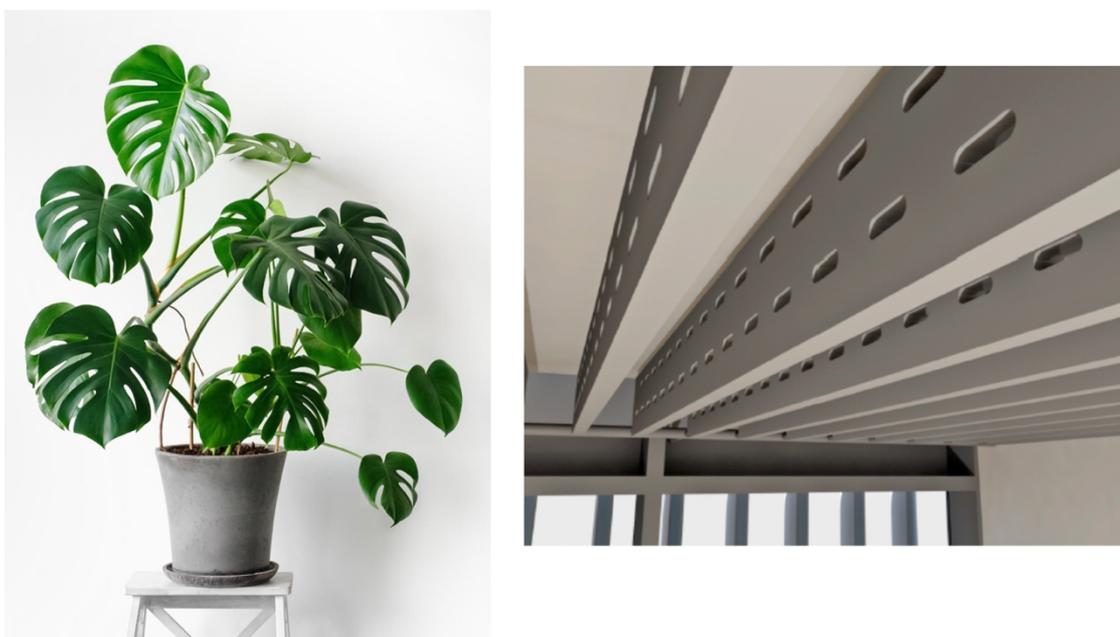
É válido mencionar que os sistemas associados à “massa térmica variável” são de funcionamento vagaroso, o que faz com que sejam menos flexíveis do que as demais alternativas de projeto consideradas. Contudo, isso não seria necessariamente uma desvantagem, pois essa lentidão faz com que o clima interno permaneça constante, o que, por sua vez, pode ser considerado como mais confortável.

⁴⁴ *Phase-change materials* (PCMs), ou "materiais de mudança de fase" (em tradução livre), são substâncias que absorvem ou liberam grandes quantidades de calor quando são submetidos a mudanças em seu estado físico (ex. sólido para líquido). *Phase-change slurries* (PCSs), ou “lamas de mudança de fase” (em tradução livre), são materiais compósitos, de textura viscosa, que possuem propriedades semelhantes às de PCMs (MA; ZHANG, 2020; PAUSE, 2019).

O sistema STAR necessitaria de uso de energia para a operação de bombeamento do fluido em seu interior. Mesmo assim, o produto foi considerado como de grande eficiência porque seu gasto energético seria reduzido ao máximo, fazendo com que houvesse economia em termos do uso de outros sistemas para a manutenção do conforto interno, por exemplo dispensando ar-condicionado (MUNTINGA, 2013).

As lamelas internas do sistema STAR, também foram inspiradas pela natureza, mais especificamente por folhas de *Monstera deliciosa* (Figura 48). Tal planta combina uma grande área de superfície com um alto coeficiente de transferência de calor por convecção, associado à presença de furos nas folhas. Assim, ao efetuar perfurações nas lamelas internas, posicionadas no teto dos ambientes, aumenta-se sua superfície de contato com o ar e o transporte de calor por convecção. Esses componentes seriam fabricados em alumínio – um material leve, resistente e bom condutor – que facilitaria o funcionamento do sistema (MUNTINGA, 2013).

Figura 48 - Costela-de-Adão (*Monstera deliciosa*) e lamelas internas do sistema STAR



Fonte: Kseniia, 2021 (<https://www.miraclegro.com/>) e Muntinga (2013).

O sistema STAR foi concebido com o propósito de proporcionar flexibilidade em sua instalação, podendo ser: a) um elemento completamente integrado na fachada de edifícios; b) um sistema modular adicional para uso em construções pré-existentes; ou c) ser feito sob medida. Em outras palavras, há uma grande variedade nas composições visuais possíveis (MUNTINGA, 2013).

O sistema e seus componentes foram detalhados e simulados em múltiplos *softwares* como: *Matlab/Simulink*⁴⁵, *Rhinoceros 3D 4.0*⁴⁶ e *Dialux*⁴⁷. A autora também ponderou sobre os processos de fabricação requeridos para produzir os componentes e examinou os potenciais custos do próprio produto (MUNTINGA, 2013). Uma aplicação simples do sistema STAR em um edifício de escritórios foi empreendida (Figura 49). Nela, as lamelas externas não foram aplicadas na totalidade da fachada, ficando restritas aos espaços que necessitavam de maior refrigeração. As lamelas dos espaços internos foram dotadas de perfurações para aumentar a sua área de superfície. Muntinga (2013) salientou que a configuração visual de projeto não necessariamente evidencia seu aspecto biomimético. Mas, essa opção de conformação retilínea e minimalista do produto foi intencional, o que, segundo a autora, indicaria que projetos biomiméticos nem sempre requerem o uso de formas orgânicas.

Figura 49 - Lamelas externas e modelagens digitais do *STAR-system*



Fonte: Muntinga, 2013.

⁴⁵ *Matlab/Simulink* é um programa de modelagem digital, simulação e análise de sistemas complexos e dinâmicos, que é utilizado em design de produto, construção e engenharia (MATHWORKS, 2021).

⁴⁶ *Rhinoceros 3D* é um *software* de modelagem digital de amplo uso em design, arquitetura e engenharia. Possui grande versatilidade por sua estrutura baseada em NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), além de poder ser combinado com diversos *plug-ins* que ampliam suas funcionalidades. Com ele, podem ser elaborados múltiplos projetos, incluindo geometrias orgânicas complexas (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2021).

⁴⁷ O *Dialux* é uma ferramenta digital para o design de iluminação que viabiliza planejamento, cálculo e visualização de projetos de sistemas luminosos em ambientes internos e externos (DIAL, 2021).

Concluiu-se que com o uso do sistema STAR, é desnecessário proporcionar qualquer resfriamento adicional do espaço. Com efeito, estimou-se que ao usar o produto, haveria apenas oito dias por ano em que a temperatura interna ficaria acima de 26°C (no contexto dos Países Baixos). Outro benefício dessa criação consiste em seu reduzido consumo energético. Além disso, Muntinga (2013) admitiu que o sistema STAR poderia ter resultados ainda mais expressivos, se estivesse na superfície de edifícios situados em locais marcados por alta amplitude térmica, a exemplo de zonas de clima desértico (MUNTINGA, 2013).

4.2.6.2 Análise do caso

Conforme já foi introduzido, o BioGen abrange a maioria das etapas do percurso de criação, sendo classificado como um processo/*framework* de abordagem baseada no problema. Essa ferramenta está disponível gratuitamente para acesso nas publicações de Badarnah (2012), Badarnah e Kadri (2014) e Muntinga (2013), que veicularam instruções para uso e retrataram aplicações desse recurso. O instrumento é composto por ferramentas complementares, apresentadas anteriormente: Modelo de Exploração, Matriz de Análise de Pináculos e Matriz de Percurso de Design. Similarmente, para a pesquisa biológica e de pináculos, é preciso complementar o BioGen com outros recursos, tal como bases de dados biomiméticas, observações *in loco*, artigos, livros e outros elementos de literatura acadêmica, além do contato direto com biólogos e especialistas (BADARNAH; KADRI, 2014).

No caso analisado, averiguou-se que todas as etapas disponíveis para o uso da ferramenta BioGen foram efetivadas por Muntinga (2013). Mais precisamente, a aplicação da ferramenta abarcou as fases de planejamento, criação conceitual, reflexão, prototipação e entrega. A etapa final relatada pela autora correspondeu ao detalhamento, simulação digital e aferição da estimativa de desempenho do produto/sistema.

A proposta formulada por Muntinga (2013) integrou o uso de energia elétrica como requisito para o funcionamento do sistema. Mesmo com esses gastos (necessários somente para bombeamento do fluido), o *STAR-system* denota preocupações com aspectos de sustentabilidade e eficiência. Ora, com o produto, os dispêndios de recursos para a operação do sistema seriam muito inferiores em comparação com a economia de energia gasta no resfriamento de edificações. De fato, esse sistema utiliza trocas energéticas por condução vinculadas às variações nas temperaturas do meio externo como principal elemento desencadeador do resfriamento.

Mas, para que essas características sustentáveis sejam mantidas, é imprescindível evitar PCMs que não sejam de base vegetal, ou seja, compostos de parafinas (MUNTINGA, 2013). Também é importante ter em vista os gastos de insumos e energia associados ao uso e manutenção desse produto. Além disso, é cabível prever como será realizada a desmontagem e o descarte dessa criação, para que os materiais de sua composição possam ser reintegrados às esferas técnicas e naturais sem impactos nocivos para nenhuma delas. No aspecto de simulação e modelagem digital, a autora não poupou esforços, já que utilizou múltiplos *softwares* para conduzir a mensuração e a estimativa de desempenho do sistema, bem como para refinar seus componentes. Outros recursos associados a essas etapas foram: *Rhinoceros 4.0*, *Dialux* e *Matlab/Simulink*.

Acrescentaram-se diversas especificações pertinentes ao projeto, como os materiais para os componentes do sistema (principalmente das lamelas e PCMs/PCSs). O custo da aplicação do *STAR-system* e os processos de fabricação necessários para sua produção foram estimados. Muntinga (2013) também avaliou a performance da criação pela ótica da eficiência do sistema ao longo do dia e da influência do calor na superfície. Enfatiza-se que, se o projeto fosse aplicado no mundo real, seria necessária uma pesquisa suplementar sobre os PCMs e PCSs, pois estes fluidos ainda não são comumente utilizados em larga escala em produtos para construções.

Em sua demonstração, Muntinga (2013) descreveu de modo pormenorizado o processo de aplicação da ferramenta BioGen. Sendo assim, notou-se que a autora escolheu realizar ajustes nas ferramentas auxiliares ao *framework*, adaptando-as a seu contexto de projeto. Dessarte, a autora incluiu não mais que três níveis no Modelo de Exploração. Ou seja, preferiu inserir e registrar os pináculos somente nas etapas posteriores. A Matriz de Análise de Pináculos também foi ajustada, dado que Muntinga (2013) determinou um único desafio de projeto, dispensando o uso da seção “desafios”. Igualmente foram eliminados os campos “características estruturais” e “outras características”. Considerando que as categorias da Matriz de Análise de Pináculos foram alteradas, isso também se refletiu na Matriz de Percurso de Design, já que cada tópico ou coluna da primeira matriz, foi transposto para a segunda.

A principal fonte de conhecimentos biológicos foi obtida com a exploração da base *Ask Nature*. Essa pesquisa foi complementada com a elaboração de quadros, para sintetizar e analisar as informações coletadas sobre os organismos. A autora também empregou recursos pictóricos, inserindo ilustrações e fotografias representativas dos organismos. Acredita-se que essa ordenação de elementos naturais inspiradores possa estimular outros pesquisadores e designers interessados em realizar projetos com a ferramenta BioGen.

Para demonstrar que um projeto biomimético não necessariamente requer formas orgânicas, Muntinga (2013) utilizou uma configuração geométrica e sintética em sua demonstração do sistema STAR. Decerto, essa decisão pode facilitar a produção do ponto de vista fabril. Mas, julga-se que explorar propostas curvilíneas, gerando outros formatos de lamelas externas poderia ser vantajoso em termos de conferir uma maior distinção visual entre os edifícios e uma melhor associação entre o artefato e a sua inspiração biológica. A fabricação dessas formas orgânicas poderia ser facilitada com o uso de técnicas de impressão 3D, por exemplo.

Cabe comentar sobre o processo de criação das lamelas internas, uma vez que esses componentes também seriam fruto de bioinspiração, mais especificamente, do estudo de folhas de *Monstera deliciosa*. Ainda que tenha essa fundamentação biológica, o trabalho de Muntinga não esclarece se esses componentes seriam resultantes de outra aplicação específica do BioGen. Na ausência dessa especificação, não foi possível identificar qual recurso biomimético foi empregado para encontrar tal solução. Este é apenas um componente do sistema proposto, e o foco do trabalho permaneceu na abordagem inspirada na espécie *Pisaster ochraceus* utilizada para criar o sistema STAR.

Limites nessa ferramenta podem ser mencionados, como por exemplo a necessidade de compreensão do uso de ferramentas complementares indispensáveis à sua estruturação. Badarnah e Kadri (2014) ressaltaram que o BioGen enfatiza as fases de pesquisa, organização de conhecimentos biológicos, abstração e transposição dessas noções para o design. De acordo com essas autoras, as etapas subsequentes dos projetos seriam de amplo conhecimento por parte dos projetistas. Contudo, seria pertinente que a ferramenta incluísse mais especificações relacionadas a essas etapas mais avançadas dos projetos, principalmente de modo a preservar as características biomiméticas contidas nos conceitos gerados. Ademais, seria interessante fornecer diretrizes para uma consideração ainda mais consciente dos fatores de sustentabilidade por ocasião da finalização do projeto.

Avaliou-se que a ferramenta BioGen proporcionou benefícios ao projeto de Muntinga (2013), principalmente por se tratar de um recurso que orienta a condução das etapas do percurso de criação. A autora complementou essa perspectiva admitindo que não teria pensado em trabalhar com o fator da “variabilidade de massa térmica” em seu projeto, caso adotasse tão somente recursos criativos não-biomiméticos e convencionais. Outra vantagem desse instrumento está associada à sua flexibilidade e adaptabilidade para realização de projetos em variadas áreas do conhecimento.

O Quadro 12 mostra as informações gerais obtidas sobre o Caso 6.

Quadro 12 - Caracterização do Caso 6 - BioGen

Categorias de Análise	Informações
Tipo	Processo / <i>framework</i> , diagrama e matrizes
Abordagem	Baseada no problema (design)
Tipo de acesso e distribuição	<i>Online</i>
Acessibilidade	Gratuita
Usada em sua totalidade?	Sim
Dependência de outras ferramentas	Sim
Etapa do processo criativo	Etapa 1: planejamento / exploração Etapa 2: criação conceitual / definição Etapa 3: reflexão / desenvolvimento Etapa 4: prototipação / implementação Etapa 5: entrega / detalhamento
Etapa final do caso	Detalhamento dos componentes do sistema, simulação digital e estimativa de desempenho
Organismo(s) selecionado(s)	<i>Pisaster ochraceus</i> e <i>Monstera deliciosa</i>
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Massa térmica variável (sistema STAR), transferência de calor por condução e convecção (lamelas internas)
Princípios da vida utilizados	Ser responsivo e estar em sintonia com o local; ser eficiente na escolha de recursos; adaptar-se às condições de mudança; integrar desenvolvimento e crescimento
Princípios biofílicos utilizados	Luz dinâmica e difusa; conexão com sistemas naturais; complexidade e ordem
Sustentabilidade	Sim
Métricas de desempenho no caso	Sim

Fonte: A autora, 2021.

4.2.7 Análise Comparativa dos Casos

Após realizar a leitura, descrição e análise de cada caso separadamente, desenvolveu-se uma análise comparativa do conjunto. O Quadro 13, a seguir, apresenta uma síntese desses seis casos, de acordo com as categorias gerais anteriormente definidas.

Quadro 13 - Síntese das características dos casos e das ferramentas biomiméticas

Categorias	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Ferramenta	DCGDPIF	BioTRIZ	M-BA	FSB	Espir. Biomim.	BioGen
Tipo	Quadro	Matriz	Processo, quadro e base de dados	Quadro	Processo	Processo, diagrama e matrizes
Abordagem	Baseada no Problema	Baseada no Problema	Baseada no Problema	Baseada no Problema	Baseada no Problema	Baseada no Problema
Acesso e distribuição	Online	Online	Online	Online	Online	Online
Acessibilidade	Gratuita	Comercial	Gratuita	Gratuita	Gratuita	Gratuita
Usada em sua totalidade?	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Depende de outras ferram.?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Etapa do processo criativo	Etapa 1 Etapa 2 Etapa 3	Etapa 1 Etapa 2 Etapa 3	Etapa 1 Etapa 2 Etapa 3 Etapa 4	Etapa 2	Etapa 1 Etapa 2 Etapa 3 Etapa 4	Etapa 1 Etapa 2 Etapa 3 Etapa 4 Etapa 5
Etapa final do caso	Desenhos esquemáticos preliminares	Desenhos esquemáticos preliminares e estimativa de desempenho	Simulação digital e estimativa de desempenho	Pesquisa preliminar de organismos e preenchimento do quadro FSB	Simulação digital e estimativa de desempenho	Detalhamento dos componentes do sistema, simulação digital e estimativa de desempenho
Organismo(s) selecionado(s)	Sementes de <i>Mesem bryanthemum</i>	Não especificou (malha hexagonal)	<i>Echinocactus grusonii</i>	Não especificou a escolha final	<i>Carpinus betulus</i> e <i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pisaster ochraceus</i> e <i>Monstera deliciosa</i>
Princípio(s) natural(is) utilizado(s)	Dispersão de sementes; hidrocoria; higroscopia	Estrutura; qualidade local; extração	Regulagem de temperatura, luz e sombreamento	Não especificou a escolha final	Regulagem de temperatura, luz e sombreamento	Massa térmica variável, transferência de calor por condução e convecção
Princípios da vida utilizados	Responsividade e sintonia c/ local; eficiência na escolha de recursos	Responsividade e sintonia c/ local; eficiência na escolha de recursos; desenvolvimento e crescimento	Responsividade e sintonia c/ local; eficiência na escolha de recursos; adaptar-se às condições de mudança; desenvolvimento e crescimento	Não especificou a escolha final	Responsividade e sintonia c/ local; eficiência na escolha de recursos; adaptar-se às condições de mudança; desenvolvimento e crescimento	Responsividade e sintonia c/ local; eficiência na escolha de recursos; adaptar-se às condições de mudança; desenvolvimento e crescimento
Princípios biofílicos utilizados	Luz dinâmica e difusa; conexão com sistemas naturais; variab. térmica e de fluxo de ar	Padrões biomórficos; complexidade e ordem	Luz dinâmica e difusa; conexão com sistemas naturais; padrões biomórficos; complexidade e ordem; variab. térmica e de fluxo de ar	Não especificou a escolha final	Luz dinâmica e difusa; conexão com sistemas naturais; padrões biomórficos; complexidade e ordem	Luz dinâmica e difusa; conexão com sistemas naturais; complexidade e ordem
Sustentabilidade	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Métricas	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: A autora, 2021.

A investigação, focalizada nesta segunda parte da Dissertação, permitiu analisar como as ferramentas biomiméticas são adotadas em processos de design de produtos para fachadas, suas principais características, vantagens e limitações, além de observar seu potencial para estimular aspectos de sustentabilidade.

Tal como discutido no Capítulo 3, existem duas abordagens principais em biomimética: uma baseada no problema de design e outra que parte diretamente da investigação biológica (*solution-driven*). Tomando por base a classificação de Baumeister et al. (2014) e de Wanieck et al. (2017), verificou-se que, nos casos analisados, todas as ferramentas tiveram uma abordagem baseada no problema.

Com relação ao foco da pesquisa biológica, foi notável, nos seis casos examinados, a tendência de inspiração em formas e processos naturais, os quais representam os dois primeiros níveis de investigação biomimética (EL-ZEINY, 2012). Ou seja, a abordagem biomimética fundamentada em relações ecossistêmicas não foi suficientemente explorada nos casos 1 a 6. Conjectura-se que isso possa estar relacionado à estrutura das ferramentas biomiméticas que, não necessariamente, conduzem os projetistas a um percurso criativo calcado em relações ecossistêmicas. Nesse sentido, a inclusão de conhecimentos associados aos ecossistemas precisaria partir de iniciativas dos membros das equipes criativas. De um lado, é importante evidenciar a maior viabilidade da pesquisa biomimética formal e processual que foi executada nos seis casos. Porém, de outro lado, é preciso reconhecer a limitação do enfoque ecossistêmico, que pode ser compreendida devido ao seu elevado grau de complexidade, uma vez que deveriam ser consideradas as intrincadas relações entre organismos e contexto. Essa suposição esclareceria a ausência de inspiração ecossistêmica como principal fonte de conhecimentos naturais nesses projetos. Para assegurar iniciativas nesse sentido, parece pertinente incluir a participação de biólogos que atuariam na facilitação das etapas de pesquisa da natureza em associação com os designers. É essencial ressaltar que a literatura especializada recomenda que os projetos biomiméticos adotem a perspectiva ecossistêmica, por meio da qual a geração de produtos sustentáveis pode ser melhor fomentada (BAUMEISTER et al., 2014; COHEN; REICH, 2016; WANIECK et al., 2017).

Quanto à caracterização atribuída a cada caso, observou-se que as ferramentas foram consideradas como processos/*frameworks*; matrizes; quadros; diagramas e bases de dados. Todos os casos adotaram ferramentas que têm como forma de acesso e distribuição a modalidade *online*, seja em *sites* e *softwares*, ou em publicações acadêmicas e artigos científicos natos-digitais. Os instrumentos DCGDPIF, FSB, M-BA, Espirais Biomiméticas e

BioGen estavam disponíveis gratuitamente por ocasião da análise dos casos. Apenas a ferramenta BioTRIZ foi classificada em uma categoria diferente (acesso comercial), visto que pode ser adquirida em plataformas especializadas.

O Quadro 13 permite, igualmente, notar que as ferramentas foram utilizadas em sua totalidade nos casos 2, 3 e 6. Já nos casos 1, 4 e 5, os autores enfatizaram outros aspectos em suas publicações em detrimento do completo uso dos instrumentos biomiméticos. Mais precisamente, as ferramentas DCGDPIF, FSB e Espirais Biomiméticas não foram aplicadas até a última etapa, estipulada nos próprios recursos. No Caso 5, sequer foi informado se o Diagrama dos Princípios da Vida foi adotado para direcionar o projeto.

Todos os projetistas recorreram a alguma ferramenta complementar, sendo que os recursos mais empregados foram: bases de dados para a busca biológica (principalmente a *Ask Nature*⁴⁸), quadros e matrizes auxiliares para organizar a geração de ideias e a elaboração do produto.

Refletindo sobre o uso das ferramentas biomiméticas nas etapas do processo criativo, observou-se que todos os casos incluíram tais recursos para o desenvolvimento conceitual e a pesquisa biológica – etapa 2 (MUNARI, 2011; STICKDORN; SCHNEIDER, 2011). Outrossim, as etapas preliminares e conceituais (1 a 3) do desenvolvimento do projeto foram aquelas adotadas em maior profundidade pelos autores de cada trabalho. Essa produção foi frequentemente complementada por ilustrações sintéticas e esquemáticas. Os casos 3, 5 e 6 atingiram a quarta etapa do processo criativo, fazendo simulações digitais⁴⁹ do produto e estimativas de desempenho ao final do processo. No Caso 2, a *performance* do produto foi estimada, porém, não foram executadas simulações digitais, nem foram comunicados detalhes de seus componentes. O Caso 6, que utilizou o instrumento BioGen, exibiu um relato mais completo da aplicação da ferramenta. A demonstração de Muntinga (2013) apresentou o detalhamento do produto e simulações digitais, além de descrever e representar como seria o funcionamento do sistema STAR. A autora também especificou materiais e processos de fabrica, além de estimar custos para a produção. Mas, é preciso advertir que a identificação das fases cumpridas em cada caso estudado dependeu do relato de cada autor. De

⁴⁸ Conforme foi apresentado no Capítulo 3, essa base de dados biomimética é um dispositivo que pode ser acessado *online* por projetistas para investigar informações referentes a organismos, processos e ecossistemas. Essas buscas são realizadas majoritariamente com palavras-chave ou utilizando categorias disponíveis na própria *Ask Nature*. Nessa plataforma também podem ser encontrados *cases* de produtos biomiméticos em variadas áreas de produção e uso (ASK NATURE TEAM, 2021; CHAKRABARTI et al., 2017; FAYEMI, 2016).

⁴⁹ Sobre a aplicação de *softwares* de simulação e modelagem digital, tais instrumentos foram adotados nos casos 3, 5 e 6, utilizando-se os seguintes recursos: *Matlab/Simulink*, *Rhinoceros 4.0*, *Grasshopper/Galapagos*, *DIVA*, *Dialux*, *Energyplus* e *TRNSYS*.

qualquer modo, é cabível pensar que as ferramentas biomiméticas constituem um recurso vantajoso ao longo do processo criativo de projetos em design (BAUMEISTER et al., 2014; CHAYAAMOR-HEIL; GUÉNA; HANNACHI-BELKADI, 2018; VOLSTAD; BOKS, 2008).

Convém comentar acerca da insuficiência de informações sobre o desenvolvimento dos projetos, notadamente para a condução da investigação aqui relatada. Conjectura-se que tal limitação possa decorrer de alguns fatores, como: a) intenção dos autores em enfatizar outros aspectos em sua publicação (como a criação da própria ferramenta ou os resultados do produto final), em vez de aprofundar o processo de criação e aplicação da(s) ferramenta(s); b) a área da biomimética encontra-se em expansão, principalmente quando se trata da interface com o design e a arquitetura, ou seja esses conhecimentos e ferramentas talvez não sejam amplamente acessíveis; e c) questões relacionadas à propriedade intelectual, ao sigilo industrial e às patentes, o que justificaria o pouco detalhamento de etapas dos projetos (ex. desenhos técnicos, especificações de materiais).

Constatou-se predomínio do Reino Plantae nas escolhas de organismos inspiradores para os projetos aqui estudados. De fato, os casos 1, 3, 5 e 6 utilizaram conhecimentos provenientes de vegetais para a produção dos artefatos para fachadas. É interessante frisar que, segundo Mancuso (2019), as plantas são modelos de resistência, solidez e flexibilidade, frequentemente associadas à modularidade. São seres que operam em uma arquitetura cooperativa e se adaptam com relativa rapidez às mudanças ambientais. Librelotto e Ferroli (2018), ao se debruçarem sobre as aplicações do bambu em arquitetura, design e engenharia, destacaram seu uso em construções, dado que se trata de um material que atua no sequestro de carbono, sendo de rápido crescimento e renovação, além de reunir qualidades mecânico-visuais.

Efetivamente, paralelos entre plantas e edifícios foram traçados pelos projetistas que elegeram esses organismos como principal inspiração de seus trabalhos, sendo que, no Caso 1, isso se deu inclusive na estruturação e diretrizes da ferramenta. Nos casos 1, 3 e 5, invocou-se o caráter sésstil das plantas, que consiste em uma limitação desses seres em realizar grandes movimentações pelo espaço, o que lhes acarreta sujeição às mudanças climáticas de um determinado local. Desse ponto de vista, adaptações dos vegetais às condições do ambiente circundante podem inspirar produtos biomiméticos para edifícios, uma vez que as construções também são definidas por sua imobilidade (ALKHATEEB; TALEB, 2015; ASK NATURE TEAM, 2021; XING et al., 2018).

A similaridade entre construções e vegetais é contundente. Mas, é vital não descartar os demais reinos e filos nas etapas iniciais da pesquisa biológica. Há muitas características encontradas em outros organismos que podem se revelar adequadas ao contexto de projetos de design para construções. Apesar do fato da limitação de movimento no espaço ser estimada como fundamental para um projeto de edificação, ainda parece útil explorar conhecimentos associados a outros organismos e espécies que passam todo (ou parte de) seu ciclo de vida em determinados locais ou não têm deslocamentos mais perceptíveis.

Vale comentar que, mesmo naqueles casos que utilizaram outros elementos como inspiração principal (ex. estrela-do-mar, no Caso 6) ou que não especificaram um organismo (casos 2 e 4), os autores citaram vegetais potencialmente inspiradores, que foram identificados por ocasião da pesquisa biológica. No Caso 2, empregou-se uma ferramenta voltada para análise de princípios gerais da natureza (formas hexagonais) no lugar de especificar um único organismo.

Os projetistas incluíram princípios naturais que foram aplicados para a elaboração de fatores estruturais e formais dos produtos e na especificação da conformação dos materiais e componentes. Nos seis casos, foram estudados, abstraídos e transpostos para o design os seguintes princípios: a) dispersão de sementes, hidrocoria e higroscopia; b) resistência e permeabilidade em estruturas hexagonais (estrutura; qualidade local e extração); c) regulação de temperatura, luz e sombreamento; d) massa térmica variável e transferência do calor por condução e convecção.

Para Benyus (1997) e Baumeister et al. (2014), os Princípios da Vida são um conjunto de fatores inerentes da Terra e que expressam a habilidade dos seres vivos para sobreviver e prosperar. Integrar tais princípios aos projetos de design pode estimular sua adaptação à biosfera. Por conseguinte, todos os casos também foram classificados de acordo com os elementos do Diagrama de Princípios da Vida. Dentre aqueles mais frequentemente integrados aos projetos, é possível citar:

- a) Responsividade e sintonia com o local - abordadas em todos os casos (com exceção do Caso 4), estiveram relacionadas ao uso de energia e materiais facilmente disponíveis/acessíveis no meio circundante; e à integração de ciclos de *feedback* relacionados a condições do ambiente externo e interno.
- b) Eficiência na escolha de recursos - representou o uso de processos de baixo consumo energético e de materiais para o funcionamento dos produtos e sistemas, além da adequação da

forma à função e da adoção de fatores multifuncionais. À exceção do Caso 4, esse princípio foi assimilado nos demais casos.

c) Adaptação às condições de mudança - incorporada aos casos 3, 5 e 6, é associada a sistemas e produtos que incorporaram a diversidade, redundância e descentralização.

d) Integrar desenvolvimento e crescimento - incluída nos casos 2, 3, 5 e 6, associa-se à auto-organização e exploração da modularidade.

Os projetos escolhidos para o estudo de casos múltiplos envolveram a elaboração de produtos referentes a espaços e construções. Tendo em vista que a biofilia está estreitamente relacionada à percepção espacial e à configuração arquitetônica e de design (BROWNING et al., 2012; BROWNING; RYAN; CLANCY, 2014), pode-se associar cada uma das criações apresentadas pelos autores a princípios biofílicos (com a exceção do Caso 4). Apurou-se que o fator de “luz dinâmica e difusa” foi identificado nos casos 1, 3, 5 e 6. A conexão com os sistemas naturais esteve presente nos casos 1, 3, 5 e 6; o uso de padrões biomórficos foi verificado no Caso 2 (malha hexagonal), no Caso 3 (padrão em estrela) e no Caso 5 (padrão de dobras de folhas / Miura-ori). Correlacionada a essa última categoria, percebeu-se o princípio “complexidade e ordem” (casos 2, 3, 5 e 6). A variabilidade térmica e de fluxo de ar foi identificada nos casos 1 e 3.

Arruda (2018), Arruda et al. (2019), Baumeister et al. (2014), Benyus (1997), Ceschin e Gaziulusoy (2016), Cohen e Reich (2016), De Pauw; Karana e Kandachar (2012); Gamage e Hyde (2012), Papanek (1985) e Zari (2007, 2010, 2012, 2015, 2017, 2019, 2020) foram alguns dos estudiosos que defenderam a integração de recursos da biomimética à sustentabilidade e à conservação da natureza. Nesse sentido, julga-se que as ferramentas biomiméticas estimularam soluções mais sustentáveis na perspectiva da inclusão de fatores característicos de locais específicos (zona e fatores climáticos, estudo de espécies adaptadas à localidade do projeto); da priorização de mecanismos de operação passiva (não requerem energia elétrica para funcionamento) vinculados às trocas térmicas abundantes no meio; da escolha criteriosa de materiais para compor os produtos; e da consideração de seu impacto no ambiente. Acima de tudo, preocupações de sustentabilidade principalmente com o desempenho térmico, energético e com a iluminação natural resultaram em criações que enfatizaram a eficiência energética e redução de gastos.

É relevante informar que as ferramentas biomiméticas forneceram caminhos de projeto diferentes e inovadores. Os autores dos seis casos admitiram que seus resultados não teriam

sido obtidos de modo tão satisfatório, nem com a mesma eficácia ‘sustentável’, se tivessem adotado apenas recursos criativos “convencionais”.

Uma vez mais, é válido argumentar que o critério de sustentabilidade, para ser genuinamente alcançado, requer a verificação da aplicação de cada produto no contexto real. Posto que nenhuma das criações atingiu a fase de teste e construção da fachada, conclui-se que os projetos tinham potencial para sustentabilidade. Mas seria importante mensurar o ciclo de vida dos produtos, dispêndios com materiais, produção, transporte, manutenção, e prever, inclusive, como seriam feitos o descarte, a reintegração e/ou o reaproveitamento dos materiais que não fossem mais utilizados (VEZZOLI; MANZINI, 2008).

Dentre as ferramentas aplicadas nos casos estudados, discerniu-se que duas – Espirais Biomiméticas (Caso 5) e BioTRIZ (Caso 2) – tiveram destaque no grupo de recursos mais mencionados e/ou utilizados na Figura 28 (ilustrativa do levantamento de literatura sobre ferramentas relatado no Capítulo 3). Alguns instrumentos e técnicas complementares adotados nos casos, também puderam ser identificados na mesma figura (*Ask Nature* e técnicas de modelagem digital). No que tange às outras ferramentas – DCGDPIF (Caso 1), M-BA (Caso 3), FSB (Caso 4) e BioGen (Caso 6) – ressalta-se que não se encontram entre aquelas mais evidenciadas pela literatura. Acredita-se que isso seja decorrente da criação e da disponibilização recentes dos referidos recursos na literatura especializada. Além disso, algumas ferramentas ainda estão em fase de aprimoramento (ex. M-BA e FSB) e/ou não oferecem sua versão definitiva.

Julga-se que todas as ferramentas empregadas nos casos poderiam ser implementadas em outros cenários de design. Mas, algumas necessitariam de ajustes em sua configuração original (ex. DCGDPIF e FSB). Dessa forma, enfatizar-se-ia o desenvolvimento de produtos de design, avaliando fatores como seu ciclo de vida, em vez de especificar questões aprofundadas sobre zona bioclimática ou certificação ambiental arquitetônica. Essa sugestão deriva do fato de que projetos em design – planejados e executados em escalas diferentes daquelas empregadas em edificações – estariam sujeitos a deslocamentos e outros tipos de normas e certificações. Logo, seria importante que os projetistas pudessem adaptar a ênfase da escala “macroespacial/arquitetônica”, vinculada ao “ocupar e habitar”, para que fosse ajustável a outras escalas, mais intimamente relacionadas ao “fazer” do design (CARDOSO, 2012; DOHMANN, 2013; BONSIPE; 2011).

Pode-se aventar a possibilidade de emparelhamento de ferramentas de design (Capítulo 3) com ferramentas biomiméticas, e até mesmo, a combinação de ambos os recursos,

na intenção de atender os preceitos biomiméticos. Assim, poder-se-ia inserir, por exemplo, *brainstorming*, *moodboards* e *sketches*, nos momentos de geração de ideias nos seis casos estudados. Também poderiam ser adotadas matriz S.W.O.T., análise paramétrica e/ou análise funcional para etapas de seleção, avaliação de ideias e alternativas de projetos biomiméticos. Quanto à ferramenta DCGDPIF, é oportuno lembrar que existem semelhanças com o instrumento 5W2H (frequentemente empregado em design). Por conseguinte, essa ferramenta biomimética poderia ser aprimorada com auxílio de mais fatores provenientes do 5W2H. Igualmente, a definição de *personas* e de cenários poderia ser proveitosa em contextos de ferramentas biomiméticas baseadas no problema. Evidentemente, são indispensáveis mais pesquisas para apreciar tal complementaridade entre ferramentas de design e de biomimética.

Presume-se que o BioGen foi a ferramenta que forneceu mais subsídios para o caso em que foi aplicada. Realmente, trata-se de um recurso que abrange todas as etapas de desenvolvimento de projetos, além de contar com ferramentas complementares que facilitam a investigação biológica e alicerçam a tradução das analogias e abstrações desses conhecimentos para a concepção de produtos. Ademais, o BioGen, é um recurso muito flexível, que pode ser ajustado a múltiplos contextos de projeto em diferentes áreas do conhecimento (BADARNAH; KADRI, 2014). Nessa ótica, entende-se que a ferramenta tem grande potencial para embasar outros projetos de design. De modo semelhante, o M-BA e as Espirais Biomiméticas são instrumentos de fácil integração a outros projetos em design em razão da sua organização, facilidade de compreensão de uso e por sua configuração que também abrange várias das etapas do processo criativo. Decerto, são necessários mais estudos para um exame aprofundado dessas constatações.

O Caso 4 revelou a importância de disponibilizar, futuramente, um aplicativo ou *software* fundamentado na ferramenta FSB, com o propósito de auxiliar na inter-relação de soluções biológicas com os critérios de certificação ambiental (CAMARGO, 2016). Até a finalização desta Dissertação, não foram identificados aplicativos biomiméticos. Sem dúvida, existem recursos digitais interativos nessa área, que são acessíveis via *sites* na *internet*, como a *Ask Nature* e *DANE*. Além disso, em outras plataformas como no *Biomimicry Toolbox*⁵⁰ e no *Biomimicry 3.8*⁵¹, pode-se obter ferramentas biomiméticas em sua versão “estática”, para consulta *online* e para impressão (ex. Espirais Biomiméticas, Diagrama de Princípios da Vida).

Sob esse prisma, é interessante pensar seria de grande valia criar um aplicativo que reunisse diversas ferramentas biomiméticas, visando incrementar a familiarização e o uso dos

⁵⁰ Acesso em <https://toolbox.biomimicry.org/>.

⁵¹ Acesso em <https://biomimicry.net/>.

instrumentos para projetistas. Iniciativas multiplataforma (ex. aplicativos, *sites*, meios impressos) – preferencialmente disponíveis de forma gratuita ou a custos baixos/moderados – seriam relevantes para facilitar o acesso aos conhecimentos gerados pela biomimética. Seria igualmente desejável que essas propostas incluíssem funcionalidades para o acompanhamento de projetos de design, indicando ferramentas biomiméticas mais adequadas a cada etapa e contexto, além de prever mais interatividade entre projetistas, os quais poderiam compartilhar ativamente conhecimentos biomiméticos entre si. Mais ainda, esses aplicativos e *softwares* poderiam ser integrados às bases de dados biomiméticas, auxiliando no momento da pesquisa biológica.

Seria concebível, inclusive, cogitar acerca da elaboração de uma ferramenta digital que viabilizasse a mensuração do grau de adequação de um determinado projeto à biomimética, utilizando-se, para tanto, os princípios da natureza e os critérios de sustentabilidade. Por fim, poder-se-ia imaginar um recurso que resultasse em uma “certificação biomimética”, semelhante a outras modalidades de certificação (ex. ambiental arquitetônica *LEED* / *AQUA-HQE*, certificação sustentável no recurso BIOS).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O homem não podia mais ser considerado o Senhor da Criação, um ser separado do resto da natureza

Charles Darwin

Esta Dissertação explorou as interfaces entre design e biomimética. Após definir noções bioinspiradas e circunscrever este recente campo do conhecimento, empreendeu-se um levantamento de trabalhos sobre a temática, complementado por uma análise comparativa da produção internacional e nacional. Sucintamente, foram abordados o processo criativo em design e suas ferramentas, traçando-se, em seguida, um panorama das ferramentas biomiméticas, especificamente voltado para a análise e a discussão de suas aplicações em projetos de design compromissados com a sustentabilidade.

Tais etapas de construção da investigação embasaram a seleção, a descrição e a comparação crítica de seis casos que empregaram ferramentas biomiméticas em projetos de produtos para edificações. Esse estudo de casos múltiplos evidenciou que as ferramentas foram usadas pelos projetistas na fase de criação conceitual, sendo que para alguns deles, suas metas não teriam sido alcançadas se tivessem optado apenas por recursos “convencionais”. Os autores também reconheceram que as ferramentas estimularam elementos de sustentabilidade (ex. economia de energia, iluminação natural e sistemas de funcionamento passivo). Ao se analisar o uso das ferramentas nesses projetos, é possível pensar que BioGen, M-BA e as Espirais Biomiméticas forneceram subsídios mais significativos do que as demais. Mas, seriam necessários estudos suplementares para um exame aprofundado.

A revisão da literatura desvelou um uso limitado das ferramentas biomiméticas. Percebeu-se uma exploração restrita desses instrumentos por parte dos autores. Ademais, em algumas publicações, não houve detalhamento suficiente sobre a aplicação da ferramenta. Assim, não se pode verificar, se os autores recorreram a outros documentos e recursos, ou se deliberadamente escolheram não incluir tais informações na comunicação de seus trabalhos. Supõe-se, também, que as explanações sintéticas dos projetos possam estar relacionadas a imposições de propriedade intelectual e sigilo industrial, uma vez que se referem a propostas com potencial comercial.

É válido ressaltar, ainda, que muitas das ferramentas biomiméticas foram formuladas recentemente e, por conseguinte, não seriam disponibilizadas na literatura sistematizada. Com efeito, a biomimética é um campo relativamente novo e encontra-se em expansão, principalmente quando associado ao design. Em plataformas como a *Web of Science* e a *Scopus*, o design não está

assinalado como uma área própria para filtragem, o que gerou uma dispersão da produção em campos correlatos. Adicionalmente, presume-se que o design é uma área plural e de grande produção técnica, o que pode fazer com que nem todas as criações sejam divulgadas em publicações de ordem acadêmico-científica. Suas realizações podem ser difundidas em outros tipos de veículo, sejam digitais ou suportes impressos. É provável, então, que tais produções não sejam captadas por bases de dados acadêmicas.

A apreciação dos seis casos de projetos para fachadas confirmou uma tendência da investigação biomimética em buscar fundamentação no estudo morfológico-funcional de elementos naturais. Acredita-se que futuros projetos biomiméticos orientem-se para níveis maior complexidade, abarcando inter-relações existentes em ecossistemas. Decerto, iniciativas desse tipo exigirão conhecimentos biológicos mais aprofundados, os quais poderão ser supridos com a colaboração de especialistas (ex. biólogos) nas equipes de projetistas, reforçando a vocação interdisciplinar do design.

Cabe acrescentar que, nos casos estudados, houve preferência por organismos do reino vegetal. Alguns autores justificaram essa escolha em função de semelhanças entre vegetais e edificações, visto que ambos se caracterizam, majoritariamente, pela fixação no espaço. Mas, entende-se que descartar os demais reinos, filos, e/ou espécies na fase inicial do trabalho acarreta uma redução no escopo de soluções pertinentes e inovadoras para os projetos. Por exemplo, partindo-se da premissa de fixação como critério de escolha, seria possível identificar outros organismos que também enfrentam condições de movimentação limitada, ou que, por convergência evolutiva, possuem formas semelhantes àquelas encontradas no reino vegetal. Outro caminho a ser explorado pelos projetistas, incluiria a pesquisa de organismos não fixos que tenham características relevantes para esse contexto.

O método ‘estudo de casos múltiplos’ mostrou-se uma abordagem adequada para a temática focalizada nesta Dissertação, pois viabilizou uma imersão analítica e comparativa sobre projetos de design de inspiração biomimética. De resto, diante dos numerosos impedimentos deflagrados pela pandemia da Covid-19, essa via tornou-se imprescindível para o alcance dos propósitos estabelecidos durante o curso de Mestrado da pesquisadora. Vale cogitar a adoção dessa metodologia em outras investigações, o que assinala seu interesse para a capacitação e o treinamento de designers. Como recurso de ensino, ao longo da formação profissional na área de design, esse procedimento de estudo poderia facilitar a compreensão de possibilidades e limitações nos processos criativos e, em particular, daqueles enquadrados na intersecção da biomimética e design.

Em futuros desdobramentos do trabalho aqui relatado, recomendam-se a aplicação de questionários e a condução de entrevistas com os projetistas dos casos estudados, no intuito de conhecer suas percepções sobre as ferramentas biomiméticas. Dessa maneira, também seria possível averiguar aprimoramentos desses recursos, sugeridos pelos próprios autores. Outrossim, seriam demandadas mais informações sobre o desenvolvimento e a implementação dos referidos projetos (ex. *sketches*, modelagens digitais, imagens, tabelas e quadros).

Evidentemente, novos parâmetros poderão ser estipulados para a seleção de casos a serem examinados. Para esta Dissertação, estabeleceu-se o critério de homogeneidade do problema de projeto (desenvolver produtos para fachadas de edifícios); mas estudos posteriores poderiam selecionar casos relacionados às ações dos usuários ou às características e funções de objetos/produtos. Outro caminho alternativo seria dirigir-se para casos que utilizaram organismos de uma mesma ordem, família ou espécie; ou então, abordar um conjunto de ferramentas biomiméticas diferente.

Convém retomar a relevância de se criar uma plataforma digital (e/ou aplicativo) que reúna informações e ferramentas biomiméticas, promovendo a familiarização e facilitando o uso por parte de projetistas. Tal dispositivo poderia estar vinculado a uma “certificação biomimética” que indicaria a adequação dos projetos em termos biomiméticos, incluindo recomendações de modificações para aproximar os projetos dos resultados almejados.

Em linhas gerais, é apropriado mencionar que incluir conhecimentos sobre a natureza em práticas humanas vem se tornando incontornável para assegurar a sobrevivência das gerações atuais e futuras, observando-se um crescimento de esforços em prol do interesse pelo design bioinspirado, sustentável e biomimético. Além de poder contar com alguma estruturação científica, o Brasil possui vastos recursos naturais e pode ter acesso aos diversos saberes dos chamados povos da floresta. Tal posição no cenário mundial confere capacidade para valorizar esse patrimônio, bem como responsabilidade na preservação dos biomas presentes em seu espaço territorial e manutenção de um amplo repositório de saber passível de inspirar projetos de design biomiméticos. Considera-se, portanto, que a natureza é uma grande fonte de exemplos que se estendem para além da sustentabilidade, pois favorecem restauração e regeneração.

Em suma, para encontrar novos modelos de concepção e produção em design, vale evocar o biomimetismo e suas inúmeras contribuições para uma atuação em cenários complexos e criativos. É preciso compreender que a humanidade partilha o planeta com uma miríade de espécies e, em sua prática projetual, o profissional de design necessita integrar processos iterativos e críticos de inspiração na natureza.

REFERÊNCIAS

- ABBASLI, Ujal; SELÇUK, Semra Arslan. Biomimetic Design principles as an inspirational model: case study on urban furniture. **International Journal of Architecture and Urban Studies**, Trabzon, Turquia, v. 1, n. 1, p. 41-52, 8 out. 2016. Disponível em: www.researchgate.net. Acesso em: 8 abr. 2020.
- ABREU, Breno Tenório Ramanho de. **BioStudio**: do tecido plano ao cultivo de tecidos vivos. Orientador: Christus Menezes da Nóbrega. 2015. 153 p. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/19289>. Acesso em: 6 out. 2020.
- ADAMS, Robin S.; BELTZ, Natalie; MANN, Llewellyn; WILSON, Denise. Exploring student differences in formulating cross-disciplinary sustainability problems. **International Journal of Engineering Education**, Java, Indonésia, v. 26, n. 2, p. 324-338, 2009. Disponível em: www.researchgate.net/publication/289678900_Exploring_Student_Differences_in_Formulating_Cross-Disciplinary_Sustainability_Problems. Acesso em: 28 set. 2021.
- AHMAR, Salma El; FIORAVANTI, Antonio. Botanicals and Parametric Design Fusions for Performative Building Skins: An application in hot climates. **Smart and Responsive Design - eCAADe**, [s. l.], v. 2, p. 595-604, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 21 jul. 2021.
- ALKHATEEB, E.; TALEB, H. Redesigning of building envelope: tree bark as a biomimicry concept. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, Southampton, GB, v. 193, p. 1019 - 1029, 2015. Disponível em: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/193/33912>. Acesso em: 3 ago. 2021.
- ALLABY, Michael (ed.). **OXFORD DICTIONARY OF ECOLOGY**. 4. ed. Reino Unido: Oxford University Press, 2010.
- ALLGAYER, Rodrigo. **Formas naturais e estruturação de superfícies mínimas em arquitetura**. Orientador: Benamy Turkienicz. 2009. 167 p. Dissertação (Mestrado em Design e Tecnologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: www.lume.ufrgs.br/handle/10183/24723. Acesso em: 23 mar. 2021.
- AL-OBAIDI, Karam M.; ISMAIL, Muhammad Azzam; HUSSEIN, Hazreena; RAHMAN, Abdul Malik Abdul. Biomimetic building skins: An adaptive approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Örebro, Suécia, n. 79, p. 1.472-1.491, maio 2017. Disponível em: <https://econpapers.repec.org/>. Acesso em: 28 set. 2021.
- AMER, Nihal. Biomimetic Approach in architectural education: case study of 'Biomimicry in Architecture' course. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, Egito, v. 10, n. 3, p. 499-506, 2019. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 24 mar. 2021.
- ANAF, Márcia; HARRIS, Ana Lúcia Nogueira de Camargo. As contribuições da impressão 3D para a validação dos conceitos no estudo das estruturas retráteis. **Educação Gráfica**, Bauru, v. 22, n. 3, p. 130-148, 2018. Disponível em: www.educacaografica.inf.br/. Acesso em: 23 mar. 2021.
- ANTONIOLI, Manola. **Biomimétisme: science, design et architecture**. Dijon, França: Éditions Loco, 2017. 144 p.
- ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Métodos e processos em biônica e biomimética: a revolução tecnológica pela natureza**. São Paulo: Blucher, 2018. 261 p.
- ARRUDA, Amilton José Vieira de. **Como a biônica e biomimética se relacionam com as estruturas naturais na busca de um novo modelo de pesquisa projetual**. Brasil: UFPE, 2015. Disponível em: <http://fido.palermo.edu>. Acesso em: 27 nov. 2019.
- ARRUDA, Amilton José Vieira de; FREITAS, Theska Laila de. Novas estratégias da biomimética: as analogias no biodesign e na bioarquitetura. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 73-82, 1 mar. 2018. Disponível em: www.sites.ojs.ufsc.br. Acesso em: 1 jan. 2020.
- ARRUDA, Amilton; LAILA, Theska; ROBERTO, Antônio; LIBRELOTTO, Lisiane; FERROLI, Paulo (org.). **Tópicos em Design: Biomimética, sustentabilidade e novos materiais**. Curitiba: Editora Insight, 2019. 242 p.

- ASK NATURE TEAM. **It's time to ask nature**. 2021. Disponível em: <https://asknature.org>. Acesso em: 30 mar. 2021.
- AZIZ, Moheb Sabry; EL SHERIF, Amr Y. Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, Egito, v. 55, n. 1, p. 707-714, 2016. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 1 jan. 2020.
- BADARNAH, Lidia. **Towards the Living envelope: biomimetics for building envelope adaptation**. 2012. 226 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Universidade Técnica de Delft - TU Delft, Países Baixos, 2012. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4128b611-9b48-4c8d-b52f-38a59ad5de65>. Acesso em: 11 maio 2021.
- BADARNAH, Lidia; KADRI, Usama. A methodology for the generation of biomimetic design concepts. **Architectural Science Review**, Londres, GB, v. 58, n. 2, p. 120-133, 2014. Disponível em: www.researchgate.net/publication/263011100_A_methodology_for_the_generation_of_biomimetic_design_concepts. Acesso em: 2 maio 2021.
- BAUDRILLARD, Jean. **O sistema dos objetos**. São Paulo: Perspectiva, 1973. 232 p.
- BAUMEISTER, Dayna; TOCKE, Rose; RITTER, Sherry; DWYER, Jamie. **Biomimicry resource handbook: a seed bank of best practices**. Montana, USA: Biomimicry 3.8, 2014. 285 p.
- BARROS, Natália Nakamura; CARLO, Joyce Correna. Modelagem generativa integrada à eficiência energética: estudo da otimização da forma de edificações institucionais. **Arquitetura Revista**, v. 13, ed. 2, p. 100-111, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/1936/193654981004/html/>. Acesso em: 2 ago. 2021.
- BAXTER, Mike. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. 2. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2000. 272 p.
- BEATTIE, Andrew J.; HAY, Mark; MAGNUSSON, Bill; NYS, Rocky de; SMEATHERS, James; VINCENT, Julian F. V. Ecology and bioprospecting. **Austral Ecology**, Londres, GB, v. 36, n. 3, p. 341-356, 2011. Disponível em: <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/ecology-and-bioprospecting>. Acesso em: 2 jan. 2020.
- BEJAN, Adrian. **Shape and structure, from engineering to nature**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 344 p.
- BENYUS, Janine M. **Biomimicry: innovation inspired by nature**. Nova Iorque, USA: William Morrow and Company, 1997. 324 p.
- BENYUS, Janine M. **Biomimétisme: quand la nature inspire des innovations durables**. Paris, França: Rue de l'Échiquier, 2011, 500 p.
- BERGMANN, Márcia; MAGALHÃES, Cláudio Freitas de. Strategic design, sustainability and multiple approaches for textile experimentation. **Global Fashion 2018**, Rio de Janeiro, p. 1-23, 2019. Disponível em: <http://gfc-conference.eu>. Acesso em: 1 jan. 2020.
- BHAMRA, Tracy; LILLEY, Debra; TANG, Tang. Design for sustainable behaviour: using products to change consumer behaviour. **The Design Journal**, Reino Unido, v. 14, n. 4, p. 427-445, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net>. Acesso em: 12 mar. 2020.
- BHATE, Dhruv; PENICK, Clint A.; FERRY, Lara A.; LEE, Christine. Classification and selection of cellular materials in mechanical design: engineering and biomimetic approaches. **Designs**, Basel, Suíça, v. 3, n. 1, p. 19, p. 1-31, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2411-9660/3/1/19/htm>. Acesso em: 24 mar. 2021.
- BHUSHAN, Bharat. Biomimetics: lessons from nature – an overview. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering**, Londres, GB, v. 367, n. 1.893, p. 1.445-1.486, 2009.
- BIEWENER, Andrew; PATEK, Sheila. **Animal locomotion**. 2. ed. Oxford, GB: OUP Oxford, 2018. 240 p.

BIOMIMICRY 3.8. 2016. Disponível em: <https://biomimicry.net/>. Acesso em: 1 jun. 2021.

BIOMIMICRY INSTITUTE. **Biomimicry global design challenge**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://challenge.biomimicry.org/>. Acesso em: 1 abr. 2020.

BIOMIMICRY INSTITUTE. The Biomimicry Design Process. In: BIOMIMICRY INSTITUTE. **Biomimicry Toolbox**. Montana, USA, 2021. Disponível em: <https://toolbox.biomimicry.org/methods/process/>. Acesso em: 22 jun. 2021.

BLACKLEDGE, Todd A.; KUNTNER, Matjaž; AGNARSSON, Ingi. The form and function of spider orb webs: evolution from silk to ecosystems. **Advances in Insect Physiology**, Burlington, USA, v. 41, p. 175-262, 2011. Disponível em: www.researchgate.net/publication/251449435_The_Form_and_Function_of_Spider_Orb_Webs. Acesso em: 14 out. 2021.

BONSIEPE, Gui. **Design, cultura e sociedade**. São Paulo: Blucher, 2011. 270 p.

BONSIEPE, Gui (coord.). **Metodologia experimental: desenho industrial**. Brasília: CNPq/Coordenação editorial, 1984. 82 p.

BOMFIM, Gustavo Amarante. **Metodologia para desenvolvimento de projetos**. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 1995. 69 p.

BRAUNGART, Michael; MCDONOUGH, William. **Cradle to cradle: criar e reciclar ilimitadamente**. Espanha: GG Barcelona, 2013. 192 p.

BROCCO, Giane Cauzzi. Biomimética: A natureza como modelo, medida a mentora para a transição. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Métodos e processos em bionica e biomimética: a revolução tecnológica pela natureza**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 122-127. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/>. Acesso em: 11 jul. 2021.

BROWNING, Bill; GARVIN, Chris; RYAN, Catie; KALLIANPURKAR, Namita; LABRUTO, Leslie; WATSON, Siobhan; KNOP, Travis. **The economics of biophilia: why designing with nature in mind makes financial sense**. Nova Iorque, USA: Terrapin Bright Green, 2012. Disponível em: www.terrapinbrightgreen.com/report/economics-of-biophilia/. Acesso em: 5 maio 2018.

BROWNING, William; RYAN, Catherine; CLANCY, Joseph. **14 patterns of biophilic design**. Nova Iorque, USA: Terrapin Bright Green, 2014. Disponível em: www.terrapinbrightgreen.com. Acesso em: 15 maio 2018.

CAMARGO, Maytê Galvão Pereira de. **Design de produtos biomiméticos visando a sustentabilidade nas edificações: Ferramenta de Solução Biomimética Orientada pelos Sistemas de Certificações Ambientais**. 2016. 149 p. Dissertação de mestrado (Mestrado em design) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/45810>. Acesso em: 19 jul. 2021.

CAMBRIDGE. **International dictionary of english**. Cambridge, GB: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles/framework/>. Acesso em: 22 abr. 2021.

CARDOSO, Rafael. **Design para um mundo complexo**. São Paulo: Cosac Naify, 2012. 264 p.

CESCHIN, Fabrizio; GAZIULUSOY, Idil. Evolution of design for sustainability: from product design to design for system innovations and transitions. **Design Studies**, Delft, Países Baixos, v. 47, p. 118-163, 2016. Disponível em: <https://reader.elsevier.com>. Acesso em: 30 nov. 2019.

CIRCULAB. **Biomimicards**. França, 2021. Disponível em: <https://biomimicards.fr/>. Acesso em: 1 jun. 2021.

CHAKRABARTI, Amaresh; SARKAR, Prabir; LEELAVATHAMMA, B.; NATARAJU, B. S. A Functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas. **Ai Edam**, Cambridge, GB, v. 19, n. 2, p. 113-132, 2005.

CHAKRABARTI, Amaresh; SIDDHARTH, L.; DINAKAR, Madhuri; PANDA, Megha; PALEGAR, Neha; KESHWANI, Sonal. Idea Inspire 3.0: A Tool for Analogical Design. In: CHAKRABARTI, Amaresh;

CHAKRABARTI, Debkumar (ed.). **Research into Design for Communities**: Volume 2 - Proceedings of ICoRD 2017. Nova Iorque: Springer, 2017. v. 2, p. 475-485.

CHAYAAMOR-HEIL, Natasha; GUÉNA, François; HANNACHI-BELKADI, Nazila. Biomimétisme en architecture: État, méthodes et outils. **Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère**, Paris, França, v. 1, p. 1-34, 2018. Disponível em: <https://journals.openedition.org/craup/>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CHO, Woo Kyung; ANKRUM James A.; GUO, Dagang; CHESTER, Shawn A.; YANG, Seung Yun; KASHAYP, Anurag; CAMPBELL, Georgina A.; WOOD, Robert J., RIJAL, Ram K.; KARNIK, Rohit; LANGER, Robert; KARP, Jeffrey M. Microstructured barbs on the north american porcupine quill enable easy tissue penetration and difficult removal. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, USA, v. 109, n. 52, p. 21289-21294, 2012.

COHEN, Yael Helfman; REICH, Yoram. **Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability**. Suíça: Springer International, 2016. 258 p. Disponível em: <https://www.springer.com>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CLARK, Melody S. Molecular mechanisms of biomineralization in marine invertebrates. **Journal of Experimental Biology**, Cambridge, GB, v. 223, n. 11, p. 78-102, 2020. Disponível em: <https://journals.biologists.com/jeb/article/223/11/jeb206961/223537/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

CRAIG, Salmaan; HARRISON, David; CRIPPS, Andrew; KNOTT, Daniel. BioTRIZ suggests radiative cooling of buildings can be done passively by changing the structure of roof insulation to let longwave infrared pass. **Journal of Bionic Engineering**, Changchun, China, v. 5, n. 1, p. 55-66, 2008. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1672652908600074. Acesso em: 17 jan. 2021.

CUNHA, Ronnie Elder da. **Verificação da adequabilidade do método BioTRIZ na aplicação da biomimética no ensino de projeto de arquitetura**. Orientador: Carlos Alejandro Nome. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/8392>. Acesso em: 28 set. 2021.

CUTKOSKY, Mark R.; KIM, Sangbae. Design and fabrication of multi-material structures for bioinspired robots. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, Londres, GB, v. 367, n. 1.894, p. 1.799-1.813, 2009.

DE PAUW, Ingrid C., KARANA, Elvin; KANDACHAR, Prabhu V. Nature-inspired design strategies in sustainable product development: a case-study of student projects. **Proceedings of Design 2012**: 12th International Conference on Design, Dubrovnik, Croácia, 2012. p. 787-796. Disponível em: www.designsociety.org/publication/32047/. Acesso em: 16 out. 2021.

DETANICO, Flora B.; TEIXEIRA, Fabio Gonçalves; SILVA, Tânia Luísa Koltermann da. A biomimética como método criativo para o projeto de produto. **Design & Tecnologia**, Rio Grande do Sul, v. 1, n. 2, p. 101-113, dez. 2010. Disponível em: www.researchgate.net/publication/279750227. Acesso em: 1 jan. 2020.

DIAL. **DIALux**: is the software for professional lighting design. Alemanha, 2 nov. 2021. Disponível em: <https://www.dial.de/en/dialux/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

DIAS, Eduardo. **A natureza no processo de design e no desenvolvimento do projeto**. São Paulo: Senai, 2014. 160 p.

DICIONÁRIO *ONLINE* DE PORTUGUÊS. **Aloplástico** [entre 2009 e 2020]. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/aloplastico/>. Acesso em: 6 out. 2020.

DICIONÁRIO *ONLINE* DE PORTUGUÊS. **Autoplástico** [entre 2009 e 2020]. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/autoplastico/>. Acesso em: 6 out. 2020.

DIDARI, Azadeh; MENGÜÇ, M. Pinar. A biomimicry design for nanoscale radiative cooling applications inspired by *Morpho didius* butterfly. **Nature Scientific Reports**, London, GB, v. 8, p. 1-18, 2018. Disponível em: www.nature.com/articles/s41598-018-35082-3.pdf. Acesso em: 24 mar. 2021.

DIVA: Solemma, 2 nov. 2021. Disponível em: <https://www.solemma.com/diva>. Acesso em: 10 ago. 2021.

DOHMANN, Marcus et al. **A experiência material**: a cultura do objeto. Rio de Janeiro : Rio Books, 2013, 272p.

DUSHKOVA, Diana; HAASE, Dagmar. Not simply green: nature-based solutions as a concept and practical approach for sustainability studies and planning agendas in cities. **Land**, Basel, Suíça, v. 9, n. 19, p. 1-37, 2020. Disponível em: www.mdpi.com/2073-445X/9/1/19. Acesso em: 24 mar. 2021.

EADIE, Leslie; GHOSH, Tushar K. Biomimicry in textiles: past, present and potential: An overview. **Journal of the Royal Society Interface**, Londres, GB, v. 8, n. 59, 2011. Disponível em: royalsocietypublishing.org. Acesso em: 24 mar. 2021.

EL-ZEINY, Rasha. Biomimicry as a problem-solving methodology in interior architecture. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, Bangkok, Tailândia, v. 50, p. 502-512, 2012. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 19 out. 2019.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Biophilia hypothesis**. 2010. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/biophilia-hypothesis>. Acesso em: 5 maio 2018.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Evolution**: Convergent and parallel evolution. 2010. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/evolution-scientific-theory/Reconstruction-of-evolutionary-history>. Acesso em: 18 ago. 2021.

ENERGYPLUS. Estados Unidos, 2021. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 13 set. 2021.

ESCOBAR, Arturo. Sustainable development: the death of nature and the rise of environment. In: ESCOBAR, Arturo. **Encountering development**: the making and unmaking of the Third World. Princeton: Princeton University Press, 1995. p. 192-211.

ESTÉVEZ, Alberto T.; NAVARRO-MATEU, Diego. Biomanufacturing the future: biodigital architecture & genetics. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, Países Baixos, v. 12, p. 7-16, 2017. Disponível em: www.researchgate.net/publication/320049756. Acesso em: 6 out. 2020.

FAYEMI, Pierre-Emmanuel. **Innovation par la conception bio-inspirée**: proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances. Orientador: Améziane Aoussat. 2016. 247 f. Tese (Doutorado - Spécialité "Génie Mécanique") - L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2016. Disponível em: <https://www.theses.fr/2016ENAM0062>. Acesso em: 4 maio 2021.

FERNANDEZ, Maria Luisa Lopez; FERNANDEZ, Maria Soledad Lopez. **Worldwide Bioclimatology Manual and Guide**. Espanha: 2017. 157 p. Disponível em: <http://naturalezaenhispania.com/art8mapaslink/InglesPDFManualyGuia.pdf>. Acesso em: 5 set. 2021.

FERRARI, Roberta. **Método Conceitual para Aplicação da Biomimética como Ferramenta de Apoio ao Processo de Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis – BIOS**. Dissertação (mestrado): Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2017.

FERRARI, Roberta; CANGIOLIERI, Osiris. Método BIOS: uma ferramenta de apoio ao processo de desenvolvimento de produtos biomiméticos sustentáveis. In: ARRUDA, Amilton; LAILA, Theska; ROBERTO, Antônio; LIBRELOTTO, Lisiane; FERROLI, Paulo. **Tópicos em Design**: Biomimética, sustentabilidade e novos materiais. Curitiba: Editora Insight, 2019. cap. Biônica; Biodesign & Biomimética, p. 61-69.

FILGUEIRAS, Araguacy; FANGUEIRO, Raul; RAPHAELLI, Nathália. A importância de fibras e fios no design de têxteis destinados à prática desportiva. **Estudos em Design**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 1, p. 1-20, 2008. Disponível em: www.maxwell.vrac.puc-rio.br. Acesso em: 1 jan. 2020.

FILHO, Luiz Valdo A Maciel; ARRUDA, Amilton José Vieira de; CLEMENTINO, Thamyres Oliveira. Sustentabilidade no contexto de negócios: Contribuições do design de produtos. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de; LAILA, Theska; ROBERTO, Antônio; LIBRELOTTO, Lisiane; FERROLI, Paulo. **Tópicos em Design**: Biomimética, sustentabilidade e novos materiais. Curitiba: Insight, 2019. p. 7-16.

FIKSEL, Joseph. **Design for environment**: a guide to sustainable product development. 2. ed. EUA: McGraw-Hill, 2012. 432 p.

FLUSSER, Vilém. **O mundo codificado**: por uma filosofia do design e da comunicação. São Paulo: Cosac Naify, 2007. 224 p.

FOLTZ, Mark A. **Designing navigable information spaces**. Orientador: Randall Davis. 1998. 130 p. Dissertação (Department of Electrical Engineering and Computer Science Master of Science) - Massachusetts Institute of Technology – MIT, USA, 1998. Disponível em: <http://rationale.csail.mit.edu/publications/Foltz1998Designing.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

FOURNIER, Mat. **Quand la nature inspire la science**: histoires des inventions humaines qui imitent les plantes et les animaux. Toulouse: Plume de Carotte, 2011. 154 p.

FU, Katherine; MORENO, Diana; YANG, Maria; WOOD, Kristin L. Bio-inspired design: an overview investigating open questions from the broader field of design-by-analogy. **Journal of Mechanical Design**, USA, v. 136, n. 11, p. 1-18, 2014. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article-abstract/136/11/111102/375236/Bio-Inspired-Design-An-Overview-Investigating-Open?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 4 maio 2021.

FULLER, Richard Buckminster. **Critical path**. New York: St. Martin's Press, 1981. 280 p.

FULLER, Richard Buckminster. **Manual de instruções para a nave espacial Terra**. Porto: Via Optima, 1998.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. **AQUA-HQE™**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://vanzolini.org.br>. Acesso em: 13 set. 2021.

GAMAGE, Arosha; HYDE, Richard. A model based on biomimicry to enhance ecologically sustainable design. **Architectural Science Review**, Londres, GB, v. 55, n. 3, p. 224-235, 2012. Disponível em: www.academia.edu/3192266/. Acesso em: 16 out. 2021.

GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Design Intelligence Lab. **DANE**: Design by analogy to nature engine. Geórgia: Dilab - Georgia Institute of Technology, 9 dez. 2021. Disponível em: <http://dilab.cc.gatech.edu/dane/>. Acesso em: 11 maio 2021.

GOMES, Luiz Vidal de Negreiros. Design, Biônica e Biomimética: divulgando ciência, ecologia e tecnologia através do ensino planejado de inovação. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de; LAILA, Theska; ROBERTO, Antônio; LIBRELOTTO, Lisiane; FERROLI, Paulo. **Tópicos em Design**: Biomimética, sustentabilidade e novos materiais. Curitiba: Insight, 2019. p. 7-16.

GORSE, Christopher; JOHNSTON, David; PRITCHARD, Martin (ed.). **OXFORD DICTIONARY OF CONSTRUCTION**. 2. ed. Reino Unido: Oxford University Press, 2020.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. Conheça a Certificação LEED. In: **Green building council Brasil**. GBC Brasil. Brasil, 2021. Disponível em: [https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/certificacao-leed/#:~:text=O%20LEED%20\(Leadership%20in%20Energy,e%20a%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20do%20mesmo](https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/certificacao-leed/#:~:text=O%20LEED%20(Leadership%20in%20Energy,e%20a%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20do%20mesmo). Acesso em: 13 set. 2021.

HASE, Betty; HEERWAGEN, Judith. Building biophilia: connecting people to nature in building design; studies show that incorporating the natural environment into buildings can have a positive influence on psychological, physical and social well-being. **Environmental Design & Construction**, Gainesville, Califórnia, USA, v. 4, n. 2, p. 30-34, 2001. Disponível em: citeseerx.ist.psu.edu. Acesso em: 27 mar. 2021.

HAYES, Samantha; DESHA, Cheryl; BURKE, Matthew; GIBBS, Mark; CHESTER, Mikhail. Leveraging socio-ecological resilience theory to build climate resilience in transport infrastructure. **Transport Reviews**, v. 39, n. 5, p. 677-699, 2019. Disponível em: www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2019.1612480. Acesso em: 24 mar. 2021.

HELMS, Michael; GOEL, Ashok K. The four-box method: problem formulation and analogy evaluation in biologically inspired design. **Journal of Mechanical Design**, Nova Iorque, USA, v. 136, n. 11, p. 1-12, 2014. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign>. Acesso em: 18 maio 2021.

HELMS, Michael; VATTAM, Swaroop S.; GOEL, Ashok, K. Biologically inspired design: process and products. **Design Studies**, Delft, Países Baixos, v. 30, n. 5, p. 127-152, 2009.

HOSSEINI, Seyed Morteza; MOHAMMADI, Masi; ROSEMAN, Alexander; SCHRÖDER, Torsten; LICHTENBERG, Jos. A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: review. **Building and Environment**, Hong Kong, China, v. 153, p. 186-204, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

HSUAN-AN, Tai. Método de Análise Biônica no Ensino de Design e Arquitetura. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Métodos e processos em biônica e biomimética: a revolução tecnológica pela natureza**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 37-49. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/>. Acesso em: 11 jul. 2021.

INSTITUTO PINDORAMA. **Projeto brasileiro que acelera o reflorestamento ganha maior prêmio mundial de ecologia**. 2019. Disponível em: <https://pindorama.org.br/>. Acesso em: 30 mar. 2019.

JEU du Vivant. França, 2021. Disponível em: <https://editionsduvivant.fr/>. Acesso em: 1 jun. 2021.

KELLERT, Stephen R. Dimensions, elements and attributes of biophilic design. 2008. In: KELLERT, Stephen R.; HEERWAGEN, Judith; MADOR, Martin. **Biophilic design: the theory, science and practice of bringing building to life**. Hoboken, EUA: John Wiley & Sons, 2013. p. 3-19. Disponível em: www.researchgate.net. Acesso em: 27 mar. 2017.

KELLERT, Stephen R.; HEERWAGEN, Judith; MADOR, Martin. **Biophilic design: the theory, science and practice of bringing building to life**. Hoboken, EUA: John Wiley & Sons, 2013. p. 3-19. Disponível em: www.researchgate.net. Acesso em: 27 mar. 2017.

KELLERT, Stephen R.; WILSON, Edward O. (ed.). **Biophilia hypothesis**. Washington: Island Press, 1993. 496p.

KIM, Jin; PARK, Kanggeun. The design characteristics of nature-inspired buildings. **Civil Engineering and Architecture**, v. 6, n. 2, p. 88-107, 2018. Disponível em: http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=6963. Acesso em: 24 mar. 2021.

KURU, Aysu; OLDFIELD, Philip; BONSER, Stephen; FIORIT, Francesco. A framework to achieve multifunctionality in biomimetic adaptive building skins. **Buildings**, Basel, Suíça, v. 10, n. 114, p. 1-28, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/10/7/114>. Acesso em: 16 maio 2021.

LABEYRIE, Vincent. As conseqüências ecológicas das atividades tecno-industriais. In: MORIN, Edgar (Coord.). **A religião dos saberes: o desafio do século XXI**. 2. ed. Tradução de Flávia Nascimento. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.125-139, 2002.

LARAIA, Roque de Barros. **Cultura: um conceito antropológico**. Rio de Janeiro: Zahar, 1986. 120 p.

LEE, Jusuk; SPONBERG, Simon N.; LOH, Owen Y.; LAMPERSKI, Andrew G.; FULL, Robert J.; COWAN, Noah J. Templates and anchors for antenna-based wall following in cockroaches and robots. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 24, n. 1, p. 130-143, 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

LEPORA, Nathan F.; VERSCHURE, Paul; PRESCOTT, Tony J. The state-of-the-art in biomimetics. **Bioinspiration & Biomimetics**, v. 8, n. 1, p. 1-18, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/234097984_The_state_of_the_art_in_biomimetics. Acesso em: 24 mar. 2021.

LI, Shihong; ZENG, Qiyun; XIAO, Y. L.; FU, Shaoyun; ZHOU, Benlian. Biomimicry of bamboo bast fiber with engineering composite materials. **Materials Science and Engineering: C**, Glasgow, GB, v. 3, n. 2, p. 125-130, 1995.

LIBRELOTTO, Lisiane Ilha; FERROLI, Paulo César Machado. Materiais e sustentabilidade: aplicações do bambu em arquitetura, design e engenharia. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de; LIBRELOTTO, Lisiane Ilha; FERROLI, Paulo César Machado (org.). **Design, artefatos e sistema sustentável**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 189-212. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/>. Acesso em: 11 maio 2021.

LINS, Bernardo F. E. Ferramentas básicas de qualidade. **Revista Ciência da Informação**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 153-161, 1993. Disponível em: <http://revista.ibict.br/ciinf/article/view/502/502>. Acesso em: 19 abr. 2021.

LÓPEZ, Marlén; RUBIO, Ramón; MARTÍN, Santiago; CROXFORD, Ben. How plants inspire façades. From plants to architecture: biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Belfast, GB, v. 67, p. 692-703, 2017. Disponível em: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1523344/>. Acesso em: 29 mar. 2021.

MA, Fei; ZHANG, Peng. A review of thermo-fluidic performance and application of shellless phase change slurry: Part 2 – Flow and heat transfer characteristics. **Energy**: FeiMaabPengZhanga, [s. l.], v. 192, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219322972>. Acesso em: 12 ago. 2021.

MAGNAGO, Patrícia Flores; AGUIAR, João Pedro Ornaghi de; PAULA, Istefani Carisio de. Sustentabilidade em desenvolvimento de produtos: uma proposta para a classificação de abordagens. **Produção Online Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção**, Florianópolis, SC, v. 112, n. 2, p. 351-376, 15 abr. 2012. Disponível em: <https://producaoonline.org.br>. Acesso em: 1 jan. 2020.

MANCUSO, Stefano. **A revolução das plantas**. São Paulo: Ubu, 2019. 188 p.

MANZINI, Ezio. **Design**: quando todos fazem design - uma introdução ao design para a inovação social. Rio Grande do Sul: Editora Unisinos, 2017. 254 p.

MARIANO, Ari de Melo. **Temac** - Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado. Brasília: Universidade de Brasília, 2021. 23 videoaulas. Disponível em: <https://www.pesquisatemac.com/>. Acesso em: 11 abr. 2021.

MARIANO, Ari de Melo; ROCHA, Maíra Santos. Revisão da literatura: apresentação de uma abordagem integradora. **AEDM International Conference – Economy, Business and Uncertainty**: Ideas for a European and Mediterranean industrial policy. Reggio Calabria (Itália), p. 427-443, 2017. Disponível em: <https://www.pesquisatemac.com/>. Acesso em: 16 out. 2021.

MATHWORKS. **Simulink**: Design. Simulate. Deploy. Estados Unidos, 2 nov. 2021. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Acesso em: 10 ago. 2021.

MAZZOLENI, Ilaria. **Architecture follows nature**: biomimetic principles for innovative design. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2013. 264 p.

MELO, Ana Paula; WESTPHAL, Fernando Simon; MATOS, Michele. **Apostila do curso básico do programa ENERGYPLUS** - LABEEE. Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2009. 24 p. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf. Acesso em: 13 set. 2021.

MELO, Viviane da Cunha; ENGLER, Rita de Castro. Design e Sustentabilidade para Valorização de Produtos Artesanais. In: ARRUDA, Amilton; LAILA, Theska; ROBERTO, Antônio; LIBRELOTTO, Lisiane; FERROLI, Paulo. **Tópicos em Design**: Biomimética, sustentabilidade e novos materiais. Curitiba: Editora Insight, 2019. cap. Biônica; Bidesign & Biomimética p. 159-166.

MENDOZA, Joan-Manuel F.; SHARMINA, Maria; GALLEGOS-SCHMID, Alejandro; HEYES, Graeme; AZAPAGIC, Adisa. Integrating backcasting and eco-design for the circular economy: the BECE *framework*. **Journal of Industrial Ecology**, Yale, USA, v. 21, n. 3, p. 526-544, 2017.

MICHAELIS moderno dicionário da língua portuguesa. São Paulo: Melhoramentos. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/>. Acesso em: 22 abr. 2021.

MILES, Matthew B.; HUBERMAN, A. Michael. **Qualitative data analysis**: an expanded sourcebook. 2. ed. Thousand Oaks, Califórnia: Sage, 1994. 352 p. Disponível em: <https://vivauniversidade.files.wordpress.com/2013/11/milesandhuberman1994.pdf>. Acesso em: 16 out. 2021.

MOORED, Keith W.; FISH, Frank E.; KEMP, Trevor H. Batoid fishes: inspiration for the next generation of underwater robots. **Marine Technology Society Journal**, Washington, USA, v. 45, n. 4, p. 99-109, 2011.

MORIN, Edgar (coord.). **A relação dos saberes: o desafio do século XXI**. 2. ed. Tradução: Flávia Nascimento. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. 584 p.

MORIN, Edgar. **Vers l'abîme?** Paris: Éditions de L'Herne, 2007. 181 p.

MUNARI, Bruno. **Das coisas nascem coisas**. São Paulo: Edições 70, 2018. 388 p.

MUNTINGA, Antje Elisabeth. **The STAR-system: a bio-inspired solution for a thermo regulative façade**. Orientadores: A. C. Bergsma e W. H. Van der Spoel, 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade Técnica de Delft (TU Delft), Países Baixos, 2013. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/>. Acesso em: 13 abr. 2021.

MYERS, William. **Bio design: nature + science + creativity**. Nova Iorque: The Museum of Modern Art, 2018. 304 p.

NATURE Cards Design for Life. In: **IDEO**, 2021. Disponível em: <https://www.ideo.com/post/nature-cards>. Acesso em: 1 jun. 2021.

NAGEL, Jacquelyn K.; PITTMAN, Peyton; PIDAPARTI, Ramana; ROSE, Chris; BEVERLY, Cheryl. Teaching bioinspired design using C–K theory. **Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials**, Londres, GB, v. 6, n. 2, p. 1-10, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 18 maio 2021.

NAGEL, Jacquelyn K. S.; STONE, Robert B.; MCADAMS, Daniel A. An engineering-to-biology thesaurus for engineering design. **Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference**, Canadá, p. 1-12, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 4 maio 2021.

NETO, Alber; ARRUDA, Iago Bersot. A abordagem de estudo de caso e a área de arquitetura, urbanismo e design: considerações a partir da análise de um periódico Qualis A2. **Revista Perspectiva Online: Humanas & Sociais Aplicadas**, Campos dos Goytacazes, v. 19, p. 39-47, 2017. Disponível em: www.researchgate.net/. Acesso em: 3 maio 2021.

NIEWIAROWSKI, Peter H.; STARK, Alyssa Y.; DHINOJWALA, Ali. Sticking to the story: outstanding challenges in gecko-inspired adhesives. **Journal of Experimental Biology**, Cambridge, GB, v. 21, n. 10, p. 1.223-1.230, 2016.

NUCLEÁRIO. **Tecnologia para restauração florestal**. S.d. Disponível em: <https://nucleario.com/>. Acesso em: 15 jun. 2020.

OLIVEIRA, Monique Aline Arabites de. **Design de superfície: proposta de procedimento metodológico para criação de estampas têxteis com referência em elementos naturais**. Orientador: Evelise Anicet Rüttschilling. 2012. 159 f. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br>. Acesso em: 1 jan. 2020.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: 17 objetivos para transformar nosso mundo**. [S. l.]: Organização das Nações Unidas, 2016. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/>. Acesso em: 1 fev. 2020.

PALOMBINI, Felipe Luis; KINDLEIN JUNIOR, Wilson; OLIVEIRA, Branca Freitas de; MARIATH, Jorge E. Araujo. Materiais e biônica: sob a ótica da análise de elementos finitos baseada em imagens de microtomografia de Raios X. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Métodos e processos em biônica e biomimética: a revolução tecnológica pela natureza**. São Paulo: Blucher, 2018a. p. 245-260 Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/article-list/9788580393491-409/list#undefined>. Acesso em: 23 mar. 2021.

PALOMBINI, Felipe Luis; LINDEN, Julio van der; MARIATH, Jorge E. A.; OLIVEIRA, Branca F. Design-aided science: o designer como promotor de tecnologias 3D para inovação em pesquisa científica. **Educação Gráfica**, Bauru, v. 22, n. 3, p. 169–186, dez. 2018b. Disponível em:

www.researchgate.net/search.Search.html?type=researcher&query=PALOMBINI%20Design-aided%20science. Acesso em: 23 mar. 2021.

PANIZZUTTI, Nicole Regina; MARTIN, Mauro. A biomimética e sua influência no design e na arquitetura e urbanismo. In: **Salão de Iniciação Científica da UFRGS**, 17. Porto Alegre: UFRGS, 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/60006>. Acesso em: 1 fev. 2020.

PAPANEK, Victor. **Arquitetura e design: ecologia e ética**. Lisboa, Portugal: Edições 70, 2007. 286 p.

PAPANEK, Victor. **Design for the real world: human ecology and social change**. Londres, GB: Thames & Hudson, 1985. 394 p.

PASSINO, Kevin M. **Biomimicry for optimization, control, and automation**. Londres, GB: Springer, 2005. 957 p.

PAUSE, B. Phase change materials and their application in coatings and laminates for textiles. In: SMITH, William C. **Smart Textile Coatings and Laminates: The Textile Institute Book Series**. [S. l.]: Elsevier / Woodhead Publishing, 2019. p. 175-187. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081024287000080>. Acesso em: 16 ago. 2021.

PAWLYN, Michael. **Biomimicry in architecture**. Londres, GB: Riba Publishing, 2011. 128 p.

PAZMINO, Ana Veronica. Interdisciplinaridade como Meio para o Fortalecimento da Biônica e Biomimética nos Cursos de Design. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a revolução tecnológica pela natureza**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 87-100. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/>. Acesso em: 23 jun. 2021.

PERERA, Ayomi S.; COPPENS, Marc-Olivier. Re-designing materials for biomedical applications: from biomimicry to nature-inspired chemical engineering. **Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering**, Londres, GB, v. 377, n. 2.138, 2018. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

PERISSÉ, André Reynaldo Santos; GOMES, Marleide da Mota; NOGUEIRA, Susie Andreis. Revisões sistemáticas (inclusive metanálises) e diretrizes clínicas. In: GOMES, Marleide da Mota (org.). **Medicina baseada em evidências: princípios e práticas**. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso, 2001. p. 131-148.

QUEIROZ, Natália; AGUIAR, Rafael Rattes Lima Rocha de; ARAUJO, Rodrigo Barbosa de. Biônica e biomimética no contexto da complexidade e sustentabilidade em projeto. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Design & complexidade**. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 7, p. 127-144.

QUEIROZ, Shirley Gomes; VIANA, Dianne Magalhães. Design e sustentabilidade: experiências integrando ensino, pesquisa e extensão. **Revista de Design, Tecnologia e Sociedade**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 33-52, 2014.

RAGGI, Roberta; MUNHOZ, Igor Polezi; NORIEGA, Carlos Enrique López. Biomimicry applied in engineering education: a case study in PUC-SP. **9th International Symposium on Project Approaches in Engineering Education (PAEE) 15th Active Learning in Engineering Education Workshop (ALE)**: Brasília, p. 1-36, 2018. Disponível em: www.researchgate.net/publication/323881025_Biomimicry_applied_in_engineering_education_a_case_study_in_PUC-SP. Acesso em: 8 mar. 2020.

RAMOS, Jaime. Biônica e Biomimética: A evolução do uso de analogias naturais - possíveis contribuições na busca da sustentabilidade ambiental. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Métodos e processos em biônica e biomimética: a revolução tecnológica pela natureza**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 113-118. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/>. Acesso em: 11 jul. 2021.

RIBEIRO, Flavio de Miranda; KRUGLIANSKAS, Isak. A economia circular no contexto europeu: conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. **XVI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente - Engema**, São Paulo, p. 1-16, 2014. Disponível em: www.engema.org.br/16/. Acesso em: 5 jan. 2020.

RIBEIRO, Gustavo Lins. Ambientalismo e desenvolvimento sustentado: nova ideologia/utopia do desenvolvimento. **Revista de Antropologia**, São Paulo, v. 34, p. 59-101, 1991. Disponível em: www.revistas.usp.br/ra/article/view/111253/109518. Acesso em: 28 set. 2021.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhino3D**: design, model, present, analyze, realize. [S. l.], 2 nov. 2021. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

ROSA, Francesco; CASCINI, Gaetano; BALDUSSU, Alessandro. UNO-BID: unified ontology for causal-function modeling in biologically inspired design. **International Journal of Design Creativity and Innovation**, Londres, GB, v. 3, n. 3/4, p. 1-34, 2014. Disponível em: www.researchgate.net/. Acesso em: 25 abr. 2021.

ROSSIN, Karen Jonhson. Biomimicry: nature's design process versus the designer's process. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, Miami, USA, v. 138, p. 559-570, 2010. Disponível em: www.witpress.com. Acesso em: 30 nov. 2019.

SÁ, Alice Araujo Marques de. **Design, inovação e estratégias naturais**: aplicações de princípios biomiméticos e biofílicos em projetos criativos. Orientadoras: Nayara Moreno de Siqueira, Fátima Santos Aparecida. 2018. 112 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Design) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/22889>. Acesso em: 28 set. 2021.

SÁ, Alice Araujo Marques de; SIQUEIRA, Nayara Moreno de. Design inspirado na natureza: aplicações de biomimética e biofilia em projeto de mobiliário. In: **Congresso de Iniciação Científica da UnB**, 24, Brasília: UnB, 2018. Disponível em: <https://conferencias.unb.br/index.php/iniciacaocientifica/24CICUNB15DF/paper/view/13610>. Acesso em: 1 maio 2020.

SÁ, Alice Araujo Marques de; VIANA, Dianne Magalhães. Design e biomimética: uma revisão sobre o estado da arte no cenário brasileiro. **Mix Sustentável (Online)**, Florianópolis, v. 7, n. 1, p. 137-150, 2020. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4332/3489>. Acesso em: 17 out. 2021.

SÁ, Alice Araujo Marques de; VIANA, Dianne Magalhães. BioTRIZ: Subsidies for Projects in Biomimicry and Design. In: ICSEEHawaii 2021 - 5th IAFOR International Conference on Sustainability, Energy & the Environment, 2021, Honolulu. **The IAFOR International Conference on Sustainability, Energy & the Environment - Official Conference Proceedings**, p. 97-109, 2021a.

SÁ, Alice Araujo Marques de; VIANA, Dianne Magalhães. Sustentabilidade em projetos criativos: contribuições da biofilia. In: ENSUS - IX Encontro de Sustentabilidade em Projeto e II Fórum de Bionica e Biomimética, 2021, Santa Catarina. **Anais ENSUS - II Fórum de Bionica e Biomimética**. Santa Catarina: UFSC / Virtuhab, v. 4, p. 57-68, 2021b.

SÁ, Lávila de Souza Nunes Rodrigues. **Análise do processo de internacionalização de empresas incubadas de base tecnológica**. Orientador: Jorge Manoel Teixeira Carneiro. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: www.maxwell.vrac.puc-rio.br/. Acesso em: 12 jan. 2021.

SANTOS, Paulo Cesar dos; VEGA, Italo Santiago. Um *framework* conceitual para planejamento didático em computação: uma abordagem em temperamentos. **Opción**, Maracaibo, Venezuela, v. 32, n. 9, p. 585-609, 2016. Disponível em: www.redalyc.org/pdf/310/31048482032.pdf. Acesso em: 11 abr. 2021.

SANTOS, Aguinaldo dos; LOPES, Camila S. D.; SAMPAIO, Cláudio P. de; TREIN, Fabiano A.; CHAVES, Liliane I.; LIBRELOTTO, Lisiane I.; FERROLI, Paulo Cesar M.; LEPRE, Priscilla R.; ENGLER, Rita C.; MARTINS, Suzana B.; NUNES, Viviane G. A. **Design para a Sustentabilidade**: Dimensão Ambiental. Curitiba: Insight, 2018. 183 p.

SHERMAN, Benjamin D.; VAUGHN, Michael D.; BERGKAMP, Jesse J.; GUST, John Devens; MOORE, Ana L.; MOORE, Thomas A. Evolution of reaction center mimics to systems capable of generating solar fuel. **Photosynthesis Research**, Suíça: Springer, v. 120, n. 1-2, p. 59-70, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11220-013-9795-4>. Acesso em: 28 set. 2021.

SILVA, Itamar Ferreira da; NASCIMENTO, Diego Lima do; SOUSA, Geysla Bezerra de; MENDES, Lucas Barros da Silva; ALVES, Daniel Ferreira. Biomimética como Método Criativo para a Concepção de artefatos nos

cursos de design de produtos. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de; LAILA, Theska; ROBERTO, Antônio; LIBRELOTTO, Lisiane; FERROLI, Paulo. **Tópicos em Design: Biomimética, sustentabilidade e novos materiais**. Curitiba: Insight, 2019. p. 19-30.

SOARES, Theska Laila de Freitas. **A biomimética e a geodésica de Buckminster Fuller: uma estratégia de biodesign**. Orientador: Amilton José Vieira de Arruda. 2016. 287 f. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32210. Acesso em: 1 jan. 2020.

SOARES, Theska Laila de Freitas; ARRUDA, Amilton José Vieira de. Fundamentos da Biônica e da Biomimética e exemplos aplicados no laboratório de Biodesign na UFPE. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de (org.). **Métodos e processos em biônica e biomimética: a revolução tecnológica pela natureza**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 9-35. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/>. Acesso em: 11 jul. 2021.

SOARES, Theska Laila de Freitas; ARRUDA, Amilton José Vieira de; LOPES FILHO, Celso Hartkopf; SILVA NETO, Justino Barbosa da; PAIVA, Rodrigo Balestra Ferreira de. A relação entre a biomimética e a geodésica de Buckminster Fuller no planejamento de construções sustentáveis. In: **Anais do 7º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável: Pluris: contrastes, contradições e complexidades: desafios urbanos no século XXI**, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, p. 1-11, 5 a 7 out. 2016. Disponível em: <http://docplayer.com.br/63092680-A-relacao-entre-a-biomimetica-e-a-geodesica-de-buckminster-fuller-no-planejamento-de-construcoes-sustentaveis.html>. Acesso em: 28 set. 2021.

SRINIVASAN, Venkataraman; CHAKRABARTI, Amaresh; PAL, Ujjwal; RANJAN, B. S. C.; OJHA, Sai Prasad. Supporting process and product knowledge in biomimetic design. **International Journal of Design Engineering**, Londres, GB, v. 4, n. 2, p. 132-158, jan. 2011. Disponível em: www.researchgate.net/publication/263424353_Supporting_Process_and_Product_Knowledge_in_Biomimetic_Design. Acesso em: 28 set. 2021.

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

STEIGLEDER, Ana Paula. **Estudo morfológico da planta *Salvinia molesta*: uma contribuição para a biônica e o design de produto**. Orientadora: Liane Roldo. 2010. 102 p. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/28839>. Acesso em: 1 jan. 2020.

STICKDORN, Marc; SCHNEIDER, Jakob (ed.). **This is service design thinking: basics, tools, cases**. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2012. 384 p.

STIVAL, Lorena Tibúrcio; BARROS, Rosana Gonçalves; VEIGA, Rosângela Mendanha da. Os instrumentos legais de gestão ambiental e sua relação com os princípios da economia circular. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 73, p. 70-83, 2020. Disponível em: www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/47214/28313. Acesso em: 23 mar. 2021.

TATE, Wendy L.; BALS, Lydia; BALS, Cristof; FOERSTL, Kai. Seeing the forest and not the trees: Learning from nature's circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 149, p. 115-129, 2019. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919302368. Acesso em: 28 set. 2021.

TERRIER, Philippe; GLAUS, Mathias; RAUFFLET, Emmanuel. BiomiMETRIC Assistance Tool: A Quantitative Performance Tool for Biomimetic Design. **Biomimetics**, Basel, Suíça, v. 4, n. 49, p. 1-19, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>. Acesso em: 12 maio 2020.

THIÉRY, Alain; BRETON, Charles. **Biomimétisme: on n'a rien inventé!** Paris, França: Le Cavalier Bleu Éditions, 2017. 136 p.

TITOTTO, Silvia; OLIVEIRA, Daniel; FERRANTE, Annarita. Space and energy: relationships among architects from nature. **SCIRES-IT**, Lecce, Itália, v. 5, n. 1, p. 115-129, 2015. Disponível em: www.sciresit.it/. Acesso em: 1 jan. 2020.

TRNSYS: Transient System Simulation Tool. Estados Unidos, 2019. Disponível em: <http://www.trnsys.com/>. Acesso em: 13 set. 2021.

TURNER, Anthony P. F. Biosensors. **Current Opinion in Biotechnology**, Londres, GB, v. 5, n. 1, p. 49-53, fev. 1994. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166905800692. Acesso em: 8 out. 2020.

VERSCHLEISSER, Roberto. **Aplicação de estruturas de bambu no design de objetos**: como construir objetos leves, resistentes, ecológicos, e de baixo custo. Orientador: José Luiz Mendes Ripper. 2008. 229 p. Tese (Doutorado em Design) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: www2.dbd.puc-rio.br. Acesso em: 1 jan. 2020.

VERSOS, Carlos A. M.; COELHO, Denis A. An approach to validation of industrial design concepts inspired by nature. **Design Principles and Practices: An International Journal - Annual Review**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 535-552, 2011. Disponível em: www.researchgate.net/publication/224831558. Acesso em: 19 out. 2017.

VEZZOLI, Carlos; MANZINI, Ezio. **Design for Environmental Sustainability**. Estados Unidos: Springer, 2008. 303 p.

VINCENT, Julian F. V.; BOGATYREVA, Olga A.; BOGATYREV, Nicolaj R.; BOWYER, Adrian; PAHL, Anja-Karina. Biomimetics: its practice and theory. **Journal of the Royal Society Interface**, Londres, GB, v. 3, p. 471-482, 2006. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/>. Acesso em: 28 set. 2021.

VOGEL, Thaís; NARDIN, Anna; OLIVEIRA, Pedro; VAGHETTI, Marcos. A biomimética como inspiração para fachadas brasileiras dinâmicas e eficientes. In: ARRUDA, Amilton José Vieira de; LAILA, Theska; ROBERTO, Antônio; LIBRELOTTO, Lisiane; FERROLI, Paulo. **Tópicos em Design: Biomimética, sustentabilidade e novos materiais**. Curitiba: Insight, 2019. p. 55-60

VOLSTAD, Nina Louise; BOKS, Casper. Biomimicry: a useful tool for the industrial designer? **DS 50: Proceedings of NordDesign 2008 Conference**, Tallinn, Estonia, 2008. p. 275-284. Disponível em: www.designsociety.org/. Acesso em: 19 out. 2017.

WANIECK, Kristina; FAYEMI, Pierre-Emmanuel; MARANZANA, Nicolas; ZOLLFRANK, Cordt; JACOBS, Shoshanah. Biomimetics and its tools. **Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials**, Londres, GB, v. 6, n. 2, p. 53-66, 2017. Disponível em: www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jbibr.16.00010. Acesso em: 11 maio 2020.

WEBER, Ana Verónica Paz y Mino Pazmino. **Modelo de ensino de métodos de design de produtos**. Orientadora: Rita Maria de Souza Couto. 2010. 454 f. Tese (Doutorado em Design) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721262_2010_pretextual_2.pdf. Acesso em: 18 abr. 2021.

WESTNEAT, Mark W.; THORSEN, Dean H.; WALKER, Jeffrey A.; HALE, Melina E. Structure, function, and neural control of pectoral fins in fishes. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, Nova Iorque, USA, v. 29, n. 3, p. 674-683, 2004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1353420>. Acesso em: 28 set. 2021.

WHAT is the *framework* for innovation? **Design council's evolved Double Diamond**, [s. l.], 2019. Disponível em: www.designcouncil.org.uk. Acesso em: 1 abr. 2020.

WHEELER, Q. D.; KNAPP, S.; STEVENSON, D. W.; STEVENSON, J.; BLUM, S. D.; BOOM, B. M.; BORISY, G. G.; BUIZER, J. L.; CARVALHO, M. R.; CIBRIAN, A.; DONOGHUE, M. J.; DOYLE, V.; GERSON, E. M.; GRAHAM, C. H.; GRAVES, P.; GRAVES, S. J.; GURALNICK, R. P.; HAMILTON, A. L.; HANKEN, J.; LAW, W.; LIPSCOMB, D. L.; LOVEJOY, T. E.; MILLER, H.; MILLER, J. S.; NAEEM, S.; NOVACEK, M. J.; PAGE, L. M.; PLATNICK, N. I.; PORTER-MORGAN, H.; RAVEN, P. H.; SOLIS, M. A.; VALDECASAS, A. G.; VAN DER LEEUW, S.; VASCO, A.; VERMEULEN, N.; VOGEL, J.; WALLS, R. L.; WILSON, E. O.; WOODLEY, J. B. Mapping the biosphere: exploring species to understand the origin, organization and sustainability of biodiversity. **Systematics and Biodiversity**, Londres, GB, v. 10, n. 1, p. 1-20, 2012. Disponível em: www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14772000.2012.665095. Acesso em: 28 set. 2021.

WILSON, Edward O. **Biophilia: the human bond with other species**. Cambridge, Massachusetts e Londres, GB.: Harvard University Press, 1984. 157 p.

WIMMER, Roger D.; DOMINICK, Joseph R. **La investigación científica de los medios de comunicación: una introducción a sus métodos**. Barcelona: Bosch, 1996. 492 p.

XING, Yangang; JONES, Phil; BOSCH, Maurice; DONNISON, Iain; SPEAR, Morwenna; ORMONDROYD, Graham. Exploring design principles of biological and living building envelopes: what can we learn from plant cell walls?. **Intelligent Buildings International**, Londres, GB, v. 10, n. 2, p. 78-102, 2018. Disponível em: www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17508975.2017.1394808. Acesso em: 24 mar. 2021.

XU, Quan; ZHANG, Wenwen; DONG, Chenbo; SREEPRASAD, Theruvakkattil Sreenivasan; XIA, Zhenhai. Biomimetic self-cleaning surfaces: synthesis, mechanism and applications. **Journal of the Royal Society Interface**, Londres, GB, v. 13, n. 122, p. 1-12, 2016. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205 p.

ZARI, Maibritt Pedersen. Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. **SB07**, Paper number 33, New Zealand, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237460476_BIOMIMETIC_APPROACHES_TO_ARCHITECTURAL_DESIGN_FOR_INCREASED. Acesso em: 19 out. 2019.

ZARI, Maibritt Pedersen. Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation. **Architectural Science Review**, Londres, GB, v. 53, n. 2, p. 171-183, 2010. Disponível em: www.researchgate.net/. Acesso em: 6 mar. 2020.

ZARI, Maibritt Pedersen. Biomimetic urban design: ecosystem service provision of water and energy. **Buildings**, Basel, Suíça, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2017. Disponível em: www.researchgate.net/. Acesso em: 6 mar. 2020.

ZARI, Maibritt Pedersen. Can biomimicry be a useful tool for design for climate change adaptation and mitigation?. In: PACHECO-TORGAL, Fernando; LABRINCHA, João António; DIAMANTI, Maria Vittoria; YU, Chang-Ping; LEE, Heung-Kyu (ed.). **Biotechnologies and biomimetics for civil engineering**: Springer, 2015. cap. 4. Disponível em: www.springer.com/gp/book/9783319092867. Acesso em: 6 mar. 2020.

ZARI, Maibritt Pedersen. Devising urban biodiversity habitat provision goals: ecosystem services analysis. **Forests**, Basel, Suíça, v. 10, n. 5, p. 1-17, 2019. Disponível em: www.mdpi.com/. Acesso em: 24 mar. 2021.

ZARI, Maibritt Pedersen. **Ecosystem services analysis for the design of regenerative urban built environments**, Weelington, Nova Zelândia: Victoria University of Wellington, 2012. 490 p.

ZARI; Maibritt Pedersen; RECHT, Katharina. Biomimicry for regenerative built environments: mapping design strategies for producing ecosystem services. **Biomimetics**, Basel, Suíça, v. 5, n. 2, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-7673/5/2/18>. Acesso em: 14 out. 2021.

APÊNDICE A - LEVANTAMENTO *WEB OF SCIENCE*

Levantamento de Citações <i>Web of Science</i>	
Título	Autor
<i>Biomimetics: lessons from nature - an overview</i>	Bhushan (2009)
<i>Biomimicry in textiles: past, present and potential. An overview</i>	Eadie; Ghosh (2011)
<i>Microstructured barbs on the north american porcupine quill enable easy tissue penetration and difficult removal</i>	Cho et al. (2012)
<i>Design and fabrication of multi-material structures for bioinspired robots</i>	Cutkosky, Kim (2009)
<i>Integrating backcasting and eco-design for the circular economy the BECE framework</i>	Mendoza et al. (2017)
<i>Evolution of reaction center mimics to systems capable of generating solar fuel</i>	Sherman et al. (2014)
<i>Templates and anchors for antenna-based wall following in cockroaches and robots</i>	Lee et al. (2008)
<i>Biomimetic self-cleaning surfaces: synthesis, mechanism and applications</i>	Xu et al. (2016)
<i>Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation</i>	Zari (2010)
<i>A model based on biomimicry to enhance ecologically sustainable design</i>	Gamage; Hyde (2012)
<i>Sticking to the story: outstanding challenges in gecko-inspired adhesives</i>	Niewiarowski, Stark; Dhinojwala (2016)
<i>Ecosystem services analysis for the design of regenerative built environments</i>	Zari (2012)
<i>Biomimicry as a problem-solving methodology in interior architecture</i>	El-Zeiny (2012)
Levantamento de Co-citation	
Título	Autor
<i>Biomimicry: innovations inspired by nature</i>	Benyus (1997)
<i>Biomimetics: its practice and theory</i>	Vincent et al. (2006)
<i>Biologically inspired design: process and products</i>	Helms; Vattam; Goel (2009)
<i>Biomimicry in architecture</i>	Pawlyn (2011)
<i>Functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas</i>	Chakrabarti et al. (2005)
<i>Biomimicry resource handbook</i>	Baumeister et al. (2014)
<i>Cradle to cradle: remaking the way we make things</i>	McDonough; Braungart (2002)
Levantamento de Coupling	
Título	Autor
<i>A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: review</i>	Hosseini et al. (2019)
<i>Seeing the forest and not the trees: learning from nature's circular economy</i>	Tate et al. (2019)
<i>Exploring design principles of biological and living building envelopes: what can we learn from plant cell walls?</i>	Xing et al. (2018)
<i>Biomimetic approach in architectural education: case study of 'biomimicry in architecture' course</i>	Amer (2019)
<i>Re-designing materials for biomedical applications: from biomimicry to nature-inspired chemical engineering</i>	Perera; Coppens (2018)
<i>Molecular mechanisms of biomineralization in marine invertebrates</i>	Clark (2020)
<i>Biomimetic urban design: ecosystem service provision of water and energy</i>	Zari (2017)

Fonte: A autora (2021).

APÊNDICE B - LEVANTAMENTO SCOPUS

Levantamento de Citações Scopus	
Título	Autor
<i>Biomimicry for optimization, control, and automation</i>	Passino (2005)
<i>The form and function of spider orb webs: evolution from silk to ecosystems</i>	Blackledge; Kuntner; Agnarsson (2011)
<i>Mapping the biosphere: exploring species to understand the origin, organization and sustainability of biodiversity</i>	Wheeler et al. (2012)
<i>Structure, function, and neural control of pectoral fins in fishes</i>	Westneat et al. (2004)
<i>Biomimetic design for climate change [...]</i>	Zari (2010)
<i>A model based on biomimicry [...]</i>	Gamage; Hyde (2012)
<i>Batoid fishes: inspiration for the next generation of underwater robots</i>	Moored; Fish; Kemp (2011)
<i>Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation</i>	Aziz; El Sherif (2016)
<i>Architecture follows nature: biomimetic principles for innovative design</i>	Mazzoleni (2013)
<i>Ecosystem services analysis [...]</i>	Zari (2012)
Levantamento de Co-citation	
Título	Autor
<i>Exploring student differences in formulating cross-disciplinary sustainability problems</i>	Adams et al. (2010)
<i>A model based on biomimicry to enhance ecologically sustainable design</i>	Gamage; Hyde (2012)
<i>Biomimicry: innovations inspired by nature</i>	Benyus (1997)
<i>Shape and structure, from engineering to nature</i>	Bejan (2000)
<i>Biologically inspired design: process and products</i>	Helms; Vattam; Goel (2009)
<i>The state-of-the-art in biomimetics</i>	Lepora; Verschure; Prescott (2013)
<i>Animal locomotion</i>	Biewener; Patek (2018)
Levantamento de Coupling	
Título	Autor
<i>Classification and selection of cellular materials in mechanical design: engineering and biomimetic approaches</i>	Bhate et al. (2019)
<i>A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: review</i>	Hosseini et al. (2019)
<i>The design characteristics of nature-inspired buildings</i>	Kim; Park (2018)
<i>Leveraging socio-ecological resilience theory to build climate resilience in transport infrastructure</i>	Hayes et al. (2019)
<i>A biomimicry design for nanoscale radiative cooling applications inspired by <i>Morpho didius</i> butterfly</i>	Didari; Mengüç (2018)
<i>Not simply green: nature-based solutions as a concept and practical approach for sustainability studies and planning agendas in cities</i>	Duschkova; Haase (2020)

Fonte: A autora (2021).

APÊNDICE C - LEVANTAMENTO *GOOGLE SCHOLAR*

Levantamento de Citações <i>Google Scholar</i> 1990 - 2021	
Título	Autor
Economia circular no contexto europeu: conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos	Ribeiro; Kruglianskas (2014)
A biomimética como método criativo para o projeto de produto	Detanico; Teixeira; Silva (2010)
Sustentabilidade em desenvolvimento de produtos: uma proposta para a classificação de abordagens	Magnago; Aguiar; Paula (2012)
A importância de fibras e fios no design de têxteis destinados à prática desportiva	Filgueiras; Fangueiro; Raphaeli (2008)
Aplicação de estruturas de bambu no design de objetos: como construir objetos leves, resistentes, ecológicos, e de baixo custo	Verschleisser (2008)
Biônica e biomimética no contexto da complexidade e sustentabilidade em projeto	Queiroz; Araújo; Aguiar (2017)
Design de superfície: proposta de procedimento metodológico para criação de estampas têxteis com referência em elementos naturais	Oliveira (2012)
A relação entre a biomimética e a geodésica de Buckminster Fuller no planejamento de construções sustentáveis	Soares et al. (2016)
Como a biônica e biomimética se relacionam com as estruturas naturais na busca de um novo modelo de pesquisa projetual	Arruda (2015)
Formas naturais e estruturação de superfícies mínimas em arquitetura	Allgayer (2009)
Estudo morfológico da planta <i>Salvinia molesta</i> : uma contribuição para a biônica e o design de produto	Steigleder (2010)
<i>Strategic design, sustainability and multiple approaches for textile experimentation</i>	Bergmann; Magalhães (2019)
Levantamento de Citações <i>Google Scholar</i> 2018 - 2021	
Título	Autor
Novas estratégias da biomimética: as analogias no biodesign e na bioarquitetura	Freitas; Arruda (2018)
Materiais e biônica: sob a ótica da análise de elementos finitos baseada em imagens de microtomografia de raios X	Palombini; et al. (2018)
Os instrumentos legais de gestão ambiental e sua relação com os princípios da economia circular	Stival; Barros; Veiga (2020)
<i>Design-aided science</i> : o designer como promotor de tecnologias 3D para inovação em pesquisa científica	Palombini et al. (2018)
As contribuições da impressão 3D para a validação dos conceitos no estudo das estruturas retráteis	Anaf; Harris (2018)

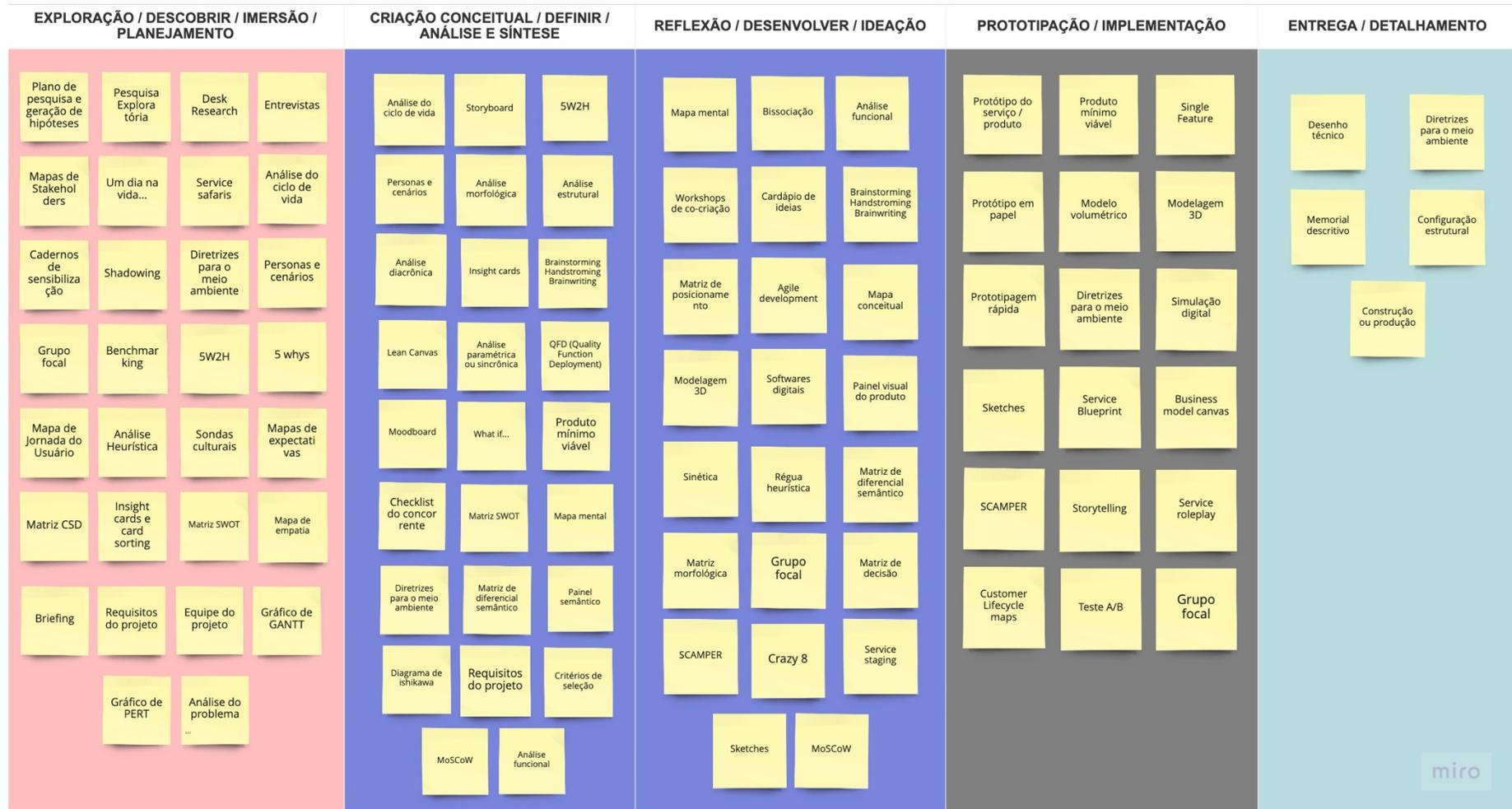
Fonte: A autora (2021).

APÊNDICE D - LEVANTAMENTO DE FERRAMENTAS *GOOGLE SCHOLAR*

Levantamento de Citações <i>Google Scholar</i> 1990 – 2021	
Título	Autor
<i>Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability</i>	Zari (2007)
<i>Integrating backcasting and eco-design for the circular economy [...]</i>	Mendoza et al. (2017)
<i>How plants inspire façades. From plants to architecture [...]</i>	López et al. (2017)
<i>Bio-inspired design [...]</i>	Fu et al. (2014)
<i>Botanics and parametric design fusions for performative building skins [...]</i>	Ahmar; Fioravanti (2014)
<i>Biomimicry as a problem-solving methodology in interior architecture</i>	El-Zeiny (2012)
<i>On the use of biomimicry as a useful tool for the industrial designer</i>	Volstad, Boks (2012)
<i>The star-system [...]</i>	Muntinga (2013)
<i>Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation</i>	Aziz; El Sherif (2016)
Design de produtos biomiméticos visando a sustentabilidade nas edificações [...]	Camargo (2016)
<i>Biomimetics: process, tools and practice</i>	Fayemi et al. (2017)
<i>Comparing biomimicry and cradle to cradle with ecodesign [...]</i>	Pauw et al. (2014)
<i>Biomimetics and its tools</i>	Wanieck et al. (2017)
<i>Biomimetic building skins [...]</i>	Obaidi et al. (2017)
<i>BioTRIZ suggests radiative cooling of buildings can be done passively [...]</i>	Craig et al. (2008)
<i>Tools to incorporate biomimetic into product design-a review</i>	Maidin et al. (2017)
Levantamento de Citações <i>Google Scholar</i> 2018 – 2021	
Título	Autor
<i>Biomimetric assistance tool [...]</i>	Terrier; Glaus; Raufflet (2019)
<i>How does biologically inspired design cope with multi-functionality?</i>	Svensen; Lenau (2019)
<i>Investigation of C-K theory based approach for innovative solutions in bioinspired design</i>	Graceraj et al. (2019)
<i>Biomimicry design thinking education [...]</i>	Stevens et al. (2020)
<i>Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils</i>	Chayaamor-Heil; Guéna; Hannachi-Belkadi (2018)
<i>Biomimicry exploring research, challenges, gaps, and tools</i>	Sharma; Sarkar (2019)
<i>A new biomimicry tool for visual design [...]</i>	AiLi; Wang (2019)
<i>Performance based abstraction of biomimicry design principles using prototyping</i>	Rovalo; McCardle (2019)
<i>Establishing analogy categories for bio-inspired design</i>	Nagel; Schmidt; Born (2018)
<i>Facilitation method for the translation of biological systems to technical design solutions</i>	Weidner; Nagel; Weber (2018)
<i>Creative design inspired by biological knowledge [...]</i>	Tan et al. (2019)
<i>Design entity recognition for bio-inspired design supervised state of the art</i>	Russo et al. (2018)
<i>What do we learn from good practices of biologically inspired design in innovation?</i>	Chirazi et al. (2019)
<i>The development of a biomimetic design tool for building energy efficiency</i>	Imani; Vale (2020)
<i>A framework to achieve multifunctionality in biomimetic adaptive building skins</i>	Kuru et al. (2020)
<i>Biomimicry for regenerative built environments [...]</i>	Zari, Hecht (2020)
<i>Biomimetics: teaching the tools of the trade</i>	Wanieck et al. (2020)
<i>A systematic approach for new technology development by using a biomimicry-based TRIZ contradiction matrix</i>	Lim et al. (2018)
<i>How students engage in biomimicry</i>	Qureshi (2020)
<i>The bio-mimicry method in creative process of new product design inspired by nature solution</i>	Purwaningsih; Wicaksono; Saptadi (2020)
<i>Biomimicry as methodological tool for technical emancipation of peripheral countries</i>	Barbosa et al. (2018)
<i>Biomimetic design method: literature review</i>	Cohen; Reich (2016)
<i>Morphino - a nature-inspired tool for the design of shape-changing interfaces</i>	Qama et al. (2020)
<i>Biomimicry design education essentials</i>	Stevens et al. (2019)
<i>E2BMO - facilitating user interaction with a BioMimetic ontology [...]</i>	McInerney et al. (2018)

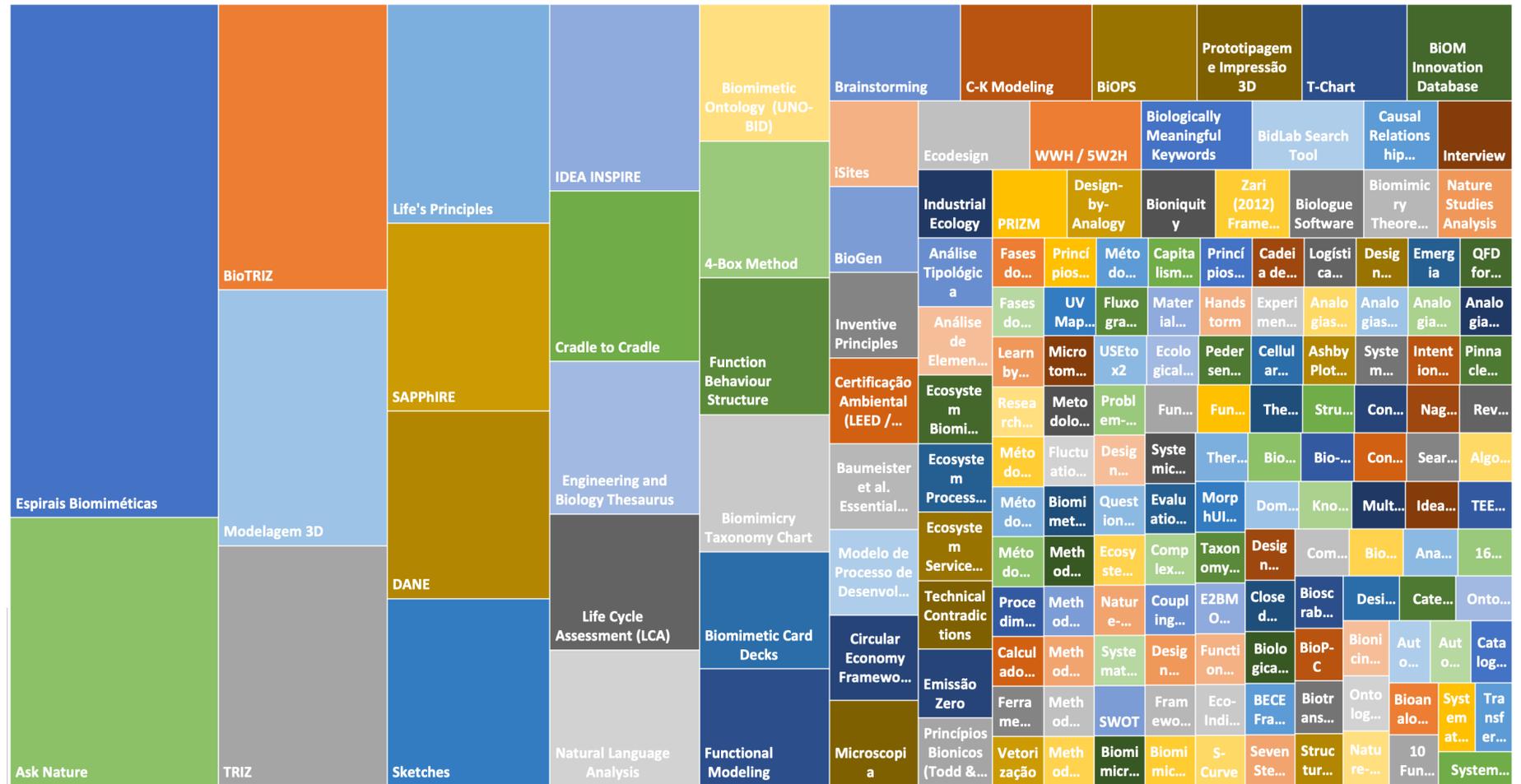
Fonte: A autora (2021).

APÊNDICE E - CONJUNTO DE RECURSOS PARA CRIAÇÃO EM DESIGN



Fonte: A autora (2021).

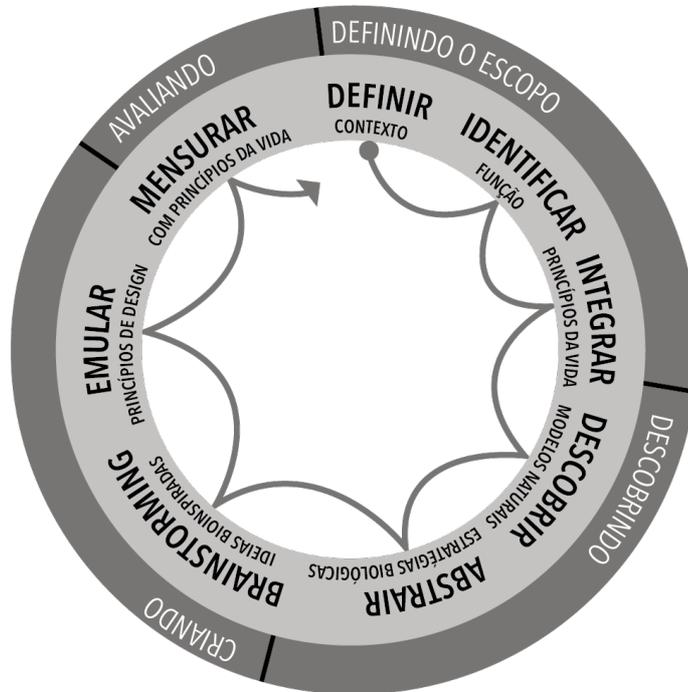
APÊNDICE F - FERRAMENTAS MAIS MENCIONADAS NA LITERATURA



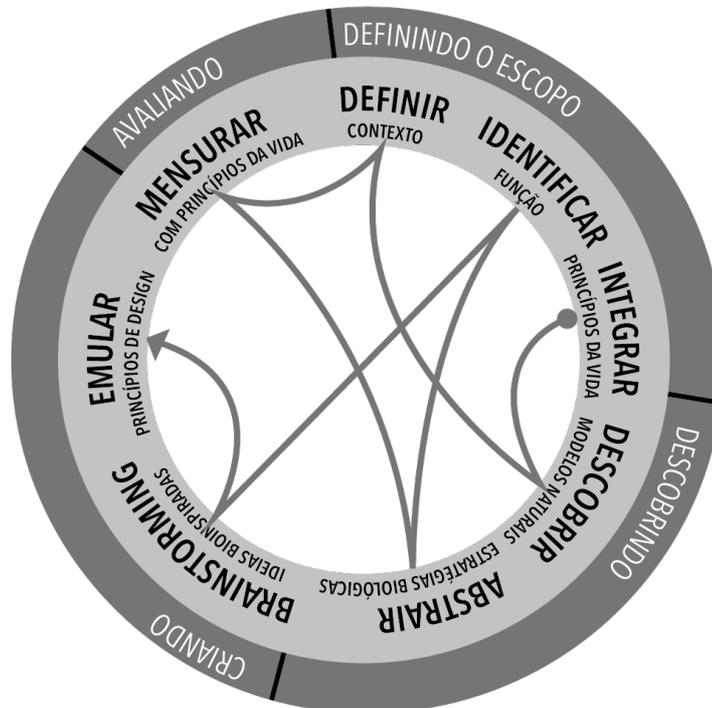
Fonte: A autora (2021)

ANEXO A - ESPIRAIS BIOMIMÉTICAS

Design para Biologia

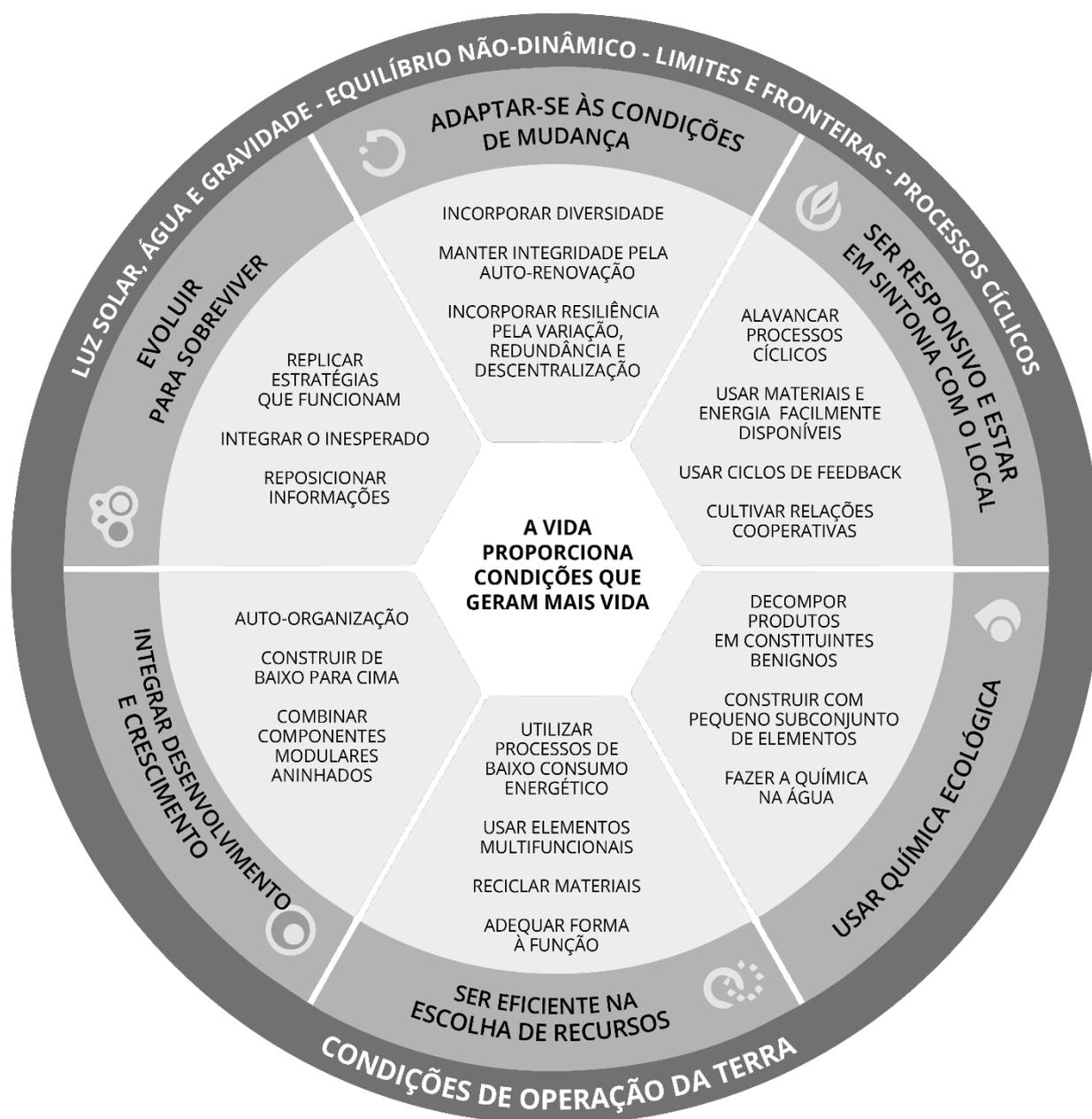


Biologia para Design



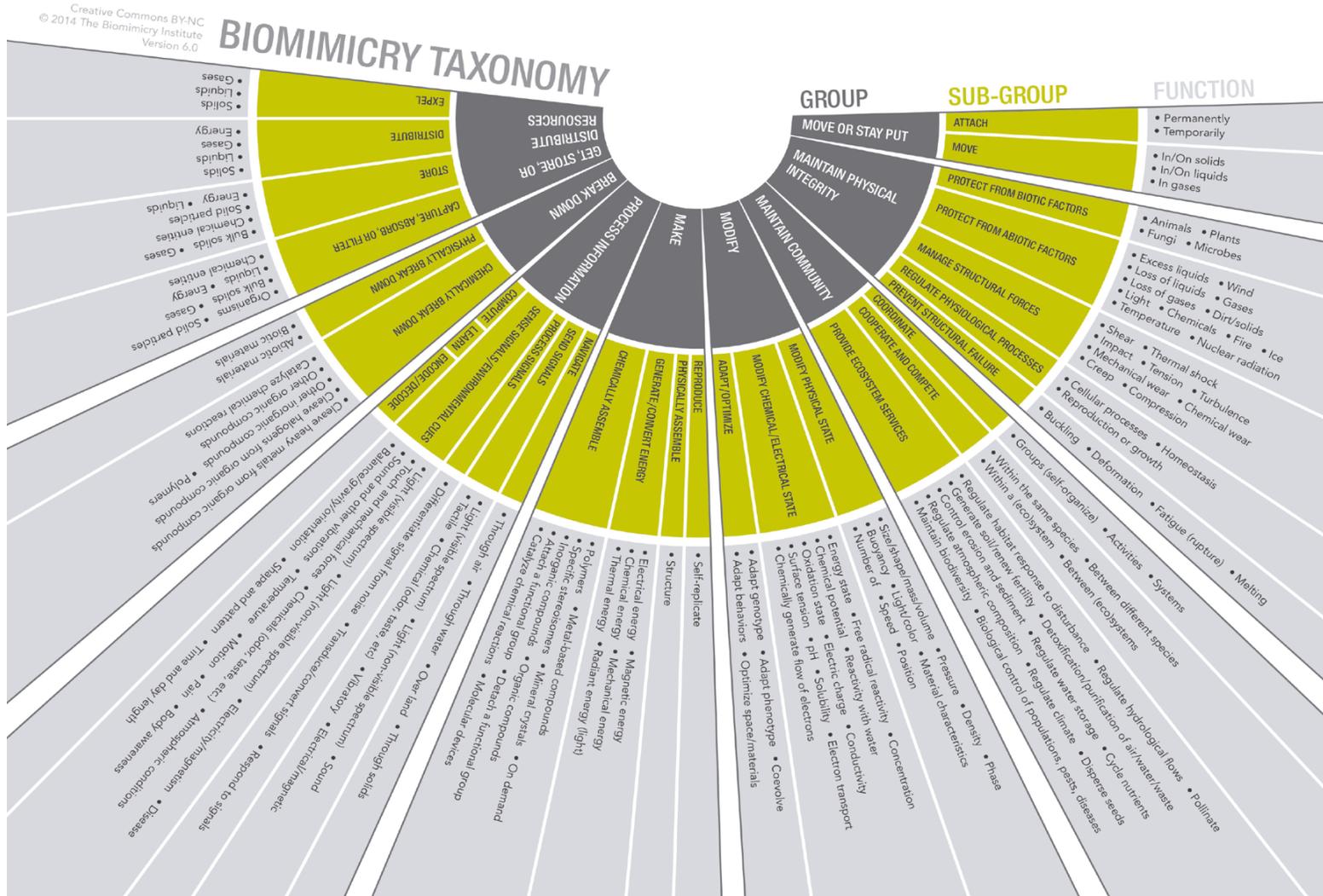
Fonte: Traduzido de Baumeister et al. (2014).

ANEXO B - DIAGRAMA DE PRINCÍPIOS DA VIDA



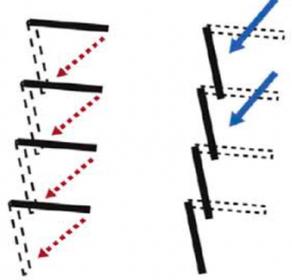
Fonte: Traduzido de Baumeister et al. (2014).

ANEXO C - BIOMIMICRY TAXONOMY CHART



Fonte: Baumeister et al. (2014).

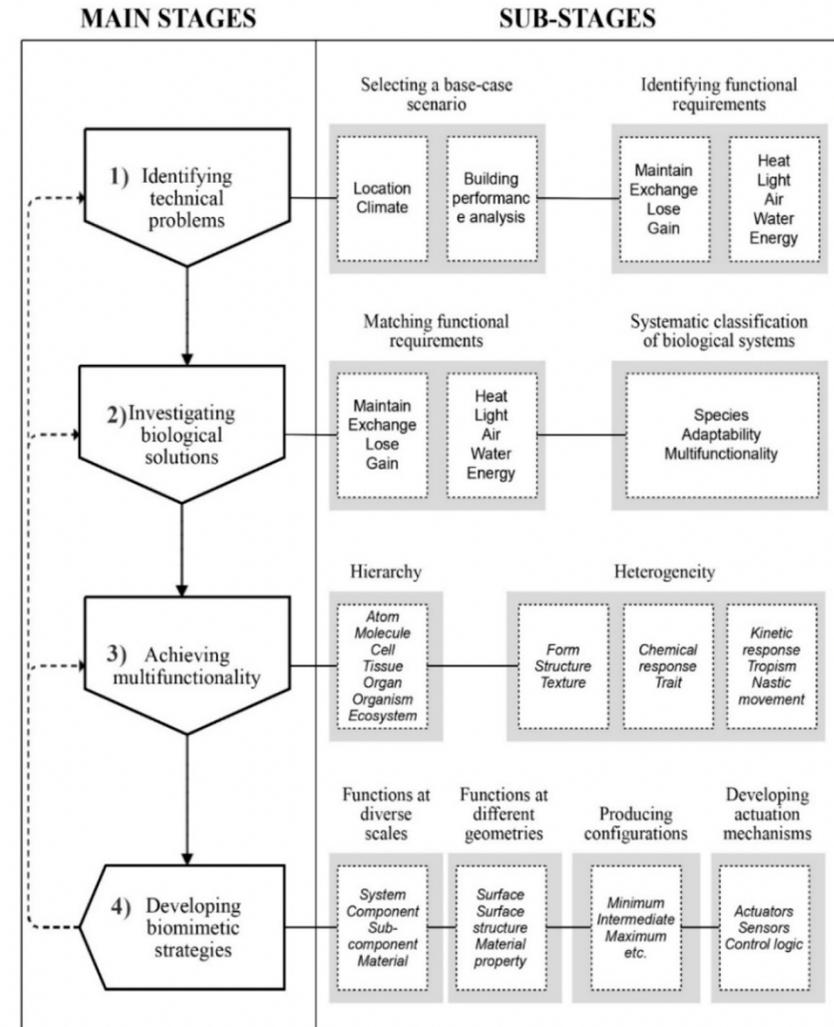
ANEXO E - FERRAMENTA DCGDPIF APLICADA EM PROJETO DE FACHADA

CLIMATE	Mesembryanthemums	WHAT?	WHY?	HOW?
Mediterranean T ^a <25°C m <10°C ltc <580		ADAPTATION behavioural	CHALLENGE dispersing seeds for a distance of yards	FUNCTION opening
		APPROACH dynamic mechanism macro-scale		PROCESS when rain falls the capsules absorb moisture and swell, causing a star-shaped set of valves to open
ENVIRONMENTAL ISSUE Rainwater	SYSTEM valve mechanism	MAIN FEATURES hygroscopicity		
APPLICATION IDEAS		INNOVATION		DESIGN CONCEPT GENERATION
ADAPTABILITY dynamic adaptive envelope		CHALLENGE opening-closing system with independent activation		TECHNICAL IMPLEMENTATION 
APPLICATION Smart opening - closing system with rainwater		BENEFIT saving construction elements saving energy waste in activation systems		
				TECHNICAL FEATURES motion such as folding, curling or rolling

Fonte: López et al. (2017)

ANEXO F - QUADRO PARA COLETA DE INFORMAÇÕES BIOLÓGICAS (À ESQUERDA) E *FRAMEWORK* M-BA (À DIREITA)

Layer	Scope	Parameters	
1. Species	Biological system	-	
	Scientific name	-	
2. Adaptability	Stimulus	Physical	
		Chemical	
	Process	Dynamic	
		Static	
3. Multifunctionality	Environmental factor	Heat	
		Light	
		Air	
		Water	
		Energy	
	Function	Maintain	
		Exchange	
		Gain	
		Lose	
		Biological mechanism	
Mechanism	Functional strategy		
	Performance measure		
3.a. Hierarchy	Biological organization scale	Pre-cellular	Atom, molecule
		Sub-cellular	Organelle
		Cellular	Cell
		Multicellular	Tissue, organ, organism
		Ecological	Ecosystem, biome
3.b. Heterogeneity	Adaptation type and level	Morphological	Form Structure Texture
		Physiological	Chemical response Trait
			Kinetic response Tropism Nastic movement
		Behavioral	

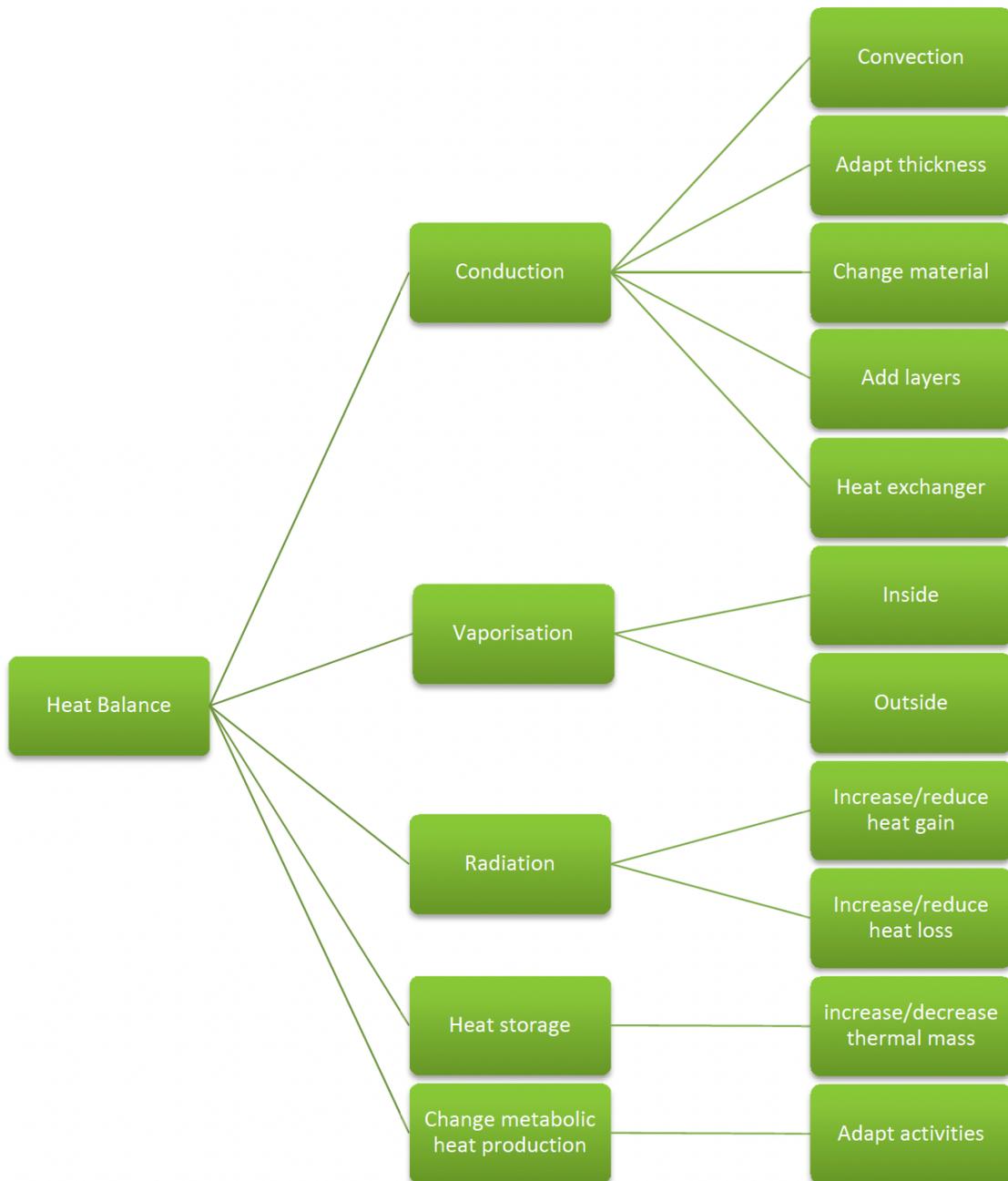


Fonte: Kuru et al., 2020.

ANEXO G - FERRAMENTA DE SOLUÇÃO BIOMIMÉTICA PREENCHIDA POR CAMARGO

CLIMA DO LOCAL: Clima temperado / Temperaturas médias: Inverno - 8° a 19°C e Verão - 16° a 27°C											
DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E USO: Eficiência energética através de um produto para ISOLAMENTO térmico nas fachadas											
Soluções biológicas	Princípios biológicos / Propriedades físicas	Aspectos do nível de biomimetismo	PRINCÍPIO ATENDE PROBLEMA E USO PROPOSTO	CREDITOS LEED-CS / AQUA-HQE							POTENCIAL DE USO DA SOLUÇÃO BIOLÓGICA PARA INSPIRAÇÃO NO DESIGN DE PRODUTO
				ENERGIA			CONFORTO TÉRMICO				
				Performance mínima de energia	Concepção térmica	Redução do consumo de energia para os sistemas de condicionamento de ar, ventilação e exaustão	Desempenho mínimo da qualidade do ar interno	Aumento da ventilação	Conforto térmico - Projeto	Implantação de medidas arquitet. para otimização do conforto higratérm. de verão e de inverno	
Hipopótamo	Secreção da pele / aumento da espessura da camada ou alteração para baixa absorvidade	Sistema orgânico Técnicas de sobrevivência Resposta por autoproteção	X								BP
Cacto	Obstáculo para sombra	Forma e volumetria Estrutura	X								MP
Estrela-do-mar	Armazenamento de água	Técnica de sobrevivência Resposta ao clima por refrigeração Adaptação à limitada oferta de recursos	X								BP
Gazela-de-thomson	Forma da vascularização e circulação	Sistema circulatório e respiratório Técnica de sobrevivência Interação com outras criaturas Resposta ao clima por refrigeração	X								MP
Pinguins imperadores	Organização em grupo / Camadas de ar intermediárias / baixa condutibilidade	Estrutura Técnica de sobrevivência Interação com outras criaturas Administração e coordenação do grupo Resposta ao clima por calefação	X								MP
Plantas gênero <i>Lysichiton</i>	Termostato natural	Estrutura Adaptação a diferentes níveis de luz e sombra									
Numbat	Organização e forma da pelagem / baixa absorvidade, condutibilidade e aumento da espessura da camada	Forma e volumetria Estrutura Resposta ao clima por calefação e refrigeração	X								MP

Fonte: Adaptado de Camargo, 2016.

ANEXO H - DIAGRAMA DO MODELO DE EXPLORAÇÃO

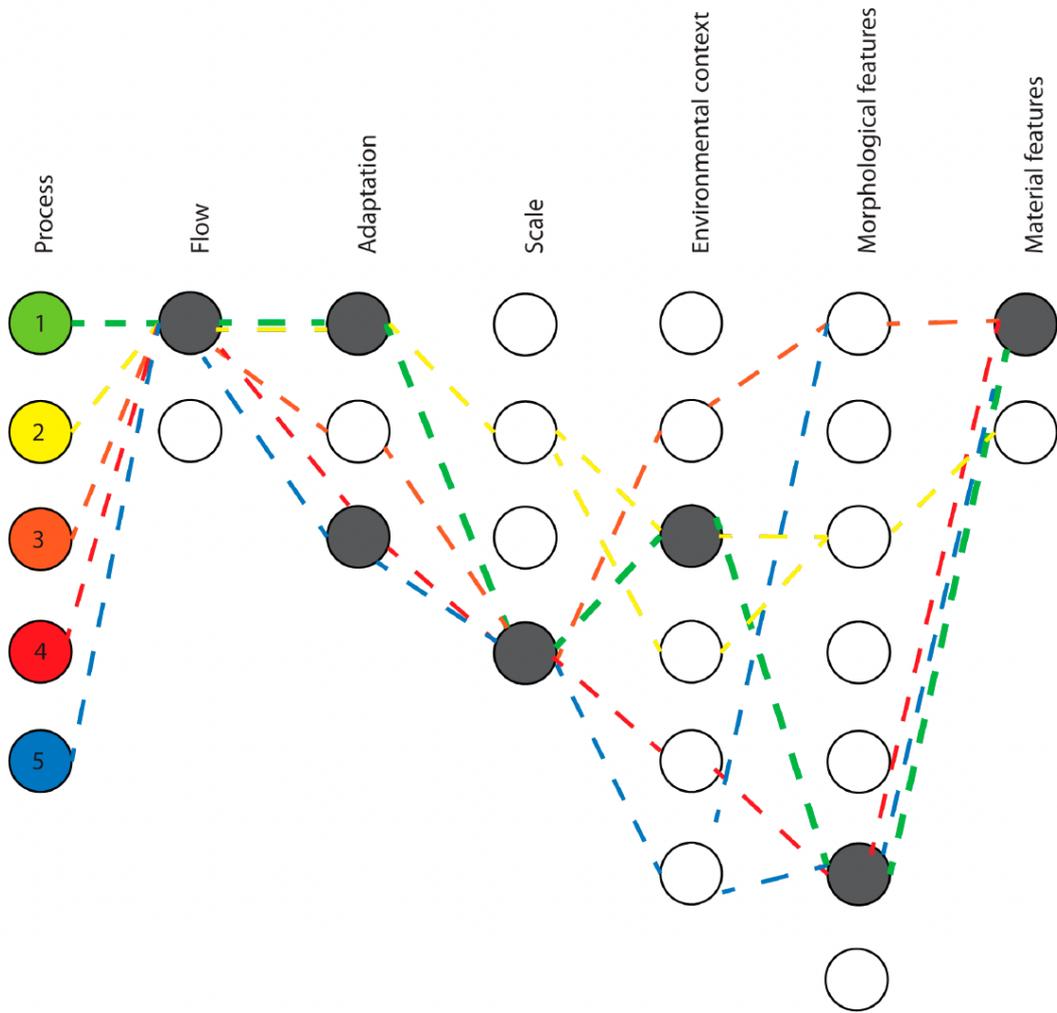
Fonte: Muntinga, 2013.

ANEXO I - MATRIZ DE ANÁLISE DE PINÁCULOS

Process	Pinnacles	Flow		Adaptation			Scale				Environmental context					Morphological features						Material features			
		Active	Passive	Physiological	Morphological	Behavioural	Nano	Micro	Meso	Macro	Arid	Tropical	Moderate	Continental	Polar	Aquatic	Modular & Compact	Filaments	Adjacent	Branching	Fluffy	Conduits	Cluster	Conductive	Elastic
Conduction	Elephants	X		X					X	X									X		X		X	X	
	Pelicans		X	X					X			X							X		X		X	X	
	Termites		X		X				X	X									X		X		X	X	
	Bird	X		X				X				X	X				X			X			X	X	
	Seal	X		X				X				X		X	X			X			X		X	X	
	Rabbits	X			X				X			X	X				X			X			X	X	
	Reindeers	X			X				X				X	X			X			X			X	X	
	Humans	X				X			X			X	X	X			X	X				X		X	X
	Whales	X		X					X						X				X	X		X		X	X
		Imaginary pinnacle 1	X		X					X			X										X		X
Evaporation	Nightjars	X		X		X		X			X	X				X	X				X			X	
	Bees	X			X			X			X	X										X			
	Humans	X		X			X		X	X	X	X					X				X				
	Ants	X		X			X		X	X	X	X					X				X				
	Datura flower	X		X			X				X	X					X							X	
		Imaginary pinnacle 2	X		X			X				X	X					X							X
Radiation	Dragonfly	X			X			X		X	X	X				X							X		
	Cactuses		X		X			X	X							X						X		X	
	Mangroves	X			X			X			X					X								X	
	Penguins	X			X	X		X					X			X						X		X	
	Alligators	X		X				X			X								X	X		X		X	
	Toco Toucan	X		X				X			X								X	X		X		X	
	Flowers	X			X	X			X			X	X				X					X		X	
	Imaginary pinnacle 3	X			X			X		X						X								X	
Change metabolic rate	Humans	X			X		X	X	X	X	X	X	X	X								X		X	
	Bears	X			X		X	X				X										X		X	
	Imaginary pinnacle 4	X			X		X	X				X										X		X	
Store heat	Starfish	X			X			X					X			X						X		X	
	Imaginary pinnacle 5	X			X			X					X			X						X		X	

Fonte: Muntinga, 2013.

ANEXO J - MATRIZ DE PERCURSO DE DESIGN



Fonte: Muntinga, 2013.