



**UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS**



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

**BIOMIMÉTICA NO DESIGN:
ABORDAGENS, LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES PARA O
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E TECNOLOGIAS**

GABRIELA RABELO ANDRADE

Belo Horizonte
Universidade do Estado de Minas Gerais UEMG
2014



**UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS**



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

GABRIELA RABELO ANDRADE

**BIOMIMÉTICA NO DESIGN:
ABORDAGENS, LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES PARA O
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E TECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG como requisito para a obtenção de grau de Mestre em Design, na linha de pesquisa: Design, Materiais, Tecnologia e Processos.

Universidade do Estado de Minas Gerais
Orientador: Prof. Antônio Valadão Cardoso, Dr.

**Belo Horizonte
2014**

A553b

Andrade, Gabriela Rabelo

Biomimética no design: abordagens, limitações e contribuições para o desenvolvimento de produtos e tecnologias / Gabriela Rabelo Andrade. – 2014.

106 f.: il. enc.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Valadão Cardoso

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Design.

Bibliografia: f. 95-98.
Inclui apêndice.

1. Desenho industrial – Teses. 2. Biônica – Teses. 3. Estudo da natureza – Inovações tecnológicas – Teses. 4. Biomecânica – Teses. I. Cardoso, Antônio Valadão. II. Universidade do Estado de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação. III. Título.

CDU: 7.05:57

Ficha catalográfica: Fernanda Costa Rodrigues CRB 2060/6 ^a



UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

BIOMIMÉTICA NO DESIGN: ABORDAGENS, LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E TECNOLOGIAS

Autora: Gabriela Rabelo Andrade

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do
título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da
Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 13 de agosto de 2014.

Sebastiana Lana
Coordenação do Mestrado em Design
MASP 1034263-2
Escola de Design / UEMG

Profª Sebastiana Luiza Bragança Lana, PhD.
Coordenadora do PPGD

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antônio Valadão Cardoso, Dr.
Orientador
Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof. Renato Cesar Ferreira de Souza, Dr.

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Jairo José Drummond Câmara, Dr.

Universidade do Estado de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo carinho, equilíbrio e pelo exemplo de esforço, desde sempre.

À minha irmã, pelo exemplo de dedicação e pelo meu pequeno Gabriel.

À vovó Elza, pela doçura e leveza ao conduzir a vida.

À Dêssa, por todo o amor e carinho de sempre, e principalmente pela compreensão em todos os momentos de dificuldade e ausência.

Aos colegas do laboratório, pelo companheirismo, boas ideias, discussões e críticas.

Aos meus orientandos, que permitiram que eu aprendesse junto com eles; em especial à Mislene e ao Fred, pela confiança. Aos colegas do mestrado, pela companhia agradável durante e após as aulas e aos bons professores que já tive e que serviram de inspiração.

Ao meu orientador, professor Antônio Valadão, e aos componentes da banca avaliadora, professores Jairo Drummond Câmara e Renato César Ferreira de Souza, cujas críticas, questionamentos e provocações me ajudaram a avançar.

À Cemig, por meio do P&D GT343, à CAPES, à Fapemig e ao CNPq pelo apoio para realização desta pesquisa e de trabalhos associados a ela.

Por fim, a algumas das grandes pesquisadoras de todos os tempos, cujos nomes foram diversas vezes deliberadamente preteridos de premiações e autorias: Valentina Tereshkova, a primeira mulher a ir ao espaço (1963); Jocelyn Bell Burnell, astrofísica britânica descobridora dos pulsares; Rita Levi-Montalcini, agraciada com o Nobel de Fisiologia ou Medicina (1986); Cecilia Payne-Gaposchkin, astrofísica britânico-americana que foi a primeira a determinar a composição primária das estrelas; Caroline Herschel, astrônoma que contribuiu para o descobrimento do planeta Urano (1781) e tornou-se a primeira mulher a descobrir um cometa (1786); Lise Meitner, co-descobridora do elemento Protactínio e a primeira a elaborar uma explicação para a energia liberada em uma fissão nuclear, mas excluída do Prêmio Nobel de Física (1944); Emmy Noether, autora do teorema que orientou a busca pelo Bóson de Higgs; Maria Mitchell, a primeira americana a se tornar astrônoma profissional. E à grandiosa Marie Curie, a primeira pessoa a ser laureada duas vezes com prêmios Nobel, em duas diferentes áreas do conhecimento: Física (1903) e Química (1911).

EPÍGRAFE

__A criatividade do Design admite limitações?

__O Design depende largamente das limitações.

__Quais limitações?

__A soma de todas as limitações. Aí está uma das únicas ferramentas eficientes para resolver problemas de Design: a habilidade do designer de reconhecer o máximo possível de limitações e a sua disposição e entusiasmo para trabalhar dentro dessas limitações. Restrições de preço, tamanho, resistência, equilíbrio, superfície, tempo, e assim por diante; cada problema tem sua lista peculiar.

__O design obedece leis?

__Limitações já não são o bastante?

***Charles Eames**, em entrevista a Mme. L. Amic na ocasião da exposição “Qu’est ce que le design?” (O que é Design?) no Musée des Arts Décoratifs (Museu de Artes Decorativas), Palais do Louvre.*

RESUMO

Este trabalho desenvolve uma investigação epistemológica das possíveis contribuições do estudo da natureza para o design de novos produtos e tecnologias, através da Biomimética (Biônica). Foram levantados e organizados os conceitos, métodos, abordagens e a terminologia do design Bioinspirado. Buscou-se compreender conceitos iniciais em biologia evolutiva e tecnologia a fim de discutir as semelhanças, diferenças e como evoluem a natureza e a tecnologia. Foram discutidas questões globais pertinentes à transposição de conceitos da natureza para o design bioinspirado, pontuando conceitos principais em biomecânica, tamanho e escala, materiais (biológicos) e geometrias de evolução, através da evolução convergente, dos Panoramas Adaptativos e dos Morfoespaços Teóricos. Por fim, concluiu-se que o estudo da natureza é capaz de contribuir com o Design, desde que sejam observadas as limitações de ambos: biomecânicas e evolucionárias por um lado, e tecnologias em processos e materiais por outro.

Palavras-chave: Biomimética; Biônica; Design; Tecnologia; Evolução Convergente; Biomecânica.

ABSTRACT

This study develops an epistemological investigation of the possible contributions of the analysis of nature to the design of new products and technologies through Biomimetics (Bionics). The concepts, methods, approaches and terminology of bioinspired design were raised and organized. It was also sought to understand initial concepts in evolutionary biology and technology to discuss the similarities and differences and how nature and technology evolve. Global issues concerning the transfer of concepts from nature to bioinspired design were discussed, highlighting key concepts in biomechanics, size and scale, (biological) materials and geometries of evolution, through the theories of Convergent Evolution, Adaptive Landscapes and Theoretical Morphospaces. Finally, it was concluded that the study of nature can indeed contribute to the Design, since both limitations are observed: biomechanical and evolutionary on one hand, technologies and processes and materials on the other.

Keywords: Biomimetics; Bionics; Design; Technology; Convergent Evolution; Biomechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Proposta Metodológica Inicial	22
Figura 2 Proposta Metodológica Adotada nesta Pesquisa (Final)	23
Figura 3 Síntese das duas abordagens da Biomimética (<i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>) descritas pela maioria dos autores na área.	31
Figura 4 Abordagens em Biomimética propostas por Ahmar [2001]	33
Figura 5 Método de projeto bioinspirado seguido por Hu et al [2009]	35
Figura 6 Experimento e protótipos elaborados por Hu et al [2009]	35
Figura 7 Planificações de membranas	36
Figura 8 Soluções incrementais no processo evolutivo	46
Figura 9 Evolução Natural versus Evolução Tecnológica	48
Figura 10 Linha do tempo da Vida na Terra	49
Figura 11 Linha do tempo de invenção e uso da roda na Mesopotâmia	50
Figura 12 Colibri-abelha-cubano, espécie endêmica de Cuba e da Isla de la Juventud, morcego-nariz-de-porco-de-kitti, espécie endêmica da Tailândia e de Mianmar e o sagui-leãozinho, a menor espécie de símio conhecida, endêmico da floresta equatorial amazônica do Brasil, Colômbia e Equador.	55
Figura 13 Comparativo entre altura do salto entre espécies de artrópodes e o homem	55
Figura 14 Relação entre massa e volume em sólidos	57

Figura 15 Similaridade Elástica versus Similaridade Geométrica	58
Figura 16 Proporção entre massa muscular para vôo e massa muscular total em aves.	59
Figura 17 Redução da resistência do ar e arraste na formação em V	59
Figura 18 A mecânica do voo da abelha Bumblebee	62
Figura 19 Regimes de fluxo e formato aero e hidrodinâmico (<i>streamlined</i>)	63
Figura 20 Robôs Bioinspirados projetados pela empresa Festo	64
Figura 21 Evolução convergente de corpos fusiformes hidrodinâmicos (<i>streamlined</i>), otimizados para o nado.....	67
Figura 22 Evolução convergente de nadadeiras em forma de pás, otimizados para nado	68
Figura 23 Traços convergentes observados em morsas e peixes-boi, espécies geneticamente distantes.....	69
Figura 24 Espécie de Mantis (louva-a-deus) natural da Malásia, com três pares de membros	70
Figura 25 Evolução convergente de morfologias de planagem em mamíferos	72
Figura 26 Distribuição Geográfica de Mamíferos Planadores	73
Figura 27 Evolução convergente de morfologias de planagem em anfíbios	74
Figura 28 Evolução convergente de morfologias de planagem em répteis.....	75
Figura 29 Evolução convergente de morfologias de planagem em peixes.....	76
Figura 30 Evolução convergente de morfologias de planagem em artrópodes.....	76

Figura 31 Cladogramas de relações evolutivas entre espécies	78
Figura 32 Panoramas Adaptativos (<i>Adaptive Landscapes</i>)	81
Figura 33 Panoramas Adaptativos e a evolução convergente em espécies aquáticas .	81
Figura 34 Panorama Adaptativo da evolução dos Trilobitas (artrópodes marinhos Paleozóicos)	82
Figura 35 Morfoespaço Teórico elaborado por McGhee [2006] para simular possíveis variações de formas de conchas	83
Figura 36 Panorama Adaptativo (acima) e Morfoespaço Teórico (abaixo)	84
Figura 37 Morfoespaço Teórico de plantas hipotéticas de plantas criado por Ellison e Niklas (1988)	86
Figura 38 Panorama Adaptativo elaborado por Ellison and Niklas (1988) que avalia diversos cenários de incidência de luz em plantas hipotéticas através da variação de propriedades como ângulos e orientação dos galhos.....	87
Figura 39 Morfoespaço Teórico (<i>Theoretical Morphospace</i>) elaborado por Karl J. Niklas relacionando a distribuição das folhas e suas proporções em diversas espécies.	88

LISTA DE TERMOS TÉCNICOS

Alegoria - figura de linguagem que produz uma representação imagética do significado, facilitando a transmissão de ideias e sentidos desejados.

Antropomórfico - Com forma humana; semelhante ao homem (espécie); algo a que se atribui características humanas.

Artrópodes - Filo composto por animais invertebrados, que possuem exoesqueleto rígido e vários pares de apêndices articulados. Abrange os insetos, aracnídeos, crustáceos, quilópodes e diplópodes, sendo o filo com o maior número de representantes existentes.

Biomecânica - Ramo da ciência que estuda as relações, ações e reações físicas e mecânicas das estruturas biológicas ou seres vivos.

Bivalve - Molusco dotado de duas conchas (valvas), como ostras e mexilhões.

Cumulativo - Incremental; que acumula mudanças ou características ao longo do tempo.

Deletério - Combinação inviável ou cujas partes anulam uma à outra.

Desenvolvimental - Referente ao processo de desenvolvimento de um indivíduo desde a sua formação (fruto da reprodução).

Dorsoventral - Indicativo de direção: das costas (dorso) à região do abdômen (ventre/ventral)

Multicelular - Ser vivo composto por múltiplas células.

Epigenética (ou Herança Epigenética) - Variações estruturais, conjuntos de informações ou caracteres dos indivíduos transmitidos por mecanismos contíguos ao código genético.

Fenótipo - Manifestações morfológicas, fisiológicas e comportamentais observadas em um indivíduo. Abrange (porém não se restringe a) expressão das características genéticas de um indivíduo.

Filogenia - estudo da relação evolutiva entre grupos de organismos descoberto por

meio de sequenciamento de dados moleculares e matrizes de dados morfológicos.

Fluido - Caracterização de meio físico que engloba gases e líquidos.

Fóssil - Palavra derivado do termo latino *fossilis* que significa "desenterrado" ou "extraído da terra". Caracteriza restos de seres vivos ou evidências de suas atividades biológicas preservados em diversos materiais (mais comumente no solo).

Framework - termo da língua inglesa que designa “quadro teórico”

Funcionalismo - Corrente de pensamento que atribui a forma de um objeto ou indivíduo às funções que este executa.

Gastrópode - Molusco geralmente dotado de uma concha helicoidal e que utiliza do pé (que compõe grande parte visível do seu corpo) para se locomover, como lesmas e caramujos.

Genótipo - Constituição genética de um indivíduo ou célula.

Hiperespaço - Espaço conceitual teórico capaz de compreender diversas dimensões.

Metabólico - Relativo ao metabolismo (conjunto de processos e fenômenos físicos e químicos intrínsecos a um organismo).

Molusco - Filo de animais invertebrados marinhos, de água doce ou terrestres, geralmente dotados de conchas, que compreende seres vivos como caramujos, mexilhões, ostras, lesmas, polvos e lulas.

Morfológico - Referente à morfologia (à forma evolutiva e desenvolvimental).

Paramétrico - Relativo a um ou mais parâmetros (variáveis ou dimensões que compõem ou ajudam a produzir uma determinada forma ou característica).

Reprodução Sexuada - Tipo de reprodução em que há troca/intercâmbio de material genético

Tautologia - Argumento ou afirmação que se explica por (e se encerra em) si mesmo; dizer a mesma coisa de duas formas diferentes de forma que uma pareça explicar a outra.

Teleologia - Orientado por um objetivo ou finalidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo Geral.....	21
2.2	Objetivos Específicos	21
3	METODOLOGIA	22
4	BIOMIMÉTICA: MÉTODOS, ABORDAGENS E TAXONOMIA.....	25
4.1	Origem, Terminologia e Nomenclatura.....	25
4.1.1.	Conjunções, Subdivisões e Conceitos Adjacentes.....	28
4.2	Abordagens Metodológicas da Biomimética	31
4.3	Conclusão do Capítulo	36
5	NATUREZA E TECNOLOGIA	37
5.1	Evolução Natural, Diversidade e Variabilidade.....	37
5.2	Tecnologia e Evolução Tecnológica: Uma Breve Introdução	40
5.3	Natureza x Tecnologia: Variação, Invenção e Mutação.....	43
5.4	Hibridação	47
5.5	Acumulação e Repertório	50
5.6	Evolução, Progresso e o Mito Da Teleologia	51
5.7	Conclusão do Capítulo	52
6	DIVERGÊNCIA, CONVERGÊNCIA E AS LIMITAÇÕES DO DESIGN BIOINSPIRADO	54
6.1	Biomecânica e o Impacto do Tamanho dos Seres Vivos.....	54
6.2	Convergência	65

6.3	Percursos Evolutivos e a Geometria da Evolução	79
6.3.1.	Panoramas Adaptativos (<i>Adaptive Landscapes</i>).....	79
6.3.2.	Morfoespaços Teóricos (<i>Theoretical Morphospaces</i>).....	83
6.4	Conclusão do Capítulo	89
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
8	CONCLUSÃO	93
9	LIMITAÇÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	94
9.1	Limitações	94
9.2	Contribuições e Trabalhos Futuros	95
APÊNDICE A - Estudo de Caso de Seres Vivos na Interface Ar e Água: insetos da família <i>Gerridae</i>		101

1 INTRODUÇÃO

Compreender e replicar as estruturas biológicas a partir da observação de novos conceitos e paradigmas “projetuais” vindos da natureza, que se somam ao conhecimento tecnológico desenvolvido pelo homem, é, em suma, a principal premissa da Biomimética, que tem sido considerada uma ferramenta profícua para a criatividade e a inovação.

Ao longo da evolução, os organismos vivos se deparam com diversos desafios e pressões seletivas, que selecionam os mais preparados¹, deixando pelo caminho diversos registros fósseis de seres extintos e desenvolvendo um processo conhecido como evolução adaptativa².

Diversos autores afirmam que, de modo geral, os fracassos da natureza, em termos de “Design”, foram transformados em fósseis extintos e que a infinidade de espécies já descobertas e catalogadas representam um legado de “experimentos” da natureza com princípios físicos, químicos e mecânicos. Assim, a natureza continuaria desenvolvendo um amplo arcabouço de soluções eficientes para os mais diversos problemas após bilhões de anos de tentativa e erro. Os frutos dessa trajetória, estimada em mais de 3,5 bilhões de anos de vida na Terra³, chamam a atenção por sua diversidade e beleza e pelo funcionamento integrado da natureza, em que diversos ciclos e sistemas se entrecruzam resultando em perfeito equilíbrio.

As estruturas e os materiais encontrados na natureza também exibem propriedades inspiradoras como sofisticação, miniaturização, hibridismo, resistência e adaptabilidade [Sanchez *et al*, 2005] e muito frequentemente apresentam capacidades surpreendentes, sobretudo sob o ponto de vista tecnológico. Nos materiais biológicos,

¹ Diz-se "mais preparados" em relação ao contexto ecológico, ambiental e/ou geológico.

² Evolução Adaptativa não deve ser confundida com o conceito Lamarckiano de adaptação.

³ A idade total do planeta Terra é estimada em 4,6 bilhões de anos.

por exemplo, encontramos uma variedade de compósitos formados por polímeros e minerais básicos que apresentam propriedades físicas excepcionais, como elevada dureza, flexibilidade, resistência à pressão e à compressão, entre outras. Essas características chamam a atenção sobretudo quando consideramos a gama limitada de elementos de que os seres vivos dispõem (sendo os principais: Carbono, Nitrogênio, Cálcio, Hidrogênio, Oxigênio, Silício e Fósforo) e a forma de processamento dos mesmos, que está restrita à temperatura ambiente e muitas vezes ao meio aquoso. Tais propriedades são, portanto, resultantes das composições e estruturas complexas formadas por estes organismos [MEYERS *et al*, 2008].

A partir de observações como estas, realizadas por diversos pesquisadores, teriam surgido as propostas de Design inspirado pela Biologia, campo tecnológico que tem se tornado cada vez mais popular e recebe diversas nomenclaturas, sendo as mais frequentes: Biônica, Biomimética e Bioinspiração.

Um indício da emergência e crescimento da área é a crescente geração de produtos e tecnologias baseados em micro e macroestruturas, comportamentos e ecossistemas. O *Biomimicry Guild*, instituto norte-americano de consultoria em inovação através da Bioinspiração, criador do método BIM - *Biomimicry Innovation Method* (Método de Inovação por Biomimetismo) - registra que cerca de 90% dos produtos e processos gerados através da Biomimética foram totalmente novos para seus clientes, que incluem grandes instituições como Boeing, General Electric, NASA e Nike [GEBESHUBER, 2011]. Deste instituto também nasceu o *Ask Nature*, um portal online de livre acesso que cataloga e descreve o funcionamento de diversas estruturas biológicas e processos da natureza. Embora os métodos de Biomimética tenham sido difundidos no século XX, diz-se que a natureza já servia de inspiração para cientistas como Leonardo da Vinci desde o Renascimento e para inventores como Joseph Monier, horticultor e paisagista francês que inventou o concreto armado em 1867 a

partir da observação da estrutura das *Opuntia*, um gênero botânico da família dos cactos - Cactaceae [GRUBER, 2011]. Também há relatos de que Gustave Eiffel tenha se inspirado na estrutura do fêmur humano para a construção da Torre Eiffel, construída entre 1887 e 1889 [AYRE, 2006 apud BIGGINS, 2011]. No século XX, o tema foi retomado principalmente a partir do trabalho do biólogo e matemático escocês D'Arcy Thompson, que publicou em 1917 o livro *On Growth and Form*, elaborado a partir de seus estudos matemáticos e geométricos das proporções da natureza. Em *On Growth and Form*, Thompson analisa padrões de crescimento e forma das estruturas biológicas, através dos quais defende que as formas dos organismos não são fruto do acaso e sim o produto de um processo dinâmico de forças que moldam cada um dos estágios do crescimento de suas estruturas que resulta frequentemente em constantes matemáticas.

A observação dos métodos e abordagens propostos para a Biomimética na literatura, no entanto, não deixa claro em qual ou quais etapas do processo projetual o estudo da natureza pode efetivamente contribuir, que tipo de conhecimento demanda esse processo de aplicação ou quais são os limites e considerações pertinentes à aplicação da Biomimética na concepção de novos produtos⁴.

Embora haja uma diversidade de livros e revistas que trazem periodicamente uma sequência de produtos tecnológicos ditos Bioinspirados, é comum que a forma a que se chegou a determinado organismo, processo ou estrutura biológica sejam omitidos. Muitas classificações e metodologias propostas aparentam ter sido geradas a posteriori, de forma conveniente à escrita e argumentação projetuais, deixando de explicitar questões essenciais que concernem à Biomimética, como por exemplo:

- O que a biologia e a tecnologia têm em comum? É possível que

⁴ Entendidos aqui tanto como produtos propriamente, tecnologias, bens de consumo, mecanismos ou outros artefatos tecnológicos.

conhecimentos obtidos na natureza sejam transmitidos para a tecnologia?

- A contribuição da natureza para a atividade projetual está puramente na sua (bio)diversidade? Qualquer ser vivo (não extinto) será capaz de fornecer boas soluções para a Biomimética? Os seres extintos são, necessariamente, fracassos da natureza?

E a principal delas:

- Quais as limitações da Biomimética? Quais restrições conceituais, materiais, físicas, desenvolvimentais (entre outras) permeiam a evolução dos seres vivos? Quais observações devem pautar os projetos bioinspirados?

Face à escassez de quadros conceituais, métodos ou descrições que esclareçam as questões levantadas, este trabalho propôs uma investigação epistemológica da Biomimética, pontuando suas propostas, possibilidades e as maneiras de desenvolvê-la e investigando sua real legitimidade como processo projetual ou método de inspiração.

Também buscou-se compor um quadro teórico-conceitual (*framework*) capaz de fornecer suporte ao processo de Design orientado para a Biomimética.

O primeiro capítulo, Biomimética: Métodos, Abordagens e Taxonomia, trouxe uma revisão dos conceitos, métodos, abordagens e a terminologia do Design Bioinspirado presentes na literatura.

O segundo capítulo, Natureza e Tecnologia, levantou conceitos iniciais em biologia evolutiva e em tecnologia e discutiu as semelhanças, diferenças e como evoluem a natureza e a tecnologia. Este capítulo discutiu evolução e seleção natural como processos inerentes à vida, questionando as atribuições teleológicas tanto para a natureza, quanto para a tecnologia.

O terceiro capítulo, Divergência, Convergência e as Limitações do Design Bioinspirado, discutiu questões globais pertinentes à transposição de conceitos da natureza para o design bioinspirado, pontuando conceitos principais em biomecânica,

tamanho e escala e materiais (biológicos).

Ao final, foram tecidas discussões e considerações finais sobre as questões que motivaram esta pesquisa.

2 OBJETIVOS

De acordo com itens 2.1 e 2.2.

2.1 Objetivo Geral

Contribuir para o estudo da Biomimética no Design através da investigação interdisciplinar que avaliou abordagens, limitações e contribuições do estudo da natureza para o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias.

2.2 Objetivos Específicos

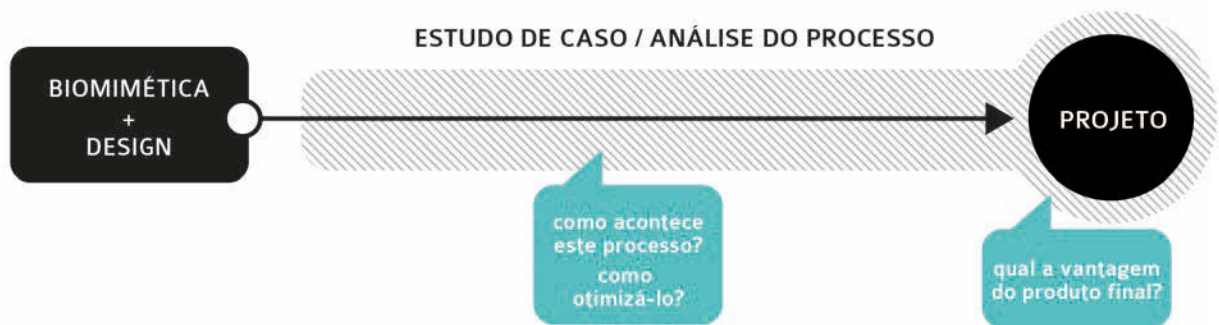
- Levantar o estado da arte dos conceitos, métodos, abordagens e a terminologia do Design Bioinspirado presentes na literatura;
- Investigar as semelhanças e diferenças entre natureza e tecnologia, avaliando as possibilidades de transposição de conhecimentos obtidos na natureza para a tecnologia;
- Analisar o potencial de contribuição tanto dos aspectos divergentes quanto convergentes da evolução biológica para a o design de novos artefatos;
- Compreender questões relativas à seleção natural no que se refere à sobrevivência ou eliminação de espécies, discutindo as afirmações de que seres vivos já eliminados (fósseis) seriam necessariamente "projetos" ruins;
- Levantar e discutir as limitações para a Biomimética, investigando restrições conceituais, materiais, físicas, entre outras, que permeiam os projetos bioinspirados.

3 METODOLOGIA

No princípio, este trabalho buscava investigar a contribuição da Biomimética para os processos de design através de um estudo de caso de projeto Biomimético (Figura 1). O trabalho de pesquisa consistiria no acompanhamento participativo da pesquisa e desenvolvimento de um projeto e nossa pergunta era:

"Como a natureza, através da Biomimética, é capaz de contribuir para o design de novos produtos?"

Figura 1 Proposta Metodológica Inicial



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao longo do percurso, foi observado que a área da Biomimética oferecia mais perguntas que respostas e que a pergunta inicial era ingênua (ou, ao menos, incompleta), tal como o método de investigação proposto.

A literatura evidenciou em diversos trabalhos na área o afã de projetistas que, ao tratar as estruturas biológicas com pouca atenção, desenvolveram trabalhos pouco ou nada significativos e eficientes. Ficou claro que a Biomimética (e, muito antes, a Biologia) apresenta incontáveis peculiaridades e que tratá-la com um olhar puramente funcionalista ou desatento levaria a resultados incompletos.

A organização de um estudo de caso (Apêndice A) também contribuiu para que

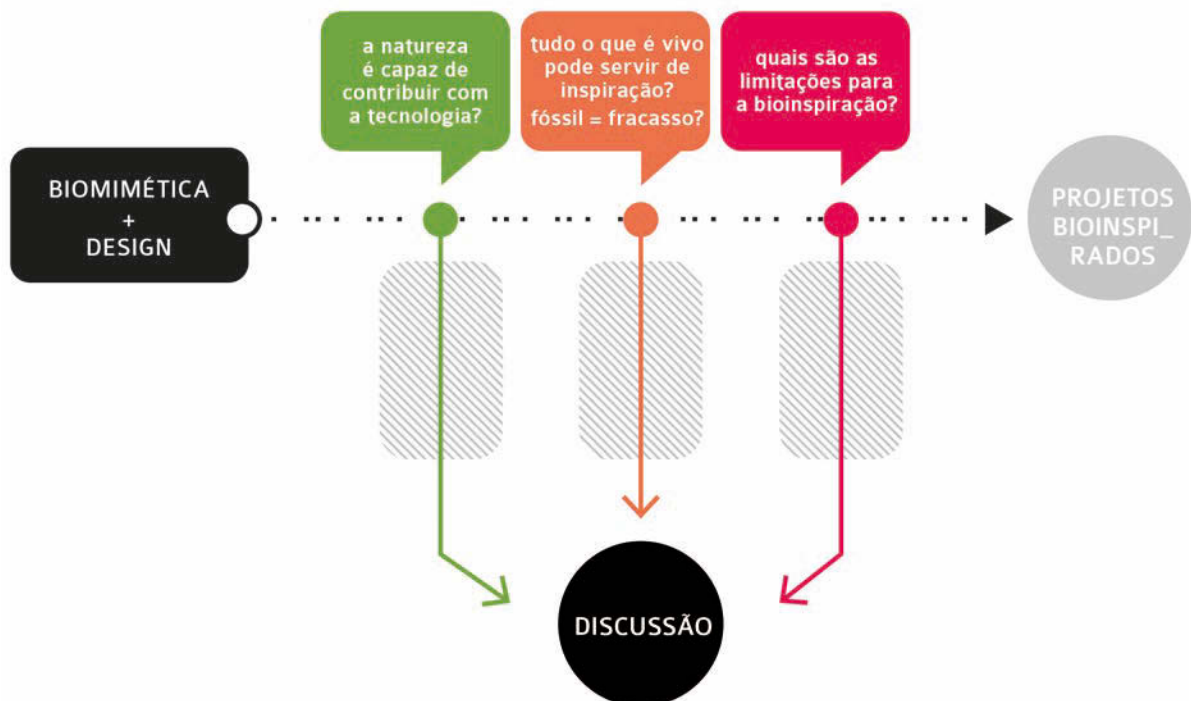
fossem levantadas muitas das questões que povoaram a discussão deste trabalho. Desta forma, as perguntas levantadas foram organizadas em três grandes questões e o curso da pesquisa foi reajustado para tentar respondê-las (Figura 2):

- O que a biologia e a tecnologia têm em comum? É possível que conhecimentos obtidos na natureza sejam transmitidos para a tecnologia?
- A contribuição da natureza para a atividade projetual está puramente na sua (bio)diversidade? Qualquer ser vivo (não extinto) será capaz de fornecer boas soluções para a Biomimética? Os seres extintos são, necessariamente, fracassos da natureza?

E a principal delas:

- Quais as limitações da Biomimética? Quais restrições conceituais, materiais, físicas, desenvolvimentais (entre outras) permeiam a evolução dos seres vivos? Quais observações devem pautar os projetos bioinspirados?

Figura 2 Proposta Metodológica Adotada nesta Pesquisa (Final)



Fonte: Elaborado pela autora.

O método de investigação adotado foi essencialmente epistemológico, consistindo no levantamento, organização e discussão de assuntos diversos nas áreas da Biologia, Tecnologia, Antropologia, Biomecânica e Mecânica de Fluidos. Cada grupo de questões foi investigado e discutido em um capítulo específico.

O trabalho produzido tem a finalidade de contribuir para uma melhor compreensão na área da Biomimética através de discussões que intentam preencher vazios teóricos desta vertente interdisciplinar do Design, situada na interface entre a Biologia e a Atividade Projetual.

4 BIOMIMÉTICA: MÉTODOS, ABORDAGENS E TAXONOMIA

Neste capítulo foi apresentada uma revisão dos métodos, abordagens e aplicações da Biomimética encontradas na literatura, bem como um levantamento das nomenclaturas aplicadas e dos termos adjacentes.

4.1 Origem, Terminologia e Nomenclatura

O termo *Bionics* (Biônica) foi aplicado por Jack Steele, major da Força Aérea americana, em 1960, para se referir à integração entre a biologia e a engenharia, a fim de descobrir como a natureza solucionou problemas, ao longo de milhões de anos de evolução, com o intuito de transmitir esse conhecimento para a produção de artefatos pelo homem [BAR-COHEN, 2011].

Quase uma década depois, o termo *Biomimetics* (Biomimética) foi cunhado por Otto H. Schmitt, em 1969, no título de um artigo e designava uma nova ciência cujo objetivo era estudar e replicar os métodos, projetos e processos da natureza. A concepção da Biomimética por Schmitt foi fruto de sua pesquisa de doutorado, quando, em 1957, o cientista tentava desenvolver um dispositivo físico capaz de imitar o comportamento de um nervo [VINCENT, 2006]. No princípio de sua pesquisa, Schmitt situava seu trabalho como uma área ainda pouco explorada da biofísica. Assim, somente 12 anos depois o termo Biomimética foi de fato publicado.

O termo “Biônica” foi reinterpretado no idioma alemão como *Bionik*, fusão das palavras *Biology* (Biologia) e *Technik* (Tecnologia) [GRUBER 2011a; 2011b], sobretudo através do trabalho do Biólogo e Engenheiro Físico Werner Nachtigall, considerado o fundador da Biônica na Alemanha. Em 1969, Nachtigall se tornou professor e diretor do Instituto de Zoologia da Universidade do Sarre (Alemanha) e,

entre 1990 e 2002, supervisionou o programa de pós-graduação em Biologia Técnica e Biônica e presidiu a Sociedade para a Biologia Técnica e Biônica. Nachtigall considera inadequada a denominação “Biomimese” (que possui as mesmas raízes etimológicas de *Biomimetics* e *Biomimicry*), que significaria em tradução literal “imitação da natureza”. Em entrevista à revista alemã “Tecnologia na Bavária”⁵, o pesquisador caracteriza como ingênua a forma como a Biônica é frequentemente abordada, uma vez que a natureza não pode ser sumariamente copiada. As inúmeras maneiras de solucionar problemas exibidas pela natureza, por outro lado, podem sim ser exploradas pelos pesquisadores para que seja gerado um produto. Este produto resultante da técnica aplicada pelo “biólogo técnico” seria biônico. Assim, Nachtigall estabelece como figura central no desenvolvimento de produtos, mecanismos ou tecnologias o pesquisador-desenvolvedor capaz de olhar para a biologia através do ponto de vista técnico. De acordo com Nachtigall, a Biologia Técnica e a Biônica pertencem uma à outra, são duas facetas que não podem ser separadas.

Ainda que hajam ressalvas como as de Nachtigall, os termos Biomimética e Biônica têm sido utilizados na literatura sem distinção. Em uma abordagem semelhante, encontramos o termo Bioinspiração (*Bioinspiration*), também aplicado quando os fenômenos e aspectos da natureza servem de inspiração para o desenvolvimento de artefatos ou tecnologias pelo homem [BIGGINS *et al*, 2011].

Biomimetismo (*Biomimicry*) foi um termo cunhado por Janine Benyus, autora de seis livros na área e co-fundadora do *Biomimicry Institute*, e propõe uma expansão do conceito clássico de Biomimética e Biônica através da delimitação de três abordagens: natureza como modelo (que se assemelha aos conceitos clássicos de *Biomimetics* e *Bionics*); natureza como medida (que utiliza os padrões naturais como critérios para

⁵ Disponível em: <www.uni-saarland.de/fak8/bi13wn/tv/artikel/interview.htm>. Acesso em 03/06/2014.

julgar a riqueza de uma inovação) e natureza como mentora (que estabelece uma nova maneira de ver e valorizar a natureza pela Biomimética: não mais “o que podemos extrair dela” e sim “o que podemos aprender com ela”) [BENYUS, 2002].

No conceito de Biomorfismo (*Biomorphism*), as formas da natureza servem de inspiração estética e semântica para a criação de produtos, construções e obras de arte. Este é, de acordo com Kuhlmann [2001], um dos mais antigos e fundamentais conceitos estéticos na arte e na arquitetura ocidentais. O Biomorfismo se vale de estudos de proporção e harmonia na natureza e sua aplicação no design, arquitetura e composições visuais diversas. Nestes estudos, destaca-se a identificação de uma aparente unidade indivisível diretamente relacionada à beleza da forma denominada número áureo, uma constante algébrica cujo valor arredondado para três casas é 1,618 [THOMPSON, 2007; DOCZI, 1990].

Uma vertente mais recente da Biomimética que seria classificada por Kulfan e Colozza [2012] como Neo-biônica é o *Morphogenetic Design* (Design Morfogenético), um processo projetual que utiliza recursos computacionais para emular padrões de crescimento e hierarquia na concepção de projetos. Esses padrões são encontrados nos processos de formação estrutural de organismos e no crescimento e diferenciação dos tecidos nos seres vivos. A emergência destes padrões é fruto de um processo de crescimento interativo *bottom-up* (de baixo para cima, hierárquico). Na concepção de Hensel *et al* [2006], trabalhar com esse processo no design torna o resultado melhor a cada etapa, com sua performance e capacidades cada vez mais inter-relacionadas de uma maneira coerente e sinérgica. Em contraste, em um processo de design *top-down* (de cima para baixo) típico, o produto é fruto da mera escolha entre uma ou outra configuração, com um aumento na incerteza da coerência da organização.

4.1.1. Conjunções, Subdivisões e Conceitos Adjacentes

Kulfan e Colozza [2012] organizaram os conceitos adjacentes à Biomimética em *Bionics* (Biônica), *Biomimicry* (Biomimetismo), *Neo-bionics* (Neo-biônica), *Cybernetics* (Cibernética), *Pseudo-bionics* (Pseudo-biônica) e *Non-bionics* (Não-biônica), classificando-os da maneira a seguir:

- **Biônica:** Inspiração visual das formas, projetos e movimentos encontrados na natureza.
- **Biomimetismo:** Inspiração conceitual para a concepção de diversas aplicações a partir da compreensão de processos que ocorrem na natureza.
- **Neo-biônica:** Aplicação da computação para gerar algoritmos e processos de otimização baseados na natureza.
- **Cibernética:** Inspiração obtida a partir de engenharia reversa dos projetos da natureza.
- **Pseudo-biônica:** Soluções projetuais desenvolvidas independentemente da Biomimética, mas que foram confirmadas pela natureza.
- **Não-biônica:** Inspiração obtida independentemente da natureza.
- Petra Gruber [2011a] também organiza os significados de termos que ocorrem em conjunção com a Biônica, sendo eles:
- **Biomorfologia:** A ciência da construção e da organização das coisas vivas e de seus componentes - órgãos, tecidos e células.
- **Morfologia Estrutural:** Refere-se ao design funcional na tecnologia e à anatomia funcional na biologia.
- **Micromorfologia:** Examina e descreve a forma dos objetos microscópicos e representa um achado de formas funcionais.
- **Biomecânica:** É a aplicação das leis físicas da mecânica ao exame dos objetos naturais.
- **Biofísica:** Examina e descreve objetos biológicos com os termos e métodos da física.
- **Biotecnologia:** Explora os objetos biológicos usando métodos técnicos. Recentemente a noção deste conceito modificou-se em direção às tecnologias que fazem uso de organismos com o intuito de gerar produtos bioquímicos, como enzimas, drogas e fármacos. Além de abranger a pesquisa com organismos

geneticamente modificados. O fortalecimento das pesquisas em Biotecnologia, de acordo com Biggins *et al* [2011], tem contribuído de maneira consistente para popularizar a Bioinspiração. De acordo com os autores, esta área contribui para a Biomimética à medida que promove a compreensão do funcionamento dos processos e sistemas na natureza - gerando conceitos que podem ser assimilados e adaptados para uma vasta gama de aplicações. Além do conhecimento gerado que serve de base para a compreensão dos organismos, o avanço da biotecnologia viabiliza tecnologicamente a materialização de conceitos bioinspirados [BIGGINS *et al* 2011].

Os autores destacam também dois termos correlatos à Biomimética (ou Bioimitação ou Bioinspiração - termos sinônimos para os autores) e fortemente ligados à Biotecnologia, sendo eles:

- **Materiais bio-derivados:** São os materiais feitos a partir de organismos vivos.
- **Bio-fabricação:** Qualquer processo que utilize células, vírus, proteínas, biomateriais ou compostos bioativos como componentes para fabricação de modelos biológicos avançados, sistemas médicos terapêuticos e sistemas biológicos para diversas aplicações.

Lin e Meyers [2005] abordam a Biomimética como uma área interdisciplinar e tecnológica entre a Ciência dos Materiais e a Biologia e retomam a classificação proposta por Sarikaya [*apud* LIN; MEYERS, 2005], dividindo a Biomimética em Bioimitação e Bioduplicação - *Biomimicking* e *Bioduplication*, respectivamente. O primeiro termo denomina o entendimento dos sistemas e a aplicação de conceitos através de materiais sintéticos usando a tecnologia atual, enquanto o segundo termo denomina um estágio mais avançado no qual novos métodos como a engenharia genética serão usados para a produção de uma nova classe de novos materiais.

Considerando a possibilidade tecnológica da Bioduplicação (*Bioduplication*), inovações tecnológicas futuras podem ser conjecturadas no processo produtivo de novos produtos. Como exemplo, um carro cuja lataria não é fabricada, mas cultivada, tal como se formam a concha dos moluscos ou ossos humanos no processo de biomineralização (em que um organismo vivo forma aglomerados minerais). Apesar

desta parecer uma realidade distante, já se pode vislumbrar um princípio dessa possibilidade tecnológica na fabricação de materiais como o APHB, [poli (ácido 3-hidroxibutírico)], polímero termoplástico produzido por organismos vivos que se degrada no solo ou no mar a partir da ação de uma enzima - PHB depolimerase - presente em bactérias e fungos [SANCHEZ *et al*, 2005]. Essa possibilidade tecnológica se torna ainda mais próxima se considerado que o fio de seda nada mais é que um filamento contínuo de proteína sintetizado por uma espécie de lagarta que, estima-se, foi domesticada há cerca de 3.000 anos pelos chineses. Esse novo formato de produção de artefatos transcenderia em muito as práticas vigentes na indústria de transformação e integrariam completamente as cadeias de produção com os ciclos naturais, atingindo uma nova fronteira de biocompatibilidade e/ou não interferência, conforme proposto por Manzini e Vezzoli [2005].

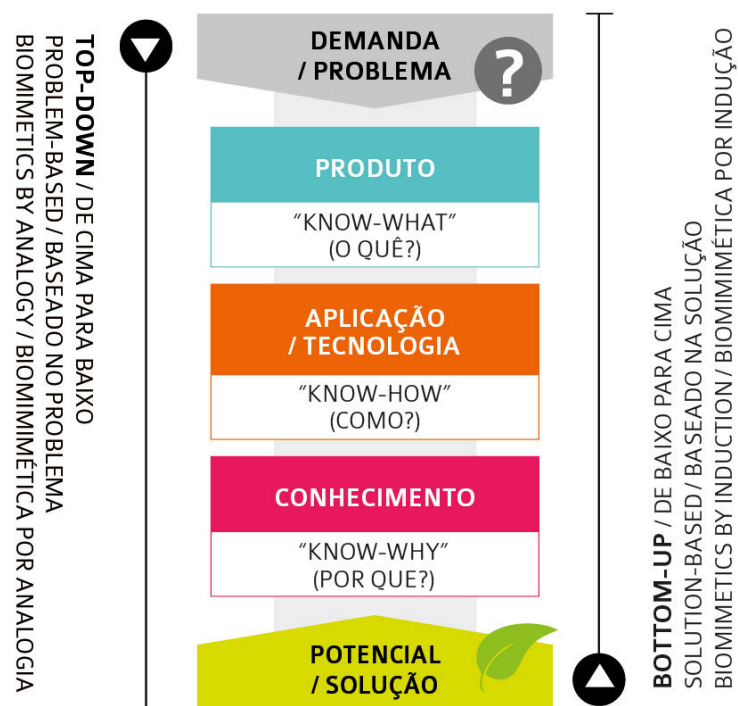
Neste trabalho, o termo Biomimética foi utilizado com o intuito de traduzir de um modo geral os termos *Biomimetics*, *Bionics*, *Bioinspiration* e *Biomimicry*, compreendendo que as evoluções conceituais propostas a partir do termo “*Biomimicry*” não são derivadas somente de uma mudança de pensamento nesta área, mas sim da consonância entre o pensamento contemporâneo nas mais diversas áreas associado às noções de ecologia e sustentabilidade. Cabe, por fim, reforçar que embora as ressalvas pontuadas por Werner Nachtigall em relação à impossibilidade de imitação literal da natureza (que desaconselhariam o uso do termo “Biomimética”) representem uma razão concreta, o termo “Biomimética” foi adotado nesta pesquisa como sinônimo de “Biônica”⁶.

⁶ O termo “Biônica” não havia sido adotado inicialmente nesta pesquisa em função de sua aplicação como sinônimo de prótese ou órtese tecnológica com propriedades superiores às orgânicas, sobretudo em obras de ficção científica das décadas de 80 e 90 e no imaginário popular.

4.2 Abordagens Metodológicas da Biomimética

A aplicação da Biomimética no desenvolvimento de novos produtos e tecnologias é descrita por diversos autores através de duas abordagens metodológicas, ainda que para estas sejam aplicadas diferentes terminologias. O primeiro método parte de um problema tecnológico ou de design, a partir do qual é realizada uma busca por problemas análogos na natureza e das soluções encontradas para solucioná-lo. O segundo método parte do estudo da natureza para então encontrar uma aplicação tecnológica para tais soluções (Figura 3).

Figura 3 Síntese das duas abordagens da Biomimética (*top-down* e *bottom-up*) descritas pela maioria dos autores na área.



Fonte: Elaborado pela autora.

Speck e Harder classificam os métodos, respectivamente, em *top-down* e *bottom-up* [apud GRUBER, 2011a]. Pesquisadores do Centro de Design Biologicamente Inspirado - *Center for Biologically Inspired Design*, no Instituto de Tecnologia da

Georgia, adotam os termos *problem-based* (baseado em problemas) e *solution-based* (baseado em soluções) [GRUBER, 2011a]. Enquanto Gebeshuber e Drack denominam as abordagens como biomimética por analogia e biomimética por indução [apud GEBESHUBER, 2011].

Gebeshuber *et al* [2001] aplicam o BIM, método caracterizado como *problem-based* ou *top-down*, composto por quatro passos: *Identify function* (identificar o problema/problematizar), *Biologize the question* (“biologizar” a questão), *Find nature’s best practices* (encontrar as melhores práticas da natureza) e *Generate Process/Product Ideas* (geração de ideias para o processo/produto).

O trabalho de Parvan *et al* [2011] propõe um método que suportaria as duas abordagens - *top-down* e *bottom-up*, aplicando métodos para orientar a pesquisa e que fosse de uso intuitivo tanto por biólogos quanto por engenheiros. No modelo desenvolvido, engenheiros e biólogos trabalham em paralelo: engenheiros descrevem demandas da engenharia, enquanto biólogos descrevem soluções interessantes encontradas na natureza. Assim, as soluções emergem de pares entre engenharia e biologia que prosseguem através de uma busca por analogias e similaridades para formarem posteriormente princípios de design bioinspirado, como: material e troca de energia; crescimento, desenvolvimento e diferenciação; performance sensorial, excitabilidade e comunicação; continuidade genética e hereditariedade e interação com o ambiente.

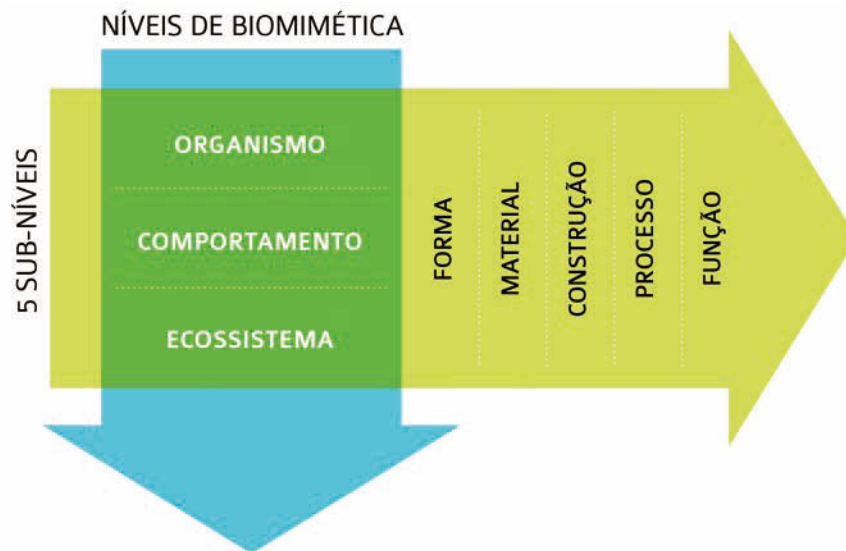
Além do que se refere à abordagem metodológica, alguns autores procuraram avançar na compreensão dos contextos de pesquisa, desenvolvimento e aplicação das soluções, a que vamos tratar por quadro teórico (referente ao termo inglês *framework*).

Ahmar [2011] organiza e classifica a atividade projetual em Biomimética quanto ao nível (*level*) e ao subnível (*sub-level*). O primeiro se refere à escala do qual advém as

soluções de design: das estruturas de um determinado organismo, passando pelo comportamento do mesmo ou atingindo o complexo funcionamento de um ecossistema. O segundo se refere ao âmbito de aplicação da Bioinspiração, partindo da forma à pura função do projeto (Figura 4).

Biggins *et al* [2011] pontuam a necessidade de um quadro teórico para organizar o problema, sintetizando em diferentes eixos as pesquisas que têm sido realizadas na área de Bioinspiração. Em uma abordagem bastante diferente, Werner Nachtigall centra o desenvolvimento Biônico em uma etapa precursora, em que a figura do “biólogo técnico” é central (podendo, inclusive, atuar de forma independente da etapa projetual). De acordo com Nachtigall, o ponto sensível do processo de pesquisa e desenvolvimento está no olhar do biólogo técnico, que deve ser capaz de observar, julgar e selecionar na natureza exemplos que exibem soluções pelas quais a tecnologia ainda está procurando.

Figura 4 Abordagens em Biomimética propostas por Ahmar [2001]



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Ahmar [2011, p.14].

Desta forma, independente do que seria um processo *Top-down* ou *Bottom-up*, a figura do biólogo técnico é indispensável, pois é ele o responsável capacitado a

encontrar na natureza, com o apoio de conhecimentos prévios, as soluções aplicáveis às demandas ou, na segunda abordagem, em encontrar na natureza questões pertinentes aos desafios tecnológicos atuais.

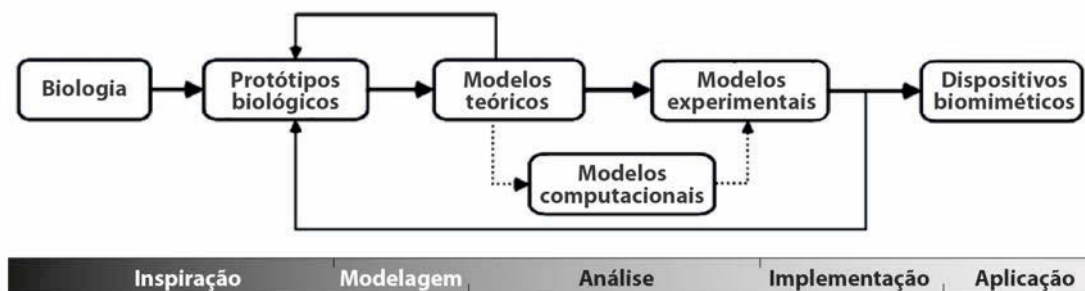
Outro ponto importante, frisado por Nachtigall, destaca a natureza de qualquer outra fonte de conhecimento: tudo o que existe, funciona (ainda que esta afirmação pareça tautológica). Usando o exemplo da fotossíntese, Nachtigall defende que, do ponto de vista de um engenheiro que não soubesse da realização deste processo pelas folhas de plantas, seria praticamente absurdo considerar a possibilidade de transformar luz e gás carbônico em energia.

O estado da arte na área da Biomimética revela que têm sido empreendidos esforços na elaboração de métodos projetuais, geralmente adaptados a partir de métodos tradicionais de Design. Estes são, em sua maior parte, lineares e baseados em etapas discretas e delimitadas. Há que se considerar, no entanto, que estas são tentativas de organizar logicamente um processo contínuo e não-linear, intrinsecamente ligado à criatividade - processo mental individual ainda pouco compreendido, ao qual alguns autores da área de metodologia em design se referem como um “salto ao vazio” [MORALES, 1989] ou “Caixa Preta” (*Black Box*) [HOWARD; CULLEY; DEKONINCK, 2008]. Seguir à risca algum dos métodos propostos na literatura pode garantir que se chegará a um resultado, mas não garante que se chegará a um bom resultado.

A compreensão dos organismos em estudo parece fundamental para a transposição de conceitos e mecanismos para os artefatos tecnológicos. Uma observação descuidada pode levar a resultados pouco expressivos, como no trabalho de Hu *et al* [2009] que exemplifica a questão. O autor e sua equipe procuraram desenvolver uma nadadeira ondulatória baseada na nadadeira dorsal dos peixes *Gymnarchus niloticus* (a

motivação para a escolha desta espécie não é mencionada pelos autores). Após uma série de experimentos e medições executados e através de método fielmente conduzido (Figura 5), os autores obtiveram um resultado pouco relevante do ponto de vista mecânico, o qual tentaram corrigir com novos testes usando diferentes filmes plásticos em substituição à membrana da nadadeira (Figura 6).

Figura 5 Método de projeto bioinspirado seguido por Hu et al [2009]



Fonte: Hu *et al*, 2009. p.634. Traduzido pela autora.

Figura 6 Experimento e protótipos elaborados por Hu et al [2009]

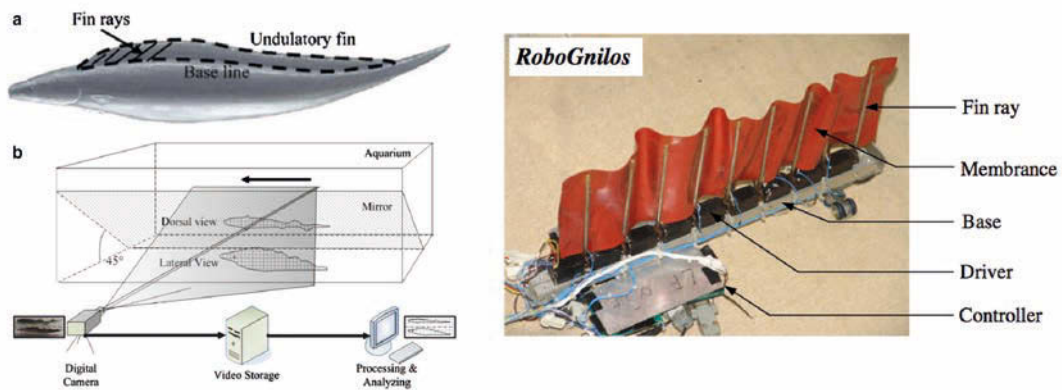
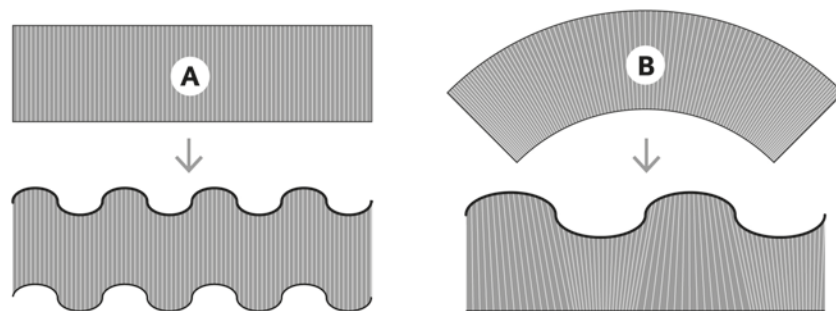


Diagrama de experimento cinemático (à esquerda) e protótipo de robô (à direita). Fonte: Hu *et al*, 2009. p.635-641.

Os autores se ativeram às questões matemáticas e à construção do protótipo e deixaram de notar um detalhe simples, porém crucial para a reprodução do mecanismo: a porção da membrana que se insere no dorso do peixe é mais curta que

a linha superior da mesma (semelhante ao corte que faria uma costureira para construir uma saia rodada) (Figura 7). Essa peculiaridade formal altera o comportamento do material e produz um movimento em cadeia nas ondulações do topo da nadadeira, o que provavelmente propicia também economia de energia pelo animal.

Figura 7 Planificações de membranas



(A) Planificação da membrana plástica usada por Hu *et al* [2009]. (B) Planificação que resultaria em comportamento semelhante ao das nadadeiras do *Gymnarchus niloticus*. Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Conclusão do Capítulo

Deste modo, parece que a riqueza da Biomimética não se encontra necessariamente nos métodos, sendo crucial, por outro lado, que as peculiaridades biológicas sejam compreendidas, conforme pontuado também por Nachtigall. Uma imersão na área parece essencial para que sejam compreendidas as nuances "projetuais" e morfológicas.

Ainda que haja alguma discordância entre os autores em relação às formas de apropriação do conhecimento adquirido na natureza para a concepção de soluções projetuais, parece unânime que a Biomimética é de fato capaz de contribuir para a inovação tecnológica ao exhibir exemplos e provocações profícuos. No capítulo seguinte serão levantados e discutidos aspectos fundamentais do funcionamento da natureza e da tecnologia a fim de investigar a articulação e transposição de conceitos entre elas.

5 NATUREZA E TECNOLOGIA

Neste capítulo foram investigados e comparados os fenômenos e trajetórias da natureza e da tecnologia: como são, como evoluem, o que têm em comum e quais as diferenças entre ambos.

Este capítulo também apresenta conceitos gerais concernentes à evolução dos seres vivos e à Teoria da Evolução, e busca desmitificar a concepção progressista da Evolução e a teleologia, tanto na natureza quanto no processo de desenvolvimento tecnológico.

Por fim, as seguintes perguntas foram discutidas:

- É possível transpor conceitos da biologia para a tecnologia?
- Seriam as espécies extintas resultantes fracassos da natureza?

5.1 Evolução Natural, Diversidade e Variabilidade

A Evolução Natural, como teoria científica, se refere a um processo contínuo e intrínseco à vida orgânica, e que proporciona a incrível diversidade morfológica observada no planeta Terra.

O principal responsável pela difusão do conceito de evolução como processo biológico inerente (e inevitável) aos seres vivos foi Charles Darwin, naturalista britânico do século XIX. Seu livro *A Origem das Espécies* (1859) lançou as bases do pensamento evolucionista moderno. Seu antecessor mais conhecido foi Jean-Baptiste Lamarck, naturalista francês, responsável por uma série de observações corretas a respeito da aquisição de caracteres morfológicos, mas é lembrado, de forma quase unânime, pelo seu principal erro: a Lei de Uso e Desuso, onde características morfológicas apareceriam e desapareceriam de acordo com a necessidade, e que os caracteres físicos

assim adquiridos por uma geração seriam transmitidos (de alguma forma, até então desconhecida) para as gerações seguintes. À primeira vista essa ideia parece intuitiva, e é interessante estar atento ao fato de que a população, de forma geral, pensa assim - o próprio Darwin pensava. “Girafas apresentam pescoços longos para se alimentar das folhas mais tenras, no alto das árvores”, ou “os macacos se tornaram bípedes para se deslocar de forma mais eficiente no solo, no abandono gradual da vida arborícola”. Soa científico.

Mas a verdade é que a evolução biológica é a causa, e não o efeito da diversidade. O pescoço dos ancestrais das girafas não cresceu para que eles pudessem se alimentar de folhas mais altas. Nasciam ancestrais com pescoços de tamanhos variados, e aqueles de pescoço ligeiramente mais longos que a média da população, enfrentavam uma competição menos acirrada por comida; suas chances de sobreviver eram ligeiramente maiores, e sobrevivendo, eles conseguiram transmitir para as gerações posteriores a bagagem genética responsável pelo pescoço mais longo. O melhor tamanho de pescoço foi selecionado pelo ambiente, e não o contrário. Isso é, de forma sintética, a Seleção Natural - conceito elaborado concomitantemente por Charles Darwin e Alfred Russel Wallace. Se pescoços crescessem de acordo com a necessidade de se alimentar em fontes cada vez mais altas, haveria animais pescoçudos em outros ambientes. Mas só nas planícies africanas existiam animais com carga genética apta a gerar (e manter) pescoços maiores. Pescoços maiores exigem outras adaptações, como corações mais potentes, para que o sangue alcance cérebros mais distantes. E a seleção natural, inexorável, continuou selecionando, dentre os pescoços cada vez maiores, os maiores. Naqueles ancestrais também nasciam indivíduos com pescoços abaixo da média, mas estes morriam, porque eles enfrentavam uma competição alimentar ferrenha. Ou talvez, de pontos de vista menos privilegiados, eles não conseguissem avistar um predador a tempo, tornando-se presas fáceis. Seja qual for a pressão seletiva

(alimentação, predação ou ambas), girafas de pescoço curto não vigoraram nestes ambientes.

A Evolução Biológica atua por mecanismos diversos: o genótipo (bagagem genética) define as características que podem ser manifestadas através do fenótipo (conjunto de caracteres físicos, parte herdada, parte adquirida). Gêmeos univitelinos, por exemplo, têm genótipo igual, como clones. Mas as características físicas destes podem variar, mais ou menos, de acordo com os hábitos de vida de cada um, e também de acordo com fatores abióticos (como temperatura média e incidência solar) do local onde habitam. O genótipo também sofre alterações aleatórias, chamadas mutações. As mutações podem acarretar mudanças fenotípicas, mas o DNA possui estratégias para evitar mudanças bruscas muito radicais. São justamente estas mudanças que a pressão ambiental seleciona e que serão (ou não) transmitidas para a próxima geração. As mutações não estão, de forma geral, relacionadas com o ambiente, mas podem ser causadas pontualmente por este, como no caso do câncer de pele, em que mutações no núcleo das células epiteliais podem ser causadas por radiação solar. Alterações e variações no código genético também ocorrem durante a divisão celular, através da Recombinação Genética, quando as informações contidas no conjunto genético podem ser “embaralhadas”, gerando (ou não), novas combinações de códigos, como anagramas.

Os mecanismos epigenéticos também determinam a expressão ou supressão de caracteres (através da atividade dos genes) sem que o código genético seja alterado. Todas as células do corpo de um indivíduo possuem o mesmo código genético, entretanto, cada órgão, sistema, tecido (entre outros) tem características próprias e suas células devem ser capazes de se organizar e funcionar de modo específico, produzindo proteínas e outras substâncias apropriadas e são os mecanismos epigenéticos que ativam ou inativam os genes para que isto aconteça. A inativação de

gens, por exemplo, é importante nas fêmeas de mamíferos: a inativação do segundo cromossomo X é necessária para que os produtos deste gene não sejam produzidos em dobro.

Mas se, sob uma ótica global, a Seleção Natural aumenta a diversidade biológica, localmente ela pode agir de forma oposta: mudanças ambientais drásticas podem selecionar, dentro de uma população variada, um genótipo específico, eliminando de repente todos os outros. Estes eventos são conhecidos como Deriva Genética, e podem levar à extinção de populações isoladas.

A Evolução Tecnológica, por outro lado, não opera de forma independente dos organismos e surge exatamente das atividades intelectuais e práticas e somente a partir delas pode se desenvolver.

5.2 Tecnologia e Evolução Tecnológica: Uma Breve Introdução

Identificar o percurso da evolução tecnológica é relativamente simples, principalmente por sua ligação intrínseca com a evolução humana e com os avanços históricos da humanidade. Entretanto, definir com exatidão o conceito de tecnologia é uma dificuldade compartilhada por diversos autores [BASALLA, 2002; AUNGER, 2010a]. A palavra tecnologia vem do idioma grego e se originou a partir da fusão dos termos "*téchnē*" que pode significar arte, habilidade e artesanato com "*logía*", que significa "o estudo de". Mas a busca pelo significado desse termo resulta em uma diversidade de definições. Mitcham [1994] define a tecnologia como "a construção e o uso de artefatos", enquanto Aunger [2010a] traz uma definição mais ampla, organizando a tecnologia em três categorias:

- **Conhecimento:** técnica (o *know-how* especializado para inventar e construir artefatos);
- **Atividade:** a técnica aplicada na prática para a produção de artefatos e

- **Produto:** artefatos (produtos da atividade).

Uma definição bastante abrangente pode ser encontrada na enciclopédia colaborativa Wikipédia:

Tecnologia é a construção, modificação, uso e conhecimento de ferramentas, máquinas técnicas, artesanatos, sistemas e métodos de organização a fim de solucionar um problema, melhorar uma solução já existente, atingir um objetivo, lidar com uma determinada relação entrada/saída, ou para exercer uma função específica. Também pode se referir ao conjunto de tais ferramentas, maquinário, modificações, arranjos e procedimentos. As tecnologias afetam significativamente a habilidade do homem, bem como de outros animais, de controlar e se adaptar ao seu ambiente natural.

No senso comum é recorrente que se defina a tecnologia como uma aplicação da ciência na prática, mas esta, contudo, surgiu muito antes da ciência e opera independente desta, tendo sido o principal fator a diferenciar os primeiros hominídeos dos nossos ancestrais comuns com os chimpanzés e gorilas, cerca de 4 milhões de anos atrás [AMBROSE, 2001].

Alguns autores defendem que a tecnologia seria um fenômeno exclusivamente humano, não sendo este termo aplicável aos artefatos criados e/ou utilizados por animais em função de sua rudimentariedade, sobretudo quando comparada à produzida pelas culturas humanas. Alguns autores admitem manifestações de tecnologia como a produção de ferramentas por chimpanzés ou artefatos criados com galhos pelos *Neandertal* como apenas indícios da origem da tecnologia [BASALLA, 2002; AUNGER, 2010a]. Outros autores como McGhee [MCGHEE, 2011], por outro lado, combatem a ideia da tecnologia como fenômeno que diferenciaria os humanos (ou, pelo menos, os primatas) do restante da natureza, apresentando uma espécie de pássaro (o corvo-da-nova-caledonia) capaz de produzir ferramentas e outras dez espécies capazes de utilizar como ferramentas artefatos encontrados na natureza. O autor discute também a abordagem conceitual para a classificação de “ferramentas”,

pontuando que algumas construções animais apresentam alta eficiência e, por conseguinte, considerável refinamento “projetual”. Esses e outros comportamentos são tratados por Hansell [2005, 2007] como uma arquitetura animal (*animal architecture*) propriamente. Exemplos citados pelo autor são a construção de ninhos por pássaros, que exhibe cinco diferentes e eficientes técnicas, sendo elas: empilhamento, emaranhamento, fixação-velcro, costura e tecelagem. O molusco marinho *Amphioctopus marginatus*, conhecido como polvo do coco, ganhou este nome popular em função de seu comportamento “arquitetônico”: conchas e cascas de coco dispersas no mar são apropriadas pelos indivíduos desta espécie para a construção de abrigos. Vespas e marimbondos também se mostram exímios construtores, utilizando duas técnicas principais para a construção de suas colônias: adobe e papel.

McGhee acrescenta à discussão exemplos de cupins, que também exibem uma distinta técnica na construção de suas habitações, o que é especialmente notório na espécie australiana *Amitermes meridionalis*. Os indivíduos desta espécie, conhecidos como cupim-bússola, constroem cupinzeiros de seção alongada, cujo eixo maior é sempre orientado na direção norte-sul. Assim, independente da hora do dia, a construção toma sol em apenas um dos lados, o que ocasiona um fluxo constante de ar que vai da face sombreada para a face iluminada pelo sol. Por fim, cabe citar o exemplo bastante conhecido dos castores, que se utilizam de galhos e toras de madeira, pedras e adobe (barro e argila) para a construção de seus alojamentos - com entradas subaquáticas que levam a estruturas flutuantes em forma de domo, bastante eficientes para protegê-los dos predadores [MCGHEE, 2011]. Indo um pouco além da construção de abrigos, o que chama atenção nestes roedores é a criação de represas artificiais através da construção de diques. Essas barragens construídas por castores costumam alcançar 450m de comprimento e, recentemente foi descoberta a maior encontrada até hoje - com 850m, localizada no Parque Nacional Wood Buffalo

(Canadá) e que pode ser vista do espaço. Estima-se que a construção do dique seja resultado do esforço conjunto de várias famílias de castores ao longo de vários meses. Portanto, pode-se refletir não somente sobre a capacidade construtiva individual, mas também sobre esforços construtivos colaborativos em outras espécies além do homem.

Outro ponto de discordância na definição da tecnologia é se ela está necessariamente ligada à criação ou aplicação de artefatos materiais, pois esta definição excluiria fenômenos como o de organização social e política e posições ideológicas, como a ética, do conceito de tecnologia [MITCHAM, 1994; AUNGER, 2010a; 2010b].

Embora cercado de tanta discussão, parece relativamente seguro afirmar que a tecnologia seja um fenômeno bastante pronunciado na espécie humana, podendo ou não se manifestar de maneira rudimentar em outras espécies, e pode ser fruto tanto da necessidade quanto da pura inventividade. Também pode-se descrevê-lo, considerando exclusivamente o gênero *Homo*, como um processo cumulativo - que descreve um progresso evolutivo ascendente ao longo do tempo - em repertório e em manifestações culturais e sociais.

5.3 Natureza x Tecnologia: Variação, Invenção e Mutação

Aplicamos frequentemente um olhar funcionalista para nos referir às estruturas que encontramos na natureza - estudamos e compreendemos as estruturas dos seres vivos a partir das funções que elas exercem, como se tivessem sido projetadas com tal propósito. Essa abordagem é provavelmente fruto da nossa relação intrínseca entre o homem, a tecnologia e seu espaço, o "mundo dos artefatos fabricados", em oposição ao restante da natureza. Assim, dificilmente pensamos na biologia sem pensar em termos antropomórficos [POPPER, 2002]. Da mesma maneira, abordamos as estruturas naturais a partir de sua função, "falamos do objetivo de placas do estegossauro e da função do olho ou a mão. Continuamos a dizer que o tentilhão

[pássaro] tem um forte bico curto e grosso, a fim de quebrar nozes” [RUSE, 2004. p7], revelando uma herança da Lei de Uso e Desuso do pensamento Lamarckiano, o que é denominado por Ruse [2004] de "*function-talk*" (descrição por função). Assim, quando olhamos a natureza, obtemos a imagem de um universo "inventivo ou até criativo, no qual emergem coisas novas em novos níveis" [POPPER, 2010. p.236], mas que é tão somente o resultado de milhares de anos de evolução em que mutações aleatórias e pressões seletivas geraram estruturas que parecem ter sido intencionalmente projetadas. Perutz [2003] ressalta os diferentes trajetos percorridos pelos artefatos e produtos, frutos da intencionalidade exercida através de um projeto prévio e dos seres vivos: “os artefatos criados pelo homem são deliberadamente projetados, enquanto as estruturas da natureza evoluíram a esmo, ao longo de milhões de anos através da recombinação de genes, da mutação e da seleção natural de características, o que resultou em descendentes mais bem preparados” [PERUTZ, 2003. p. 229].

A evolução biológica não tem, portanto, compromisso com a função ou utilidade das estruturas geradas. É justamente o ambiente que cria as restrições que colocarão o funcionamento destas à prova, permitindo aos seres mais adaptados ao meio gerar mais descendentes e se perpetuar.

É necessário pontuar, no entanto, que a evolução biológica se opera de modo lento e gradual. Não existem saltos abruptos na evolução - as mutações muito radicais em geral não são toleradas pelo ambiente ou pela própria espécie (corre-se o risco, por exemplo, de que esse novo indivíduo seja incapaz de gerar descendentes férteis com outros membros de seu grupo). Ao longo do processo de seleção natural, perpetuam-se as melhores soluções dentro de uma determinada linha; as mudanças são sempre pequenas e incrementais.

Marcus [2008] utiliza a alegoria de uma cadeia de montanhas (Figura 8) para

representar diferentes soluções incrementais da natureza que culminaram na criação de estruturas eventualmente análogas (com função semelhante), mas que se originaram e evoluíram independentemente umas das outras. Após sucessivas mutações submetidas à seleção natural, cada classe de solução rumaria independentemente em direção ao cume de uma montanha (que representa a máxima eficiência possível atingida através de um processo cumulativo operado pela seleção natural). Deste modo é simples compreender que seria inviável passar de uma montanha a outra: para fazer isso, o indivíduo teria de andar na contramão da evolução – regredindo em uma solução já desenvolvida e selecionada a partir da seleção natural para que a espécie encontrasse uma solução diferente que a permitisse evoluir em direção ao topo de outra montanha.

Não se pode afirmar que as soluções existentes são necessariamente as melhores possíveis do ponto de vista conceitual ou mecânico; tem-se que considerar a aptidão genética das espécies e indivíduos para o desenvolvimento de uma ou outra estrutura. Conforme exemplificado pelo autor, a coluna vertebral dos seres humanos está longe de ser a solução ideal para nos manter de pé, entretanto, nossa espécie manteve essa solução ao longo da evolução: não por ela ser a melhor dentro de todas as possibilidades mecânicas e sim por termos evoluído a partir de quadrúpedes que a possuíam. Nestas condições, andar de pé, mesmo que com sacrifício para a coluna, era melhor que não fazê-lo.

Essas e outras soluções encontradas na natureza (como o cérebro humano) são definidas por Marcus como *Kluge*, termo utilizado por engenheiros para designar uma desajeitada ou inelegante, mas surpreendentemente efetiva solução para um problema - o que em português denominaríamos “gambiarra”. Os *kluges* seriam soluções criadas por engenheiros com o principal propósito de economizar tempo ou dinheiro. O processo evolutivo, contudo, não sendo fruto de pensamento racional não leva em

conta tempo ou o dinheiro – e ainda sim observamos uma série de *kluges* nas construções da natureza. Outro exemplo de gambiarra biológica é a anatomia do olho humano: a retina fica no fundo do globo ocular, sendo afetada por tudo o que passa entre ela a córnea; inclusive por um conjunto de nervos ópticos, que dão aos olhos humanos alguns pontos cegos. De acordo com Marcus [2008], a explicação é simples: a natureza é propensa a fazer gambiarras porque ela não “se importa” se seus produtos são perfeitos ou elegantes. Se algo funciona, se perpetua; se não funciona, desaparece. Genes que produzem soluções de sucesso tendem a se propagar, genes que resultam em criaturas inaptas tendem a ir desaparecendo, todo o resto é metáfora. Adequação, não beleza, é o nome do jogo.

Figura 8 Soluções incrementais no processo evolutivo



Fonte: Elaborado pela autora para representar a alegoria da cadeia de montanhas proposta por Marcus [2008].

Este conceito é semelhante ao de *Adaptive Landscape*⁷ (Panoramas Adaptativos),

⁷ Este conceito será detalhado no Capítulo 3.

abordado por McGhee em *The Geometry of Evolution* (A Geometria da Evolução) e proposto originalmente por Sewall Wright. Ao modelar o mesmo cenário, McGhee [2006] classifica o salto de um topo ao outro como “menos provável” - e não “impossível”, descrevendo que seria mais provável que indivíduos saltem (morfologicamente falando) entre picos de pequenas montanhas do que entre picos de grandes e altas montanhas. McGhee pontua que esses grandes saltos acarretariam mudanças morfológicas radicais, o que provavelmente criaria combinações deletérias.

O processo evolutivo é cumulativo, perpetuando e aprimorando soluções para os mais variados desafios simultaneamente. A diversidade biológica que observamos hoje é o resultado de um processo que percorreu estimados 3,5 bilhões de anos.

5.4 Hibridação

Se por um lado a natureza possui uma enorme diversidade de espécies, mais ou menos complexas e com as mais variadas soluções funcionais testadas ao longo de um processo contínuo de erro e tentativa, através da pressão seletiva, os resultados desse processo resultam em espécies raramente capazes de se reproduzir umas com as outras - resultado de um longo processo de especiação. A hibridação - cruzamento entre indivíduos de espécies diferentes - pouco frequentemente gera uma prole e, menos frequentemente ainda, resulta em indivíduos férteis.

No campo tecnológico, entretanto, a combinação de artefatos e técnicas diferentes com frequência resulta em novas e férteis tecnologias - capazes de gerar outras. A Figura 9 foi criada pelo antropólogo Alfred L. Kroeber para comparar a evolução biológica com o desenvolvimento cultural humano e foi aplicada por George Basalla [2002] para comparar a evolução natural com a evolução tecnológica.

Figura 9 Evolução Natural versus Evolução Tecnológica

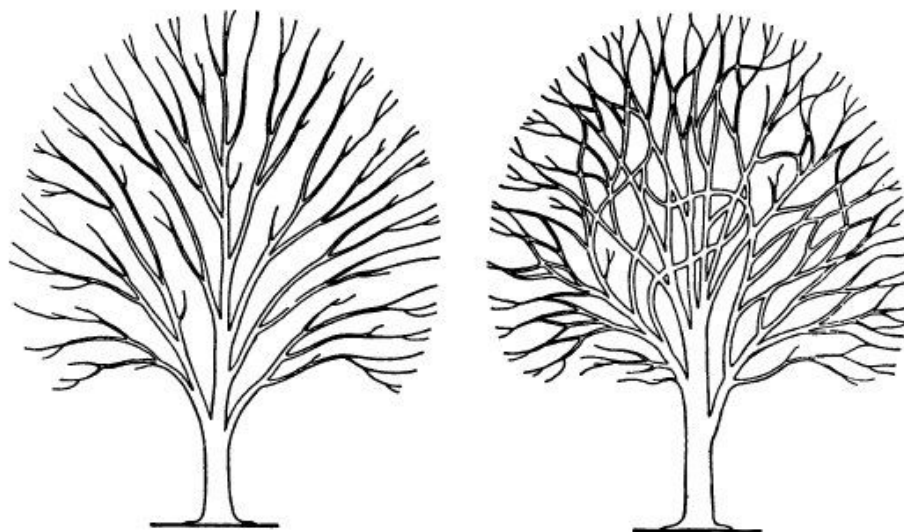


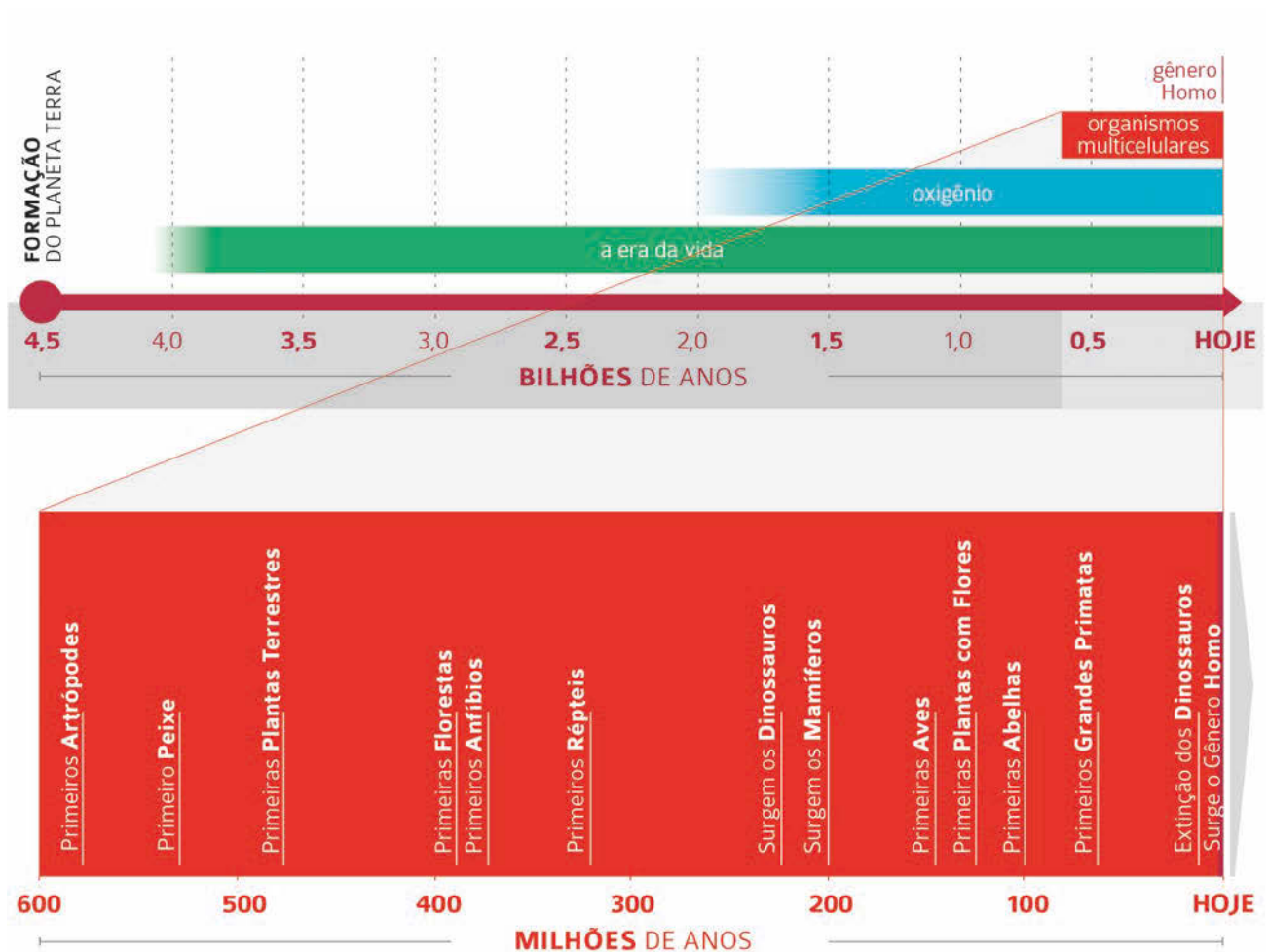
Ilustração criada pelo antropólogo Alfred L. Kroeber para comparar a evolução biológica (à esquerda) com o desenvolvimento cultural humano (à direita) e posteriormente aplicada por George Basalla para comparar a evolução natural com a evolução tecnológica. Fonte: Basalla [2012. p. 138].

Em função da capacidade de hibridação, o fenômeno tecnológico tem percorrido uma trajetória hiperbólica ascendente, desde o período Paleolítico, cerca de 2,5 milhões de anos atrás, tendo expressividade ligeiramente maior a partir da evolução do *Homo sapiens*, há cerca de 50 mil anos. O desenvolvimento tecnológico intensificou-se na Idade Moderna, sobretudo a partir da primeira Revolução Industrial, e na Idade Contemporânea, com a segunda e a terceira Revoluções Industriais (essa última também chamada de Revolução Digital). Entretanto, toda a trajetória do ser humano moderno representa cerca de 0,03% (200.000 anos) do percurso da vida multicelular na Terra e, se considerarmos apenas a presença do *Homo sapiens*, esse percentual cai para 0,0008%.

Ainda que a pluralidade tecnológica tenha atingido um índice espantosamente alto, ela é fruto de uma presença relativamente curta do homem na terra e está restrita a um método projetual (tecnológico) que opera através da criatividade humana. A natureza, por outro lado, gerou ao longo de quase 4 bilhões de anos uma quantidade

aproximada de 8,7 milhões de espécies a partir de simples organismos unicelulares, as primeiras formas de vida existentes (Figura 10). Neste percurso, um número muito maior de espécies foi colocado à prova por diversos fatores, resultando em registros fósseis de seres já extintos e em nossa fauna terrestre atual.

Figura 10 Linha do tempo da Vida na Terra



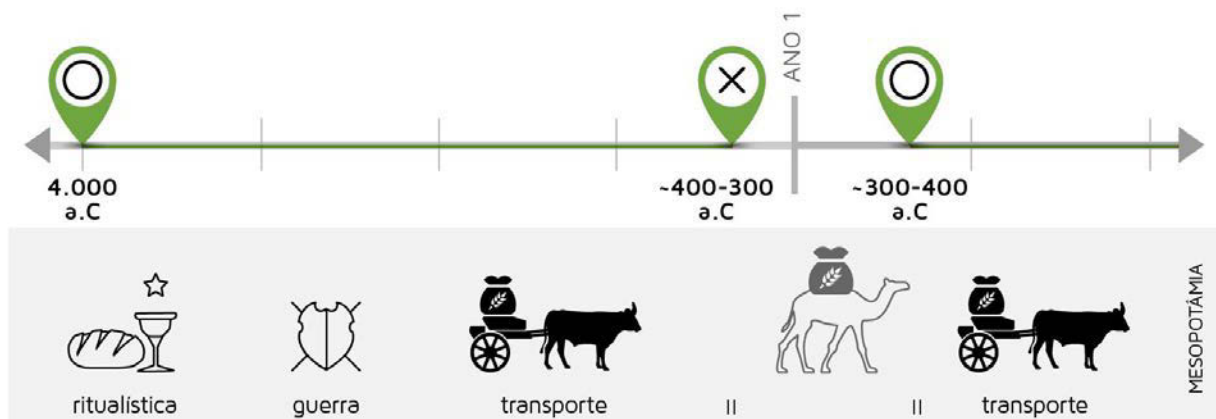
Acima: linha do tempo do planeta Terra; a vida surgiu há mais de 4 bilhões de anos, enquanto os homens anatomicamente modernos surgiram há cerca de 200 mil anos. Abaixo: linha do tempo desde o surgimento dos organismos multicelulares até os dias de hoje: a presença do gênero *Homo* se deu em apenas 0,03% deste percurso. Fonte: Elaborado pela autora.

5.5 Acumulação e Repertório

Durante o processo evolutivo é possível que as espécies percam uma ou outra característica que carregavam em seu código genético. A partir deste ponto, somente perpetuarão as características que permaneceram em seu genótipo. Desta forma, mesmo tendo evoluído a partir de homínídeos do gênero *Australopithecus*, seria impossível que nossa espécie gerasse, hoje, um exemplar desse gênero, pois diversas características se perderam durante o percurso evolutivo do gênero *Homo* até o *Homo sapiens* e outras surgiram. Assim, as características genéticas são indissociáveis dos indivíduos e grupos e somente através deles podem se perpetuar.

Em contraponto, a perpetuação das tecnologias pode se dar através de formas como a linguagem oral e escrita, a cultura e o comportamento dos indivíduos, podendo ser aprendidas ou resgatadas quando se faz necessário.

Figura 11 Linha do tempo de invenção e uso da roda na Mesopotâmia



Fonte: Elaborado pela autora.

A roda, por exemplo, tida pela cultura ocidental como uma das principais e mais importantes invenções do homem e um dos principais indicadores de progresso tecnológico na concepção das civilizações ocidentais passou por ciclos de uso e desuso (Figura 11). Indícios arqueológicos apontam para a invenção da roda por volta do

quarto milênio A.C. na Mesopotâmia, região localizada entre os rios Tigre e Eufrates, e em pouco tempo a tecnologia se difundiu até o noroeste da Europa. Levantamentos arqueológicos apontam que em um primeiro momento, os veículos com rodas foram utilizados com fins ritualísticos e, posteriormente, em guerras, para só então adquirir a função de transporte de suprimentos. Entre o terceiro e o sétimo séculos A.C., no entanto, as civilizações do norte, oriente médio e oriente da África substituíram o transporte através de veículos com rodas por camelos, considerados mais eficientes que carroças e charretes no transporte de carga. Esses animais eram capazes de carregar mais peso, se locomover mais depressa e ir até mais longe com uma quantidade menor de água e comida se comparados aos animais tradicionalmente utilizados, como os bois e, em relação aos veículos de carga com rodas, não demandavam a construção de estradas ou pontes. O uso dos camelos perdurou por cerca de mil anos até que a roda voltou a ser utilizada [BASALLA, 2002].

5.6 Evolução, Progresso e o Mito Da Teleologia

De acordo com a corrente funcionalista da antropologia (abordagem adotada no senso comum), a tecnologia, assim como traços culturais e comportamentais, teria a função de responder a uma necessidade básica do ser humano, argumentos que são combatidos por Basalla [2002], que argumenta que até mesmo invenções como a roda e os veículos automotores não foram criadas para satisfazer à necessidade básica de transporte, ganhando esta função apenas alguns séculos depois. Do mesmo modo, a agricultura e a arquitetura não resultaram das necessidades biológicas de nutrição e abrigo, mas encontraram sentido posteriormente à sua invenção. A invenção do fonógrafo, por Thomas Edison em 1877, é outro exemplo notável. Ao divulgar sua invenção, Edison escreveu um artigo propondo dez usos para o fonógrafo, que incluíam: preservar as últimas palavras de pessoas que estavam próximas de morrer, gravar livros em áudio para cegos e ensinar como soletrar. A reprodução musical

figurava apenas em quarto lugar da lista de prioridades do inventor; registra-se também que anos depois Edison teria dito ao seu assistente que a invenção não tinha valor comercial [DIAMOND, 1998].

O curso das invenções e descobertas tecnológicas não é, portanto, necessariamente teleológico - orientado por finalidades. De modo semelhante, aplica-se com frequência o termo “tentativa e erro” para se referir às evoluções adaptativas surgidas na natureza. Além de autores da área de Biomimética como Bar-Cohen [2005; 2012], esta interpretação da evolução das espécies também foi aplicada pelo filósofo Karl Popper no livro *Objective Knowledge* (1972), na ocasião em que se retratava após haver atacado a teoria Darwinista. No entanto, “tentativa e erro” denota intencionalidade e, portanto, a presença de uma entidade racional (explicitada pela presença de um objetivo) representada pela natureza. Se aplicável, a forma mais aproximada do correto sob o ponto de vista da teoria Darwinista seria a de “erro e tentativa”, entendendo “erro” como algo que escapa a um padrão⁸ e “tentativa” como a verificação prática de uma matriz finita de possibilidades: sobreviver ou não, perpetuar seu genoma ou não.

5.7 Conclusão do Capítulo

As mutações, a variabilidade genética (provida pela reprodução sexuada) e os fenômenos epigenéticos deram origem a uma incrível diversidade de espécies - vivas ou já extintas. Cada pequena alteração orgânica, mesmo que a nível molecular, é capaz de alterar significativamente o desempenho individual de cada ser vivo, dando-lhe ligeira vantagem (ou desvantagem) e permitindo (ou não) que este enfrente os desafios ambientais propostos até que seja capaz de se reproduzir⁹. Esse fenômeno, embora pareça pouco relevante a curto prazo, é capaz de propiciar cumulativamente

⁸ Neste caso, o “padrão” morfológico, mental ou gênico de um indivíduo.

⁹ Este é resumidamente o conceito de sobrevivência evolucionária.

grandes e sensíveis mudanças no panorama das espécies.

É crucial, no entanto, analisar outro componente deste cenário: além de seres vivos em constante mudança, as mudanças geológicas, ambientais e ecológicas deram origem a constantes e mutáveis desafios ambientais. Quando se trata de “sobrevivência dos mais aptos”, portanto, a aptidão deve ser avaliada em função do contexto ambiental, ecológico e geológico em questão.

Diversos seres já extintos poderiam encontrar algum sucesso nos dias de hoje, tal como espécies invasoras encontram lugar em outros habitats que não o seu natural. O processo de evolução biológica, portanto, não deve ter tomado caminho em direção ao progresso¹⁰. O caráter cumulativo do processo evolutivo é capaz de gerar estruturas mais complexas, mas no que se refere ao preparo em relação às pressões seletivas, a simples existência de bactérias e algas nos dias atuais evidencia a não relação entre complexidade e aptidão.

Seres já extintos, portanto, podem exibir sistemas e soluções consistentes para problemas projetuais, pois em algum momento geológico foram capazes de existir.

Finalmente, pode-se levantar a última questão: além dos fatores bióticos, quais variáveis e limitações permeiam os projetos da natureza?

¹⁰ Ao menos as evidências científicas não apoiam esta afirmação.

6 DIVERGÊNCIA, CONVERGÊNCIA E AS LIMITAÇÕES DO DESIGN BIOINSPIRADO

Neste capítulo foram investigadas as seguintes questões:

- Quais as limitações da Biomimética?
- Quais restrições conceituais, materiais, físicas, desenvolvimentais (entre outras) permeiam a evolução dos seres vivos?
- Quais observações devem pautar os projetos bioinspirados?

6.1 Biomecânica e o Impacto do Tamanho dos Seres Vivos

O tamanho das estruturas da natureza causa um impacto direto na performance e em suas características, mas afeta principal e intrinsecamente a sua viabilidade mecânica.

A perda de calor pelos animais é proporcional à área da sua superfície e sua produção de calor é proporcional a sua massa total. Devido ao seu alto requerimento metabólico, pequenos beija-flores, morcegos e mamíferos tem que comer uma enorme quantidade de comida (o que equivaleria a um ser humano médio comer uma geladeira inteira cheia de comida). Em função da alta taxa de perda de temperatura, não existem pequenos mamíferos no mar - sobretudo nas águas frias dos oceanos. A Figura 12 mostra pequenos representantes de aves e mamíferos que são exceções entre os outros indivíduos de suas classes. Pode-se observar que todos eles são endêmicos de regiões equatoriais e tropicais do planeta.

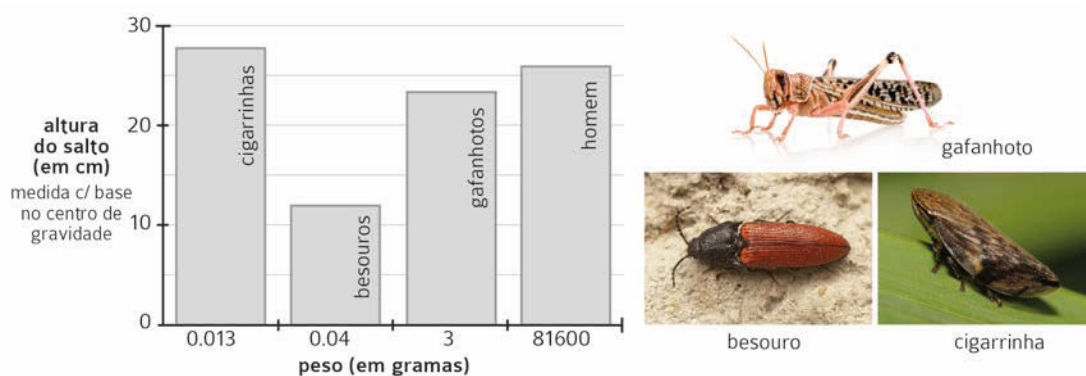
Figura 12 Colibri-abelha-cubano, espécie endêmica de Cuba e da Isla de la Juventud, morcego-nariz-de-porco-de-kitti, espécie endêmica da Tailândia e de Mianmar e o sagui-leãozinho, a menor espécie de símio conhecida, endêmico da floresta equatorial amazônica do Brasil, Colômbia e Equador.



(A) Colibri-abelha-cubano (*Mellisuga helenae*). Disponível em: <kinooze.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Morcego-nariz-de-porco-de-kitti (*Craseonycteris thonglongyai*). Disponível em: <ambientalistasemrede.files.wordpress.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (C) Sagui-leãozinho (*Cebuella pygmaea*). Disponível em <wbwhy.tumblr.com>. Acesso em 22 de setembro de 2014.

Discute-se frequentemente a capacidade extraordinária das pulgas em pularem 100 ou 200 vezes seu próprio tamanho. Sendo a massa desse animal praticamente desprezível, não se pode compará-lo a outras espécies. Já o salto médio de homens, grilos, gafanhotos e besouros pode ser comparado e relacionado ao peso de cada um (Figura 13), de modo que homens, grilos e gafanhotos equiparam-se em capacidade de impulso, de acordo com as análises de Kulfan e Colozza [2012].

Figura 13 Comparativo entre altura do salto entre espécies de artrópodes e o homem



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza [2012, p.587].

Mais do que apenas influenciar na capacidade e performance em relação às atividades de cada indivíduo, o tamanho das estruturas na natureza está intrinsecamente ligado

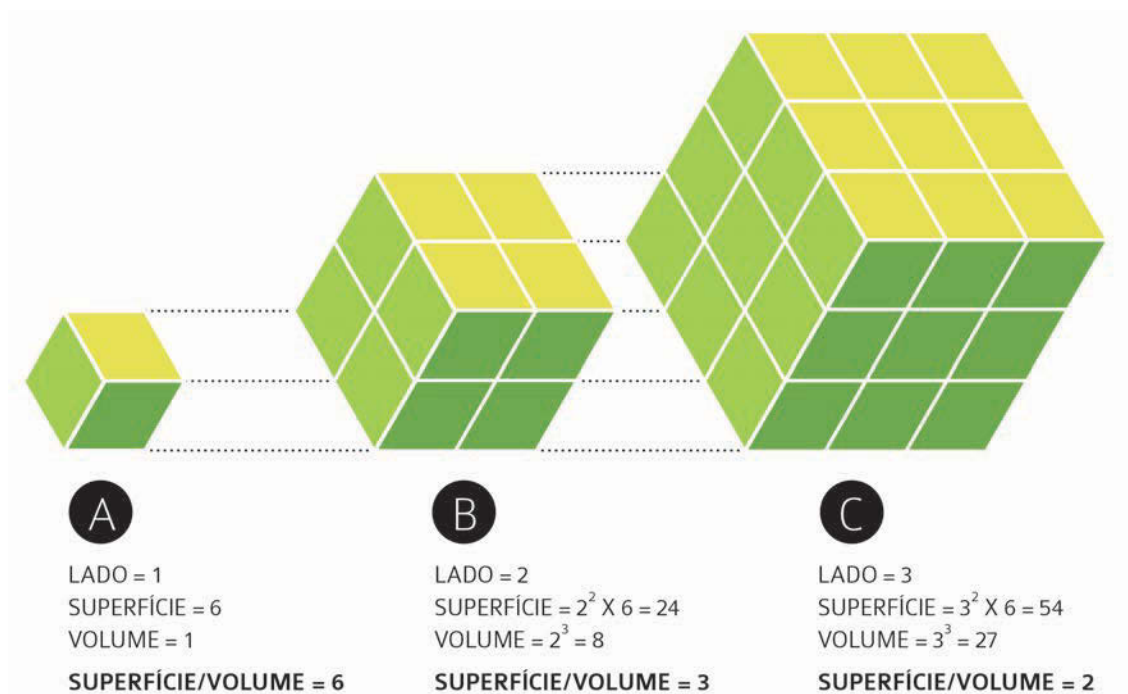
a sua viabilidade. Baleias, por exemplo, são várias vezes maiores que qualquer mamífero terrestre porque não precisam suportar seu próprio peso, sendo mantidas com o auxílio do empuxo da água. Conforme mostrado por Kulfan e Colozza [2012] (Figura 13), os exemplos encontrados na natureza demonstram que os padrões de proporção nos seres vivos são pautados pela similaridade elástica, e não pela similaridade geométrica. A questão já havia sido descrita por Galileo no século XVII:

Você pode ver claramente a impossibilidade de aumentar o tamanho de estruturas a grandes dimensões, quer na arte ou na natureza. Do mesmo modo é impossível construir navios, palácios, ou templos de enorme tamanho, de tal forma que os seus remos, pátios, vigas, parafusos e todas as suas outras partes se mantenham na mesma proporção; nem pode a natureza produzir árvores de tamanho extraordinário porque os ramos quebrariam sob seu próprio peso. Assim também seria impossível reconstruir as estruturas ósseas de homens, cavalos ou de outros animais de modo a desempenhar as suas funções normais se estes animais forem aumentados enormemente em altura. Esse aumento em altura poderia ser realizado apenas através do emprego de um material mais duro e mais forte do que o material real, ou pelo alargamento do tamanho dos ossos, alterando assim a sua forma até que a forma e aparência dos animais sugiram uma aberração... se o tamanho do corpo é diminuído, a força do corpo não diminui na mesma proporção; na verdade quanto menor for o corpo maior é a sua resistência relativa. Assim, um pequeno cachorro provavelmente poderia levar em suas costas dois ou três cães de seu próprio tamanho, mas eu acredito que um cavalo não poderia levar nem mesmo um do seu próprio tamanho [Timoshenko, 1983 p.13-14].

Retomando as observações de Galileo, o famoso geneticista J.B.S. Haldan, em 1926, publicou o ensaio *On Being the Right Size* (Sobre ser do tamanho certo), em que o autor pontua que cada animal possui o tamanho conveniente, tendo em vista as questões físicas e biomecânicas – uma grande mudança no tamanho do animal acarretaria também uma mudança de forma: uma lebre não poderia ser tão grande quanto um hipopótamo, assim como uma baleia não poderia ser do tamanho de um peixe. Perutz [2003] ilustra a questão com o exemplo do livro *As Viagens de Gulliver*, em que um ser humano médio encontraria pequenas criaturas com a exata proporção

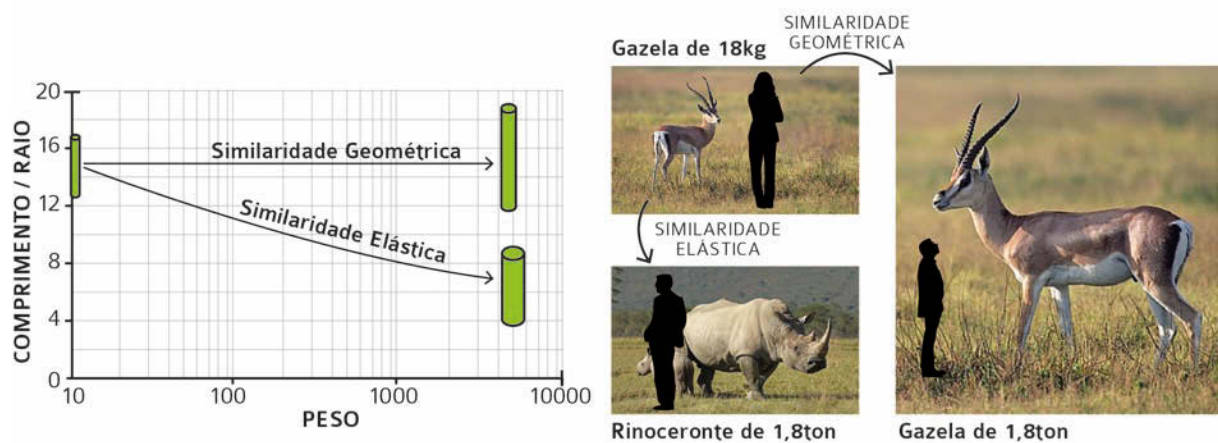
dos seres humanos e, a seguir, gigantes, também com as mesmas proporções – ambos inviáveis nas condições normais do nosso planeta. Os gigantes de Brobdignag, que mediam 30 metros de altura, pesariam 280 toneladas, 4.600 vezes mais que Gulliver, mas uma vez que seus ossos seriam apenas 300 vezes mais grossos, eles teriam desmoronado sob seu próprio peso. Os Lilliputianos, por outro lado, mediam apenas 15 centímetros. Nas condições físicas da Terra, eles se beneficiariam de ser capazes de cair de alturas grandes sem se machucarem, porque o arraste reduziria a velocidade de sua queda mais do que em um homem de tamanho normal – uma proporção ainda maior entre área de superfície em razão do peso permite que ratos caiam em buracos de minas e corram prontamente, intactos. Por outro lado, sua demanda energética seria tal como a de um pequeno roedor e estes passariam boa parte de seu tempo se alimentando para serem capazes de manter sua temperatura corporal (Figura 14).

Figura 14 Relação entre massa e volume em sólidos



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Kardong [2012 p.132].

Figura 15 Similaridade Elástica versus Similaridade Geométrica

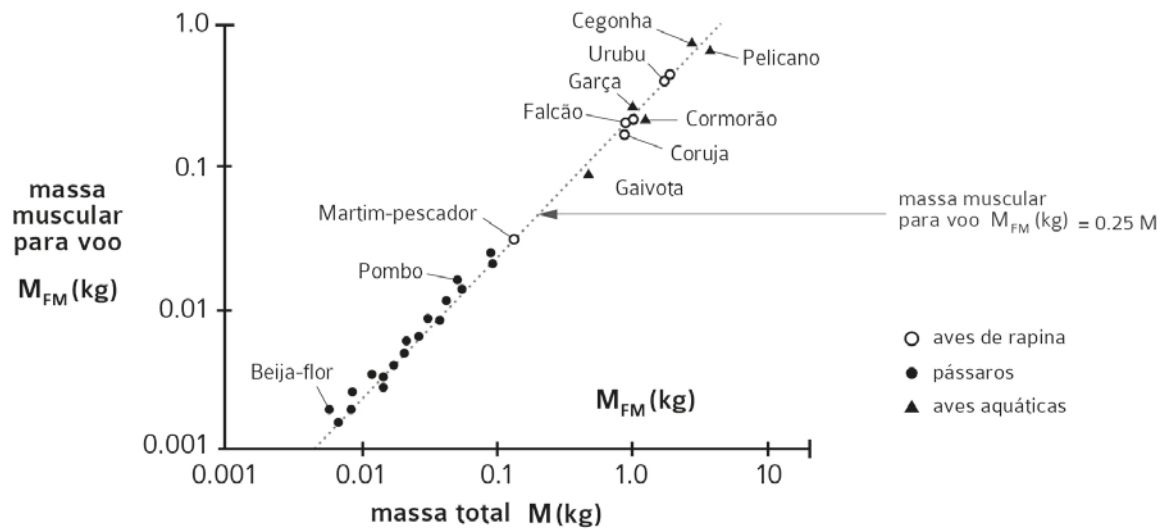


Fonte: Elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza [2012. p.594].

As questões pontuadas se devem a um importante fundamento que permeia os "projetos" da natureza, o de similaridade elástica. Esse conceito, elaborado por McMahon em 1973, determina que animais de diferentes tamanhos devem ser "elasticamente semelhantes", ao invés de geometricamente semelhantes (Figura 15). Assim, assume-se que a natureza otimiza seus designs quando se trata da escala dos mesmos e que animais, independente do seu tamanho, têm uma probabilidade similar de falha elástica nas estruturas que os suportam. Ou seja: à medida que aumenta o tamanho dos seres vivos, as relações de proporção corporais se modificam para que a sua estrutura se torne fisicamente viável [PERUTZ, 2003].

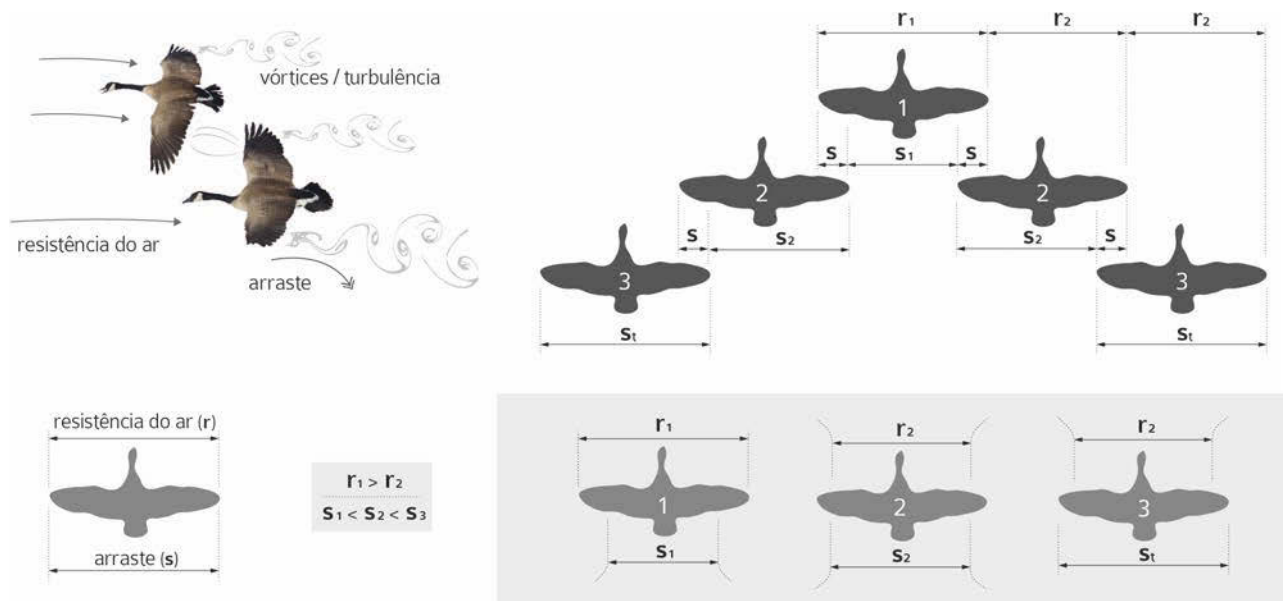
Quando se trata especificamente do voo de aves, essas demandas de viabilidade também ficam evidentes. Há, por exemplo, uma forte correlação entre a massa muscular para voo e a massa total na maioria dos pássaros, conforme mostrado por Kulfan e Colozza [2012] (Figura 16). Além da constituição física, as estratégias comportamentais das espécies quando em voo também são essenciais para a viabilidade técnica do voo, como a formação em V adotada por aves migratórias, capaz de beneficiar todo o conjunto com a economia energética (Figura 17).

Figura 16 Proporção entre massa muscular para voo e massa muscular total em aves.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza [2012. p.592]

Figura 17 Redução da resistência do ar e arraste na formação em V



Na formação em V todos os indivíduos se beneficiam: o primeiro é beneficiado pela redução do arraste, os últimos pela redução de resistência do ar e os demais são beneficiados por ambos. Fonte: Elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza [2012. p.609].

Deve-se observar, contudo, que os métodos adotados por diferentes espécies no voo (ou nado) guardam especificidades. Um fato interessante relatado por Kulfan e

Colozza [2012] mostra que, se feitos os cálculos de aerodinâmica (envolvendo peso, volume e área da asas), seria possível provar matematicamente que as abelhas terrestres *Bumblebee* (Figura 18), naturais da Austrália, seriam incapazes de voar. No entanto, independente dos cálculos biomecânicos, os indivíduos dessa espécie são capazes de fazê-lo. Tal fato intrigante foi explicado por pesquisas recentes, que demonstraram que as *Bumblebee* produzem a propulsão necessária para voar a partir de movimentos complexos de asas que criam vórtices que as mantêm suspensas no ar [SUN, 2005; MILLER, 2004; BOMPHREY *et al*, 2009]. Assim, uma vez em suspensão, podem adotar um voo em linha reta, que consome menos energia e permite velocidades maiores. A mesma estratégia é utilizada por beija-flores para decolar verticalmente e depois pairar e voar em velocidade, valendo-se de seu peso reduzido. De modo semelhante, algumas aves aquáticas utilizam-se da criação de vórtices na água embaixo de si para se manterem em suspensão e se locomoverem mais facilmente [VOGEL, 2013].

O tamanho, peso e volume dos seres e a viscosidade do meio fluido no qual estão imersos determina a relação entre os dois. Pequenos animais como borboletas, por exemplo, voam sob fluxo laminar e considerando suas relações de viscosidade com o ar, torna-se muito mais simples manter-se em suspensão. À medida que aumenta o tamanho do animal (volume e densidade), modifica-se o regime de fluxo (Figura 19). Não seria possível, por exemplo, que uma borboleta 100 vezes maior voasse com a mesma frequência de batimento de asas; sua constituição corporal mudaria, aumentando seu Número Reynolds e demandando mais velocidade¹¹. Alterar a escala, o tamanho e a forma de seu aparato de voo provocaria também um regime turbulento

¹¹ Esse exemplo pode ser compreendido quando imagina-se uma pessoa com a mão para fora de um veículo: à medida que aumenta a velocidade torna-se mais fácil sentir a “consistência” do ar, que nada mais é que a alteração do número Reynolds.

de voo, que demandaria mais potência para compensar o arraste (decorrente dos vórtices gerados pelo movimento do corpo no fluido). Por esse motivo, comparar a capacidade de voo de aviões e insetos, por exemplo, constitui uma análise ingênua, tendo em vista a considerável diferença entre os regimes de fluxo aos quais ambos estão sujeitos. Entretanto, esta compreensão desperta a atenção para possibilidades de intercâmbio entre soluções para diferentes fluidos.

Figura 18 A mecânica do voo da abelha Bumblebee



Acima, à esquerda: Abelha Bumblebee pousada. Disponível em: <stat16.privet.ru>. Acesso em 04 de julho de 2014. Acima, à direita: Câmeras de alta velocidade capturam o modo de “força bruta” aplicado pela abelha bumblebee para voar. Disponível em: <www.sciencedaily.com>. Créditos: *Richard Bomphrey*. Abaixo: Ilustração dos vórtices gerados por cada uma das asas de uma abelha Bumblebee. Fonte: Vanella et al, 2008. p.103.

Figura 19 Regimes de fluxo e formato aero e hidrodinâmico (*streamlined*)

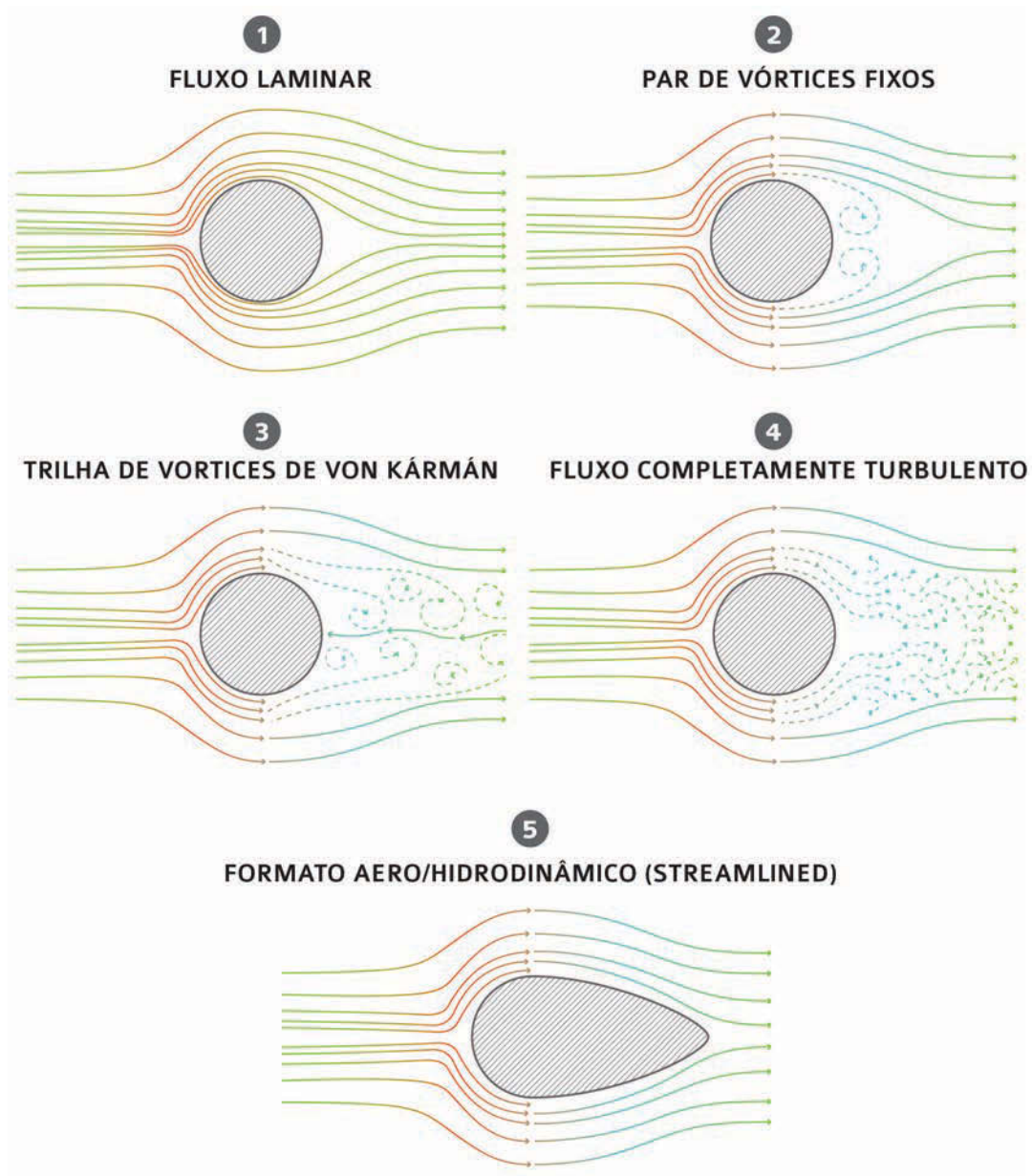
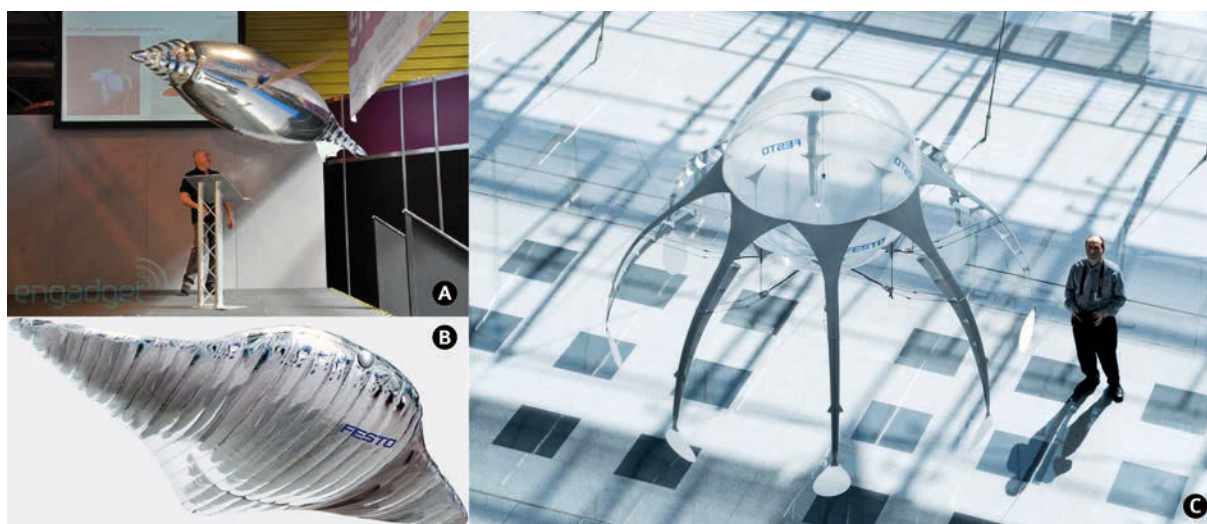


Ilustração: Vinicius de Abreu e Carvalho.

A forma como sólidos e fluidos respondem a forças externas difere fisicamente - enquanto os sólidos possuem módulo de elasticidade e respondem à tensão com uma deformação proporcional à força, os fluidos (líquidos e gases) respondem à tensão, independente da força aplicada, compartilhando uma propriedade exclusiva: a viscosidade. Uma definição simplificada dessa propriedade seria de que a viscosidade é o quão menos fluido é um fluido. Ou seja: quanto mais rápido um gás ou líquido

escoa, menor é sua viscosidade. O coeficiente de viscosidade é calculado com base na força, velocidade, área e a força entre elas e adquire grande importância quando relacionado à densidade do fluido - assim obtém-se a densidade cinemática. Através dessa propriedade é possível relacionar mais facilmente líquidos e gases, o que é particularmente útil para a Biomimética à medida em que atividades análogas como, por exemplo, voo e nado são comparadas. Essas duas formas de locomoção podem aparentar absolutamente distintas em uma primeira análise, entretanto, ambas as situações tratam de um sólido imerso se locomovendo em um fluido. Através desta compreensão foi possível que a empresa Festo desenvolvesse, por exemplo, robôs ultra leves, que voam tal como nadam as baleias, pinguins (Figura 20a), arraia (Figura 20b) ou pairam no ar tal como flutuam as águas-vivas (Figura 20c). Nos exemplos da Figura 20, de produtos Bioinspirados, o parâmetro para construção dos produtos Bioinspirados não foi a dimensão real dos seres vivos, mas a relação entre o corpo e o fluido em que está imerso - calculados através do Numero Reynolds.

Figura 20 Robôs Bioinspirados projetados pela empresa Festo



(A) Festo AirPenguin. Disponível em: <www.engadget.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Festo AirRay. Disponível em: <www.yankodesign.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (C) Festo AirJelly. Disponível em: <www.theengineer.co.uk>. Acesso em 14 de julho de 2014.

O Número Reynolds, cálculo desenvolvido por Osborne Reynolds (em 1883) permite compreender o comportamento dos fluidos sem envolver muita complexidade. Este número indica a importância da viscosidade (ou a não importância, já que quanto maior o número, menor é a viscosidade) e seu papel relativo a outras variáveis (força, densidade, área, comprimento, velocidade e tempo). Nenhum dos dados requerido é difícil de ser obtido, o que permite uma facilitada aplicação prática. O número Reynolds é particularmente útil para a realização de experimentos em escala. Em experimento realizado por Vogel [2002], foi necessário representar em escala reduzida os túneis construídos por roedores (*prairie dogs*). Alterar o tamanho dos túneis e entradas de ar alteraria, no entanto, os regimes de fluxo de ar e, para permitir a obtenção de dados compatíveis com a realidade no experimento, foi usado um túnel de ar que alterou as condições naturais (aumentando o valor da velocidade do meio) de modo a obter um número Reynolds igual ao da situação real.

A observação da natureza permite observar a semelhança de diversas soluções, o que confirma o bom desempenho (bio)mecânico de muitas formas e estruturas. Qual a explicação teórica por trás deste fenômeno?

6.2 Convergência

De acordo com o livro *Convergent Evolution*, de George McGhee¹² [2011], a evolução convergente é um fenômeno observado na natureza em que espécies diferentes desenvolvem soluções semelhantes. Um golfinho¹³, por exemplo, pode se parecer sobremaneira com um tubarão, sobretudo se estiver na água, nadando em sua direção. Entretanto, ainda que possua corpo fusiforme e *streamlined* (hidro e

¹² McGhee é paleobiólogo e morfologista.

¹³ No original, McGhee se refere a uma porpoise (também traduzida como golfinho) e não ao golfinho tradicionalmente conhecido (golfinho nariz-de-garrafa). Entretanto, golfinhos são parentes próximos das porpoises e são mais conhecidos, tornando-se portanto mais simples utilizá-los neste exemplo.

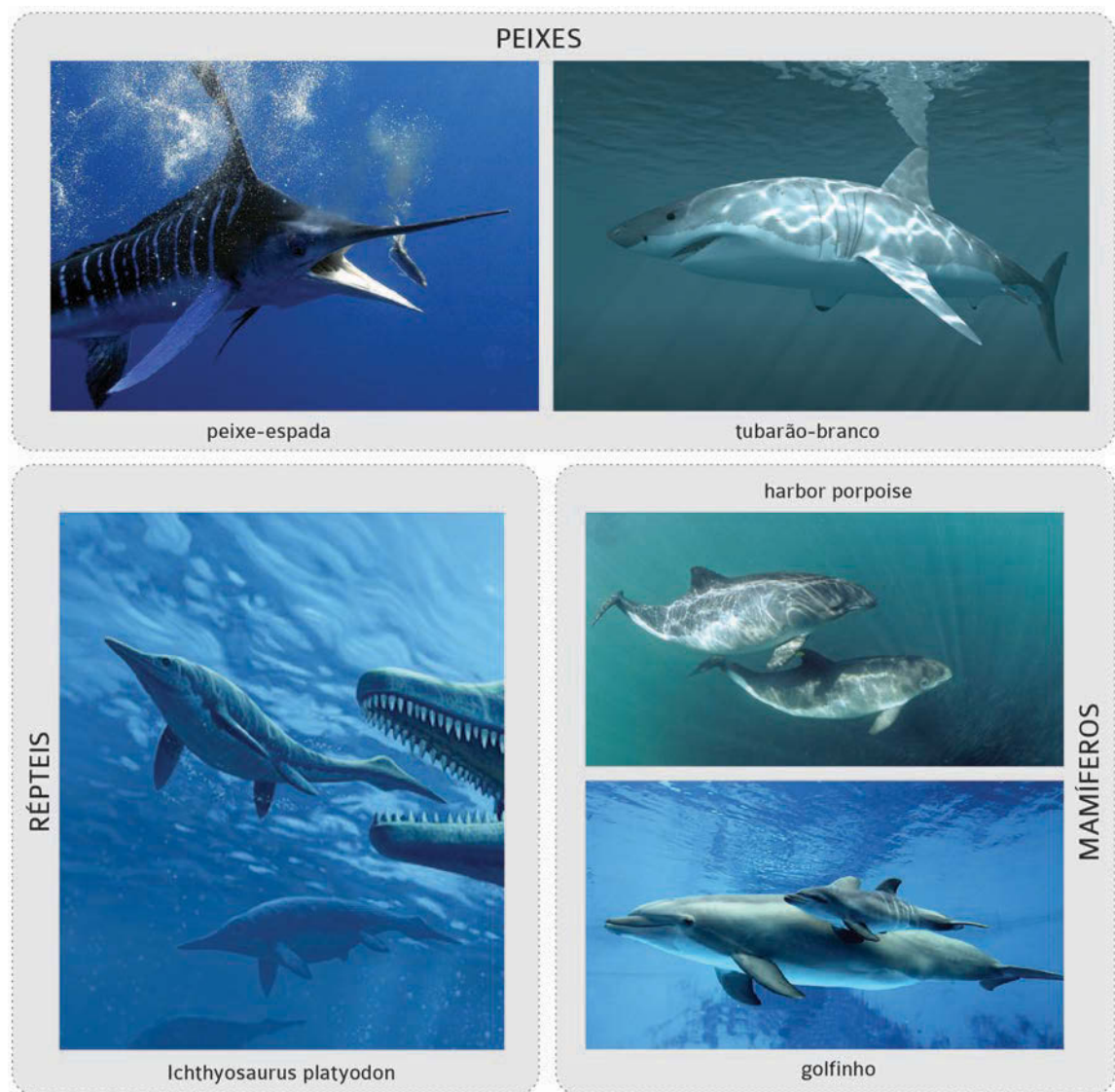
aerodinâmico), uma barbatana dorsal no centro das suas costas e uma grande nadadeira na extremidade de seu corpo, ao invés de uma cauda, o golfinho não é um peixe, e sim um mamífero. Ele possui uma indubitável combinação de traços que definem um mamífero, como placenta, viviparidade, glândulas mamárias, metabolismo endotérmico, três ossos no ouvido interno, dente de leite, fertilização interna, entre diversos outros. Ao contrário do que pode parecer, os traços que fazem um golfinho se assemelhar a um peixe não foram herdados diretamente dos peixes, mas se desenvolveram de maneira convergente, a partir de outras estruturas comuns aos mamíferos, perdendo também ao longo deste percurso outros traços presentes em grande parte dos mamíferos, como pelos, pernas e apêndice caudal. Os golfinhos e baleias¹⁴ fazem parte de um grupo de mamíferos que rumou de volta à água¹⁵ e encontrou neste ambiente os mesmos desafios locomotórios já enfrentados pelos por peixes ósseos e cartilagosos e por répteis aquáticos como o *Ichthyosaurus platyodon*¹⁶, um réptil marinho do período Mesozoico. O sucesso de ambos os grupos de animais no meio aquático foi resultado de evoluções adaptativas convergentes que os permitiram nadar com velocidade com a ajuda de seus corpos fusiformes e da modificação de seus membros em nadadeiras (Figura 21).

¹⁴ Popularmente costuma-se chamar de golfinhos os mamíferos aquáticos de pequeno porte e de baleias os mamíferos aquáticos de grande porte. Em geral, os cetáceos (Ordem: Cetacea) chamados de baleias são misticetos (Subordem: Mysticeti) e os golfinhos são odontocetos (Subordem: Odontoceti). No entanto, algumas baleias como as Orcas e Cachalotes são, na verdade, odontocetos.

¹⁵ Cerca de 405 milhões de anos depois dos peixes.

¹⁶ Cerca de 230 milhões de anos depois dos peixes.

Figura 21 Evolução convergente de corpos fusiformes hidrodinâmicos (*streamlined*), otimizados para o nado



Fonte: Elaborado pela autora. Imagens disponíveis em: <education.nationalgeographic.com>; <www.fish-wallpapers.com>; <greencityjournal.com>; <channel.nationalgeographic.com>; <cetki.com>. Acesso em 14 de julho de 2014.

Ainda dentro dos desafios impostos pelo meio aquático, McGhee [2011] cita a transformação de membros em nadadeiras em forma de pás em diversos seres de grupos evolutivamente distantes, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 Evolução convergente de nadadeiras em forma de pás, otimizados para nado

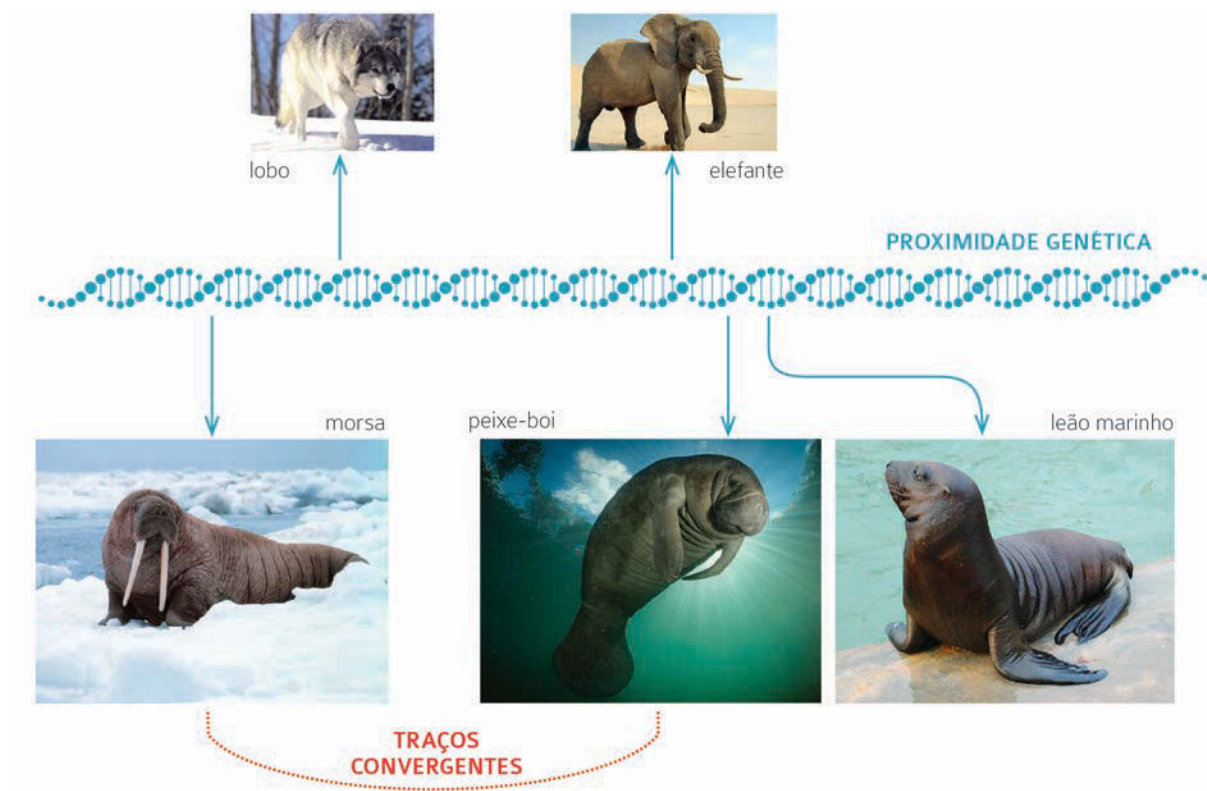


Fonte: Elaborado pela autora. Imagens disponíveis em: <www.fish-wallpapers.com>; <cetki.com>; <fineartamerica.com>; <africagreenmedia.co.za>; <www.enteresan.com>; <en.wikipedia.org/wiki/Merostomata>; . Acesso em 20 de agosto de 2014.

A identificação e comprovação da evolução de traços convergentes tornou-se mais simples a partir da disseminação das técnicas de decodificação genética, que permite identificar a real proximidade (ou distância) filogenética entre indivíduos

morfologicamente semelhantes (Figura 23).

Figura 23 Traços convergentes observados em morsas e peixes-boi, espécies geneticamente distantes



Fonte: Elaborado pela autora. Imagens disponíveis em: <www.free-picture.net>; <www.india-forums.com>; <animal-backgrounds.com>; <www.nationalgeographic.com>; <www.biscayneaquarium.com>; Acesso em 18 de setembro de 2013.

A convergência evolutiva não deve ser tomada sob a ótica teleológica ou funcionalista, de “forma segue a função” - além das pressões ambientais a que as espécies estão submetidas, deve-se considerar a capacidade (ou propensão) genética de cada indivíduo em gerar ou modificar estruturas existentes¹⁷. Conforme exemplificado por McGhee, seres mitológicos como centauros, por exemplo, jamais poderiam surgir a partir dos mamíferos, tendo em vista que todos os mamíferos

¹⁷ Como já hipotetizado no capítulo 2, poderia haver mamíferos de pescoços longos em outros locais, porém somente um certo grupo de indivíduos habitante das planícies africanas possuía aparato genético para tal.

possuem somente quatro membros locomotores para modificarem, não haveria portanto maneira de que outros dois membros surgissem, de acordo com o que pôde ser observado até então.

Figura 24 Espécie de Mantis (louva-a-deus) natural da Malásia, com três pares de membros



Copyright: Igor Siwanowicz / Barcroft media.

Outros grupos de seres vivos, por outro lado, possuem tal capacidade baseada em sua filogenia e algumas linhagens de artrópodes exibem seis membros locomotores, tendo sido capazes de gerar seres centauróides, como o mantis, popularmente chamado de louva-a-deus (Figura 24). Pelo mesmo motivo seria improvável o surgimento de seres com a morfologia dos dragões mitológicos: os répteis, que supostamente dariam origem a eles, possuem apenas dois pares de membros para serem modificados.

Um exemplo elaborado por McGhee ilustra o conceito de evolução convergente

moldada tanto por limitações físicas quanto por limitações filogenéticas. Na natureza são encontrados diversos animais planadores, com representantes entre mamíferos, répteis, anfíbios, peixes e até mesmo em formigas.

Pelo menos sete grupos de mamíferos evoluíram a capacidade de planar através de prolongamentos de membranas. Essas modificações começaram a ocorrer com grupos de mamíferos desde o período Cretáceo e, nos dias atuais, diversos exemplos são encontrados como os esquilos-voadores (roedores da ordem Rodentia, pertencentes à tribo Pteromyini), com ampla distribuição em todos os continentes, exceto na África, onde são encontrados outros animais conhecidos como “esquilos” voadores de cauda escamada (que não são de fato esquilos). No sudeste asiático, os lêmures-voadores, ou colugos, evoluíram os mesmos traços convergentes. Estes animais não são roedores, mas Dermópteros (da ordem Dermoptera, mais próxima aos primatas que aos roedores). Por fim, essa morfologia também evoluiu em marsupiais, encontrada em três diferentes grupos de gambás voadores na Austrália e algumas partes do Sudeste Asiático (Figuras 25 e 26).

Figura 25 Evolução convergente de morfologias de planagem em mamíferos



(A) Esquilo-voador pertencente à tribo Pteromyini (família Sciuridae). Disponível em: <iliketowastemytime.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Petauro-do-açúcar (*Petaurus breviceps*), espécie de possum planador originária do Leste e Norte da Austrália, da Nova Guiné e do Arquipélago de Bismarck. Disponível em: <cs607930.vk.me>. Acesso em 14 de julho de 2014. (C) Espécie de roedor chamado Esquilo voador pigmeu de cauda escamada (*Idiurus zenkeri*) que não é de fato um esquilo. É encontrado em Camarões, República Centro-Africana, República do Congo, República Democrática do Congo Guiné Equatorial e Uganda. Disponível em: <www.darwinmuseum.ru>. Acesso em 14 de julho de 2014. (D) Colugo, ou Lêmure Voador, é natural do sudoeste asiático pertence à ordem Dermoptera,. Disponível em: <media-cache-ec0.pinning.com>. Acesso em 14 de julho de 2014.

Figura 26 Distribuição Geográfica de Mamíferos Planadores

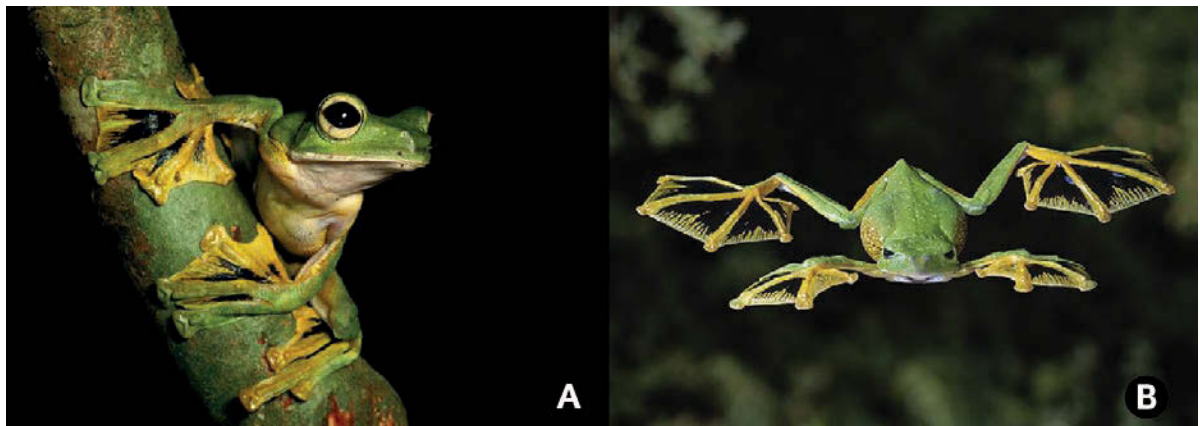


Fonte: Elaborado pela autora.

Em todos os mamíferos, nota-se que as morfologias de planagem decorrem de prolongamentos de membranas, que são, de acordo com McGhee, a maneira “encontrada” filogeneticamente pelas espécies de mamíferos para operar tais mudanças.

Os prolongamentos de membrana também capacitaram um grupo de anfíbios a evoluir uma morfologia planadora: os sapos-voadores-de-árvore evoluíram membranas prolongadas, esticadas por dedos também alongados ao longo da evolução (Figura 27).

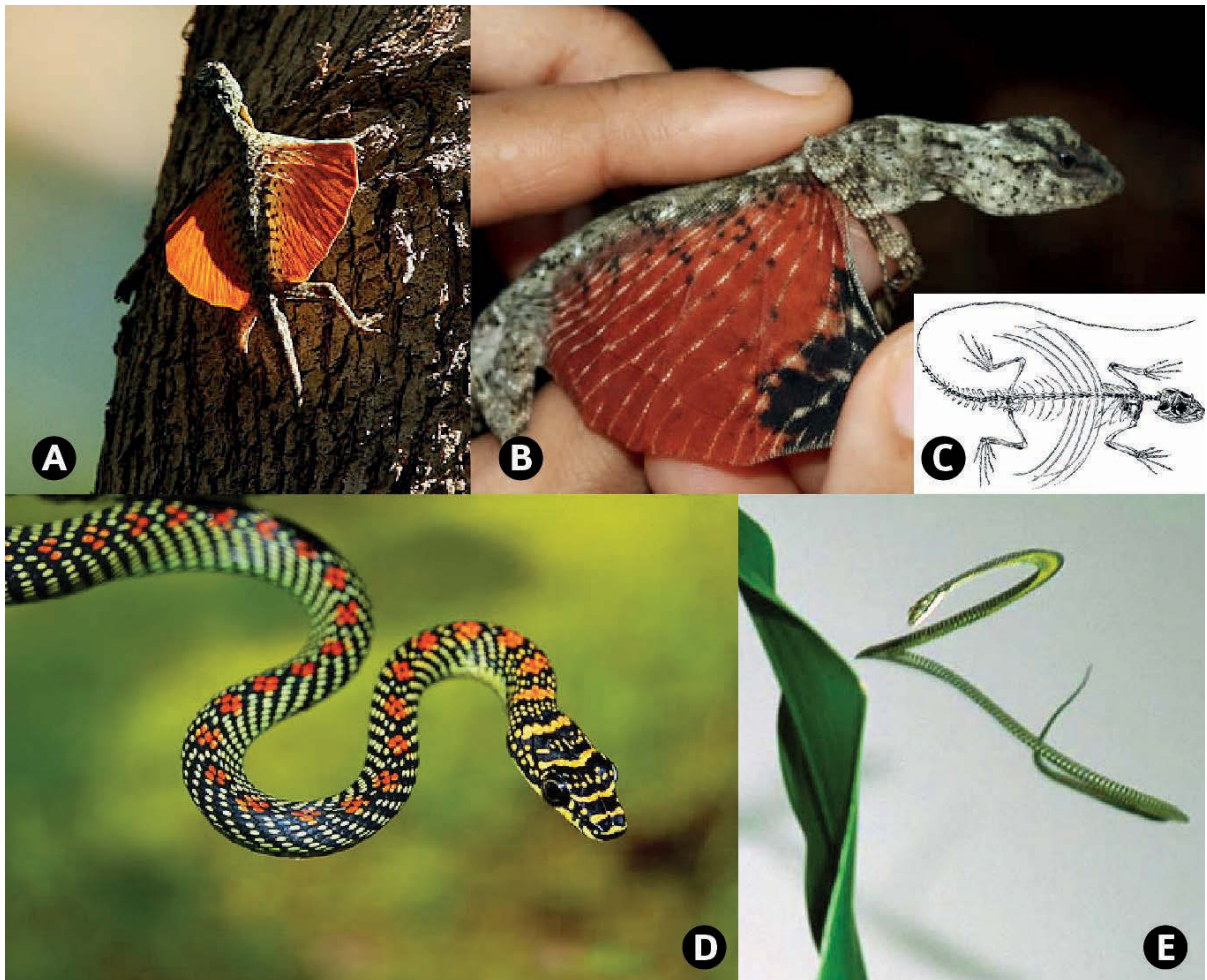
Figura 27 Evolução convergente de morfologias de planagem em anfíbios



Sapo-voador-de-wallace. Disponível em: <animals.nationalgeographic.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Sapo-voador-de-wallace planando. Disponível em: <mtdata.ru>. Acesso em 14 de julho de 2014.

Já nos répteis, o caminho filogenético possível para o surgimento dessas morfologias foi o do achatamento dorsoventral e alargamento lateral. Essa morfologia é encontrada nos lagartos do gênero *Draco* (Figuras 28a, 28b e 28c,) e nas cobras-voadoras-do-paráíso, pertencentes ao gênero *Chrysopelea* (Figuras 28d e 28e). Durante o voo, essa espécie de cobra exibe uma mudança considerável em sua forma, assemelhando-se a uma fita, e é capaz de fazer curvas de 90 graus.

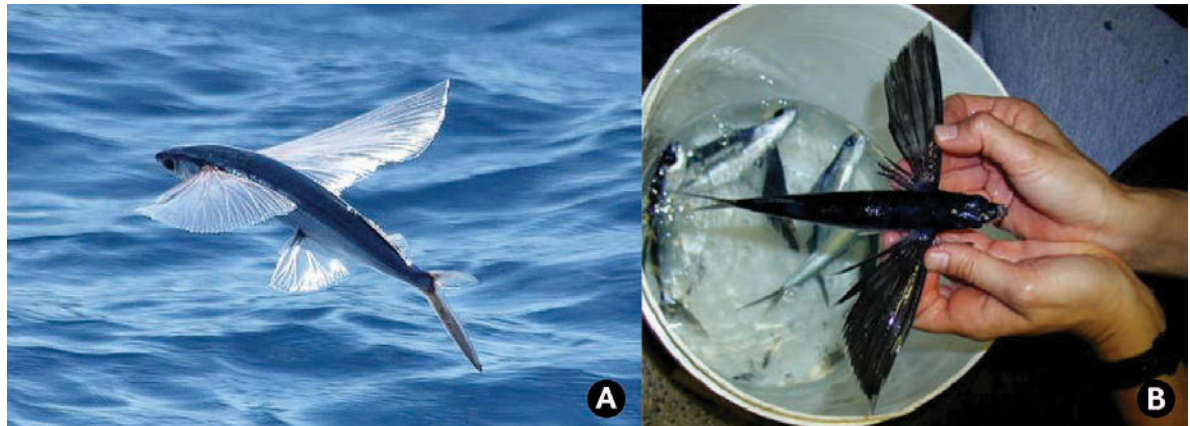
Figura 28 Evolução convergente de morfologias de planagem em répteis



(A) *Draco volans*, lagarto planador do gênero *Draco*. Disponível em: <studentick.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Detalhe do lagarto planador do gênero *Draco*. Disponível em: <www.relativelyinteresting.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (C) Ilustração de achatamento e prolongamento de costelas dos lagartos planadores. Disponível em: <upload.wikimedia.org>. Acesso em 14 de julho de 2014. (D) Serpente-voadora-do-paráiso. Disponível em: <animalspace.net>. Acesso em 14 de julho de 2014. (E) Serpente-voadora-do-paráiso em voo, permitindo visualizar o achatamento dorsoventral. Disponível em: <cdn4.sci-news.com>. Acesso em 14 de julho de 2014.

A capacidade de planar surgiu também em dois grupos distintos de peixes, que modificaram suas nadadeiras peitorais em formas alongadas, que são esticadas quando os peixes se lançam para fora da água (Figura 29).

Figura 29 Evolução convergente de morfologias de planagem em peixes



(A) Peixe-voador planando ao saltar da água. Disponível em: <naturepage.files.wordpress.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Peixe-voador com nadadeiras evidenciadas. Disponível em: <planktons.ru>. Acesso em 14 de julho de 2014.

Por fim, três grupos de formigas evoluíram separadamente as morfologias de planagem: dois desses grupos planam com as costas para baixo e o abdômen para cima (Figura 30).

Figura 30 Evolução convergente de morfologias de planagem em artrópodes



(A) Formiga planadora. Disponível em: <smithsonianscience.org>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Formiga planadora em salto. Disponível em: <smithsonianscience.org>. Acesso em 14 de julho de 2014. (C) Detalhe do formato achatado dos membros das formigas planadoras. Disponível em: <arthropoda.files.wordpress.com>. Acesso em 14 de julho de 2014.

Animais e insetos com asas e voo ativo são outro exemplo clássico de evolução convergente: pássaros, dinossauros e morcegos desenvolveram asas através de diferentes modificações em seus membros superiores, enquanto insetos, de maneira radicalmente distinta, desenvolveram asas derivadas das guelras presentes na forma larval.

Grande parte dos exemplos de evolução convergente tratam de aparatos locomotórios - asas, nadadeiras, remos e, conforme pontuado por McGhee, até mesmo o surgimento de pernas é uma evolução convergente. Tanto artrópodes quanto vertebrados evoluíram pernas, mas de duas maneiras distintas: vertebrados com a estrutura interna dos ossos e a musculatura externa e artrópodes com exoesqueleto¹⁸ articulado internamente pelos músculos.

Todos os seres vivos evoluíram a partir de um mesmo conjunto de organismos e compartilham uma estrutura comum: o DNA, o que é chamado por McGhee de “Homologia Profunda”. Os elos que os unem, entretanto, estão separados por milhares de anos de mutações cumulativas, que resultaram em estruturas elaboradas e complexas que permanecem em constante mutação.

Para reconhecer a evolução convergente, é necessário compreender cinco conceitos essenciais: sinapomorfismo, homoplasia, convergência, paralelismo e reversão.

Sinapomorfismo¹⁹, ou traços sinapomórficos, são características distintas herdadas de um ancestral comum e que definem o pertencimento a um determinado grupo, ou clado (traços citados anteriormente que definem o golfinho como mamífero).

Homoplasias são características semelhantes (entre dois seres vivos), mas que não

¹⁸ Esqueleto externo de quitina, característico dos artrópodes.

¹⁹ McGhee pontua que particularmente na literatura mais antiga, o sinapomorfismo é referido como homologia.

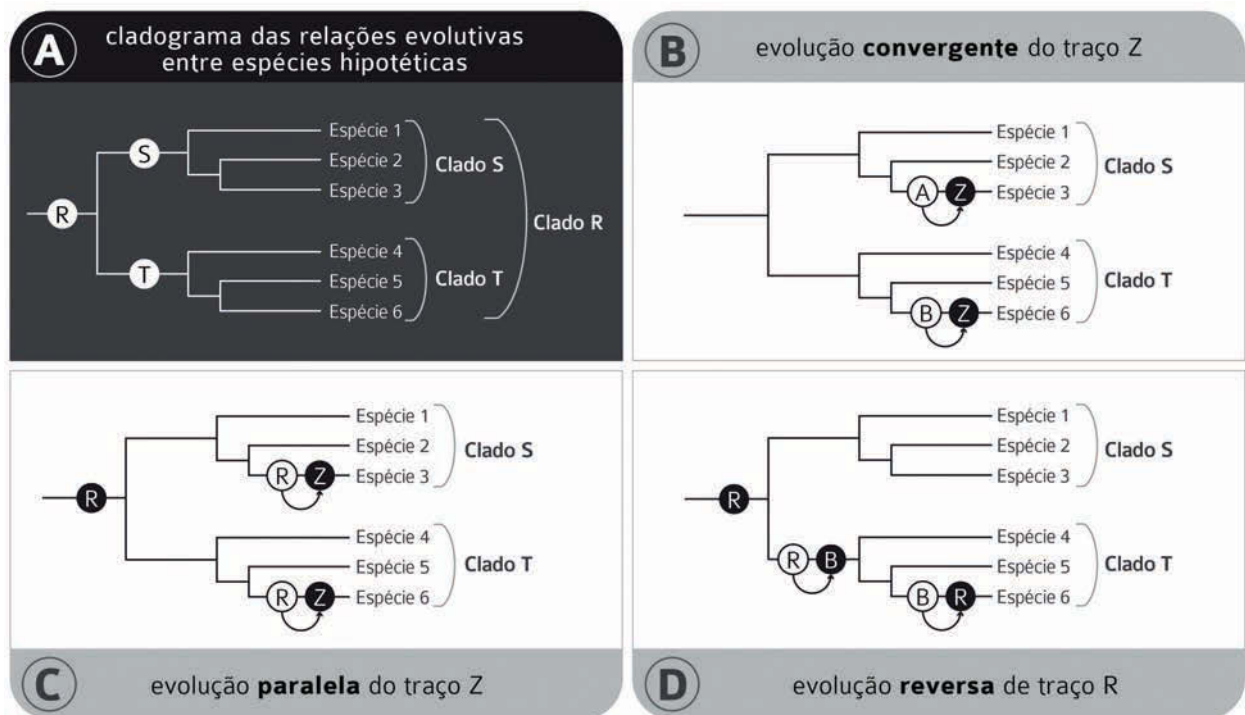
foram herdadas de um ancestral comum. Há três formas através das quais os traços homoplásticos podem surgir: convergência, paralelismo e reversão (Figura 31a).

Convergência, ou traços convergentes, são características surgidas em uma espécie que foram modificadas a partir de duas diferentes estruturas (Figura 31b).

Paralelismo, ou evolução paralela, é uma forma particular de convergência em que um determinado traço evolui paralelamente, a partir da modificação de uma mesma estrutura comum (Figura 31c).

Reversão, ou evolução reversa, ocorre quando algum traço herdado já modificado é revertido para o traço anterior (Figura 31d).

Figura 31 Cladogramas de relações evolutivas entre espécies



Fonte: Elaborado pela autora a partir de McGhee [2011 p. 2-4].

A presença de soluções convergentes na natureza presume, naturalmente, um percurso anterior de divergência em que foram geradas diversas variantes de soluções biológicas. Desta forma, pode-se observar um arcabouço vasto de estruturas

biológicas que torna afortunada a pesquisa para a Biomimética.

6.3 Percursos Evolutivos e a Geometria da Evolução

"Nossos resultados suportam fortemente a hipótese de que os elementos essenciais da estrutura orgânica são altamente limitados por regras geométricas, processos de crescimento e pelas propriedades dos materiais. Isto sugere que, dado um tempo suficiente e um número extremamente grande de experiências evolutivas, a descoberta por organismos de "bons" projetos - aqueles projetos que são viáveis e que podem ser construídos com materiais disponíveis - era inevitável e em princípio previsível ". [Thomas and Reif, 1993. p.342]

Em *The Geometry of Evolution: Adaptive Landscapes and the Theoretical Morphospaces* (A Geometria da Evolução: Panoramas Adaptativos e os Morfoespaços Teóricos), George McGhee aborda dois quadros conceituais centrais para a compreensão do fenômeno da Evolução Convergente e sua relação com a morfologia dos seres vivos. São eles: Panoramas Adaptativos, conceito criado pelo geneticista americano Sewall Wright²⁰, e Morfoespaço Teórico, criado pelo paleontólogo David M. Raup.

6.3.1. Panoramas Adaptativos (*Adaptive Landscapes*)

A metáfora do *Adaptive Landscape*²¹ propõe que a evolução via seleção natural pode ser visualizada através do percurso de topos e vales adaptativos. De acordo com McGhee [2006], esta proposta é uma forma simples e poderosa de visualizar a

²⁰ Sewall Wright, juntamente com os cientistas britânicos R. A. Fisher e J.B.S. Haldane, desenvolveram a síntese Neo-Darwiniana da teoria da evolução em 1930.

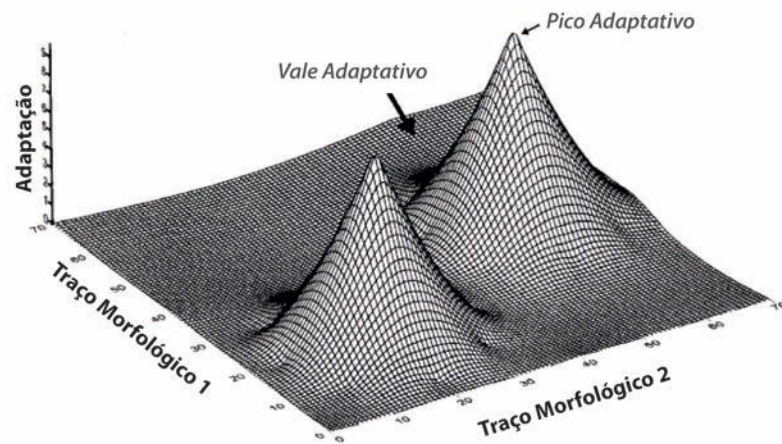
²¹ A crítica ao conceito de Adaptive Landscape foi de que ele possuiria apenas valor heurístico, para a criação de modelos conceituais, não sendo aplicável no estudo de animais e plantas existentes. Esta crítica se tornou inválida em 1966, quando David Raup utilizou simulações computacionais para modelar formas hipotéticas de vida que jamais existiram ao longo da evolução. Subsequentemente, Raup elaborou o conceito de Theoretical Morphospaces. (McGhee, 2006. p.xi)

evolução da vida. O conceito propõe que a correlação entre traços genéticos²² cruzados em dois eixos daria origem a um mapa de relevo com topografia composta por montanhas, picos e vales (Figura 32). Se um determinado gene tivesse 10 alelos (repetidos nos eixos x e y), haveria 100 possíveis combinações entre eles. Entretanto, a maioria destas 100 possíveis combinações não existe na natureza, sendo existentes apenas cerca de 10 destas opções. As outras 90 possibilidades poderiam potencialmente existir, mas isto não acontece. Assim, Wright propôs que essas 90 potenciais combinações genéticas teriam adaptação zero, representando combinações genéticas letais. As outras 10 possibilidades teriam valores maiores que zero, provavelmente variando dentro de uma gama de valores adaptativos (na metáfora das montanhas e no gráfico proposto, cada valor adaptativo seria representado por uma determinada cota altimétrica, enquanto a adaptação zero seria representada pela planície e pelos vales ao nível de altitude zero) [MCGHEE, 2006].

Como morfologista, McGhee [2006] utiliza o *Adaptive Landscape* para conduzir a análise. O grau de adaptação dos possíveis traços morfológicos será determinado pela análise funcional das formas potenciais (Figura 33). O arranjo geométrico dos picos dentro do mapa representaria então duas possíveis formas de vida disponíveis para os organismos analisados, enquanto as planícies e vales representam morfologias não funcionais.

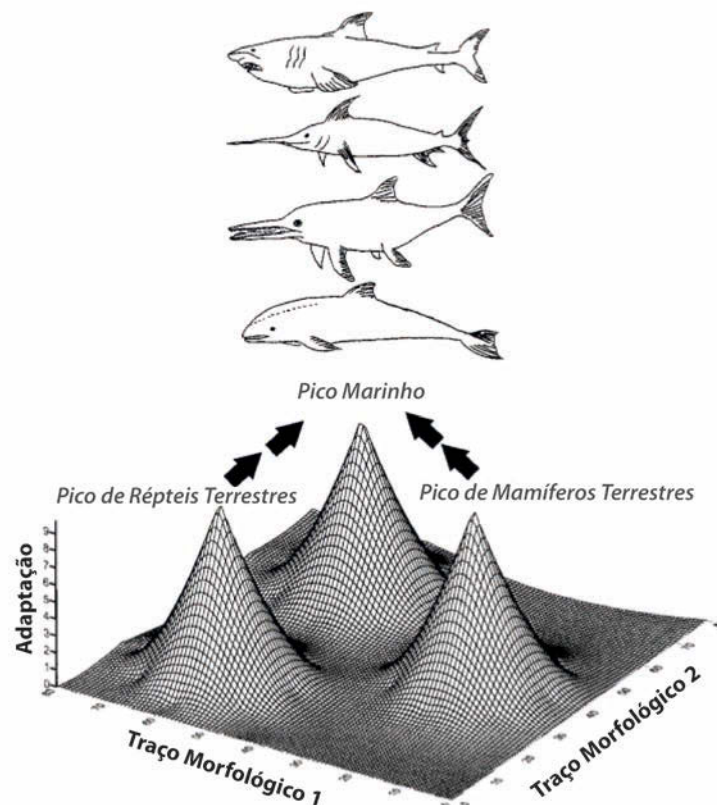
²² O conceito foi inicialmente proposto por Wright com traços genéticos, sendo chamado originalmente “fitness landscape”. O mesmo conceito é utilizado por geneticistas, com traços gênicos (chamado *fitness landscape*), e por morfologistas, com traços morfológicos (chamado *adaptive landscape*).

Figura 32 Panoramas Adaptativos (*Adaptive Landscapes*)



Fonte: McGhee [2006], p. 2. Traduzido pela Autora.

Figura 33 Panoramas Adaptativos e a evolução convergente em espécies aquáticas

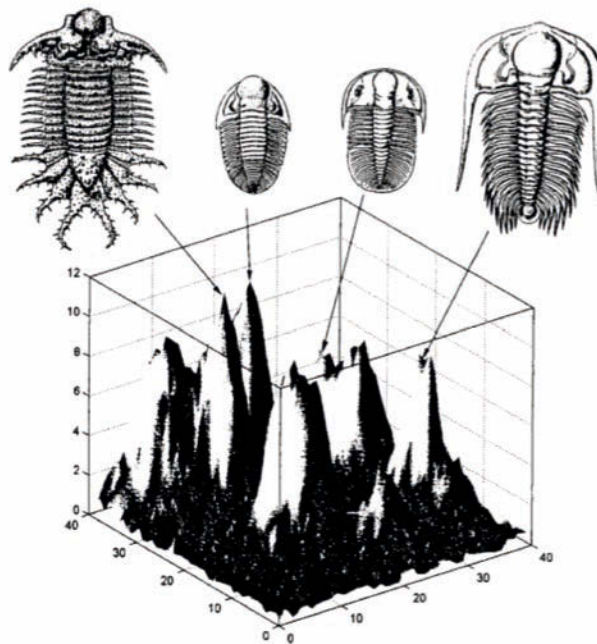


Fonte: McGhee, 2006. p.33. Traduzido pela Autora.

De acordo com McGhee [2006], o conceito dos *Adaptive Landscapes* seria correlato ao cerne da Seleção Natural: o diferencial de sucesso reprodutivo de vários fenótipos ou morfologias. Assim, no nível das espécies, cada uma tende a traçar uma trajetória ascendente rumo ao cume da montanha ao longo de gerações e em função das taxas reprodutivas maiores dos seres com morfologias mais adaptadas (Figura 34).

O autor pontua, entretanto, que a referência do cume da montanha como o grau máximo de evolução somente funciona em um quadro teórico estático. No contexto real, as pressões seletivas são consequência dos variados, complexos e permanentemente mutáveis desafios seletivos. Os ambientes, a concorrência e as relações de predação seriam algumas dessas demandas ambientais em constantes (ainda que lentas e graduais) mudanças. Dentro deste quadro conceitual, a extinção de espécies seria resultado da incapacidade de uma ou mais espécies em subir novas montanhas frente a um novo desafio imposto pelo meio ambiente.

Figura 34 Panorama Adaptativo da evolução dos Trilobitas (artrópodes marinhos Paleozoicos)

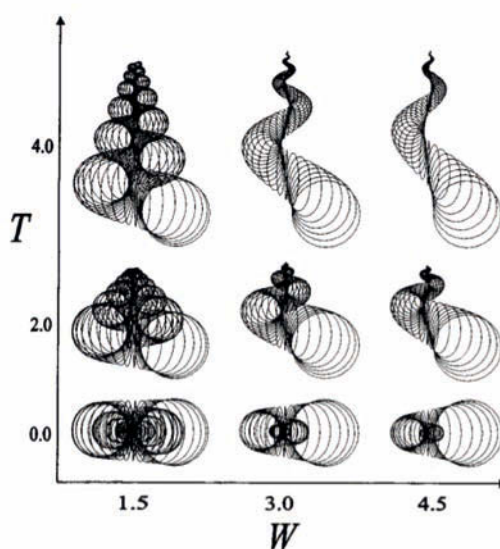


Fonte: McGhee, 2006. p.52

6.3.2. Morfoespaços Teóricos (*Theoretical Morphospaces*)

O segundo conceito, de *Theoretical Morphospace*, é definido por McGhee [MCGHEE, 1991] como “hiperespaço geométrico n-dimensional produzido através da variação sistemática de valores paramétricos do modelo geométrico de uma forma”. Apesar da explicação complexa, o conceito pode ser claramente compreendido quando ilustrado. A Figura 35 traz o exemplo gerado através de simulação computacional de objetos em forma de concha. Através da variação de dois parâmetros: taxa de expansão da espiral²³ e número de translações, pode-se observar diferentes morfologias resultantes: as mais acima e à esquerda lembram conchas de caramujos (gastrópodes), enquanto as mais abaixo e à direita assemelham-se mais às ostras (bivalves).

Figura 35 Morfoespaço Teórico elaborado por McGhee [2006] para simular possíveis variações de formas de conchas



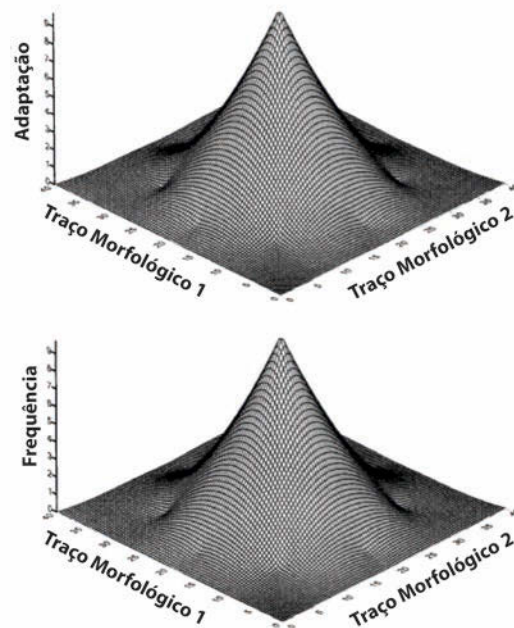
O eixo W representa a taxa de expansão da espiral da concha e o eixo T representa sua taxa de translação. Fonte: McGhee, 2006. p.58. Fonte: McGhee [2006. p.58].

²³ Apesar de espiral remeter quase instantaneamente às conchas de moluscos, as formas helicoidais tem ocorrência ubíqua na natureza, até o próprio DNA - observação frisada pelo próprio McGhee. Cabe pontuar também que na natureza, a espiral presente é a equiangular, e não a mais conhecida espiral de Arquimedes, conforme observado por D'Arcy Thompson no livro *On Growth and Form* (Sobre Forma e Crescimento) [p.176-177].

Utilizando-se este quadro de possibilidades formais para conchas, composto por dois eixos, é possível compor um diagrama de montanhas e vales, semelhante ao dos *Adaptive Landscapes*. Neste diagrama, porém, o terceiro eixo representa a taxa de ocorrência da morfologia na natureza.

Diferentemente dos *Adaptive Landscapes*, os *Theoretical Morphospaces* não levam em conta o grau de adaptação das soluções para a constituição do diagrama. As montanhas formadas no gráfico representam ocorrências da forma na natureza e as planícies podem representar tanto as formas que ainda não ocorreram, mas que são possíveis, quanto as formas de ocorrência impossível ou de adaptação zero. Esse ponto de vista assume que algumas das formas não existentes poderiam funcionar perfeitamente na natureza, mas o processo evolutivo simplesmente não as gerou. A não geração destas formas pelo processo evolutivo abre a discussão sobre as restrições evolucionárias (Figura 36).

Figura 36 Panorama Adaptativo (acima) e Morfoespaço Teórico (abaixo)



Fonte: McGhee, 2006. p.58.

Embora os *Theoretical Morphospaces* não utilizem uma medida para o nível de adaptação de cada solução, esta característica pode ser, de certo modo, mapeada através dos diagramas resultantes. De acordo com McGhee, uma grande riqueza da análise com os Morfoespaços Teóricos reside exatamente nos espaços vazios que ele evidencia. Qual seria a razão para que não haja (ou tenha havido) ser vivo com determinadas formas? A resposta para esta questão envolve as limitações que permeiam a existência dos seres vivos, sendo as principais de duas naturezas distintas: as limitações evolucionárias²⁴ e as limitações filogenéticas. Através da elaboração dos diagramas, pode-se constatar relações vantajosas e desvantajosas entre as variáveis e inferir o sucesso (ou fracasso) de cada conjunção em particular.

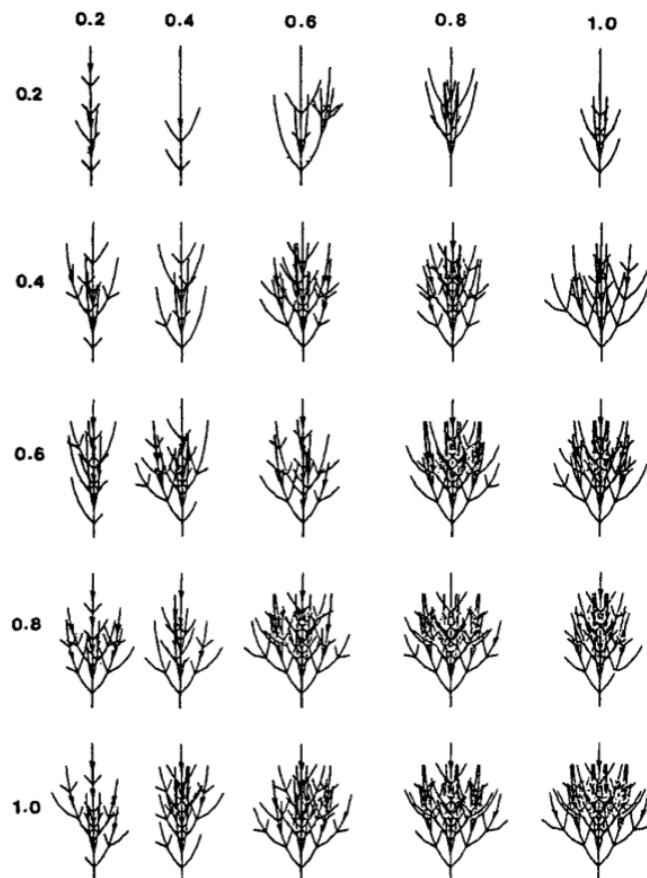
Também diferentemente dos Panoramas Adaptativos, os Morfoespaços Teóricos não dimensionam o grau de adaptação de cada solução individualmente e as montanhas formadas no gráfico representam portanto a ocorrência da forma na natureza, enquanto os planos no nível 0 podem representar tanto formas pouco eficientes (e portanto selecionadas negativamente) quanto formas que ainda não surgiram (devido a restrições desenvolvimentais, por exemplo).

Um trabalho na área publicado por Ellison e Niklas (1988) desenvolveu através de simulação computacional um Morfoespaço Teórico de plantas hipotéticas nas quais duas dimensões morfológicas foram correlacionadas: a probabilidade de um galho continuar a crescer versus a probabilidade de se bifurcar (Figura 37). Este Morfoespaço Teórico foi posteriormente ampliado a partir da adição propriedades como ângulo e orientação dos galhos, que são fatores capazes de alterar consideravelmente a exposição à luz nas plantas. Esse quadro de possibilidades foi transformado pelos autores em um Panorama Adaptativo capaz de apontar as formas

²⁴ Limitações Evolucionárias que são também chamadas limitações desenvolvimentais, arquitetônicas, fabricacionais, construtivas, ontogenéticas e morfogenéticas.

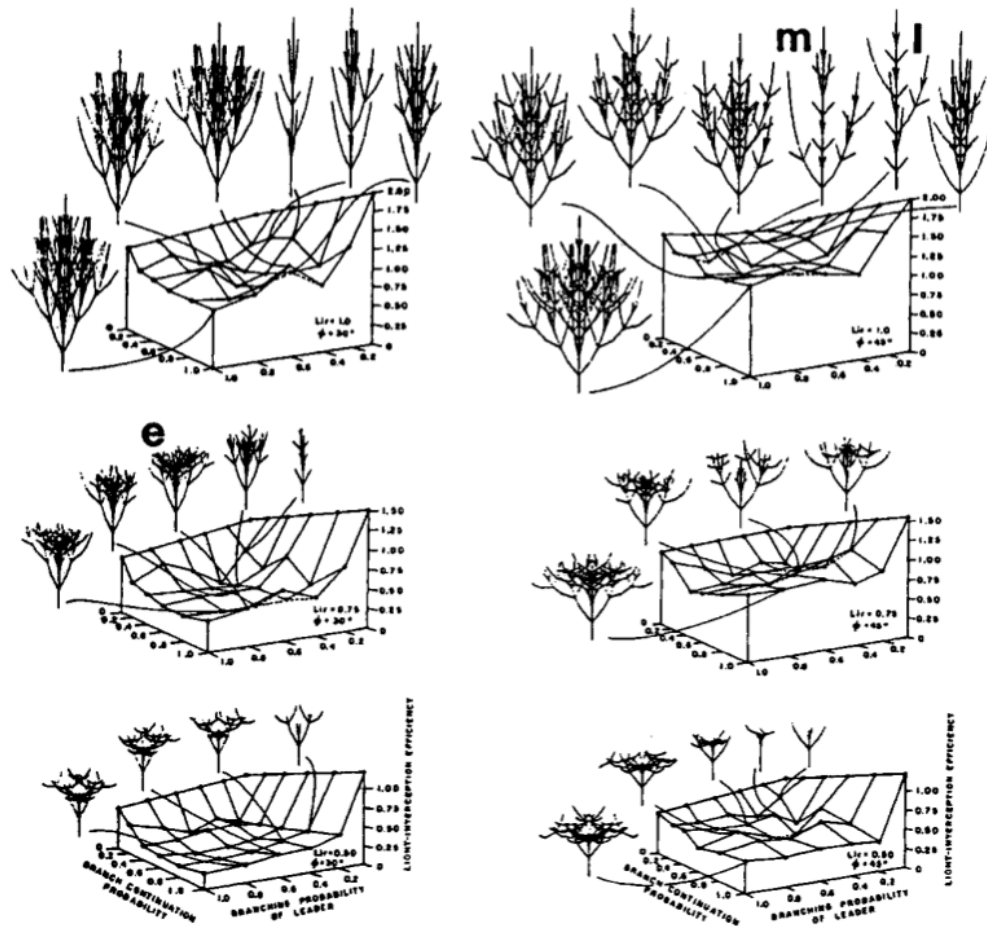
hipotéticas mais eficientes (e provavelmente mais prevalentes) de plantas com base em sua geometria em função de suas demandas e propriedades biológicas (Figura 38).

Figura 37 Morfoespaço Teórico de plantas hipotéticas de plantas criado por Ellison e Niklas (1988)



Eixo Horizontal: probabilidade de os galhos continuarem a crescer. Eixo Vertical: probabilidade de os galhos se bifurcarem. Fonte: McGhee, 2006. p. 83

Figura 38 Panorama Adaptativo elaborado por Ellison and Niklas (1988) que avalia diversos cenários de incidência de luz em plantas hipotéticas através da variação de propriedades como ângulos e orientação dos galhos.



Fonte: McGhee, 2006. p. 87

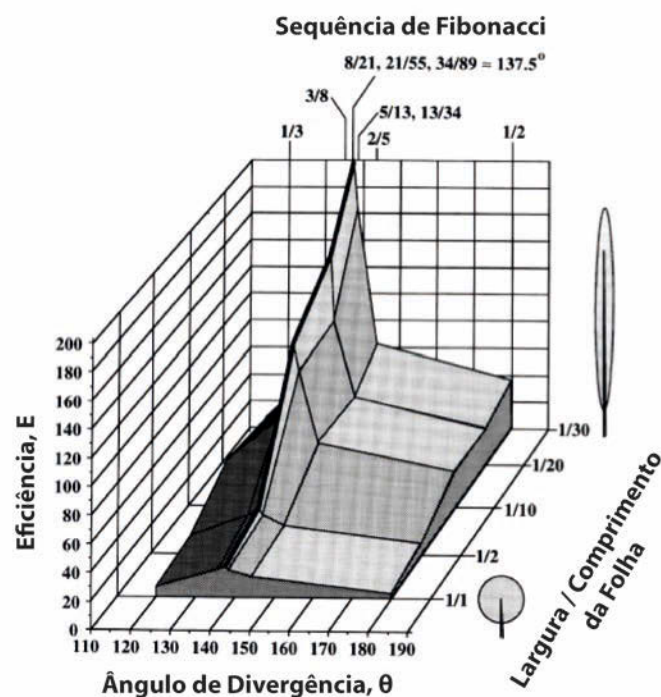
Outro trabalho elaborado por Karl J. Niklas em 1997²⁵ avaliou o posicionamento das folhas de plantas nos galhos em relação umas às outras²⁶ através dos *Theoretical Morphospaces*, transformados em *Adaptive Landscapes* pela adição da dimensão/eixo “Eficiência Energética” (Figura 39). Através do diagrama, Niklas constatou que o arranjo em espiral seguindo a sequência de Fibonacci tem prevalência maior em plantas cujas folhas são mais alongadas, enquanto há uma variância grande deste

²⁵ No livro *The Evolutionary Biology of Plants* (A Evolução Biológica das Plantas).

²⁶ Considerando o posicionamento das folhas em um galho, é natural que uma não fique exatamente abaixo de outra para que todas estejam aptas a receber a luz do sol. Assim, a posição dos galhos pode ser descrita como helicoidal ao redor do galho, variando em dois parâmetros: distância vertical e distância horizontal.

padrão em plantas com folhas mais largas. O Diagrama do *Theoretical Morphospace* permite visualizar que as folhas mais alongadas dispostas ao longo dos galhos na angulação de *Fibonacci* ($137,5^\circ$) recebem um índice maior de incidência solar, sendo mais eficientes energeticamente e perpetuando sua morfologia (através dos genes) com mais sucesso. Já em folhas com formas mais arredondadas, a eficiência na captação de luz é muito menor, mesmo quando arranjadas em ângulos de *Fibonacci*, em função da sobreposição de umas às outras. O arranjo nos galhos com a angulação de *Fibonacci* lhes confere apenas uma ligeira vantagem, não se tornando especialmente prevalente ao longo de gerações como no caso anterior.

Figura 39 Morfoespaço Teórico (*Theoretical Morphospace*) elaborado por Karl J. Niklas relacionando a distribuição das folhas e suas proporções em diversas espécies.



Fonte: McGhee, 2006. p. 88.

6.4 Conclusão do Capítulo

A viabilidade dos seres vivos esta pautada tanto por limitações físicas, químicas e mecânicas quanto por limitações filogenéticas. Outro fator chave para a análise técnica das soluções biológicas são os fatores sistêmicos dos ecossistemas e fatores micro e macroclimáticos, que determinam grande parte das pressões seletivas. Apesar dessas restrições (ou talvez em resposta a elas, como indicariam alguns estudos em epigenética), os seres vivos exibam um número muito elevado de "soluções" para diversos desafios. A análise ampla deste quadro aponta o fenômeno da Convergência Evolutiva, potencialmente enriquecedor para a Biomimética.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um ambiente de pressões seletivas, há uma tendência de que as morfologias mais eficientes tenham prevalência sobre as de menor eficiência, conforme relacionado através dos Panoramas Adaptativos e dos Morfoespaços Teóricos e de estudos como o desenvolvido por Niklas, capazes de revelar tendências morfológicas em relação à eficiência.

O comportamento mecânico e a viabilidade dos seres vivos estão intrinsecamente ligados ao seu tamanho, escala e às relações com os fluidos nos quais estão imersos. O tamanho dos seres vivos está submetido à viabilidade física dos mesmos no que diz respeito, por exemplo, à capacidade de sustentação do próprio corpo e ao funcionamento das micro e macroestruturas. No que se refere à viabilidade técnica, as construções da natureza se pautam pela similaridade elástica e não pela similaridade geométrica. Assim, não se poderia deliberadamente aumentar a escala de um ser vivo, pois isto acarretaria resultados biomecanicamente inviáveis, conforme já foi descrito no século XVII por Galileo. Assim, a escala é um componente fundamental a ser considerado quando se tratar da transposição de formas da natureza para artefatos tecnológicos.

Além das limitações físicas e biomecânicas, o percurso evolutivo das espécies está pautado também pela filogenia. Toda solução que existe (ou existiu) é viável (bio)mecanicamente. Porém, muitas soluções exibidas pela natureza são "gambiarras biológicas", surgidas dentro de um contexto filogenético específico e sendo otimizadas apenas quando se considera seu próprio percurso - não necessariamente quando se consideram todas as demais soluções para o mesmo desafio já encontradas na natureza.

Ficou evidente que muitos trabalhos que vêm sendo publicados na área não

apresentam critérios claros para a escolha do ser vivo ou mecanismo biológico estudado. Essa abordagem parece ingênua e pode levar a resultados pouco (ou nada) expressivos.

Em diversas ocasiões, ao longo do percurso evolutivo, espécies diferentes encontraram soluções morfológicas semelhantes para os mesmos problemas. Os reflexos conceituais e teóricos dos estudos em Evolução Convergente na Biologia podem contribuir de maneira consistente para a Biomimética. É provável que soluções convergentes estejam mais aptas a contribuir para o Design, uma vez que elas perpassam, mas não se limitam às restrições filogenéticas.

Nesse contexto, muitas das soluções convergentes da natureza serão compartilhadas com espécies já extintas, como no exemplo de formas otimizadas para o nado desenvolvido por McGhee. Este fato não enfraquece, muito pelo contrário, fortalece os indícios de que a morfologia apresenta vantagem em relação a outras. As razões para a extinção de espécies são as mais diversas, variando desde os fatores intrínsecos aos indivíduos, passando pelas relações com outros componentes do ecossistema e chegando aos fatores de ordem micro e macroclimáticos.

Além dos aspectos divergentes e convergentes da evolução, a observação de fenômenos e processos naturais é capaz de levantar provocações que questionam as possibilidades tecnológicas e criam provocações para novos saltos da Tecnologia Humana. Conforme observado por Nachtigall, a natureza é capaz de exibir e atestar a possibilidade de que existam algumas soluções. Assim, é inegável a sua contribuição para a tecnologia: mesmo que algo não seja replicável ou exequível²⁷, sabe-se que é ao menos possível. Não se trata, portanto, apenas da eficiência de cada mecanismo, mas da peculiaridade da solução e formas alcançadas através do processo evolutivo.

²⁷ Dentro do contexto tecnológico.

O funcionamento de estruturas orgânicas é radicalmente diferente dos artefatos tecnológicos construídos pelo homem. Essa diferença demanda um refinamento no olhar ao analisar as soluções da natureza - que inclui, por exemplo, a compreensão de conceitos biomecânicos, bioquímicos, paleontológicos, de ecossistemas, entre outros.

Reciprocamente, os recursos tecnológicos disponíveis²⁸ para a construção de artefatos biomiméticos também oferecem grande limitação ao desenvolvimento por diferenciarem-se sobremaneira do funcionamento dos “componentes” orgânicos.

Quando se trata das tecnologias de materiais e processos de fabricação, os materiais biológicos apresentam indiscutível superioridade sobretudo em função de seus métodos de fabricação (hierarquicamente, da nano à macro escala). Embora a tecnologia de materiais e processos de fabricação apresente avanços contínuos, a cópia fiel de materiais e estruturas biológicas ainda é impossível. Assim, há que se considerar também esta restrição em processos bioinspirados, para que sejam feitas as adaptações necessárias em termos de materiais. Assim, a Biomimética demanda uma nova classe de materiais - assim como as áreas de Biomateriais (materiais biocompatíveis) e Prostética. Os avanços constantes na tecnologia de materiais²⁹ têm colaborado para a expansão das possibilidades da Biomimética..

²⁸ Como componentes eletromagnéticos ou fotônicos como sensores, motores e microcontroladores, para citar alguns.

²⁹ Como hidrogéis, compósitos diversos e polímeros eletroativos (frequentemente aplicados no desenvolvimento de músculos artificiais), entre outros.

8 CONCLUSÃO

O estudo da natureza pode contribuir com o Design, desde que sejam observadas as limitações de ambos: biomecânicas e evolucionárias por um lado, e tecnologias em processos e materiais por outro. A evolução dos seres vivos é pautada pela viabilidade (bio)mecânica de suas estruturas tal qual estarão as demais estruturas artificiais³⁰ que estejam submetidas às mesmas condições físicas e ambientais. Além dos fatores mecânicos, a evolução desenvolvimental das espécies é dirigida também pela filogenia. Por fim, os caracteres surgidos passam por fatores de seleção de acordo com o ambiente em que se encontram. Em função da grande diversidade observada, é possível encontrar variadas e eficazes soluções aplicáveis aos mais diversos problemas projetuais, que foram geradas a partir de um longo percurso evolutivo. No entanto, não se pode afirmar que toda e qualquer espécie possa contribuir significativamente para qualquer processo de desenvolvimento em Biomimética. O preceito de que tudo o que existe já foi “chancelado” pela seleção natural é incompleto: os mecanismos de seleção natural são intrínsecos aos diferentes nichos, ambientes ou ecossistemas e se encontram em constante mutação. Problemas e soluções específicos encontrados nos seres vivos não necessariamente são extrapoláveis para outros contextos que não o da espécie e de seus ancestrais. Assim, recomenda-se que em processos de Biomimética, os fatores de seleção natural sejam levantados e avaliados criticamente. Devem ser consideradas também possíveis pressões externas que eventualmente contribuíram para tal caminho evolutivo, como a seleção artificial e as mudanças bruscas no ambiente. Por fim, fica evidente a importância do raciocínio interdisciplinar e da imersão em conceitos da Biologia para que se possa desenvolver projetos tecnologicamente relevantes através da Biomimética.

³⁰ Construídas pelo homem.

9 LIMITAÇÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção foram enumeradas e discutidas as limitações encontradas no desenvolvimento deste trabalho e levantadas as contribuições futuras e possibilidades de continuidade do estudo.

9.1 Limitações

Em função da complexidade do quadro teórico em Evolução Convergente e sobretudo nos Panoramas Adaptativos e Morfoespaços Teóricos, a escrita destes trechos teve de ser cuidadosa, porém breve, para não se tornar exaustiva ou inacessível. Esses conceitos poderiam ser melhor explorados, mas foram encontradas limitações no sentido de manter a discussão clara e didática, que se encontra na área do Design - e não da Biologia. Sabe-se também que a presente pesquisa sobre evolução convergente limitou-se principalmente aos livros publicados por George McGhee. Entretanto, boa parte da literatura desta área encontra-se dispersa em livros técnicos de Biologia e os livros deste autor são alguns dos poucos que convergem toda a informação e explicam de maneira relativamente acessível para leitores de outras áreas.

O trabalho de Werner Nachtigall se mostrou fundamental para qualquer estudo em Biomimética/Biônica. Porém, a descoberta deste autor foi tardia e, além da barreira do tempo, foram encontradas limitações em relação ao idioma: das 18 publicações mais relevantes do autor (originalmente escritas em alemão), apenas duas foram traduzidas para o inglês - sendo apenas uma sobre Biônica propriamente. Mesmo com as ferramentas de tradução via *internet* bastante avançadas, não foi possível aprofundar na obra deste autor como necessário. Portanto, uma investigação mais profunda deverá ser conduzida na obra de Nachtigall.

9.2 Contribuições e Trabalhos Futuros

Junto ao desenvolvimento deste trabalho foi submetido um artigo completo em periódico internacional (Elsevier Materials Science and Engineering: C) dentro do tema Biomimética, que se encontra em fase de revisão:

- **Functional Surface of the molluscan foot of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857): morphology, organic structures and the role of cilia on underwater adhesion** (Gabriela Rabelo Andrade, João Locke Ferreira de Araújo, Arnaldo Nakamura Filho, Anna Paganini Guañabens, Marcela David de Carvalho e Antônio Valadão Cardoso).

A discussão desenvolvida nesta pesquisa também será organizada para submissão de dois artigos em periódicos da área de Design.

Ao longo desta pesquisa foram orientadas 6 Pesquisas de Iniciação Científica contando com bolsas da Fapemig e do CNPq, sendo:

- 1 na área de materiais biológicos (“Avaliação das propriedades mecânicas da concha do *Limnoperna fortunei*”);
- 2 na área de impressão 3D (“Impressoras 3D Domésticas e os Desafios da Impressão 3D” e “O Potencial das Impressoras 3D Domésticas na Impressão de Artefatos”);
- 1 na área sensores para monitoramento ambiental (“Monitoramento Ambiental Automatizado: Desenvolvimento de Dispositivo de Sensoriamento Autônomo e Remoto para Auxílio no Controle do Invasor Mexilhão-dourado”) e
- 2 na área de produção de material didático multimídia (“Construção de Plataforma Online de Livros: Mecânica dos Materiais” e “Metodologia de Interatividade com TI para Modelar Decisão Epistemológica, Metodológica e Lógica de Auxílio à Decisão em Projetos Ambientais”)

Foi também realizado estágio de docência (64 horas) e a autora atuou também como Professora Colaboradora Voluntária durante 8 horas semanais em dois semestres na disciplina **Representação Tridimensional II** do curso de Design Gráfico da

Universidade do Estado de Minas Gerais, sob a tutoria da professora Tatiana Azzi.

Foram apresentados seis trabalhos em eventos científicos na Semana das Águas 2014 (IGAM), com os seguintes temas:

- **Caracterização dos Mecanismos de Adesão do Bivalve Fixador *Limnoperna fortunei* (Dunker 1857): Pé e Bisso** (Anna Carolina Paganini Guañabens, João Locke Ferreira de Araújo, Gabriela Rabelo Andrade, Arnaldo Nakamura Filho, Arthur Corrêa de Almeida, Marcela David de Carvalho, Antônio Valadão Cardoso);
- **Tecnologia da Informação e Dispositivos Autônomos: Sistemas Inteligentes de Monitoramento de Qualidade da Água** (Frederico Vieira Magalhães, Gabriela Rabelo Andrade, Vinicius de Abreu e Carvalho, Fabiano Alcísio e Silva, Marcela David de Carvalho, Antônio Valadão Cardoso);
- **Monitoramento Ambiental Automatizado Por Meio de VANTs e Inteligência Artificial** (Gabriela Rabelo Andrade, Frederico Vieira Magalhães, Fabiano Alcísio e Silva, Helen Regina Mota, Marcela David de Carvalho, Antônio Valadão Cardoso).
- **Base Colaborativa de Dados CBEIH: Uma Inovação da Cemig Para o Monitoramento Participativo de Alterações nas Águas Brasileiras** (Gabriela Rabelo Andrade, Arthur Corrêa de Almeida, Hernán Espinoza Riera, Fabiano Alcísio e Silva, Frederico Vieira Magalhães, Mônica de Cássia Souza Campos, Helen Regina Mota, Marcela David de Carvalho, Antônio Valadão Cardoso);
- **Centro de Bioengenharia de Espécies Invasoras de Hidrelétricas: Uma Metodologia Multidisciplinar em Pesquisa** (Arthur Corrêa de Almeida, Hernán Espinoza Riera, Gabriela Rabelo Andrade, Fabiano Alcísio e Silva, Helen Regina Mota, Marcela David de Carvalho, Antônio Valadão Cardoso);
- **Deteccão Rápida e Resposta Imediata: Programa de Prevenção e Combate a Espécies Invasoras** (Fabiano Alcísio e Silva, Gabriela Rabelo Andrade, Arthur Corrêa de Almeida, Vinicius Sérgio Rodrigues Diniz, Frederico Vieira Magalhães, Mônica de Cássia Souza Campos, Hernán Espinoza Riera, Helen Regina Mota, Marcela David de Carvalho, Antônio Valadão Cardoso);

REFERÊNCIAS

- AHMAR, S. A. S. EL. *Biomimicry as a Tool for Sustainable Architectural Design*. Alexandria University, 2011.
- AMBROSE, S. H. Paleolithic Technology and Human Evolution. *Science*, v. 291, n. 5509, p. 1748-1753, 2001.
- AUNGER, R. What's special about human technology? *Cambridge Journal of Economics*, v. 34, n. 1, p. 115-123, 2009.
- AUNGER, R. Types of technology. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 77, n. 5, p. 762-782, 2010.
- BAR-COHEN, Y. (ed). *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- BAR-COHEN, Y. (ed). *Biomimetics: Nature Based Innovation*. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- BASALLA, G. *The Evolution of Technology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- BENYUS, J. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins e-books, 2002.
- BOMPHREY, R.; TAULOR, G.; ADRIAN L. R. T. Smoke visualization of free-flying bumblebees indicates independent leading-edge vortices on each wing pair. *Experiments in Fluids*, v. 46, n. 5, p. 811, 2009.
- CHEN, P. Y. *et al.* Structure and mechanical properties of crab exoskeletons. *Acta Biomaterialia*, v. 4, n. 3, p. 587–596, 2008.
- CHEN, P.-Y.; MCKITTRICK, J.; MEYERS, M. A. Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs. *Progress in Materials Science*, v. 57, n. 8, p. 1492–1704, 2012.
- DIAMOND, J. M. *Guns, Germs and Steel*. Random House ed. Random House, 1998.
- DOCZI, G. *O poder dos limites. Harmonias e proporções na Natureza, Arte e*

Arquitetura. São Paulo: Mercuryo, 1990

GEBESHUBER, I. *et al.* Biomimetics in Tribology. In: GRUBER, P. *et al.* (Eds.). *Biomimetics: Materials, Structures and Processes - Examples, Ideas and Case Studies*. Berlim: Springer-Verlag, 2011.

GRUBER, P. *et al.* (Eds.). *Biomimetics: Materials, Structures and Processes - Examples, Ideas and Case Studies*. Berlim: Springer-Verlag, 2011a.

GRUBER, P. Biomimetics in Architecture [Architekturbionik]. In: _____. *Biomimetics: Materials, Structures and Processes - Examples, Ideas and Case Studies*. Berlim: Springer-Verlag, 2011b.

HALDANE, J. B. S.; SMITH, J. M. *On being the right size and other essays*. Oxford University Press, 1985.

HANSELL, Mike. *Built by Animals: The natural history of animal architecture*. Oxford University Press, 2007.

HANSELL, M. *Animal Architecture*. Oxford University Press, 2005.

HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M. Techniques and Technologies in Morphogenetic Design. *Architectural Design*, v. 78, n. 2, 2006.

HOWARD, T. J.; CULLEY, S. J.; DEKONINCK, E. *Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature*. Elsevier, Bath, v. 29, n. 2, p. 160-180, 2008. Disponível em: <http://agora.cs.illinois.edu/download/attachments/25498093/Describing+the+creative+design+process+by.pdf>. Acesso em 27 ago. 2010.

HU, T. *et al.* Biological inspirations, kinematics modelling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*. *Mechanism and Machine Theory*, v. 44, n. 3, p. 633-645, 2009.

KARDONG, K. V. *Vertebrates: comparative anatomy, function, and evolution*. McGraw-Hill, 2012.

KUHLMANN, D. Biomorphism in Architecture: Speculations on Growth and Form. In: GRUBER, P. *et al.* (Eds.). *Biomimetics: Materials, Structures and Processes - Examples, Ideas and Case Studies*. Berlim: Springer-Verlag, 2011.

KULFAN, B. M.; COLOZZA, A. J. Biomimetics and Flying Technology. in: BARCOHEN, Y. (ed). *Biomimetics: Nature Based Innovation*. Boca Raton: CRC Press, 2012.

LIN, A.; MEYERS, M. A. Growth and structure in abalone shell. *Materials Science and Engineering: A*, v. 390, n. 1-2, p. 27-41, 2005.

MARCUS, G. *Kluge: The Haphazard Construction of the Human Mind*. Houghton Mifflin, 2008.

MCGHEE, G. R. *Convergent Evolution*. MIT Press, 2011.

MCGHEE, George R. *The Geometry of Evolution*. Cambridge University Press, 2006.

MEYERS, M. A.; CHEN, P. Y.; LIN, A. Y.-M.; SEKI, Y. Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science*, v. 53, n. 1, p. 1-206, 2008.

MILLER, L. A. When vortices stick: an aerodynamic transition in tiny insect flight. *Journal of Experimental Biology*, v. 207, n. 17, p. 3073–3088, 2004.

MITCHAM, C. Thinking through technology: the path between engineering and philosophy. Chicago: The University of Chicago Press, 1994.

MORALES, L. R. *Para una teoria del diseño*. 1. ed. Mexico: Tilde Editores S.A.. 1989. 125 p.

PARVAN, M. I.; SCHWALMBERGER, A.; LINDEMANN, U. Application of basic design principles for solution search in biomimetics. In: 8th International Conference on Engineering Design, ICED'11, 22 jul. 2011, København. *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design* København, p. 1–10, 2011.

PERUTZ, M. F. The Top Designer. In: _____. *I wish I'd made you angry earlier: essays on science, scientists, and humanity*. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2003. cap. 2, p. 229-244.

POPPER, K. *Textos escolhidos*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2010.

POPPER, K. *The Poverty of Historicism*. 2. ed. London: Routledge Classics, 2002.

RUSE, M. *Darwin and Design: Does Evolution Have a Purpose?* Cambridge: Harvard University Press, 2004.

SANCHEZ, C.; ARRIBART, H.; GUILLE, M. M. G. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. *Nature materials*, v. 4, n. 4, p. 277-88, abr 2005.

SUN, M. Dynamic flight stability of a hovering bumblebee. *Journal of Experimental Biology*, v. 208, n. 3, p. 447-459, 2005.

THOMAS, R. D. K.; REIF, W. E. The skeleton space: a finite set of organic designs. *Evolution*, v. 47, p. 341-360, 1993.

THOMPSON, D. W. *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

TIMOSHENKO, S. P. *History of Strength of Materials*. New York, McGraw-Hill Book Co., 1953.

USHERWOOD, J. R.; ELLINGTON, C. P. The aerodynamics of revolving wings I. Model hawkmoth wings. *Journal of Experimental Biology*, v. 205, n. 11, p. 1547-1564, 2002.

VANELLA, M. *et al.* Influence of flexibility on the aerodynamic performance of a hovering wing. *Journal of Experimental Biology*, v. 212, n. 1, p. 95-105, 2008.

VINCENT, J. F. V. *et al.* Biomimetics: its practice and theory. *Journal of The Royal Society Interface*, v. 3, n. 9, p. 471-482, 2006.

VOGEL, S. *Comparative Biomechanics: Life's Physical World*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003.

APÊNDICE A - Estudo de Caso de Seres Vivos na Interface Ar e Água: insetos da família *Gerridae*

Esta investigação serviu como ponto de partida para algumas reflexões presentes neste trabalho e demonstra uma aplicação da compreensão de conceitos de evolução convergente à medida que o conceito que permeou a pesquisa foi estruturado a partir de um desafio ambiental.

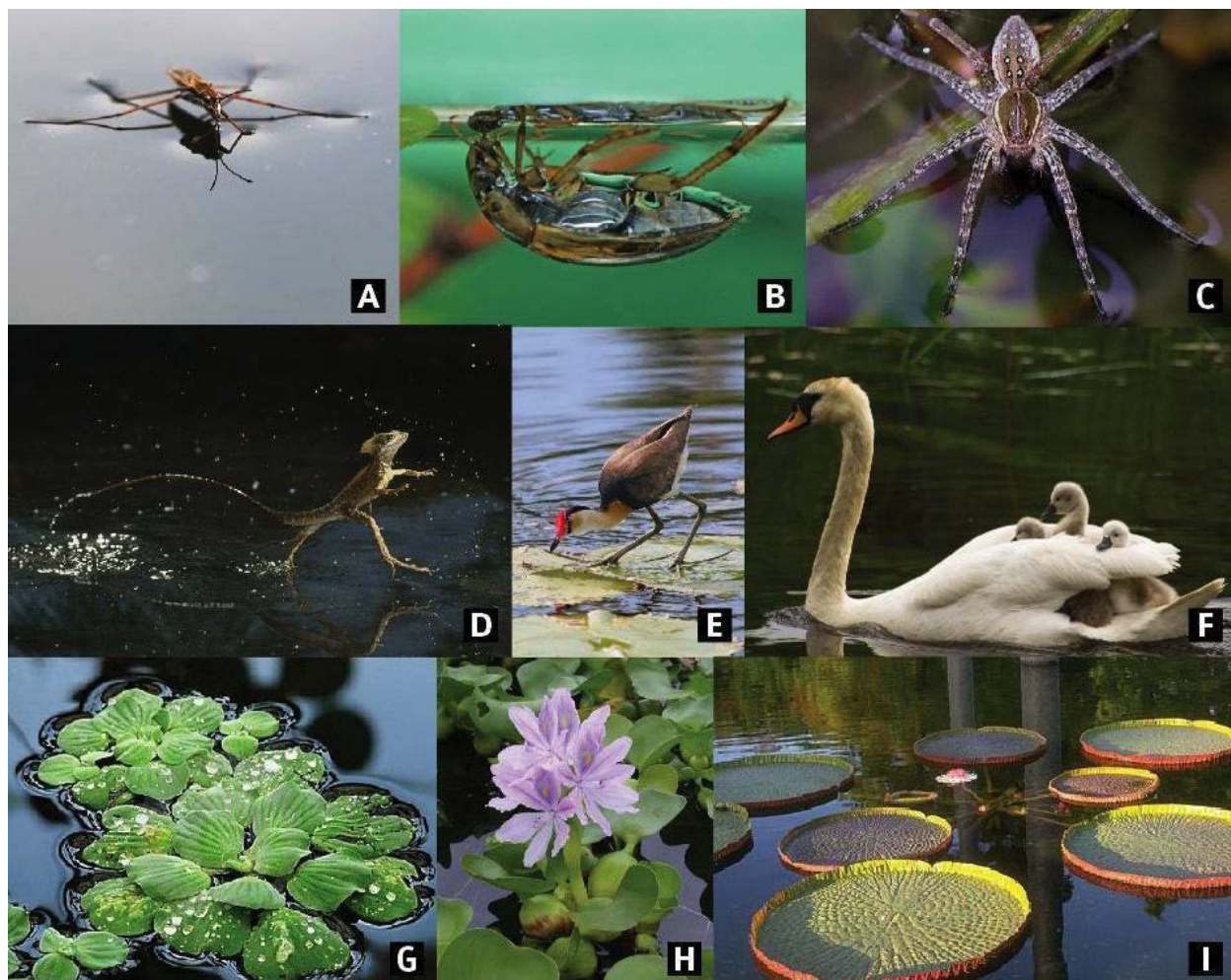
Neste estudo de caso foram investigadas possíveis contribuições do estudo dos seres vivos - capazes de habitar, mesmo que temporariamente, a interface entre o ar e a água - para os processos projetuais de robôs capazes de flutuar e/ou se locomover na superfície da água. A primeira etapa após a definição do problema/desafio ambiental consistiu na revisão de publicações científicas de caracterização morfológica (do nível micro ao macro), estudos de comportamento, estudos biomecânicos, entre outros, de espécies de animais e plantas.

Após o levantamento (Figura A1), foi escolhida uma família de insetos para estudo mais aprofundado:

- Insetos da Família *Gerridae* (Figura A1a), capazes de se locomover na superfície da água.

Os insetos da família *Gerridae*, são muito conhecidos por sua capacidade de pousar e de se locomover na superfície da água. Desde Aldrovandi (1618) e Ray (1710), os insetos capazes de andar sobre a água são estudados, além dos mecanismos de sustentação e de propulsão desses indivíduos [HU *et al*, 2010].

Figura A1 - Espécies levantadas na pesquisa bibliográfica inicial



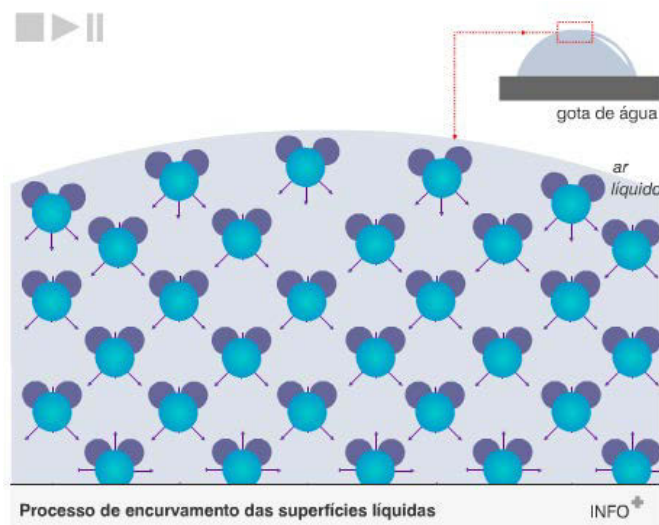
(A) Inseto da família *Gerridae* conhecido como *water strider*, “passo largo n’água”. Disponível em: <www.ianwadephotography.co.uk>. Acesso em 14 de julho de 2014. (B) Espécie de Besouro-D’água (nome comum aos besouros aquáticos das famílias *Giriniídeos*, *Hidrofilídeos* e *Disticídeos*). Copyright 2012 Ernie Cooper. Disponível em: <macrocritters.wordpress.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (C) Espécie de Aranha-d’água. Disponível em: <www.sjsdblogs.com/derekkendall>. Acesso em 14 de julho de 2014. (D) Lagarto Basilisco (*Basiliscus basiliscus*). Disponível em: <i.telegraph.co.uk>. Acesso em 14 de julho de 2014. (E) Jacanã (*Jacana jacana*). Disponível em: <ibc.lynxeds.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (F) Cisne (*Cygnus sp.*). Disponível em: <topwalls.net>. Acesso em 14 de julho de 2014. (G) Alface d’água (*Pistia stratiotes*). Disponível em: <pt.dreamstime.com>. Acesso em 14 de julho de 2014. (H) Aguapé (*Eichornia crassipes*). Disponível em: <www.aquarienpflanzen-shop.de>. Acesso em 14 de julho de 2014. (I) Vitória-Régia (*Victoria amazonica*). Disponível em: <0.static-atcloud.com>. Acesso em 14 de julho de 2014.

A análise de imagens destes seres mostra que eles permanecem secos e provocam um comportamento curioso na superfície da água, que se curva, mostrando que a tensão

superficial não foi rompida. A tensão superficial é um comportamento atípico da camada superficial dos líquidos quando em contato com gases. As forças que atuam nas moléculas no interior de um corpo líquido encontram-se em equilíbrio, sendo equivalentes em todas as direções e sentidos.

O mesmo não ocorre na porção superior deste mesmo líquido: o restante do líquido puxa essas moléculas para baixo e a camada de ar, acima, não é capaz de igualar esta força no sentido contrário. Sendo o líquido incapaz de contrair (mantendo-se a temperatura e a pressão), forma-se na superfície deste uma camada diferente das demais, resultante dessa assimetria de forças (Figura A2).

Figura A2 – Processo de encurvamento das superfícies líquidas



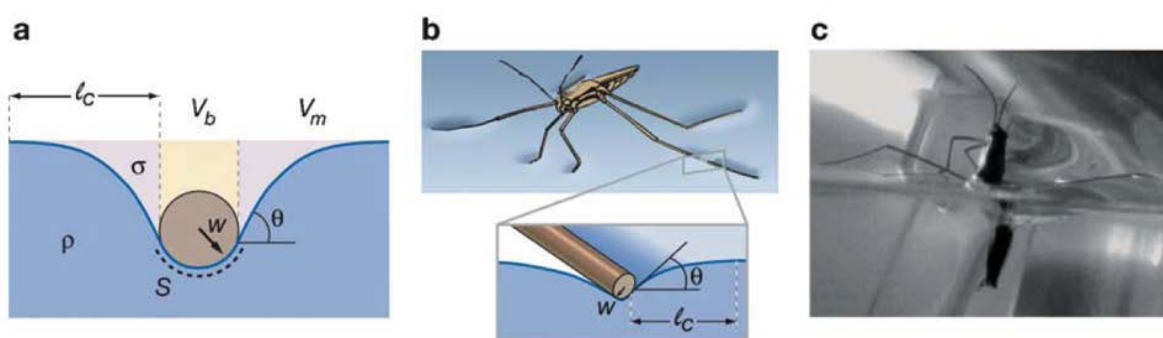
Relação assimétrica das forças às quais está submetida a porção de água na superfície. Disponível em:

<www.cienciadosmateriais.org>. Acesso em 14 de julho de 2014.

Os alfaiates (denominação genérica de diversas espécies da família *Gerridae*), se apoiam com ajuda da tensão superficial da água, o que quer dizer que as patas destes animais que entram em contato com a água não chegam a se molhar. O corpo destes insetos (e especialmente as patas) é recoberto por nano-pelos de hastes flexíveis, que se curvam ao contato com a água, mantendo uma camada de ar presa entre o corpo

do animal e a superfície (Figura A3). Estes pelos e a cobertura do animal também são recobertos por substâncias hidrofóbicas cerosas, que contribuem para impedir que estes se molhem. Essa camada de ar, além de impedir que o animal rompa a tensão superficial da água, funciona também como uma boia, reduzindo a densidade do corpo do animal e alterando assim as relações de viscosidade com o líquido. À medida que a superfície da água é curvada sem que a tensão superficial seja rompida, o animal ganha sustentação, conforme mostrado por Bush [2006] (Figura 3a). Além disso, esses insetos também tiram proveito desta característica para andar na superfície, gerando propulsão ao empurrar as patas na direção contrária à que querem se locomover, tirando proveito do arrasto que provocam, que os impulsiona na direção desejada.

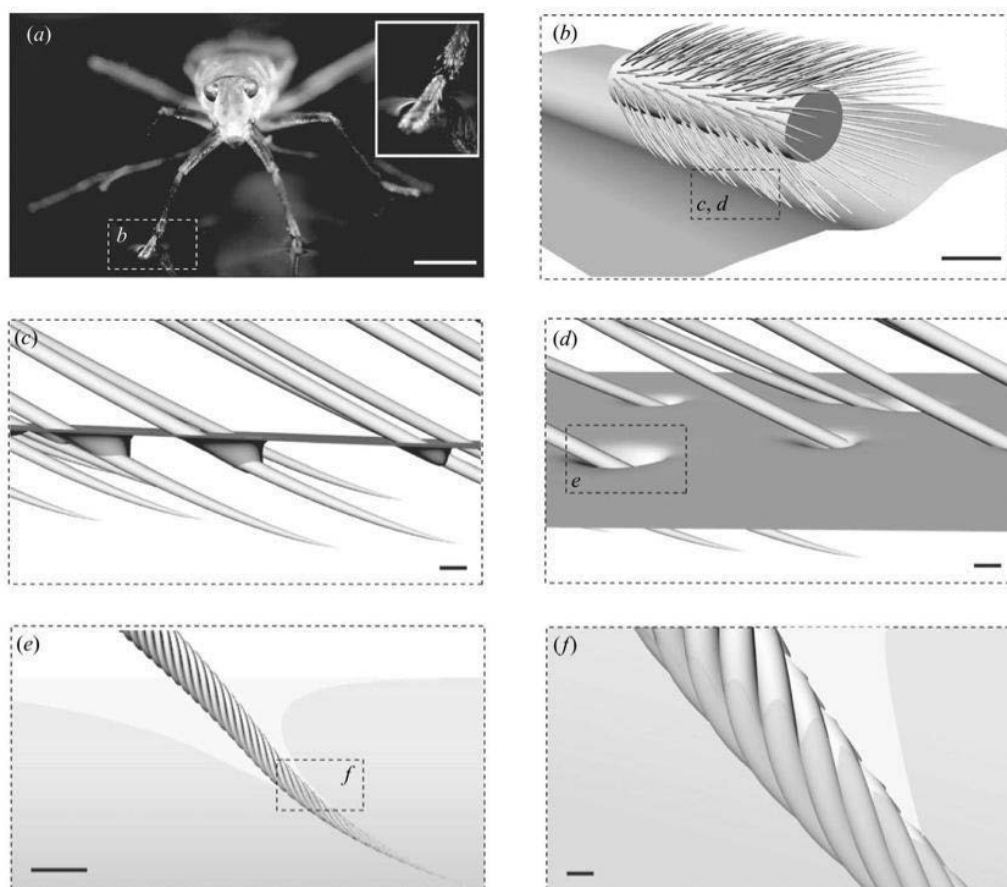
Figura A3 – As forças no corpo flutuante.



(a) O peso do animal é suportado por uma combinação entre empuxo e forças de curvatura, cujas magnitudes são dadas pelos pesos dos volumes de líquido deslocado, dentro e fora da sua linha de contato, respectivamente V_b (amarelo) e V_m (rosa). (b) Para um corpo muito longo em relação ao comprimento capilar, como a perna destes insetos, o peso é suportado principalmente pela força de curvatura por unidade de comprimento $2\sigma \sin\theta$. Fonte: Bush *et al* [2006, p.344]

A característica de manter uma camada de ar junto ao corpo pode ser observada em outros animais (Figura 4) e também em plantas. No caso dos animais, essa camada serve tanto para locomoção quando para respirar enquanto permanecem abaixo da superfície, como é o caso de outros insetos e alguns aracnídeos, como os besouros e aranhas d'água, respectivamente.

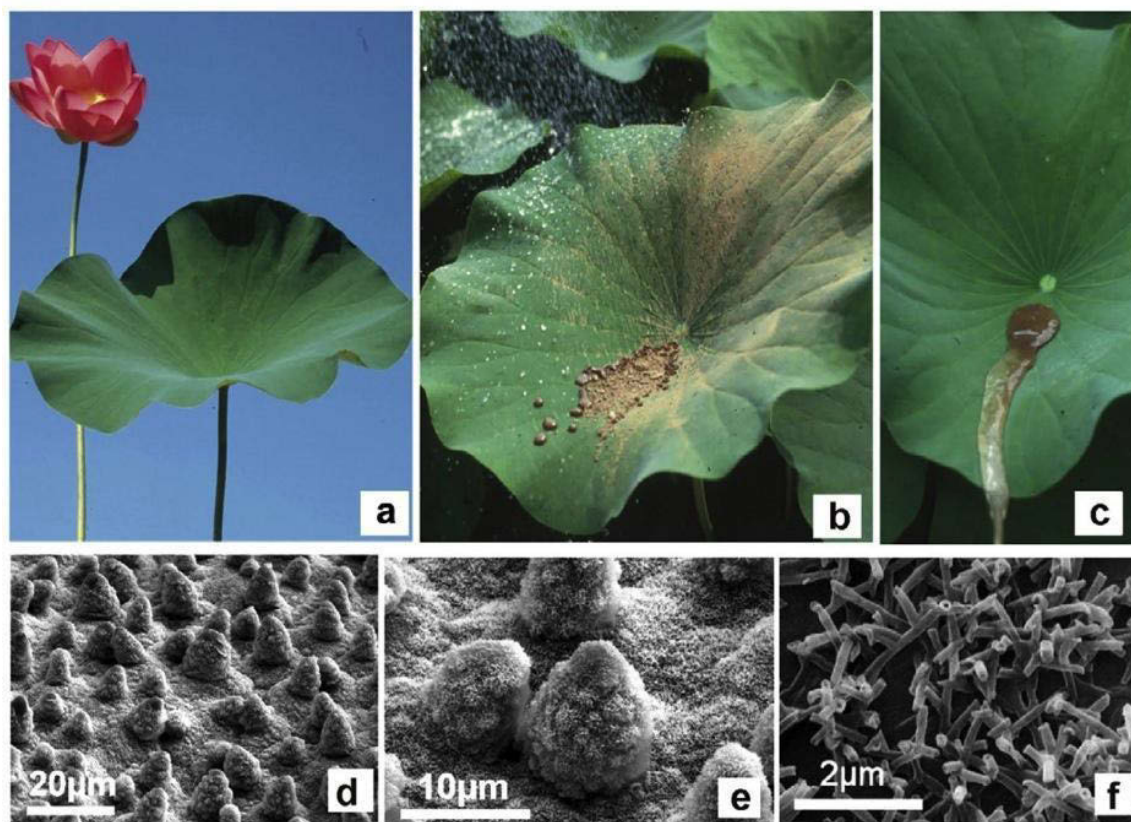
Figura A4 – Mecanismo semelhante ao observado nos alfaiares é o encontrado nas patas de insetos da família *Mesoveliidae*.



(a) Fotografia de indivíduo sustentando o próprio peso na água por deformação da superfície. Escala: 1mm. (b) Esquema com a para do animal, coberta por pelos. Escala: 100 μ m. (c, d) Esquema seguinte de pelos penetrando a superfície. Escala: 1 μ m. (e) um único pelo penetrando a superfície livre. Escala: 1 μ m. (f) A superfície dos pelos é coberta por nanorugosidades que aprisionam o ar quando o pelo é submerso. Escala: 0,1 μ m. Fonte: Hu *et al* [2010, p.11]

Tanto animais quanto plantas se beneficiam também com as superfícies hidrofóbicas recobertas com pelos ou outras estruturas e ceras, em razão das suas propriedades antiaderentes e autolimpantes, mantendo sua cobertura limpa, seca e evitando contato com possíveis agentes infectantes, como no exemplo clássico das folhas do Lótus (*Nelumbo nucifera*) (Figura 5), que levou ao desenvolvimento de tecnologias patenteadas para coberturas super-hidrofóbicas, como o Lotusan.

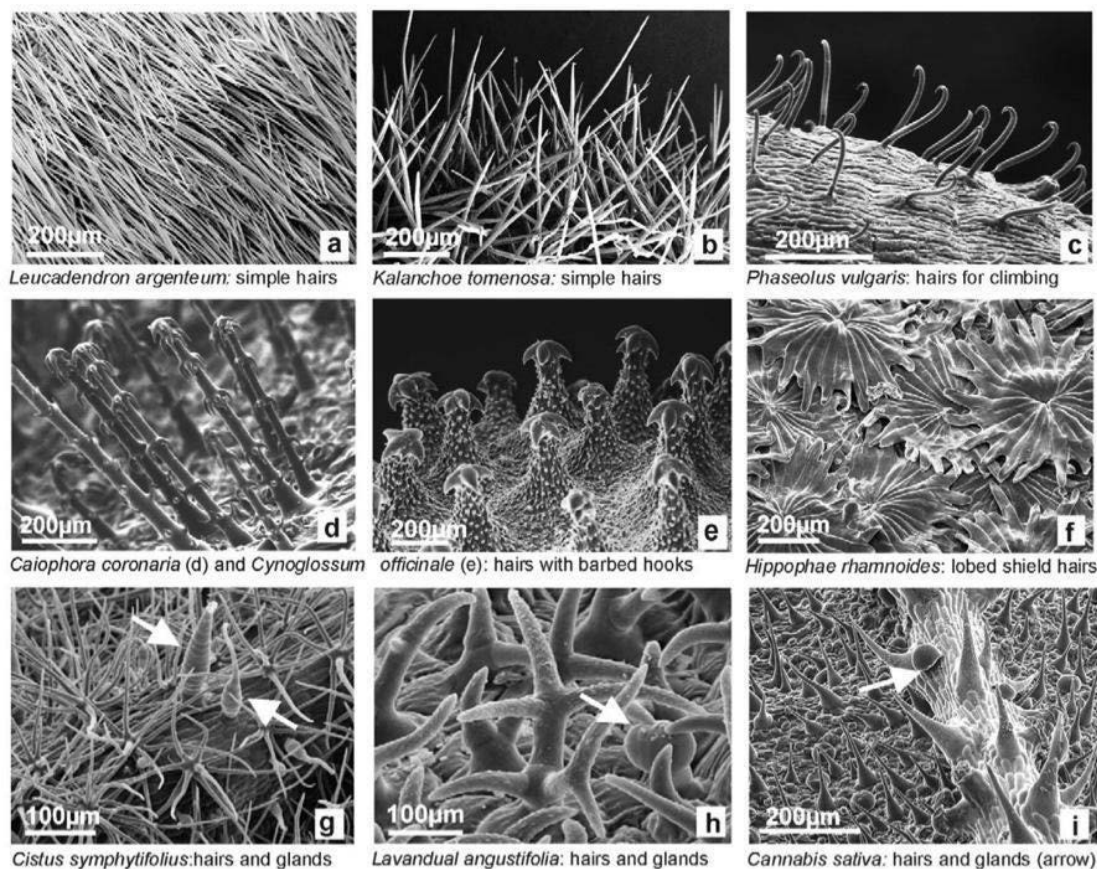
Figura A5 – Superfície das folhas de Lótus mostradas por Koch [2011]



(a) Superfície super-hidrofóbica e autolimpante da planta Lótus (*Nelumbo nucifera*) (b) Planta com flor; (c) Folha suja de terra; (d-f) A remoção das partículas aderidas pela água; (e) micrografias (MEV) mostrando a microestrutura da superfície das folhas, recobertas com papilas, (f) que por sua vez são recobertas por túbulos de cera. Fonte: Koch [2011, p.164]

As investigações de Koch *et al* [2009] em superfícies multifuncionais de plantas identificaram uma diversidade de soluções evolutivas, capazes de inspirar o desenvolvimento de novos materiais bioinspirados. A investigação destes materiais biológicos, com destaque para as superfícies capazes de reduzir a adesão de partículas e com propriedades autolimpantes, se deu desde o nível sub-celular até os aspectos visuais, reforçando a importância da hierarquia nas estruturas biológicas. Algumas das espécies estudadas revelaram a presença de tricomas (estruturas em forma de pelo) na superfícies das folhas com as mais diversas funções, como refletir a luz visível, exibindo a coloração branca, aumentar ou diminuir a perda de água e a molhabilidade da superfície ou facilitar a fixação em outras superfícies [Koch *et al*

2009] (Figura A6). Figura A6 – Micrografias (MEV) de tricomas, pelos e glândulas em superfícies vegetais.



(a) *Leucadendron argenteum* com uma cama densa de pelos retos, não ramificados e orientados quase paralelos à superfície da folha. (b) Os pelos não ramificados de *Kalanchoe tormentosa* são orientadas na vertical. (c) A superfície do broto de uma trepadeira de feijão *Phaseolus vulgaris* com ganchos terminais e pelos individuais sobre uma folha de *Caiophora coronaria* (d), e os da superfície de sementes de *Cynoglossum officinale* são caracterizados por terminais e ganchos farpados laterais (e). (f) Os pelos peltados de *Hippophae rhamnoides* de escudos lobulados, que se encontram na superfície plana da folha, (g) simples, ramificados, estrelados e pelos de duas glândulas diferentes morfológicamente (setas) na folha de *Cistus symphytifolius*, (h) pelos ramificados multiplamente e glândulas com pedúnculos curtos (seta) em uma folha de *Lavendual angustifolia*. Em (i) um recipiente exposto de folha com pelos-papilares e glândulas sem pedunculos (seta) da *Cannabis sativa* é mostrado. (a-h) Obtidos a partir de lados superiores (adaxial) da folha e (i) do lado inferior (abaxial) da folha.

Fonte: Koch *et al* [2009. p.146]

Referências

- BUSH, J. W.; HU, D. L. Walking on water: biolocomotion at the interface. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 38, p. 339–369, 2006.
- HU, D. L.; BUSH, J. W. M. The hydrodynamics of water-walking arthropods. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 644, p. 5, 2010.
- KOCH, K. Design of Hierarchically Sculptured Biological Surfaces with Anti-adhesive Properties. *Functional Nanoscience*, p. 167–178, 2011. Disponível em: <<http://www.beilstein-institut.de/Bozen2010/Proceedings/Koch/Koch.pdf>>. Acesso em 07 de julho de 2014.
- KOCH, K.; BHUSHAN, B.; BARTHLOTT, W. Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. *Progress in Materials Science*, v. 54, n. 2, p. 137–178, 2009.