

Capítulo 3

**Divergência, convergência e as
limitações do design bioinspirado**

Neste capítulo, serão exploradas e debatidas algumas questões cruciais relacionadas à biomimética. Em primeiro lugar, examinaremos as limitações que essa abordagem enfrenta, reconhecendo que, embora seja uma fonte rica de inspiração, a biomimética também possui suas próprias restrições e desafios. Em seguida, analisaremos as diversas limitações conceituais, materiais, físicas e de desenvolvimento que influenciam a evolução dos organismos vivos, reconhecendo que a natureza, apesar de suas inúmeras soluções eficientes, não é uma fonte ilimitada de inspiração. Por fim, discutiremos as observações essenciais que devem nortear os projetos bioinspirados, destacando a importância de uma compreensão profunda dos princípios biológicos subjacentes e a necessidade de adaptar esses conceitos à aplicação prática, considerando as demandas específicas do projeto em questão.

3.1 Biomecânica e o impacto do tamanho dos seres vivos

Na natureza, o tamanho das estruturas impacta de forma direta a performance e suas características, mas afeta, principal e intrinsecamente, a sua viabilidade mecânica.

A perda de calor pelos animais é proporcional à área da sua superfície, sendo sua produção de calor proporcional à sua massa total. Devido ao seu alto requerimento metabólico, pequenos beija-flores, morcegos e mamíferos têm que consumir diariamente uma enorme quantidade de alimento. Alguns beija-flores, por exemplo, chegam a consumir oito vezes o seu próprio peso em alimentos, diariamente – o

que seria o equivalente a uma pessoa de 75 kg consumir 600 kg de comida em um só dia! Em função da alta taxa de perda de temperatura, não existem pequenos mamíferos no mar – sobretudo nas águas frias dos oceanos. A Figura 10 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 10: Distribuição geográfica de representantes de aves e mamíferos considerados exceções entre outros indivíduos de suas classes

(A) Colibri-abelha-cubano (*Mellisuga helenae*), espécie endêmica de Cuba e da Isla de la Juventud; (B) Sagui-leãozinho (*Cebuella pygmaea*), a menor espécie de símio conhecida, endêmico da floresta equatorial amazônica do Brasil, Colômbia e Equador; (C) Musaranho-pigmeu (*Suncus etruscus*), menor mamífero conhecido e presente na região mediterrânea e no sul da Ásia; (D) Morcego-nariz-de-porco-de-kitti (*Craseonycteris thonglongyai*), espécie endêmica da Tailândia e de Mianmar.

Fonte: elaborado pela autora.²²

22 (A), (B) e (D) foram licenciadas pela autora para o presente trabalho. Disponíveis em: <https://www.alamy.com/stock-photo-bee-hummingbird-mellisuga-helenae-the-smallest-bird-in-the-world-137831118.html>; <https://www.alamy.com/stock-photo-pygmy-marmoset-climbing-a-branch-17373183.html>. <https://merlintonuttle.smugmug.com/HighQuality/Thailand-2019-MTBC-Field-Workshop/i-qp42pwq/A>. (C) se encontra sob domínio público. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crocidura_leucodon-1.jpg.

Frequentemente discute-se a capacidade extraordinária das pulgas em pularem cem ou duzentas 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 11), uma vez que se equiparam em capacidade de impulso, de acordo com as análises de Kulfan e Colozza (2012).

Mais do que apenas influenciar a capacidade e a performance em relação às atividades de cada indivíduo, o tamanho das estruturas na natureza está intrinsecamente ligado à 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 11), os casos 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 Galileu Galilei no século XVII, e é explicada de forma detalhada por Timoshenko (1983):

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).

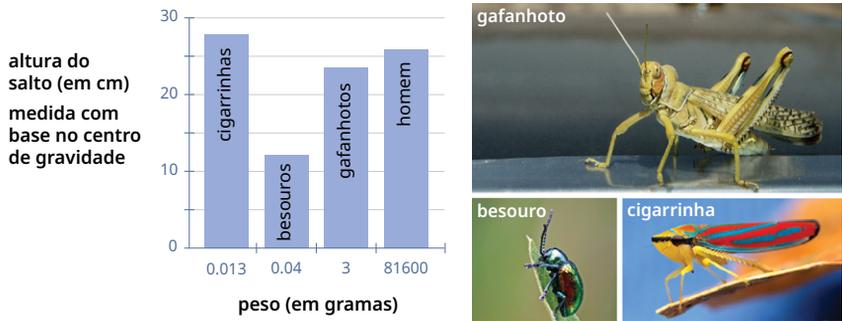


Figura 11: Comparativo entre altura do salto entre espécies de artrópodes e o homem

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza (2012, p. 587).²³

Retomando as observações de Galileu, o famoso geneticista J.B.S. Haldane publicou, em 1926, 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

²³ Imagens sob licença Creative Commons. Disponíveis em: <https://www.flickr.com/photos/44124425616@No1/1286253471>; <https://www.flickr.com/photos/126987422@No5/14902480549>; <https://www.flickr.com/photos/126987422@No5/20826254391>.

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, em seguida, gigantes, também com as mesmas proporções – ambos inviáveis nas condições normais do nosso planeta. Os gigantes de Brobdingnag, 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 liliputianos descritos em *As Viagens de Gulliver*, por outro lado, mediam apenas 15 centímetros. Nas condições físicas da Terra, eles se beneficiariam de serem 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 os liliputianos passariam boa parte de seu tempo se alimentando para serem capazes de manter sua temperatura corporal (Figura 12).

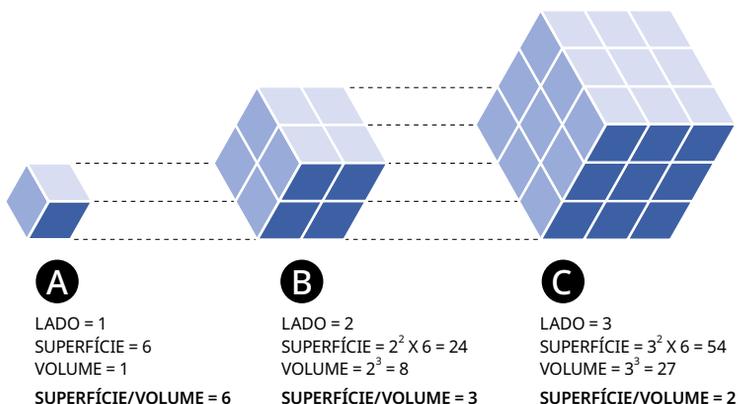


Figura 12: Relação entre massa e volume em sólidos

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kardong (2012, p. 132).

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 13). Assim, assume-se que a natureza otimiza seus designs quando se trata da escala e que animais, independentemente 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).

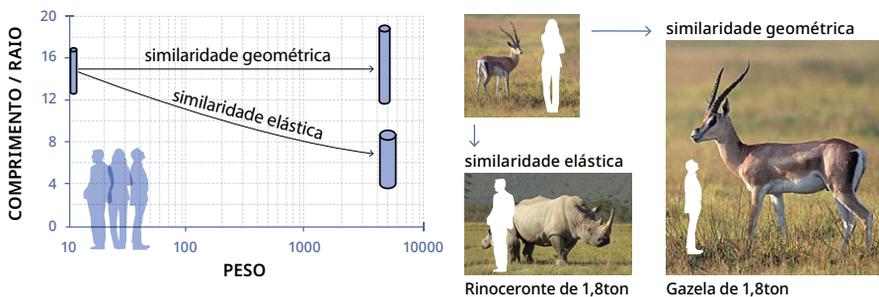


Figura 13: Similaridade elástica versus similaridade geométrica

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza (2012, p. 594).²⁴

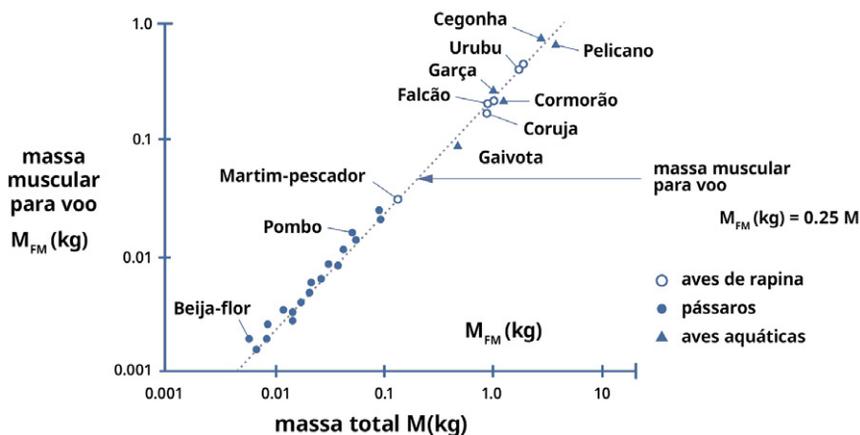


Figura 14: Proporção entre massa muscular para voo e massa muscular total em aves

Fonte: elaborado pela autora a partir de Kulfan e Colozza (2012, p. 592).

Quando se trata especificamente do voo de aves, essas demandas de viabilidade também ficam evidentes. Há, por

²⁴ As imagens utilizadas foram geradas por ferramenta de inteligência artificial (DALL-E) e editadas pela autora.

exemplo, uma forte correlação entre a massa muscular para voo e a massa total na maioria dos pássaros, conforme demonstrado por Kulfan e Colozza (2012) (Figura 14). Além da constituição física, as estratégias comportamentais das espécies enquanto voam 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 15).

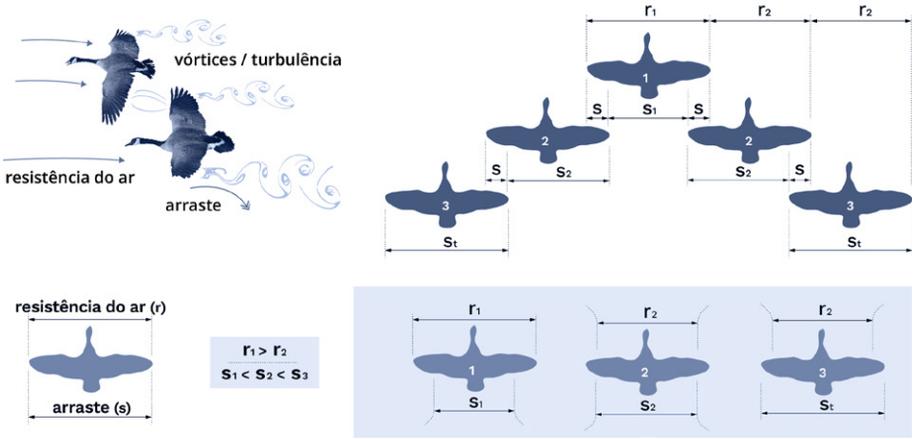


Figura 15: Redução da resistência do ar e arraste na formação em "V"

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 das asas), seria possível provar matematicamente que as abelhas terrestres *Bumblebee*, naturais da Austrália, seriam incapazes de voar. No entanto, independentemente 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; Taulor; Adrian, 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, 2003).

O tamanho, peso e volume dos seres e a viscosidade do meio fluido no qual estão imersos determinam a relação entre o ser e o meio. Pequenos animais, como as borboletas, voam geralmente em fluxo laminar, em que as camadas de ar se movem suavemente e de forma ordenada em torno do corpo do animal. Nessa situação, a viscosidade do ar desempenha um papel crucial. A viscosidade é uma medida da resistência de um fluido ao fluxo e afeta diretamente como as camadas de ar se movem em torno de um corpo imerso no fluido. Em termos simples, a viscosidade do ar facilita para a borboleta manter-se em suspensão, pois as camadas de ar próximas ao seu corpo se movem de maneira mais uniforme e previsível,

tornando-se mais simples manter-se em suspensão, reduzindo a turbulência e facilitando o voo. À medida que o tamanho do animal aumenta, incluindo seu volume e densidade, o padrão de fluxo ao redor dele também se modifica (veja as Figuras 16 e 17). Por exemplo, uma borboleta que fosse cem vezes maior não conseguiria voar com a mesma frequência de batimento de asas, devido às mudanças em sua interação com o meio fluido. Essa mudança no comportamento do fluxo ao redor do animal é caracterizada pelo aumento do Número Reynolds. O Número Reynolds é uma quantidade adimensional que descreve a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas em um fluido. Em termos simples, ele ajuda a determinar se o fluxo é laminar (suave e ordenado) ou turbulento (caótico e irregular). Para ilustrar, pense em colocar a mão para fora da janela durante uma viagem de carro: conforme a velocidade aumenta, você sente o ar ficar mais “firme”, o que reflete a mudança no Número de Reynolds à medida que o fluxo se torna mais turbulento. Alterar a escala, o tamanho e a forma de seu aparato de voo provocaria também um regime turbulento de locomoção, que demandaria mais potência para compensar o arraste (decorrente dos vórtices gerados pelo movimento do corpo no fluido). A alteração resultaria ainda em uma necessidade de maior velocidade e uma constituição corporal mais robusta para sustentar o voo. 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, esse entendimento desperta a atenção para possibilidades de intercâmbio entre soluções para diferentes fluidos.

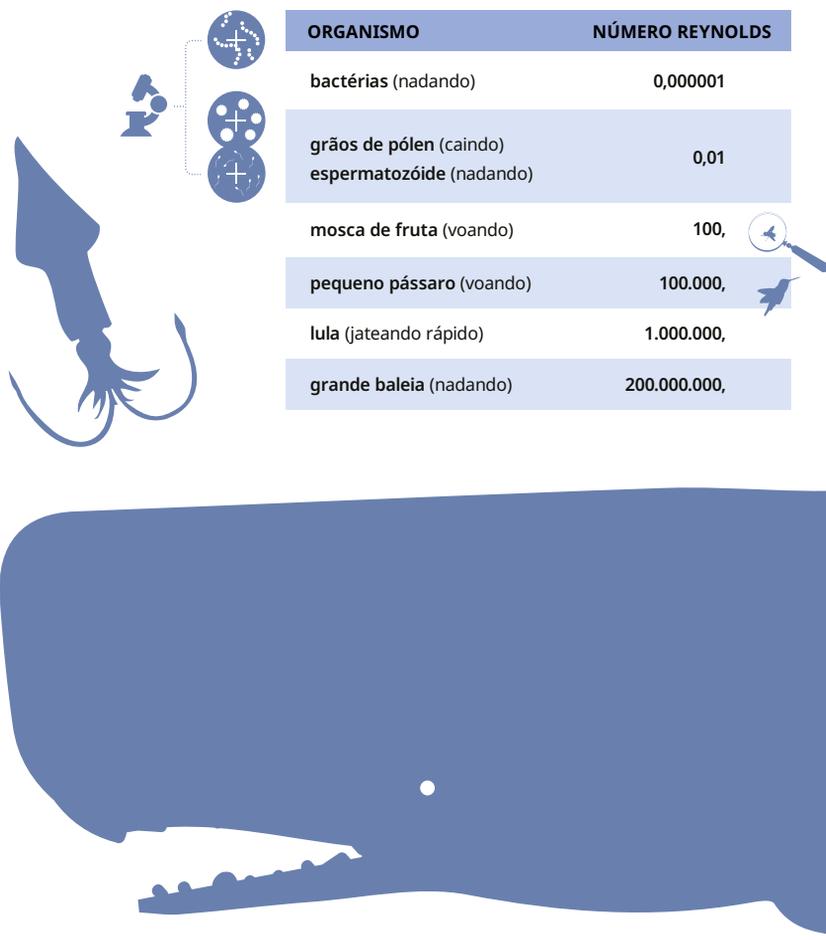


Figura 16: Valor de exemplo para o Número Reynolds de seres vivos em diferentes escalas

Fonte: elaborado pela autora a partir de ilustração cedida para o presente trabalho.²⁵

²⁵ Ilustração de Vinicius de Abreu e Carvalho.

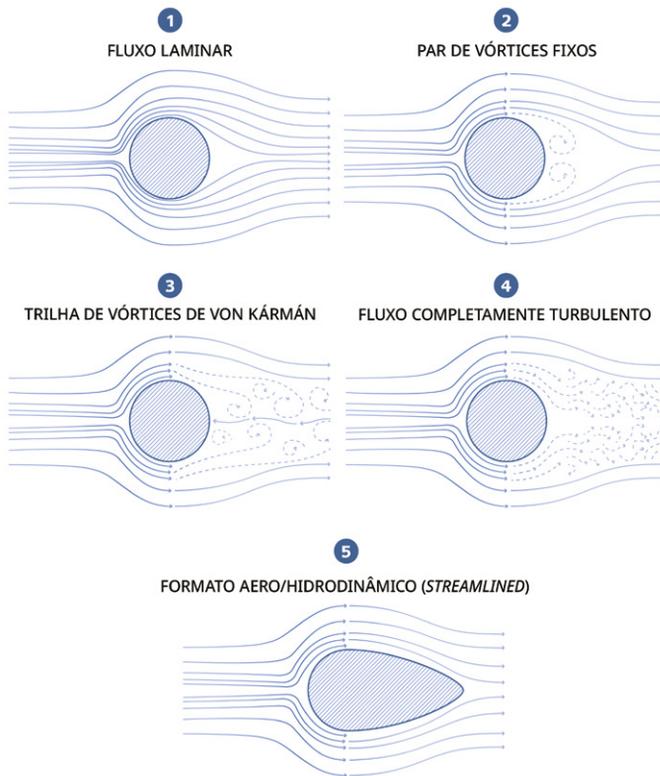


Figura 17: Regimes de fluxo e formato aero e hidrodinâmico (*streamlined*)

Fonte: elaborado pela autora a partir de ilustração cedida para o presente trabalho.²⁶

A maneira 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)

²⁶ Ilustração de Vinicius de Abreu e Carvalho.

respondem à tensão, independentemente 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 escoar, menor é sua viscosidade e mais fluido é o material. O coeficiente de viscosidade é calculado com base na força, velocidade, área e a razão de forças entre elas, adquirindo 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, principalmente na comparação de atividades análogas como voo e nado. Essas duas formas de locomoção aparentam ser absolutamente distintas em uma primeira análise, entretanto, ambas as situações tratam de um sólido imerso se locomovendo em um fluido. Através dessa compreensão foi possível que a empresa Festo desenvolvesse, por exemplo, robôs ultraleves, que voam tal como nadam as baleias, os pinguins (Figura 18a) e as arraias (Figura 18b) ou pairam no ar tal como flutuam as águas-vivas (Figura 18c). Nos exemplos de produtos bioinspirados da Figura 18, o parâmetro para construção não foi a dimensão real dos seres vivos, mas a relação entre o corpo e o fluido em que está imerso – calculados através do Número Reynolds.

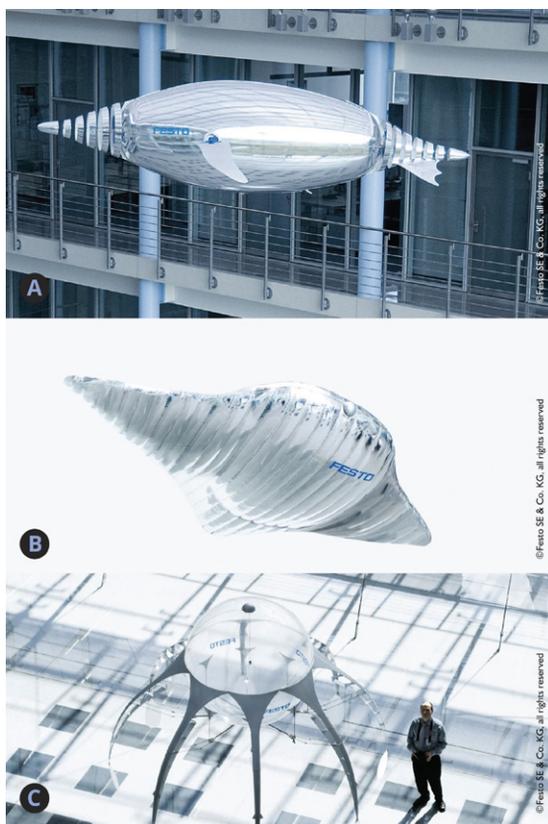


Figura 18: Robôs bioinspirados projetados pela empresa Festo

(A) Festo AirPenguin; (B) Festo AirRay; (C) Festo AirJelly.

Fonte: Divulgação Festo.²⁷

27 Imagens (A), (B) e (C) tiveram seu uso neste livro autorizado pela Festo. Disponíveis em: https://www.festo.com/br/pt/e/sobre-a-festo/pesquisa-e-desenvolvimento/bionic-learning-network/destaques-de-2006-2009/air-ray-id_33851; https://www.festo.com/br/pt/e/sobre-a-festo/pesquisa-e-desenvolvimento/bionic-learning-network/destaques-de-2006-2009/airjelly-id_33841; https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2006-to-2009/airpenguins-id_33788.

O Número Reynolds, cálculo desenvolvido por Osborne Reynolds em 1883, permite compreender o comportamento dos fluidos sem depender de um pensamento demasiadamente intrincado. Esse número indica a importância da viscosidade (quanto maior o índice, menor é a viscosidade) e seu papel relativo a outras variáveis (força, densidade, área, comprimento, velocidade e tempo). Nenhum dos dados requeridos 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 uma experiência realizada por Vogel (2003), foi necessário representar em escala reduzida os túneis construídos por um tipo de roedor, o prairie dog (cão-da-pradaria). No entanto, modificar o tamanho dos túneis e entradas de ar alteraria os regimes de fluxo de ar e, para permitir a obtenção de dados compatíveis com a realidade, foi usado um túnel que alterou as condições naturais (aumentando a velocidade do meio) de modo a obter um Número Reynolds igual ao da situação real.

3.2 Convergência

A observação da natureza revela frequentemente a presença de soluções semelhantes em diferentes espécies, indicando um desempenho (bio)mecânico eficaz em várias formas e estruturas. Uma teoria que busca explicar esse fenômeno é a Evolução Convergente. De acordo com o livro *Convergent Evolution* de George McGhee²⁸ (2011), a evolução convergente é um fenômeno amplamente observado na natureza, no qual espécies distintas desenvolvem soluções similares para desafios semelhantes. Esse conceito destaca a capacidade

28 McGhee é paleobiólogo e morfologista.

da seleção natural de moldar de forma independente características semelhantes em organismos não relacionados, em resposta a pressões ambientais compartilhadas. Um golfinho,²⁹ por exemplo, pode se parecer com um tubarão, sobretudo se estiver nadando em sua direção. Entretanto, ainda que possua corpo fusiforme e *streamlined* (hidro e 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, dentes de leite, fertilização interna, entre diversos outros. Ao contrário do que pode parecer, os traços que fazem golfinhos se assemelharem aos peixes não foram herdados diretamente desses animais, mas se desenvolveram de maneira convergente, a partir de outras estruturas comuns aos mamíferos, perdendo também ao longo desse percurso outros traços presentes em grande parte dos animais dessa subclasse, como pelos e pernas. Os golfinhos e baleias³⁰ fazem parte de um grupo de mamíferos que rumou de volta à água³¹ e encontrou nesse ambiente

29 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 nesse exemplo.

30 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 mistocetos (Subordem: *Mysticeti*) e os golfinhos são odontocetos (Subordem: *Odontoceti*). No entanto, algumas baleias como as orcas e cachalotes são, na verdade, odontocetos.

31 Cerca de 405 milhões de anos depois dos peixes.

os mesmos desafios de locomoção já enfrentados por peixes ósseos e cartilagosos e por répteis aquáticos como o *Ichthyosaurus platyodon*,³² 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 rapidamente com a ajuda de seus corpos fusiformes e da modificação de seus membros em nadadeiras (Figura 19).



Figura 19: Evolução convergente de corpos fusiformes hidrodinâmicos (*streamlined*), otimizados para o nado

Fonte: elaborado pela autora.³³

Ainda dentro dos desafios impostos pelo meio aquático, McGhee (2011) cita a transformação de membros em

32 Cerca de 230 milhões de anos depois dos peixes.

33 Imagens sob licença Creative Commons. Disponíveis em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_White_Shark_\(14730796397\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_White_Shark_(14730796397).jpg); <https://www.flickr.com/photos/7216770@No4/48020248356/>; <https://www.deviantart.com/johnson-mortimer/art/Ichthyosaur-628212459>; <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cuvier-50-Espadon.jpg>; [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Daisy_the_porpoise_\(6828030642\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Daisy_the_porpoise_(6828030642).jpg).

nadadeiras com forma de pás em diversos seres de grupos evolutivamente distantes, como pode ser visto na Figura 20.



Figura 20: Evolução convergente de nadadeiras em forma de pás, otimizadas para nado

Fonte: elaborado pela autora.³⁴

A identificação e comprovação da evolução de traços convergentes tornou-se mais simples a partir da disseminação das técnicas de decodificação genética, que permitem constatar a real proximidade (ou distância) filogenética entre indivíduos morfologicamente semelhantes (Figura 21).

³⁴ A imagem “plesiossauro (extinto)” foi gerada por ferramenta de inteligência artificial (DALL-E) e editada pela autora. Demais imagens estão sob licença Creative Commons. Disponíveis em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_White_Shark_\(14730796397\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_White_Shark_(14730796397).jpg); <https://www.flickr.com/photos/7216770@No4/48020248356>; [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_Turtle_Chelonia_Mydas_\(224075535\).jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_Turtle_Chelonia_Mydas_(224075535).jpeg); <https://www.flickr.com/photos/9464116@No8/7339354228>; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eurypterus_Smithsonian.jpg.

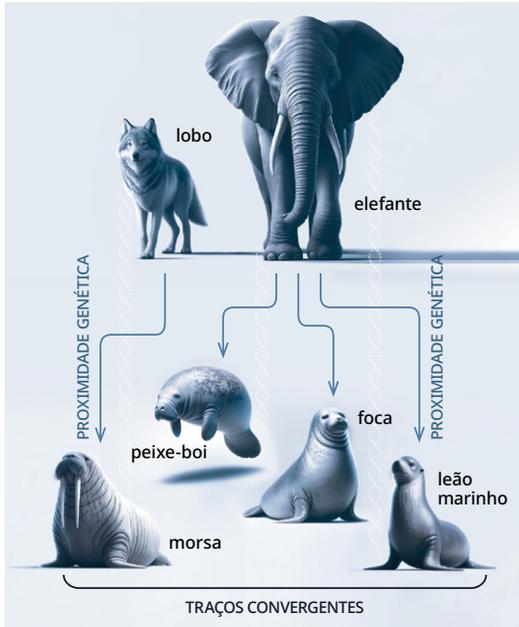


Figura 21: Traços convergentes observados em morsas e peixes-boi, espécies geneticamente distantes

Fonte: elaborado pela autora.³⁵

A convergência evolutiva não deve ser tomada sob a ótica teleológica ou funcionalista dentro da noção de que “forma segue a função”, pois, 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 existentes. Mamíferos com pescoços peculiarmente longos poderiam ter surgido em outros locais do planeta; no entanto, é provável que somente um certo

³⁵ Imagens geradas por ferramenta de inteligência artificial (DALL-E) e editadas pela autora.

grupo de indivíduos habitante das planícies africanas possuía aparato genético para tal – e combinado às pressões seletivas daquele ambiente em particular, surgiram o que conhecemos como girafas. Explica McGhee (2011) que animais com forma semelhante aos mitológicos centauros dificilmente se originaram de mamíferos, considerando que os animais dessa subclasse de vertebrados possuem somente quatro membros³⁶ locomotores disponíveis para modificações evolutivas. Portanto, de acordo com o que pôde ser observado até então, não haveria possibilidade de surgimento de dois novos membros.



Figura 22: Morfologia centauroide

(A) Ilustração de um centauro;
(B) Espécie de mantis (louva-a-deus).

Fonte: (A) se encontra sob domínio público. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_antiquities_of_Herculaneum_\(1773\)_14590988577.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_antiquities_of_Herculaneum_(1773)_14590988577.jpg); (B) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praying_mantis_india.jpg.

³⁶ Ao ler o trecho em questão é possível que você tenha se perguntado como se situam as baleias, que são mamíferos, mas não aparentam possuir quatro membros locomotores. Ao longo de milhões de anos, à medida que os mamíferos ancestrais se adaptavam à vida aquática, a seleção natural favoreceu indivíduos com corpos aerodinâmicos e capacidades de natação aprimoradas. Os membros posteriores se tornaram, então, menos necessários (ou eficientes) para a propulsão na água, resultando em uma gradual redução e culminando em estruturas vestigiais e não funcionais.

Há grupos de seres vivos, por outro lado, que possuem tal capacidade baseada em sua filogenia. Algumas linhagens de artrópodes exibem seis membros locomotores, tendo sido capazes de resultar em seres centauroides,³⁷ como o mantis, popularmente chamado de louva-a-deus (Figura 22). 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 (2011) 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.

Desde o período Cretáceo, pelo menos sete grupos de mamíferos evoluíram a capacidade de planar através de prolongamentos de membranas. Atualmente, diversos exemplos ainda são encontrados na natureza, 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 (Dermópteros, da ordem Dermoptera, mais próxima aos primatas que aos roedores), evoluíram os mesmos traços convergentes. Por

37 “Centauroide” é um termo que se refere a formas ou atributos semelhantes aos dos centauros – criaturas da mitologia grega que possuem o corpo de um cavalo e o torso de um ser humano.

fim, essa morfologia também evoluiu em marsupiais, sendo encontrada em três diferentes grupos de gambás voadores da Austrália e de algumas partes do sudeste asiático (Figuras 23 e 24).

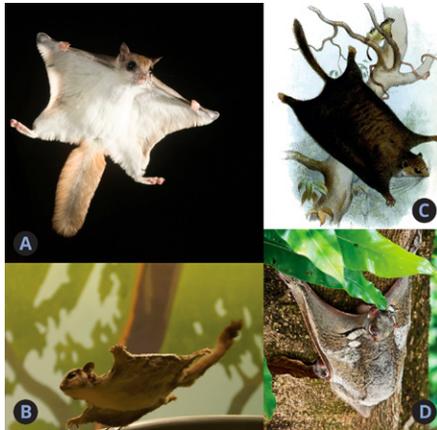


Figura 23: Evolução convergente de morfologias de planagem em mamíferos

(A) Esquilo-voador pertencente à tribo Pteromyini (família Sciuridae); (B) Petauro-do-açúcar (*Petaurus breviceps*), espécie de *opossum* planador originária do leste e norte da Austrália, da Nova Guiné e do Arquipélago de Bismarck; (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; (D) Colugo, ou lêmure-voador, é natural do sudoeste asiático e pertence à ordem Dermoptera.

Fonte: (A) foi licenciada pela autora para o presente trabalho. Disponível em: <https://www.alamy.com/southern-flying-squirrel-glaucomys-volans-voplaning-or-gliding-at-night-steering-and-balancing-with-its-tail-arizona-usa-image462230639.html>. (B) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63144901>. (C) se encontra em domínio público <https://en.wikipedia.org/wiki/File:AnomalurusPusillusSmit.jpg>. (D) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/23732062@No4/19091984902>.

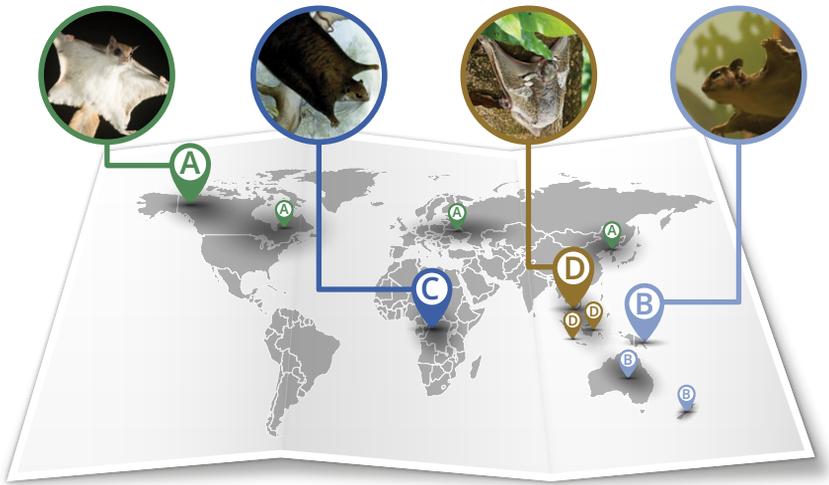


Figura 24: Distribuição geográfica de mamíferos planadores

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 (2011), a maneira “encontrada” filogeneticamente pelas espécies para operar tais mudanças. Os prolongamentos de membrana também capacitaram um grupo de anfíbios a evoluir uma morfologia planadora, como nos sapos-voadores-de-árvore, cujo processo evolutivo gerou dedos alongados para estocar as membranas (Figura 25).



Figura 25: Evolução convergente de morfologias de planagem em anfíbios

(A) Sapo-voador-de-wallace;
(B) Sapo-voador-de-wallace planando.

Fonte: (A) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=51422142>. (B) foi licenciada pela autora para o presente trabalho. Disponível em: <https://www.alamy.com/stock-photo-wallaces-abah-river-flying-frog-rhacophorus-nigropalmatus-gliding-71426079.html>.

Já nos répteis, o caminho filogenético possível para o surgimento dessas morfologias foi o do achatamento dorsoventral e alargamento lateral, como apresentado nos lagartos do gênero *Draco* (Figuras 26a e 26b) e nas cobras-voadoras-do-paráiso, pertencentes ao gênero *Chrysopelea* (Figuras 26c e 26d). Durante o voo, essa espécie de cobra exibe uma mudança considerável em sua forma, assemelhando-se a uma fita, o que a torna capaz de fazer curvas de 90°.



Figura 26: Evolução convergente de morfologias de planagem em répteis

(A) *Draco volans*, lagarto-planador do gênero *Draco*; (B) Ilustração de achatamento e prolongamento de costelas dos lagartos-planadores; (C) Serpente-voadora-do-paráiso; (D) Serpente-voadora-do-paráiso planando ao saltar de uma árvore a outra.

Fonte: (A), (B) e (C) se encontram sob licença Creative Commons. Disponíveis em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26213924>; <https://www.inaturalist.org/photos/42586960>. (D) foi licenciada pela autora para o presente trabalho. Disponível em: <https://www.alamy.com/paradise-flying-snake-chrysopelea-paradisi-sabah-borneo-malaysia-image181588234.html>.

A capacidade de planar surgiu também em dois grupos distintos de peixes, através da modificação das suas nadadeiras peitorais em formas alongadas, que são esticadas quando os peixes se lançam da água (Figura 27).



Figura 27: Evolução convergente de morfologias de planagem em peixes

(A) Peixe-voador planando ao saltar da água;
(B) Peixe-voador com dois pares de nadadeiras laterais abertas.

Fonte: (A) e (B) se encontram sob licença Creative Commons. Disponíveis em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flying_Fish_\(5800263376\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flying_Fish_(5800263376).jpg); <https://www.flickr.com/photos/therontrowbridge/8152593248>.

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 28).

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 gúelras presentes na forma larval.

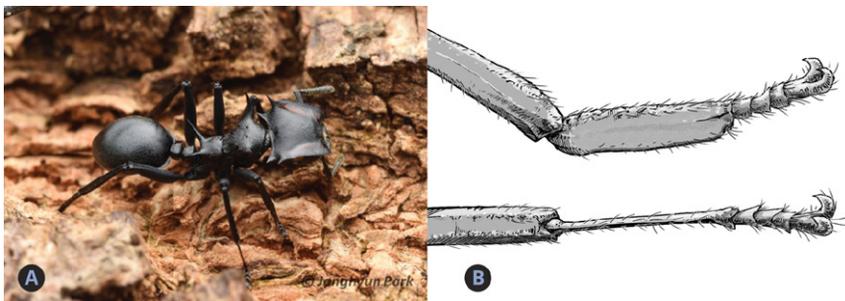


Figura 28: Evolução convergente de morfologias de planagem em artrópodes

(A) Formiga-planadora;

(B) Detalhe do formato achatado dos membros das formigas planadoras.

Fonte: (A) se encontra sob licença Creative Commons. Disponível em: <https://www.inaturalist.org/photos/102613551>. (B) detalhe do formato achatado dos membros das formigas planadoras. Ilustração de Vinícius de Abreu e Carvalho.

Grande parte dos exemplos de evolução convergente tratam de aparatos locomotórios – asas, nadadeiras, remos e, conforme pontuado por McGhee (2011), 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 exoesqueleto³⁸ 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 (2011) de “homologia profunda”. Os elos que os unem, entretanto, estão separados por milhares de anos de mutações cumulativas,

³⁸ Esqueleto externo de quitina, característico dos artrópodes.

que resultaram em estruturas elaboradas e complexas que permanecem em constante mutação.

Para reconhecer a evolução convergente, é necessário compreender cinco conceitos essenciais:

- **Sinapomorfismo**,³⁹ ou traços sinapomórficos, são características distintas herdadas de um ancestral comum e que definem o pertencimento a um determinado grupo, ou clado⁴⁰ (por exemplo, traços que definem o golfinho como mamífero). Exemplo: As penas nas aves são um exemplo de traço sinapomórfico, herdado de um ancestral comum e que define o grupo das aves;
- **Homoplasias** são características semelhantes entre dois seres vivos, mas que não foram herdadas de um ancestral comum. Há três formas através das quais os traços homoplásticos podem surgir: convergência, paralelismo e reversão (Figura 29a). Exemplo: O formato do corpo hidrodinâmico do golfinho e do tubarão é uma homoplasia, pois ambos desenvolveram essa característica independentemente para se adaptarem ao ambiente aquático.
 - **Convergência**, ou evolução convergente, se refere ao processo em que espécies diferentes desenvolvem evolutivamente características semelhantes sem que as tenham herdado de um ancestral comum. Esses traços convergentes surgem de adaptações ocorridas de forma independente e a partir de estruturas distintas (Figura 29b). Exemplo: As asas dos morcegos e dos pássaros são

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

40 Clado é um agrupamento que inclui um ancestral comum e todos os seus descendentes (vivos e extintos).

um exemplo de convergência, pois surgiram independentemente para permitir o voo em diferentes grupos de vertebrados.

- **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 29c). Exemplo: A presença de presas afiadas nos dentes de diferentes espécies de carnívoros, como os leões e os tigres, exemplifica o paralelismo, onde a modificação evolutiva ocorre em estruturas semelhantes de diferentes grupos.
- **Reversão**, ou evolução reversa, ocorre quando algum traço herdado já modificado é revertido para o traço anterior (Figura 29d). Exemplo: O reaparecimento de membros nas serpentes cegas da família Typhlopidae é um exemplo de reversão, onde uma característica perdida anteriormente é recuperada ao longo da evolução.

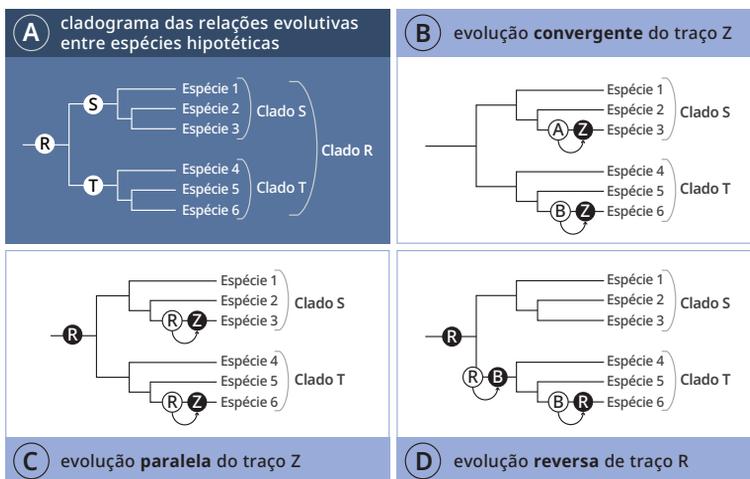


Figura 29: Cladogramas de relações evolutivas entre espécies

Fonte: elaborado pela autora a partir de McGhee (2011, p. 2-4).

A presença de soluções convergentes na natureza presume um percurso anterior de divergência em que foram geradas diversas variantes de soluções biológicas. Dessa forma, pode-se observar um arcabouço vasto de estruturas biológicas que torna afortunada a pesquisa para a biomimética.

3.3 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; 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 (2006) 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, termo criado pelo geneticista americano Sewall Wright,⁴¹ e morfoespaço teórico, criado pelo paleontólogo David M. Raup.

⁴¹ Sewall Wright, juntamente com os cientistas britânicos R. A. Fisher e J. B. S. Haldane, desenvolveu a síntese neodarwiniana da teoria da evolução em 1930.

3.3.1 Panoramas adaptativos (*adaptive landscapes*)

A metáfora do *adaptive landscape*⁴² 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 evolução da vida. O conceito propõe que a correlação entre traços genéticos⁴³ cruzados em dois eixos daria origem a um mapa de relevo com topografia composta por montanhas, picos e vales (Figura 30). Se, por exemplo, um determinado gene tivesse 10 alelos (repetidos nos eixos x e y), haveria 100 possíveis combinações entre eles. Entretanto, a maioria das 100 possíveis combinações não existe na natureza, sendo encontradas apenas cerca de 10 das opções. Ou seja, há 90 possibilidades que potencialmente poderiam existir, mas isso não acontece. Assim, Wright propôs que essas 90 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,

42 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. Essa 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. 11).

43 O conceito foi inicialmente proposto por Wright, sendo relacionado aos traços genéticos e chamado originalmente *fitness landscape*. O mesmo conceito é utilizado por geneticistas, baseando-se em traços gênicos (chamado *fitness landscape*), e por morfologistas, baseando-se em traços morfológicos (chamado *adaptive landscape*).

enquanto a adaptação zero seria representada pela planície e pelos vales ao nível de altitude zero) (McGhee, 2006).

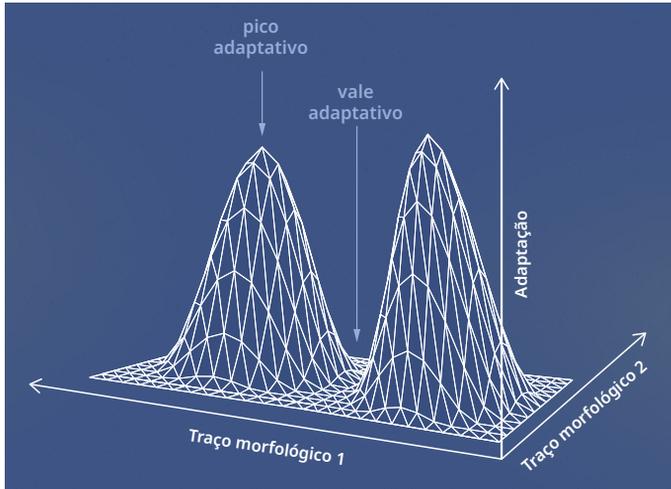


Figura 30: Ilustração do conceito de panoramas adaptativos (*adaptive landscapes*) proposto por McGhee (2006)

Fonte: elaborado pela autora.

Como morfologista, McGhee (2006) utiliza o conceito de *adaptive landscape* para conduzir a análise. O grau de adaptação dos possíveis traços morfológicos seria determinado pela análise funcional das formas potenciais (Figura 31). O arranjo geométrico dos picos no mapa representaria então duas possíveis formas de vida disponíveis para os organismos analisados, enquanto as planícies e vales representam morfologias não funcionais.

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 31).

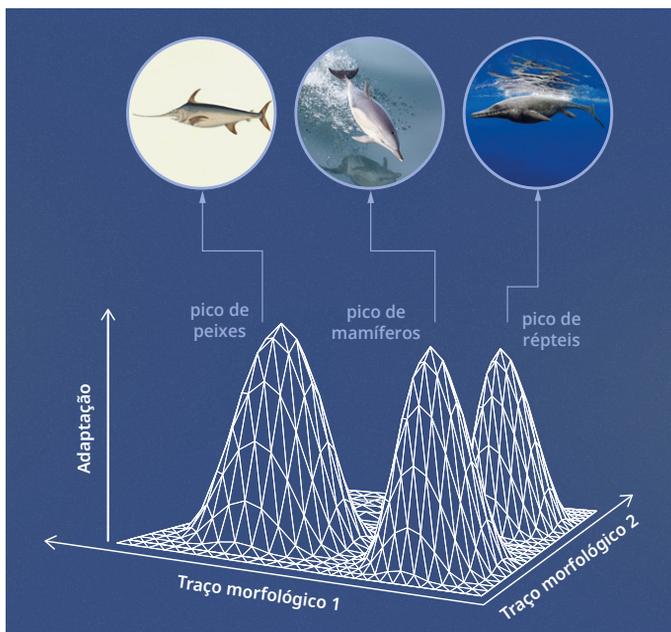


Figura 31: Ilustração dos conceitos de panoramas adaptativos e evolução convergente em espécies aquáticas, baseada em McGhee (2006)

Fonte: elaborado pela autora.⁴⁴

44 Imagens sob licença Creative Commons. Disponíveis em: <https://www.flickr.com/photos/7216770@N04/48020248356>; <https://www.deviantart.com/johnson-mortimer/art/Ichthyosaur-628212459>; <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cuvier-50-Espadon.jpg>.

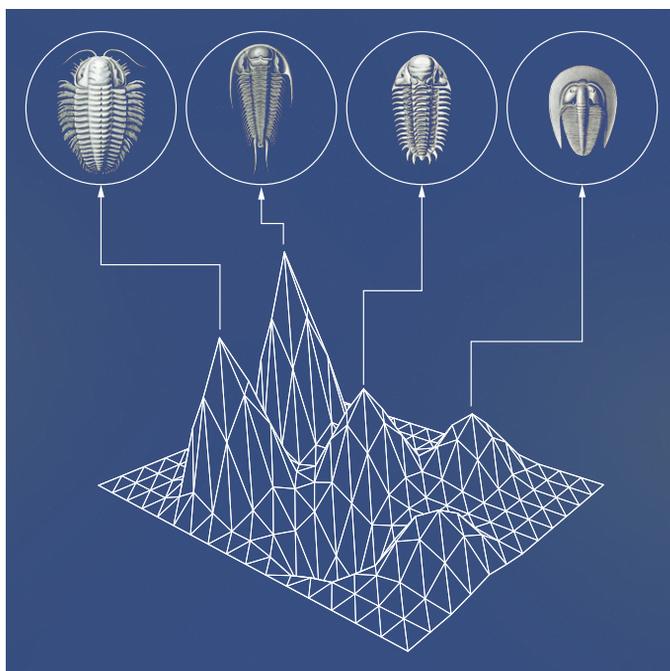


Figura 32: Ilustração dos conceitos de panorama adaptativo da evolução dos trilobitas (artópodes marinhos paleozóicos) baseada em McGhee (2006)

Fonte: elaborado pela autora.⁴⁵

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

⁴⁵ Imagens sob domínio público. Disponíveis em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Haeckel_Aspidonia.jpg.

(ainda que lentas e graduais) mudanças. Dentro desse 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 (McGhee, 2006).

3.3.2 Morfoespaços teóricos (*theoretical morphospaces*)

O segundo conceito, de *theoretical morphospace*, é definido por McGhee (2006) 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 33 traz o exemplo gerado através de simulação computacional de objetos em forma de concha. Através da variação de dois parâmetros: taxa de expansão da espiral⁴⁶ e número de translações, podem-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).

46 Apesar de a espiral remeter quase instantaneamente às conchas de moluscos, as formas helicoidais têm ocorrência ubíqua na natureza, por exemplo o próprio DNA – observação frisada por McGhee (2006). 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) (2007, p. 176-177).

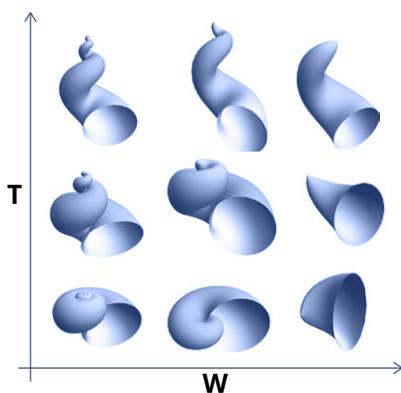


Figura 33: Representação de morfoespaço teórico simulando possíveis variações de formas de conchas

O eixo W representa a taxa de expansão da espiral da concha e o eixo T representa sua taxa de translação.

Fonte: elaborado pela autora utilizando a ferramenta criada por Contreras-Figueroa, G; Aragón, J. L. A.⁴⁷

Utilizando esse quadro de possibilidades formais para conchas, elaborado em dois eixos, é possível compor um diagrama de montanhas e vales, semelhante ao dos *adaptive landscapes*. Nesse 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 que ainda não ocorreram, mas são possíveis, quanto as de ocorrência

⁴⁷ Disponível em: <https://github.com/jlaragonvera/Mathematica-Notebooks>.

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 delas abre a discussão sobre as restrições evolucionárias (Figura 34).

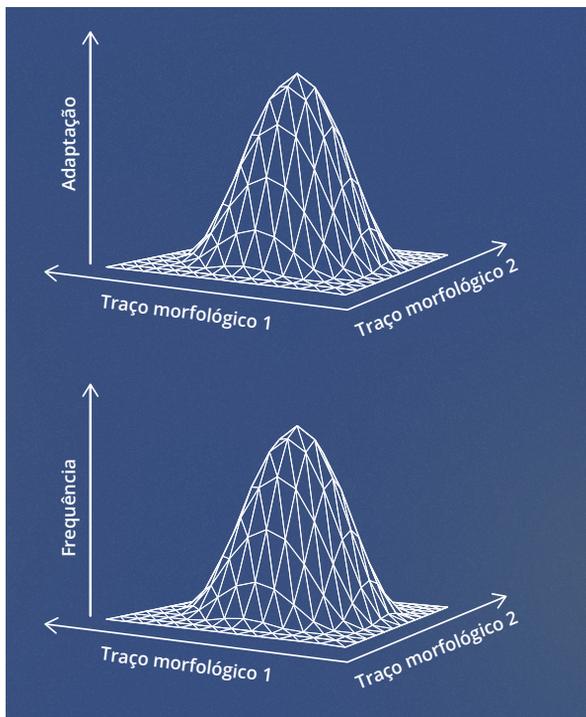


Figura 34: Ilustração dos conceitos de panorama adaptativo (acima) e morfoespaço teórico (abaixo), baseada em McGhee (2006)

Fonte: elaborado pela autora.

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 (2006), grande parte da riqueza da análise dos morfoespaços teóricos reside exatamente nos espaços vazios que eles evidenciam. Qual seria a razão para que não haja (ou tenha havido) ser vivo com determinadas formas? A resposta para essa questão envolve as limitações que permeiam a existência dos seres vivos, sendo as principais de duas naturezas distintas: as evolucionárias⁴⁸ e as filogenéticas. Através da elaboração dos diagramas, podem-se constatar relações vantajosas e desvantajosas entre as variáveis e inferir o sucesso (ou fracasso) de cada conjunção em particular.

Também de modo diferente dos panoramas adaptativos, os morfoespaços teóricos não dimensionam o grau de adaptação de cada solução individualmente. As montanhas formadas no gráfico representam, portanto, a ocorrência da forma na natureza, enquanto os planos no nível zero podem representar tanto as formas pouco eficientes (e, conseqüentemente, selecionadas negativamente) quanto as formas que ainda não surgiram (devido a restrições desenvolvimentais, por exemplo).

Um trabalho na área publicado por Ellison e Niklas (1988 *apud* McGhee, 2006) desenvolveu através de simulação computacional um morfoespaço teórico de plantas hipotéticas, no qual duas dimensões morfológicas foram correlacionadas: a probabilidade de um galho continuar a crescer *versus* a

⁴⁸ Limitações evolucionárias, também chamadas de limitações desenvolvimentais, arquitetônicas, fabricacionais, construtivas, ontogenéticas e morfogênicas.

probabilidade de se bifurcar.⁴⁹ Esse morfoespaço teórico foi posteriormente ampliado a partir da adição de 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 hipotéticas mais eficientes (e provavelmente mais prevalentes) de plantas com base na geometria em função de suas demandas e propriedades biológicas.⁵⁰

Outro trabalho, elaborado por Karl J. Niklas⁵¹ (1997 *apud* McGhee, 2006), avaliou o posicionamento das folhas de plantas nos galhos em relação umas às outras⁵² através dos *theoretical morphospaces*, transformados em *adaptive landscapes* pela adição da dimensão/eixo “eficiência energética” (Figura 35). 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 desse 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

49 Ver MCGHEE, G. R. **The Geometry of Evolution: Adaptive Landscapes and Theoretical Morphospaces**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, p. 83.

50 Ver MCGHEE, G. R. **The Geometry of Evolution: Adaptive Landscapes and Theoretical Morphospaces**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, p. 87.

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

52 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.

(137,5°) 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 indicada lhes confere apenas uma ligeira vantagem, não se tornando especialmente prevalente ao longo de gerações como no caso anterior.

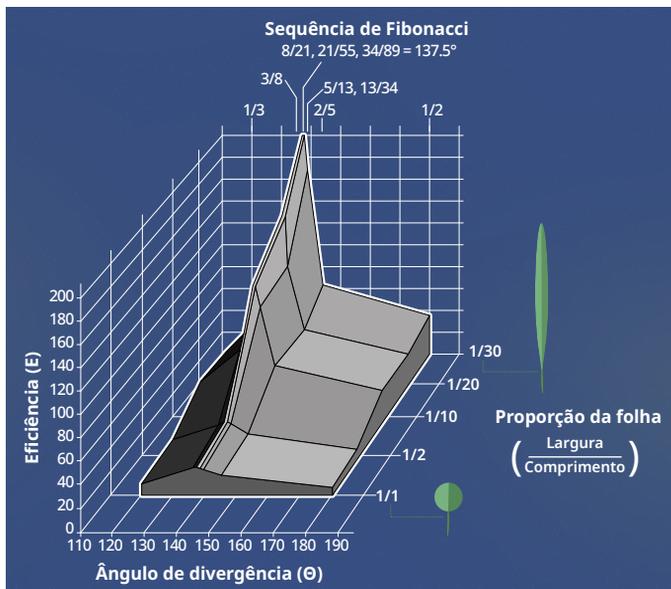


Figura 35: Ilustração do morfoespaço teórico elaborado por Karl J. Niklas, relacionando a distribuição das folhas e suas proporções em diversas espécies

Fonte: elaborado pela autora.

3.4 Limitações, viabilidade e convergência como fatores-chave

A viabilidade dos seres vivos está 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 exibem um número muito elevado de “soluções” para diversos desafios. A análise ampla desse quadro aponta o fenômeno da convergência evolutiva, potencialmente enriquecedor para a biomimética.