

Maria Daniela Candia Carnevali

M. Daniela Candia Carnevali si è laureata con lode in Scienze Biologiche nel 1973. Ha svolto da allora attività didattica e di ricerca presso la Facoltà di Scienze (ora Facoltà di Scienze e Tecnologie) dell'Università degli Studi di Milano. Dal 2000 è Professore Ordinario del Settore BIO/05 - Zoologia ed è attualmente docente di Biologia e sistematica animale (Laurea Triennale in Scienze Biologiche) e di Biomeccanica (Laurea Magistrale in Biodiversità ed Evoluzione Biologica) presso la stessa università. È anche membro del Collegio docenti della Scuola di Dottorato in Scienze Ambientali e supervisore di tesi di Dottorato e di Master in Italia e all'estero. E' stata per diversi anni docente ed organizzatore dell'Experimental Developmental Biology Course in Marine Invertebrates, Station Biologique de Roscoff. Ha rivestito numerose cariche accademiche presso l'Università di Milano, fra cui quelle di Prorettore vicario (2012-2018), di Direttore del Dipartimento di Biologia, di Presidente del Collegio Didattico in Scienze Biologiche, di Coordinatore della Laurea Magistrale in Biodiversità ed Evoluzione Biologica. E' stata inoltre Presidente del Collegio dei Biologi delle Università Italiane (CBUI). E' responsabile scientifico del gruppo di ricerca sulla Biologia degli invertebrati marini del Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali. Ha al suo attivo più di 200 pubblicazioni su riviste internazionali e nazionali. In termini di attività scientifica è stata: Presidente del Consiglio Scientifico del Centro di Ricerca Interdipartimentale ADAMSS (Advanced and Applied Mathematical and Statistical Sciences) dell'Università di Milano; Invited speaker e chairman a numerosi congressi e simposi internazionali e nazionali; Organizzatore del 5th European Conference on Echinoderms,

Milano 1998 ed Editor del relativo volume "Echinoderm Research 1998" (Balkema, Rotterdam); Organizzatore del II Meeting Europeo COMPRENDO, Gargnano 2003; Editor e coautore del volume: "The biology of echinoderm regeneration" (Micr.Res.Tech. 55, 2001); coautore, insieme a Carmelo Di Bartolo e ad altri, del volume "Ripensare il Design" (Tecnica Nuove, 1997); membro del Comitato scientifico di congressi nazionali ed internazionali; revisore di articoli scientifici per numerose riviste internazionali. E' risultata vincitrice del premio nazionale Henry Ford Conservation Awards 1999 con il progetto: "Environmental stress, endocrine disruptors and regenerative phenomena in marine invertebrates". E' stata responsabile di programmi di ricerca finanziati dalla Comunità Europea e dal MIUR, nonché dall'Ateneo di Milano e dal CNR, e di progetti di scambio internazionali. L'attività scientifica di M. Daniela Candia Carnevali si è focalizzata prevalentemente sullo studio a) della biologia funzionale degli Invertebrati (Artropodi, Echinodermi, Poriferi), e b) della biologia rigenerativa e riproduttiva (Echinodermi), affrontati con approccio integrato morfologico, fisiologico e biomeccanico biochimico, molecolare. Le ricerche più recenti relative a questi stessi ambiti e processi si sono rivolte anche agli effetti dell'impatto ambientale sugli organismi e sui promettenti risvolti applicativi dell'approccio di tipo biomimetico. E' attualmente impegnata in numerose collaborazioni con gruppi internazionali e nazionali fra cui spicca la proficua collaborazione trentennale con Iain C. Wilkie (Glasgow University, Scotland, UK).



I “Brevetti” della Natura: Design, Tecnologia ed Ecosostenibilità

Maria Daniela Candia Carnevali | daniela.candia@unimi.it



“L'ingegno umano mai troverà invenzione più bella, né più facile né più breve della natura, perché nelle sue invenzioni nulla manca e nulla è superfluo.”

Leonardo da Vinci

[INTRODUZIONE]

Quando, nella seconda metà degli anni '80 ho incontrato per la prima volta Carmelo di Bartolo, non avevo un'idea chiara di cosa fosse esattamente la bionica, e men che meno la biomimetica (terminologia che oggi si preferisce utilizzare, pur non trattandosi di sinonimi). Da sempre, come mio interesse di ricerca, studiavo le strutture animali da un punto di vista morfo-funzionale e biomeccanico, ma non mi era mai sfiorata l'idea di possibili ricerche applicative in cui il modello animale potesse diventare ispirazione per la realizzazioni di progetti di tecnologia e design (Fig. A). L'incontro “fatidico” fra le due prospettive complementari, della biologia e del design industriale, è avvenuto grazie all'intermediazione del comune amico e collega Marco Ferraguti, che, conoscendo bene gli specifici interessi sia miei che di Carmelo, aveva ritenuto quanto mai opportuno metterci in reciproco contatto, creando le circostanze favorevoli all'incontro. E' stata una specie di “colpo di fulmine”: sono infatti bastati pochi minuti di conversazione perché entrassi in perfetta sintonia con Carmelo (in quel momento a capo del Centro Ricerche Strutture Naturali dell'Istituto Europeo di Design - Fig. B) e, per quanto riguarda l'approccio bionico, perché mi rendessi conto che si trattava di un modo di studiare la natura insito nell'approccio forma-funzione che da sempre utilizzavo nelle mie ricerche!

A questo primo incontro ne sono seguiti molti altri, in cui sono state poste le premesse per una proficua collaborazione, sia sul fronte didattico che su quello della ricerca, che ha comportato la mia convinta e attiva partecipazione come docente a corsi di Master e a moduli di esercitazioni o lab-meeting con gli studenti di bionica del C.R.S.N., nonché a sedute di discussione relative al lavoro di ricerca per possibili tesi da co-tutorare. Devo dire che da questi intensi momenti di *brain-storming* comuni sono scaturite idee, progetti e prospettive e, per quanto mi riguarda, soprattutto consapevolezza di possedere un bagaglio di conoscenze e strumenti di grandissimo potenziale per ricerche nuove e concrete di tipo applicativo.

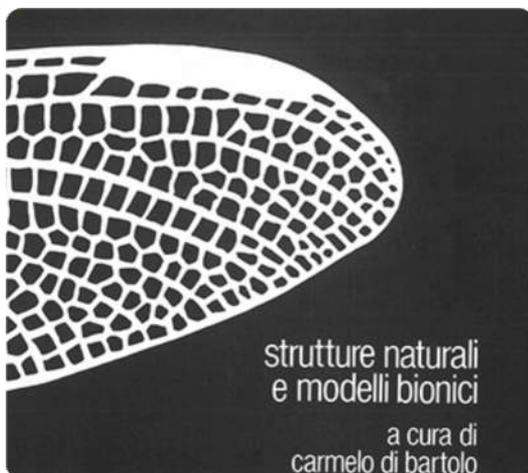


Figura A. Immagine dalla mostra-rassegna 50 anni di IED, 2017



Figura B. Dettaglio dalla copertina di: Design Come, n.3, IED 1984



E' stato in occasione di alcune mie lezioni agli studenti di Master che ho fatto la conoscenza di Amilton Arruda e che è nato il suo interesse per il modello dell'apparato boccale del riccio di mare (lanterna di Aristotele) che, in quel momento storico, rappresentava il "cavallo di battaglia" delle mie specifiche ricerche di carattere morfo-funzionale e biomeccanico (Fig. C). Questo spiccato quanto lusinghiero interesse in effetti si è sviluppato in forma di uno *stage* di alcuni mesi che Amilton ha effettuato presso il mio laboratorio, al Dipartimento di Biologia dell'Università degli Studi di Milano, e che è sfociato nella realizzazione in materiale sintetico di un macro-modello di ricostruzione dello scheletro della lanterna scomponibile in tutti i suoi pezzi e di grande effetto ed efficacia sotto il profilo didattico (Fig. D).

In seguito alla donazione da parte dell'Autore, il modello originale è poi diventato patrimonio storico del mio laboratorio e viene tutt'oggi utilizzato per le esercitazioni pratiche agli studenti di biologia. Sulla scia della positiva esperienza fatta e dell'amicizia e della stima reciproche alimentate nel tempo, la collaborazione con Carmelo è proseguita con entusiasmo reciproco anche con altri progetti: un concreto e "visibile" risultato di successo è stata la realizzazione del volume *Ripensare il Design* (Tecniche Nuove, 1997 - Fig.E) di cui ho avuto l'onore di essere coautore e in cui ho potuto riportare la mia esperienza e prospettiva di biologo animale allo studio di forma e funzione, con ampi specifici riferimenti ai miei studi sulla lanterna di Aristotele (Fig. C).

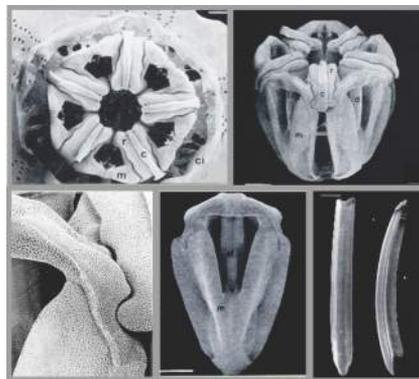


Figura C. Struttura scheletrica della lanterna di Aristotele del riccio di mare. Micrografie al SEM. Dall'alto: visione aborale; visione laterale; dettaglio di un'articolazione; mascella isolata; dente isolato di fronte e di lato. (c: compasso; r: rotula; m: mascella; d: dente; ci: cintura).

Ma la storia della lanterna di Aristotele, capolavoro di design naturale e oggetto di studio da oltre 2000 anni!, non finisce certo qui e continua ad intrecciarsi ancora con la bionica, anzi con la biomimetica e con studi interdisciplinari in cui Carmelo ed io siamo direttamente o indirettamente coinvolti: in particolare, in tempi recenti, il modello scheletrico, oltre che da svariati altri autori che ne hanno rianalizzato le caratteristiche geometrico-matematiche, è stato ripreso per ulteriori studi mecano-strutturali da Valentina Perricone (vedi capitolo in questo volume) per la sua tesi di Dottorato, che costituisce dunque un ulteriore anello alla catena di fortunate occasioni e coincidenze in cui Carmelo di Bartolo ed io abbiamo avuto l'opportunità di incontrarci, e ri-incontrarci a distanza di anni, e interagire sinergicamente.

E' stato dunque con grande piacere che, cogliendo l'invito a partecipare a questo volume, dedico questo mio contributo all'amico Carmelo, come omaggio alla sua mente eclettica, al suo spirito innovativo e alla sua passione per la natura. Il testo qui proposto, che non ha la pretesa di essere un testo scientifico a contenuto originale, ma mantiene un'impostazione di tipo didattico e divulgativo, offre una visione d'insieme delle meraviglie del regno animale e, in particolare, di modelli animali già sfruttati per applicazioni di successo o proponibili in futuro per studi integrati di biomimetica.



Figura D. Pezzi del modello di lanterna di Amilton Arruda



Figura E. Copertina del volume Ripensare il Design



[I "BREVETTI" DELLA NATURA: DESIGN, TECNOLOGIA ED ECOSOSTENIBILITÀ]

[L'APPROCCIO BIOMIMETICO]

Da sempre la natura, con le sue sorprendenti e infinite invenzioni, ha offerto all'uomo infiniti stimoli per ricerche di base o applicate. L'approccio del *learning from nature* è un modo di studiare la natura che ha una tradizione molto antica, e che è stato recentemente riscoperto e rilanciato grazie alle sue ricadute applicative in vari campi della tecnologia (Bar-Cohen, 2005). Si tratta di un metodo che, studiando gli organismi nei loro svariati adattamenti morfo-funzionali, si sposa da sempre idealmente con l'approccio dell'ingegnere e del designer: e, difatti, ci sono diversi e importanti storici esempi di proficui connubi interdisciplinari fra questi diversi punti di vista e relativi approcci.

La natura, animata o inanimata, può essere un'inesauribile fonte di ispirazione per l'innovazione: in particolare gli organismi viventi costituiscono un universo ancora largamente inesplorato di modelli straordinari e ben collaudati, che presentano a tutti i livelli, dal microscopico al macroscopico, soluzioni avanzate da prendere come spunto per possibili applicazioni tecnologiche d'avanguardia (Bhushan, 2012). Se, dunque, il metodo è vecchio come il mondo, la *biomimetica* è stata però solo recentemente riconosciuta come una moderna disciplina scientifica a sé stante che studia i modelli della natura per imitarne e applicarne le soluzioni nei più svariati campi.

Nel 1997 Janine Benyus ha portato alla ribalta il tema della biomimetica, nonché il termine (in inglese *biomimetics* o *biomimicry*), in occasione della pubblicazione del suo bestseller *Biomimicry. Innovation Inspired by Nature*. Nel libro viene sottolineato come la natura, con la sua estrema creatività, abbia trovato brillanti soluzioni, in termini di forme, prestazioni funzionali, processi e sostenibilità, a molti dei problemi con cui l'uomo è attualmente alle prese, e definisce la biomimetica come la cosciente imitazione del genio della natura. Viene affermato che la biomimetica è lo studio consapevole dei processi biologici e biomeccanici della natura, come fonte di ispirazione per il miglioramento delle attività e tecnologie umane; è la natura vista come *modello, misura e guida* per la progettazione di artefatti tecnici; è la natura intesa come una riserva di conoscenze, informazioni, e ispirazioni, e non come un serbatoio di risorse da cui attingere: "è un nuovo modo di vedere e valutare la natura basato non su cosa ne possiamo estrarre ma su cosa possiamo imparare da essa". Viene inoltre spiegato come ci siano almeno tre diversi tipi di approccio biomimetico: il primo consiste nell'imitare forme e strutture, il secondo nell'imitare processi, il terzo nell'imitare sistemi complessi, in particolare a livello ecosistemico: "se la teoria del caos ha trasformato la nostra visione dell'universo, la biomimetica sta trasformando la nostra vita sulla Terra. La biomimetica è innovazione ispirata dalla natura che, in termini di R&D, si avvantaggia di 3,8 miliardi di anni di evoluzione a partire dai primi batteri" (Benyus, 1997).

L'approccio biomimetico è per sua natura interdisciplinare: richiede l'indispensabile contributo di varie competenze scientifiche ben integrate fra loro e dei relativi metodi. Gli innumerevoli modelli di sistemi e meccanismi naturali devono essere studiati a 360°, in modo il più possibile integrato, mettendo il più possibile in campo le competenze dei fisici e degli ingegneri, che dispongono delle conoscenze di tipo tecnico-scientifico, con quelle dei biologi che, possiedono le basilari conoscenze della realtà organismica, ma in genere non ne comprendono gli aspetti squisitamente tecnici e non ne intuiscono i possibili vantaggi applicativi. Le competenze biologico-naturalistiche sono comunque primarie e irrinunciabili: la curiosità, l'osservazione attenta dei fenomeni e un puntuale e preciso metodo descrittivo-interpretativo sono infatti requisiti essenziali per questo approccio e sono caratteristiche che fanno parte del bagaglio di competenze del biologo. I biologi sono abituati a osservare, a cogliere e a descrivere gli aspetti della realtà che possono essere importanti per l'interpretazione dei fenomeni, cercando di capire come sono fatte le diverse strutture (qualunque sia il livello, macroscopico o microscopico in cui viene fatta l'osservazione), quali sono i loro ruoli e le funzioni che svolgono nel contesto dell'organismo, cioè della macchina biologica (Vogel, 1988).

[BIODIVERSITÀ E BIOMIMETICA]

Il complesso degli organismi viventi si presenta come un'immensa congerie di diversità e varietà di forme che offrono innumerevoli spunti agli studi biomimetici. Il termine *biodiversità*, che è oggi molto utilizzato anche dai media, definisce la grande diversità degli organismi viventi - che vanno dai batteri agli organismi pluricellulari complessi, come gli animali e le piante - e rappresenta il prezioso patrimonio "vivente" della natura.

In termini di numerosità di specie, e quindi di "ricchezza", gli animali rappresentano la stragrande maggioranza dei viventi: fra questi i cosiddetti *invertebrati* rappresentano più del 90% (Barnes et al., 1990); i *vertebrati* (tra cui anche l'uomo) sono, invece, percentualmente una parte assai meno rilevante del regno animale. La cosa importante, quando si studiano gli organismi, è cercare di capire questa diversità di forme, ricostruirle e darne una chiave interpretativa il più possibile completa e corretta che tenga conto di criteri funzionali, ecologici e storico-genealogici, cioè evolutivi. La diversità dei viventi si esprime non soltanto a livello di intero organismo, ma a tutti i livelli di



organizzazione dell'organismo stesso (Candia Carnevali, 1997): dal livello molecolare a quello di strutture subcellulari, di cellule, di tessuti, di organi, di apparati. A tutti questi livelli di organizzazione, differenti ma concatenati e integrati secondo una scala gerarchica progressiva, la biodiversità si manifesta in tutti i suoi molteplici aspetti: per motivi pratici, però, non è solitamente possibile studiarla contemporaneamente a tutti questi diversi livelli in quanto sono necessarie competenze molto diverse e, ovviamente, anche metodi di studio e strumentazioni appropriate.

Gli aspetti in cui si esprime la biodiversità sono molteplici e apparentemente infiniti: comprendono, in particolare, strutture e funzioni sempre correlate ad altrettanti *adattamenti* (Burnett, 1964). In generale, più la funzione è specializzata, più risulta adattata alla sua funzione: pertanto gli adattamenti più spinti sono quelli che possono presentare delle soluzioni innovative di alta "tecnologia" che si propongono come vere e proprie "invenzioni" della natura e si prestano ad essere validamente "copiate" e sfruttate in svariati ambiti applicativi, primo fra i quali quello oggi assai fertile della robotica (Bar-Cohen, 2005). A seguito del progresso delle conoscenze sui sistemi naturali, l'imitazione biomimetica dei modelli naturali trova attualmente grandi potenzialità applicative anche a livello micro- e nano-strutturale, e ha fatto passi da gigante grazie alla possibilità di usufruire di software molto potenti e di realizzare tecnologie sempre più sofisticate e complesse (per esempio con l'impiego di stampanti 3-D, ecc.).

I campi di studio della biomimetica sono davvero numerosi e cercano risposte a fenomeni e a problemi con cui abbiamo a che fare tutti i giorni. Esistono molti esempi conosciuti che sono frutto di queste applicazioni biomimetiche. Uno dei modelli storici più noti è il *velcro* (Coineau & Kresling, 1989), un dispositivo assai semplice e utilizzato ampiamente per applicazioni diversissime, per l'appunto ispirato da un organismo vegetale, la bardana: vale la pena sottolineare che, come accade in tutti i casi di modelli biomimetici anche avanzati, al di là del successo del velcro e dei suoi molteplici utilizzi pratici, risulta ben chiaro che la struttura naturale resta comunque molto più efficiente, resistente ed elastica rispetto a quella artificiale.

[DIVERSITÀ E UNITARIETÀ]

Si è già detto che, fra le infinite specie di organismi viventi, gli animali sono la maggioranza, arrivando grossomodo ad essere intorno al paio di milioni di specie descritte: un panorama di diversità assai complesso e difficile da mettere insieme in un quadro interpretativo unitario. In realtà la variabilità così appariscente non è caotica e bizzarra, ma "ordinata": ci sono infatti dei temi unificatori fondamentali, come il fatto di a) avere strutture e funzioni di base che accomunano tutti gli organismi animali, e b) avere modalità di trasferimento dell'informazione ereditaria alla discendenza secondo una relazione parentale storica (Gould, 2002). Ciò mette in relazione tutti gli organismi, non solo gli animali, secondo una genealogia comune da cui si evince che non ci sono elementi di discontinuità, perchè in realtà tutto è correlato da una parentela. Questa genealogia comune si esprime negli alberi filogenetici, che sottolineano la parentela evolutiva, e illustrano, utilizzando metodi diversi, l'affinità tra i diversi gruppi, mostrandone i dettagli a seconda della scala. Il motivo unificatore di questa parentela è rappresentato dal *programma*, intrinseco all'organismo e codificato nel DNA, che viene trasmesso di generazione in generazione; una proprietà della vita simile al programma di un computer che contiene tutte le informazioni riconducibili a tutte le strutture e le funzioni di un organismo. Al di là delle differenze nelle parti più specifiche del programma, tutti gli organismi condividono il fatto di possedere il DNA, che è una caratteristica dominante della vita. Questo programma non solo dirige la realizzazione del progetto, sia in termini di strutture che di funzioni; ma è anche il responsabile della modificazione storica che è alla base della variabilità e della diversità dei viventi, e cioè è il responsabile del processo evolutivo. Se questi sono i principi dell'unitarietà degli animali, la loro diversità si esprime in una vistosa varietà di differenti forme, caratterizzate da diversi stili di vita e habitat, e da differenti specializzazioni strutturali e funzionali ad ogni livello di organizzazione.

La biodiversità è stata realizzata, nel corso di milioni e milioni di anni, dall'evoluzione che l'ha testata e collaudata attraverso il processo di selezione naturale: in termini di risultato, questa si manifesta con un continuo processo di adattamento delle successive generazioni al proprio ambiente e al proprio stile di vita. Questo concetto è il contenuto centrale del pensiero darwiniano. In un passo significativo dell'*Origine delle Specie* (abbozzo del 1842) Darwin dice: "*in un modo così semplice, attraverso questo processo di selezione graduale di piccoli cambiamenti si sono evolute infinite forme di stupenda bellezza*". Nel processo evolutivo gioca dunque un ruolo fondamentale l'ambiente, attraverso la selezione naturale: l'ambiente, le cui caratteristiche cambiano nel tempo in modo imprevedibile, seleziona, cioè sceglie, le varianti di volta in volta più adeguate. Modificazioni minime e trasmissibili delle caratteristiche ereditarie portano all'affermarsi di organismi sempre diversi grazie alla selezione naturale, a patto che questi risultino adatti alle specifiche condizioni ambientali in cui si trovano a vivere. Il processo di trasformazione, e cioè il processo evolutivo, è sempre in atto e, appunto, porta alla modificazione graduale della discendenza, premiando gli individui più "adatti" con un maggior successo riproduttivo (Gould, 2002; Mayr, 1976).



[LA BIODIVERSITÀ ANIMALE]

Lo studio degli animali e delle loro specializzazioni risale all'antichità ed offre sempre nuovi stimoli di ricerca. Non si può non convenire con Richard Dawkins quando, nel suo best seller *The Selfish Gene*, afferma: "gli organismi animali sono le macchine più complicate e piu' perfettamente disegnate dell'intero universo conosciuto....quindi, con questa premessa, è difficile capire come si possa voler studiare qualche altra cosa". Gli animali hanno due aspetti fondamentali che li contraddistinguono dagli altri viventi: da una parte sono eterotrofi, cioè dipendenti dal punto di vista della nutrizione. Questo aspetto potrebbe farli sembrare svantaggiati e non autonomi rispetto agli organismi vegetali: ma è proprio perché, dipendono da altri organismi per le loro esigenze nutritive, e cioè devono mangiare!, che sviluppano la seconda e formidabile caratteristica distintiva, e cioè si muovono attivamente. Il movimento, che va visto pertanto come una caratteristica animale fondamentale, si presta a infinite varianti, che rappresentano altrettante manifestazioni della biodiversità.

Negli animali possiamo studiare la biodiversità a tutti i livelli e in ciascuno di questi livelli trovare degli spunti per fare studi appropriati. A qualunque livello venga fatta l'analisi, il tema unificatore deve rimanere comunque l'organismo, che rappresenta la chiave di lettura per estrapolare delle corrette interpretazioni di tipo morfo-funzionale, adattativo ed evolutivo. Un approccio integrato appropriato guarda all'animale dal punto di vista della sua morfologia costruzionale, cioè nella sua complessa architettura e nelle sue analogie di funzionamento con una macchina. In questo senso un animale viene inteso come un sistema chiuso, nella sua coerenza di tipo chimico-fisico, nella sua stabilità strutturale, e nella sua dinamicità che possiamo anche chiamare auto-mobilità.

[ADATTAMENTO E BIOMIMETICA]

Fondamentalmente, guardando un organismo, abbiamo la tendenza a cercare una rispondenza fra le sue necessità funzionali e i suoi aspetti anatomici. Abbiamo sottolineato che da una parte ci sono aspetti di unitarietà fra gli organismi, dovuti al fatto di avere una serie di aspetti comuni; dall'altra parte ci sono le diversità, che riguardano gli aspetti di differenziazione fra gli organismi, dipendenti dalle differenze di stili vita, di habitat e di specializzazioni, che richiedono requisiti strutturali e funzionali diversi. In altre parole abbiamo adattamenti diversi in animali che vivono ed operano in ambienti diversi e che sono specializzati per attività diverse. Premesso che negli organismi non sempre tutto è perfettamente adatto e adeguato, in quanto è frutto di cambiamenti che avvengono nel tempo e che spesso riguardano operazioni di *bricolage* (Jacob, 1978), o coptazione di vecchie strutture per nuovi ruoli (Gould and Vrba, 2008), è attraverso lo studio di strutture e funzioni specializzate, particolarmente adeguate a certe funzioni e condizioni, che risultano chiari i vantaggi diretti o indiretti (*fitness*) per l'organismo che li possiede e che ne esprimono al massimo le potenzialità adattative.

Quello dell'adattamento è il principio-base su cui si basa l'approccio biomimetico. Questo approccio, come si è detto, può essere interessante di per sé per studiare la biodiversità, e cioè la varietà della vita in tutte le sue forme e i suoi fenomeni, ma può essere interessante anche da un punto di vista prettamente tecnico, allo scopo di acquisire gli spunti e gli elementi essenziali per la realizzazione pratica di strumenti o tecnologie. Negli animali, un classico esempio è quello del volo, una funzione estremamente complessa e specializzata, che implica la presenza di requisiti irrinunciabili e fondamentali nelle strutture che lo realizzano, con aspetti applicativi importantissimi. Vedremo, per esempio, che non è casuale che negli oggetti volanti realizzati dall'uomo si siano largamente copiate le soluzioni strategiche adottate dagli animali adattati al volo.

[MODELLI BIOMIMETICI ANIMALI]

Abbiamo già accennato alla presenza in molti organismi di adattamenti così spinti e innovativi da proporsi come vere e proprie "invenzioni" della natura. Questo a maggior ragione si applica agli animali, che hanno tutti i requisiti di una macchina dotata di adeguati strumenti e tecnologie. E' evidente, che data la nostra condivisione della condizione di "animalità", copiare la natura ed imitare le strutture animali, sia negli aspetti fondamentali che in quelli più specifici e dettagliati relativi a funzioni iper-specializzate, può essere per l'uomo più che utile e vantaggioso in vari campi. Le applicazioni biomimetiche che si riferiscono a modelli animali sono dunque numerosissime e si trovano a vario stadio di sviluppo: interessano tanto tecnologie già commerciabili quanto lo sviluppo di prototipi. In ogni caso, in ogni tipo di applicazione pratica, è sempre bene tener presente quanto accennato per il velcro, e cioè che si tratta della realizzazione di modelli artificiali che, per forza di cose, pur riproducendo gli aspetti essenziali dei modelli naturali, prevedono sempre notevoli semplificazioni e omissioni rispetto alla complessità dei sistemi naturali. Viene presentata qui di seguito una brevissima rassegna di esempi in cui i modelli animali sono già stati proficuamente utilizzati per applicazioni biomimetiche in diversi ambiti e a diversi livelli, dal macro- al nanostrutturale, o sono ancora largamente da esplorare. Ciò servirà a sottolineare le potenziali applicazioni dell'approccio *learning from nature*, e ad incoraggiare a ri-esplorare aspetti tradizionali



della biologia animale dal punto di vista di prospettive sempre nuove.

Gli scheletri dei radiolari: avveniristiche architetture vetrose

Un primo esempio, che fa riferimento al livello microscopico, è rappresentato da alcuni organismi unicellulari, classificati tradizionalmente come Protozoi e dunque compresi nel Regno Animale, che sono stati oggetto di studio fin dai tempi antichi. Si tratta dei radiolari, organismi marini unicellulari (dimensioni: da 50 μm a pochi mm), in cui è di particolare interesse lo scheletro siliceo, vetroso, che assume delle forme geometriche di perfezione strutturale e bellezza incredibili. Questi microscheletri (Fig. 1 a, b) che, essendo collocati all'interno della cellula stessa che li produce, sono dei veri e propri endoscheletri, sono costituiti da una combinazione di elementi (spine radiali, puntelli, sfere) costruiti sul principio architettonico di vere e proprie cupole geodetiche, sovrapposte e incastrate una dentro l'altra a formare una complicata struttura tridimensionale che funge da impalcatura di sostegno. È stato detto: "Questo superarchitetto non si accontenta di una sola cupola geodetica; possiede tre cupole silicee concentriche ricamate a merletto". Le cupole geodetiche dei radiolari costituiscono strutture leggerissime e resistenti, le cui proprietà sono state oggetto di studi dettagliati non solo da parte di numerosi biologi e naturalisti del secolo scorso (Haeckel, 1904; D'Arcy Thompson, 1917), ma anche di moderni architetti e ingegneri (Isozaki & Oshima, 2009) che ne hanno riprodotto le caratteristiche, sia dal punto di vista dei materiali che dei moduli costruttivi, in modelli artificiali ampiamente utilizzati all'interno di architetture avveniristiche (Fig. 1 c) o perfino nella progettazione di moduli spaziali impiegati dalla NASA.

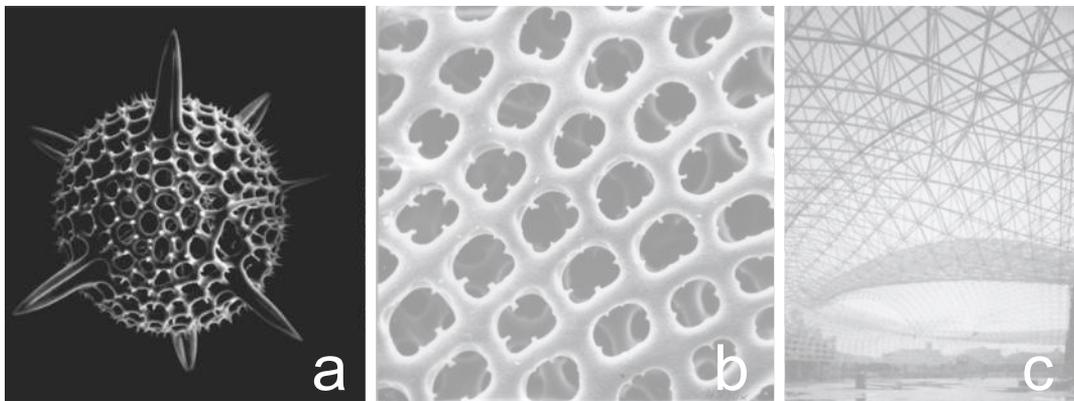


Figura 1. a) Scheletro di radiolare al SEM (Microscopio Elettronico a Scansione). b) Dettaglio della microstruttura scheletrica di un radiolare al SEM. c) Arata Isozaki: Pabellón polideportivo de Palafolls, 1990. Un'architettura ispirata ai radiolari

La pelle dello squalo: un capolavoro di idrodinamica.

Passando ad esempi più conosciuti di animali veri e propri, cioè di Metazoi, non possiamo non citare lo squalo, dove troviamo, dal livello macro- al microscopico, infiniti aspetti da studiare che si prestano all'applicazione dell'approccio biomimetico (Fig.2). Lo squalo è davvero una macchina acquatica perfetta, in cui tutte le strutture sono strettamente adattate allo stile di vita di veloce nuotatore e di feroce predatore. Nel movimento in acqua, in generale, gli organismi incontrano gli stessi problemi di qualunque altro oggetto che si muove, e che sono principalmente rappresentati dall'attrito e dalla resistenza del fluido. Per minimizzare questi problemi il più possibile, nella macchina-squalo vengono realizzate soluzioni tecniche che ottimizzano la condizione di nuoto: da una parte viene assunta una struttura corporea a siluro (Fig. 2 a), che è la migliore per ridurre la resistenza del fluido, dall'altra viene impiegato un rivestimento corporeo sofisticato, costituito da una pelle scabra, tutta ricoperta all'esterno da scaglie, a forma di minuscoli dentelli (di composizione del tutto simile ai denti umani), fra loro sovrapposti, i cui rilievi superficiali, mirabilmente combinati insieme, formano delle opportune micro-scanalature superficiali dove l'acqua viene opportunamente incanalata, minimizzando così le turbolenze (Fig. 2 cb, c).

Grazie alla loro forma, struttura e disposizione, i dentelli riducono la resistenza dell'acqua, consentendone un fluire più rapido ed efficiente, e quindi consentendo una migliore prestazione di a nuoto. I dentelli, inoltre, non sono tutti uguali ma cambiano a seconda della zona del corpo e della specie: gli squali più veloci hanno dentelli più piccoli e leggeri. Attraverso l'impiego di modelli matematici e simulazioni, alcuni ricercatori della Florida University hanno di recente dimostrato che il pattern di sviluppo e distribuzione delle scaglie è conforme al modello teorico proposto da Alan Turing nei suoi studi sulle geometrie della natura (Cooper et al, 2018 Turing, 1952) Utilizzando stampanti 3D, alcuni ricercatori di Harvard (Wen et al., 2014) hanno inoltre recentemente costruito in laboratorio un modello di "pelle di squalo" artificiale del tutto simile a quella naturale (Fig.2 d). I primi test confermano che la pelle artificiale aumenta la velocità nel nuoto del 6,6%, riducendo del 5.9% l'energia necessaria.

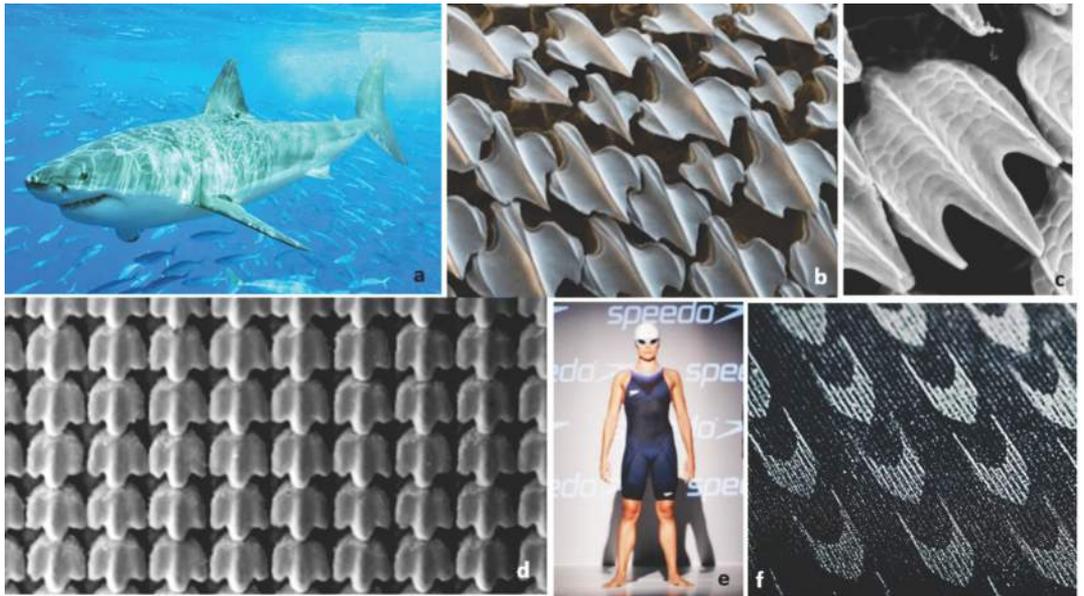


Figura 2. a) Uno squalo fotografato nel suo ambiente. b, c) Dentelli cutanei osservati al SEM (Microscopio Elettronico a Scansione) a progressivo ingrandimento. d) Prototipo di pelle di squalo artificiale realizzata dall'Università di Harvard con stampante 3D. e) Modello di tuta Fastskin Speedo ispirata alla pelle dello squalo. f) Dettaglio ingrandito della struttura superficiale della tuta presentata in (e).

Ispirandosi a questi principi, note aziende hanno realizzato modelli commerciali di tute da nuoto sperimentate da alcuni prestigiosi nuotatori (Fig.2 e, f) e ora vietate in gara: in realtà i presunti vantaggi forniti da queste tute sono stati smentiti dai ricercatori di Harvard proprio sulla base dell'assenza della fondamentale micro-dentellatura tipica del modello naturale. Ma nonostante tutti i recenti progressi tecnologici, siamo ancora molto lontani dalla replica perfetta della pelle naturale di squalo e delle sue prestazioni in acqua, per non parlare delle sue capacità di fungere anche efficacemente da anti-fouling.

Le zampe del gecko: la perfetta adesione.

Un altro esempio molto noto è rappresentato dalla struttura delle zampe del gecko, che è capace di arrampicarsi e di rimanere perfettamente adeso a superfici liscissime (Fig. 3). Nel caso del gecko, tutto il segreto di questa straordinaria capacità adesiva si basa sulla sofisticata "tecnologia" con cui sono strutturate le superfici delle zampe (Fig.3 b). Malgrado le apparenze, le zampe del gecko sono asciutte

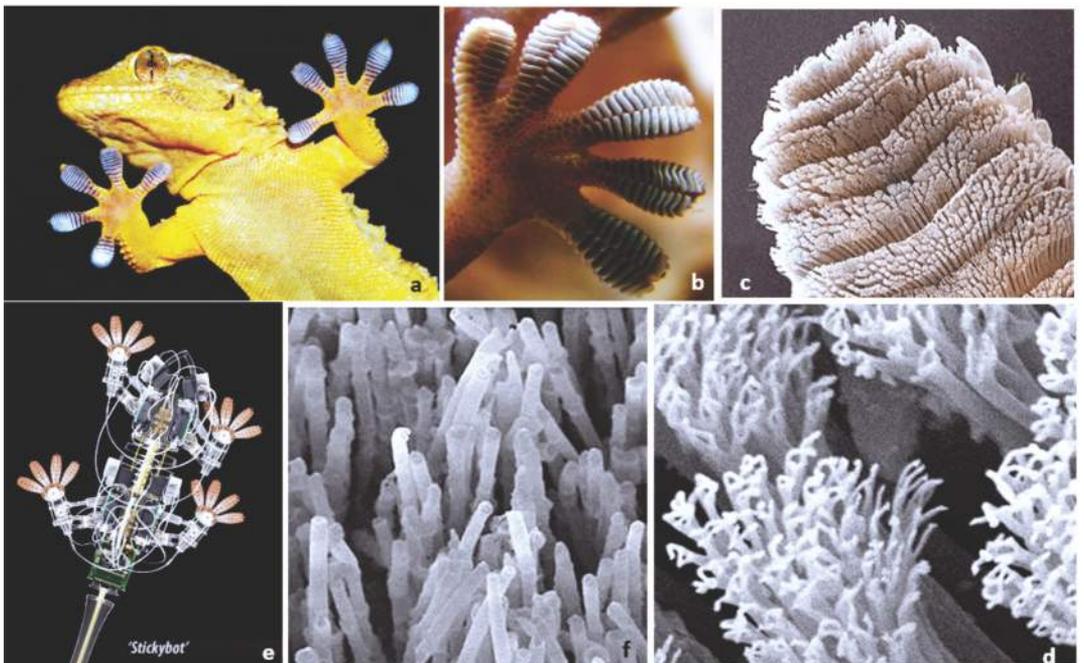


Figura 3. a) Un gecko che aderisce ad una parete di vetro con le sue zampe adesive. b) Una visione ingrandita della superficie ventrale adesiva di una zampa. c) Ingrandimento di (b) mostrante le micropieghe della superficie adesiva di un dito. d) Particolare della superficie adesiva al SEM (Microscopio Elettronico a Scansione) mostrante i tipici fascetti di microsetole a spatola inclinata. e) Il prototipo di Stickybot messo a punto dall'Università di Stanford e ispirato al gecko. f) Dettaglio al SEM della superficie adesiva degli arti artificiali dello Stickybot, la cui microstruttura imita il modello naturale.



e lisce: la loro superficie inferiore (ventrale) presenta delle micropieghe, formate a loro volta da bande di microsetole (2 miliardi di microsetole per cm²), spesse circa 200 nm ciascuna e terminanti con una struttura a spatola inclinata (Fig. 3 c, d).

Queste nanostrutture interagiscono con la superficie del substrato, generando a livello molecolare forze di adesione (forze di van der Waals), che benché deboli a livello di singola interazione, e che benché deboli a livello di singola interazione, moltiplicate per miliardi di volte generano l'effetto finale: il geco può così camminare a testa in giù su qualsiasi superficie e alla velocità di un metro al secondo, e può resistere ad una forza di trazione parallela di circa 20,1 newton (circa 2 kg: più di 40 volte il suo peso). Per staccare la zampa da una superficie al geco basta modificare l'angolazione delle microscopiche setole a spatola che ricoprono le dita, come hanno scoperto alcuni ricercatori dell'Oregon State University grazie all'elaborazione di un modello matematico. In via di principio, dunque, se fosse possibile riprodurre la struttura delle "setole" del geco sulla suola di una scarpa, un uomo potrebbe mostrare le performances di *spiderman* e potrebbe agevolmente arrampicarsi sui vetri o camminare su un soffitto a testa in giù.

Alcuni ricercatori dell'Università di Stanford (Parness et al., 2009; Santos et al., 2008; Soto et al., 2010) hanno creato un robot (*Stickybot*) ispirato al geco (Fig. 3 e, f): il prototipo messo a punto dagli scienziati, benché in grado di camminare su superfici verticali lisce (plastica, vetro, maiolica) e recentemente perfezionato (Zou et al., 2013), è ancora molto lontano dall'efficienza del modello biologico. In futuro, *Stickybot*, superando i suoi limiti, potrebbe essere impiegato in operazioni di soccorso. Ricerche di questo tipo vengono fatte anche su molti altri animali. Un modello analogo, sia strutturalmente che funzionalmente, altrettanto specializzato se non addirittura più versatile, lo troviamo in comuni specie di coleotteri dotati di straordinarie capacità di aderire a foglie molto scivolose (Gernay et al., 2016; Knight, 2009).

Esistono poi dispositivi per migliorare e ottimizzare il movimento o l'adesione in meduse, chiochiette, pesci, uccelli, ecc...e ognuno di questi modelli nasconde innumerevoli aspetti tecnici super-sofisticati che varrebbe la pena esplorare nei dettagli.

La ragnatela: il più raffinato e resistente manufatto di seta

E' noto a tutti che gli animali producono anche sostanze e materiali che vengono impiegati a scopo diverso e che nel tempo sono stati spesso utilmente riutilizzati dall'uomo. La tela dei ragni sia per la sua geometria che per il materiale di cui è costituita (Fig 4). La ragnatela, che viene prodotta e secreta da differenti tipi di ghiandole specifiche (ghiandole della seta) e poi filata da apposite strutture (filiere) in forma di un filo sottile (Fig.4 a), è costituita da un materiale eccezionalmente resistente e duttile, la seta, rappresenta addirittura un esempio di raffinato "manufatto" animale. Si tratta di un materiale di alta qualità, biodegradabile e biocompatibile, che si presta di per sé ad essere studiato e utilizzato per molteplici applicazioni tecnologiche.

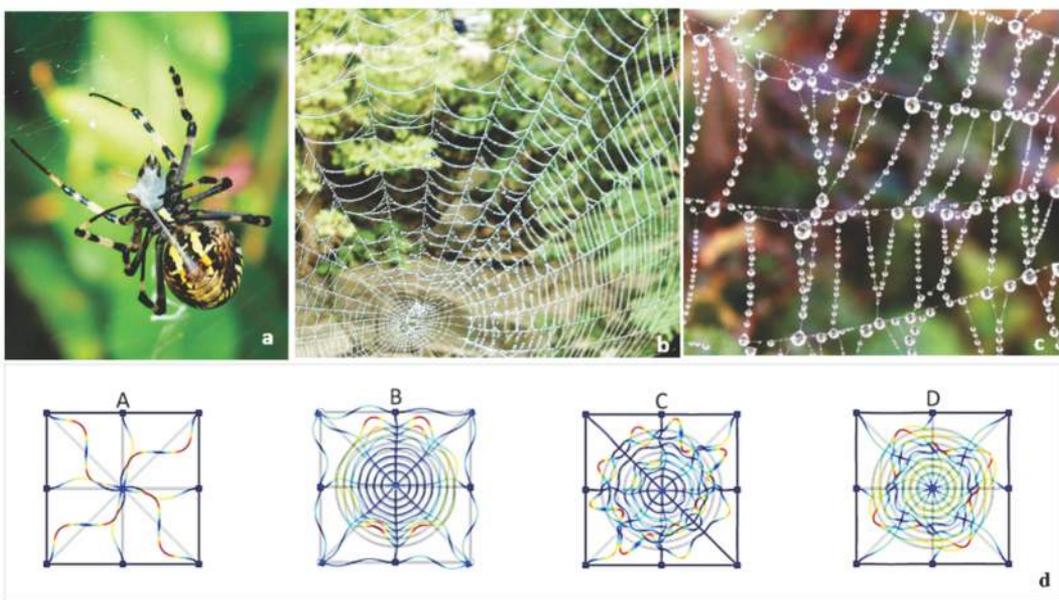


Figura 4. a) Un ragno intento a filare la seta e a tessere la sua ragnatela. b) Particolare di una ragnatela a spirale e della sua geometria. I robusti fili radiali sono le componenti portanti della ragnatela e sono costituiti da seta dragline. c) Dettaglio dei fili di seta a sferule vischiose (componenti circolari) di una ragnatela. d) Differenti modelli (vibration mode shapes) per nuovi metamateriali ispirati alle ragnatele da utilizzare per l'isolamento da vibrazioni fononiche.



Inoltre questo materiale così duttile e leggero può essere tessuto nei modi più svariati, secondo precisi modelli geometrici di tessitura (Fig.4 b) che seguono schemi diversi e hanno scopi e performances ben diversi (cattura delle prede, conservazione delle prede, trasporto nell'aria, rituali nuziali, protezione delle uova). Ci sono tipi diversi di ragnatele: a spirale, a groviglio, a imbuto, tubulari, a foglio, a filamento semplice e i ragni vengono classificati in base alla tipologia che producono. Oltre ai diversi tipi di ragnatela, i ragni possono secernere tipi differenti di seta (fino a 7 !) che presentano diverse proprietà meccaniche (viscoelastiche): in particolare, una seta a filo vischioso (caratterizzata da una sequenza di sferule appiccicose – Fig. 4 c) che viene utilizzata per gli elementi ad andamento circolare della ragnatela, flessibili e non sottoposti a grandi sforzi, ma dedicati alla cattura delle prede; e una a filo molto robusto (*dragline*), che è invece usata per costruire le componenti portanti (radiali e di contorno) della ragnatela (Fig.4 b). La seta *dragline* di una ragnatela ha proprietà meccaniche eccezionali (resistenza alla trazione, flessibilità, elasticità): è costituita da filamenti strutturati come cavi, composti da migliaia di nanofibrille proteiche, disposte in parallelo, e inoltre consiste di proteine diverse (spidroine: Ma Sp1, Ma Sp2) o, in un caso studiato recentemente, addirittura 4 proteine. Sono proprio la struttura e la composizione così peculiari a determinare l'eccezionale resistenza del materiale (Kosky et al., 2013) che, relativamente al suo spessore, supera di più di quattro volte la resistenza dell'acciaio e di almeno tre volte quella del Kevlar.

Viste le straordinarie proprietà della seta di ragno, le sue potenziali applicazioni sono molteplici (Cheng & Lee, 2016; Zhao & Buehler, 2013). Esse spaziano dal campo tessile a quello dei biomateriali, estendendosi anche alla medicina ed alla microelettronica. Un'applicazione notevole è stata progettata dai fisici della Florida State University, che hanno inventato un sistema a ragnatela, che utilizza fili di seta e nanotubi di carbonio, per migliorare la conducibilità elettrica e controllare i parametri dei dispositivi elettronici (Steven et al., 2013). Un'altra recente applicazione è stata ideata da un team internazionale di ricercatori (Miniaci et al., 2016), che hanno progettato, su ispirazione del pattern delle ragnatele, un innovativo metamateriale (cioè un materiale fatto da strutture ripetitive periodiche) per il controllo e l'isolamento di un ampio range di vibrazioni fononiche (Fig.4 d). Infine, gruppi di ricercatori di varie università (Seul University, Stanford University) hanno messo a punto sistemi di biosensori ispirati alle ragnatele costituiti da una fitta trama di polimeri plastici sensibili a stress di diverso tipo (meccanici, termici e altri) (Lanzara et al., 2010; Kang et al., 2014). Il tessuto ultra-sensibile di queste ragnatele artificiali, grazie alle sue proprietà sensoriali integrate, è in grado di «ricepire» ogni minima perturbazione dell'ambiente circostante e può essere utilizzato perfino per applicazioni nel campo dell'ingegneria aeronautica e aerospaziale, consentendo non solo di monitorare temperatura, umidità e pressione esterna, ma anche di individuare la presenza di microfratture o di danni strutturali nascosti, molto prima che si manifestino a livello macroscopico e si trasformino in danni irreversibili.

Il volo degli insetti: l'arte di volare con i vortici

Il volo è il tipo di locomozione più specializzato e più straordinario, ma anche più difficile da realizzare e proprio per questo utilizzato solo da pochissimi organismi animali. Nel volo l'animale si muove nel fluido, l'aria, senza alcun punto di appoggio sul substrato, e spostandosi nell'aria sfrutta in definitiva principi analoghi a quelli utilizzati da un animale che nuota e si sposta nell'acqua: il problema è che deve fare i conti con la minor densità dell'aria rispetto all'acqua e quindi con il problema di mantenersi sospeso in un mezzo che non sostiene. Un corpo per sostenersi nell'aria deve reagire alla forza di gravità, cioè per prima cosa deve trovare un modo per rimanere sospeso in aria, cioè sviluppare portanza. Per attuare un volo attivo deve poi muovere il fluido intorno in modo da ricevere da questo una spinta propulsiva nella direzione prescelta. Nei viventi la conquista del volo ha richiesto l'invenzione di superfici portanti: le ali, studiate ampiamente dall'uomo da tutti i punti di vista (si veda il *Codice degli Uccelli* di Leonardo Da Vinci).

Applicando i principi di azione-reazione e quello della conservazione dell'energia meccanica si crea un oggetto volante: il flusso d'aria complessivo relativo al corpo (sulle ali) genera la sua sospensione; l'aria spostata con la spinta motrice permette la traslazione del corpo. Questa doppia azione (portanza e spinta) è difficilissima da realizzare, e infatti solo tre gruppi di animali sono in grado di effettuare un volo attivo: gli insetti, gli uccelli e i pipistrelli. Nel volo attivo tutto il lavoro di portanza e di spinta viene effettuato dalle ali, che sono strutture dinamiche non solo responsabili della capacità di rimanere sospesi, ma anche della capacità di muoversi a diverse velocità e con diverse modalità, e di compiere le manovre (decollo e atterraggio) anche in condizioni proibitive. Nella maggior parte delle macchine volanti ideate dall'uomo, invece, le ali sono strutture statiche e servono solo a generare portanza; solo l'elicottero viene sorretto e spostato dalle sue ali-eliche, e dunque è funzionalmente comparabile ad un animale volante.

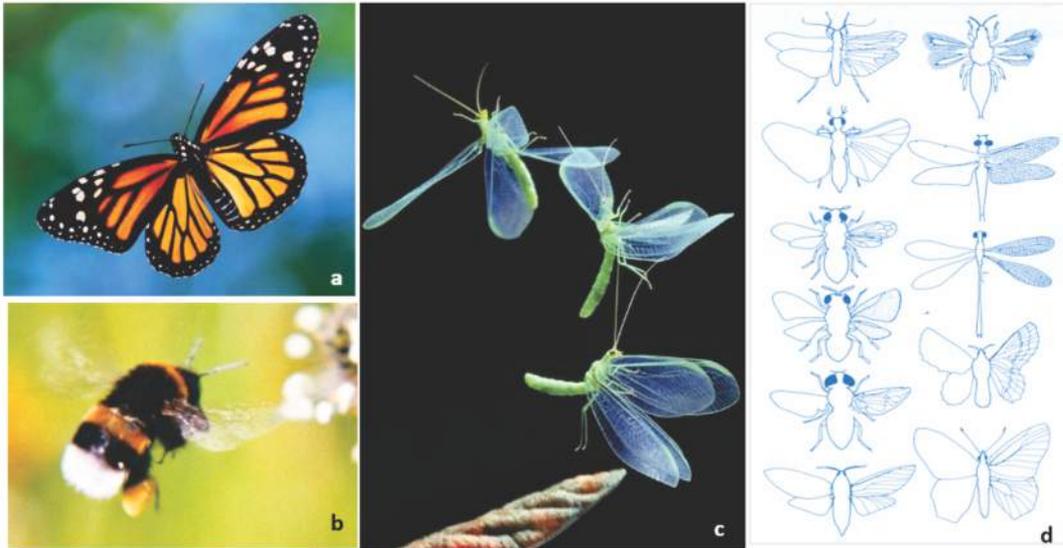


Figura 5. a, b) Una farfalla (a) e un bombo (b) in volo. c) Sequenza del decollo di *Chrysopa carnea*. Il movimento delle quattro ali è sfasato e molto complesso. d) Principali tipologie di ali nei diversi gruppi di insetti

Fra gli animali volatori, gli insetti rappresentano senz'altro le macchine volanti più sofisticate e complesse (Figura 5 a, b, c): sono infatti in grado di utilizzare le più svariate strategie di volo (a vela, battente, librato), assai ben perfezionate a seconda delle specie e delle circostanze (Barnes et al., 1990). La maggior parte degli insetti adulti presenta 2 paia di ali articolate ai lati del torace: si tratta di strutture locomotorie che derivano da pliche della cuticola (esoscheletro) e non da arti modificati. Per acquisire le ali, gli insetti non hanno "sacrificato" un paio di arti anteriori (come hanno fatto uccelli e pipistrelli) con relativo svantaggio della deambulazione sul substrato, ma hanno utilizzato, o riutilizzato, altre strutture: quindi la capacità del volo si aggiunge e non si sostituisce alla capacità di deambulare.

Di regola gli insetti hanno due paia di ali, ma ci sono molti casi in cui, di fatto, per il volo ne viene utilizzato solo un paio. Le ali presentano una grande varietà di modelli che variano per forma, dimensioni, battito e tipo di utilizzo (Fig.5 d). Tuttavia, fermo restando che in ciascun modello di ala si possono trovare ottimi spunti per studi biomeccanici avanzati, il modello eccezionale da copiare non è tanto l'ala, in termini di struttura, ma il sofisticato meccanismo in cui viene mossa. La dinamica del volo degli insetti presenta degli aspetti estremamente complessi e quasi paradossali, che a tutt'oggi rappresentano un vero rompicapo per gli scienziati che cercano di interpretarli alla luce delle tradizionali regole dell'aerodinamica (Dudley, 2002). Il fatto è che le condizioni di volo degli insetti sono completamente diverse da quelle degli uccelli. Un primo punto è la mancanza di adattamento di forma del corpo negli insetti, che contrasta con il perfetto adattamento delle forme degli uccelli al mezzo fluido. Le forme d'una mosca, d'un calabrone, di un'ape sono ben lungi dal poter essere chiamate "forme di buona penetrazione". La bassa velocità di volo e, in genere, il piccolo peso degli insetti, specie in relazione alla superficie relativa delle ali, danno ragione della trascurabile importanza che per essi avrebbe una ottimizzazione aerodinamica delle forme, che, invece, si dimostra un requisito essenziale nei più veloci e più grandi volatori, per ridurre la resistenza al moto. Negli insetti, a causa delle piccole dimensioni del corpo, l'attrito con l'aria ha un'importanza minore rispetto ad animali più grandi: pertanto solo poche specie, che hanno dimensioni relativamente grandi (farfalle notturne e tafani) mostrano una tendenza verso forme aerodinamiche.

Il secondo punto è che la mole del corpo e la forma e le dimensioni delle ali di molti insetti non sembrano teoricamente compatibili con la possibilità di realizzare un volo efficace, che invece si verifica mirabilmente anche nei casi più proibitivi, chiamando in causa audaci strategie attraverso l'attiva produzione e rilascio di vortici di aria in movimento, a tutt'oggi sconosciute all'ingegneria aeronautica tradizionale. Il volo degli insetti è la conseguenza di flussi d'aria non stazionari generati dai movimenti delle ali (Fig. 6 a, b). L'insetto in volo è spinto in avanti dalla forza di reazione risultante da vortici che vanno verso il basso (Fig.6 c, d). In questo modo la *portanza*, ossia la forza che li tiene in volo, non è generata in modo continuo, come avviene per le ali degli aerei, ma a scatti. In effetti, gli insetti usano le loro ali in modo più simile a quello degli elicotteri che a quello degli aeroplani per spostarsi orizzontalmente, ma anche verticalmente o in diagonale e per restare sospesi nell'aria. Specifiche strategie di battuta-spinta delle ali e di abile sfruttamento dei vortici sono anche usate efficacemente per le manovre di decollo (Figura 6 e). Durante le manovre le ali vengono per lo più mosse in modo sfasato.

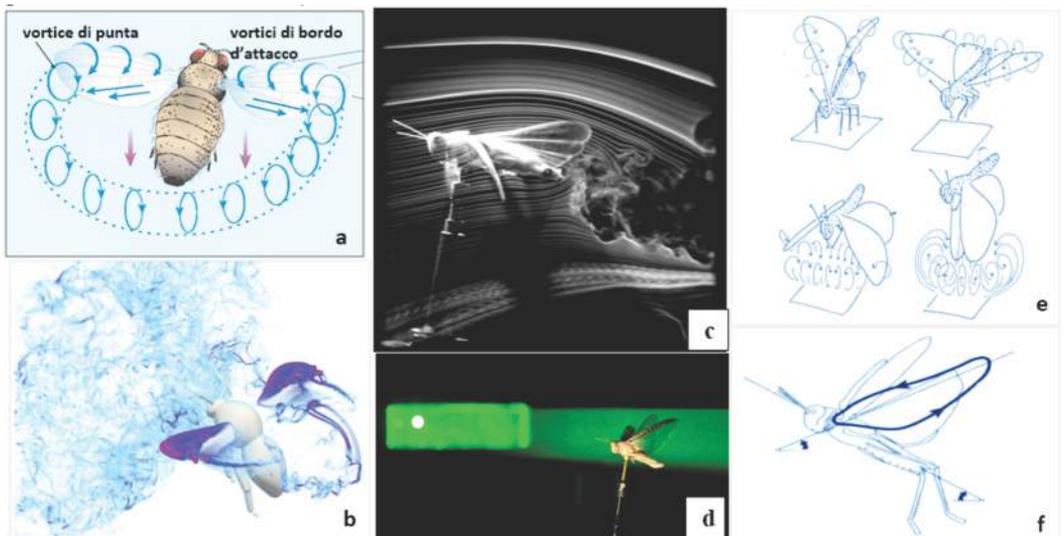


Figura 6. a) Schema-base della generazione dei vortici nel normale volo battente di un insetto di medie dimensioni. b) Simulazione computerizzata della complessa turbolenza dei flussi d'aria nel normale volo battente. c) Visualizzazione della turbolenza dei flussi durante il volo di una locusta (classico esperimento con flussi laminari di fumo in una galleria del vento). d) Visualizzazione dei flussi d'aria e del movimento delle ali in locusta con nuova tecnica laser (confronta con (c)). e) Generazione dei vortici durante il decollo in *Chrysopa carnea* (dall'sinistra a destra). f) Schema dell'orbita percorsa dell'ala durante il normale volo battente della locusta. Sono indicate l'inclinazione del corpo e l'angolo di battuta dell'ala.

Gli insetti hanno ottimizzato in modo stupefacente lo sfruttamento dei vortici. Questo spiega il mistero del volo del bombo, un insetto che dal punto di vista della fisica è troppo pesante per poter volare (Fig.5 b): il suo volo obbedisce alle leggi della "aerodinamica instabile", creando condizioni che consentono di volare sfruttando particolari turbolenze d'aria (Dickinson & Muijres, 2016; Dudley, 2002; Lehmann, 2004).

Fermo restando lo sfruttamento dei vortici, nel volo battente di tipo più comune l'ala si muove con un movimento complesso, ruotando intorno al proprio asse e generando sollevamento e spinta sia nel colpo verso l'alto che nel colpo verso il basso (Fig.6 f). In sostanza: la punta dell'ala traccia un percorso circa ellittico; il profilo dell'ala disegna un tracciato diverso a seconda della velocità di battuta; vengono prodotti vortici a ciambella che spingono in avanti il corpo.

Sulla produzione del tutto peculiare di vortici *ad hoc* è basato anche l'intrigante tipo di volo di insetti piccolissimi, la cui strategia prevede il cosiddetto "clap and fling" (Miller & Peskin, 2009): qui il volo è preceduto da una caratteristica battuta delle ali (0,5 mm), che vengono battute fra loro dorsalmente, poi aperte e divaricate lateralmente e infine mosse verso il basso (Fig.7 a, b, c), provocando circolazione d'aria intorno alle ali con generazione di vortici che conferiscono sollevamento e spinta.

Infine, sempre sui vortici, è basata il volo "librato", tipico della sirfide o della sfinge, del tutto simile a quello dei colibrì, che viene utilizzato dall'insetto al momento del decollo e quando resta sospeso a mezz'aria. In questo caso la posizione del corpo mantiene una precisa inclinazione e le ali compiono un movimento rotatorio a "8" paragonabile a quello delle pale dell'elicottero. La frequenza di battuta (70 bat/sec) è tale da produrre un vero e proprio ronzio (Vance et al, 2014; Wang, 2004).

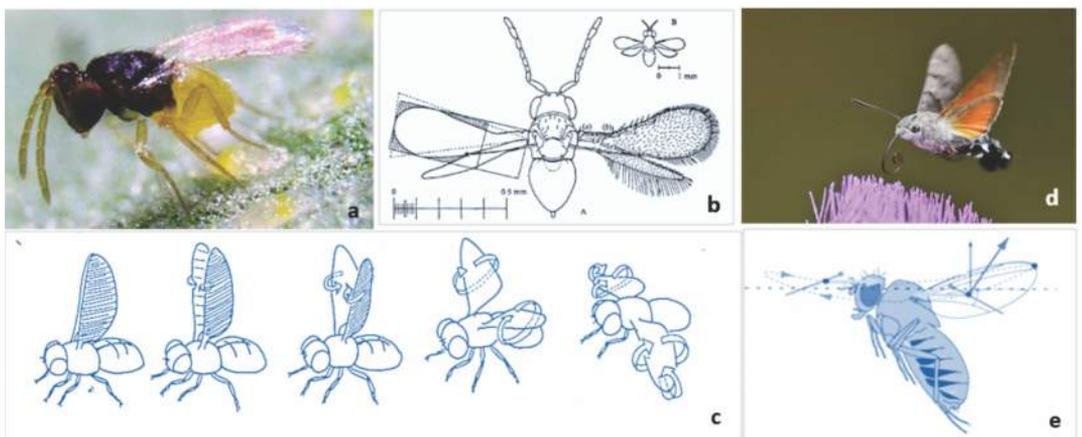


Figura 7. a, b) Un esempio di piccolissimo insetto (*Encarsia formosa*) con ali ridotte (0,6 mm), che utilizza la strategia di volo "clap and fling". c) Ricostruzione delle fasi del volo "clap and fling" (da sinistra a destra). d) Insetto imenottero che utilizza la strategia di volo librato (hovering flight). e) Movimento e orbita delle ali nell'hovering flight". Sono indicate la postura inclinata del corpo e la direzione delle forze che agiscono sulle ali



Da decenni i ricercatori si cimentano nella sfida di ricostruire e spiegare i complessi meccanismi del volo degli insetti. Team di studiosi di diversi centri di ricerca (University of New South Wales-Australia, German Aerospace Center –DLR, Oxford University, Beijing Institute of Technology) hanno usato la cinematografia ad alta velocità e speciali micro-gallerie del vento per filmare i cambiamenti di forma e di orientamento dell'ala di comuni insetti (locuste, falene, ecc.) durante il volo e produrre un modello computerizzato per opportune simulazioni (Fig. 6). Grazie a questo tipo di studi i ricercatori hanno potuto costruire modelli del movimento delle ali (Elzinga & Dickinson, 2014) sviluppando specifici software che riproducano non solo il battito ma anche i cambiamenti aerodinamici legati alla struttura della superficie delle ali e alla loro deformazione (Bomphrey et al, 2010; Young et al, 2009; Zhao et al, 2014). Ricerche analoghe hanno anche permesso di ideare e costruire primi pionieristici modelli robotizzati. In laboratori specializzati in cui vengono utilizzati modelli robotizzati e simulazioni computerizzate, i ricercatori hanno potuto ricostruire la formazione e il movimento dei vortici rispetto alle ali (Engels et al., 2019), spiegando perché gli insetti sappiano sviluppare una portanza tre volte superiore a quella che risulterebbe dai calcoli dell'aerodinamica convenzionale e non entrino in stallo (Fig. 6 b).

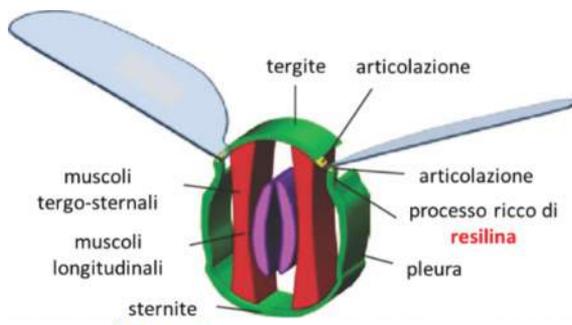


Figura 8. Schema del torace di un insetto: sono indicati i muscoli del volo indiretti e le componenti dell'esoscheletro coinvolte nel volo.

Gli insetti presentano una gamma di adattamenti strutturali, funzionali e neuromuscolari molto più ampia e differenziata di quella mostrata dagli altri volatori, cioè uccelli e pipistrelli. I muscoli adibiti al volo (che sono collocati nel torace) presentano un modello di muscolo striato molto sofisticato, che raggiunge il massimo dell'efficienza in termini di battito alare nei cosiddetti muscoli indiretti o asincroni (oltre 1000 battiti al secondo) (Deora et al., 2017). La velocissima contrazione di questi muscoli si basa infatti su due espedienti: 1) il tipo di controllo neuromuscolare, del tutto unico, per cui a ciascun impulso nervoso

corrisponde una serie di contrazioni automatiche; 2) l'eccezionale risposta elastica da parte di due componenti del sistema muscolo-scheletrico: e cioè l'esoscheletro che, in aggiunta alle normali componenti, è caratterizzato, nel torace, dalla presenza di una proteina elastica, la resilina capace di accumulare energia di deformazione e restituirla quasi integralmente (resilienza del 97%) in tempo rapidissimo (1/1000 sec); e le fibre muscolari stesse, che presentano una componente filamentosa aggiuntiva dell'apparato contrattile rispetto a quella acto-miosinica. Una ricerca sui bombi, usando riprese con videocamere ultraveloci e analisi a raggi X, ha dimostrato che nei muscoli del volo l'attivazione della contrazione avviene grazie a un meccanismo peculiare, denominato attivazione da "stretch", in cui ciascun muscolo viene attivato dall'allungamento dovuto alla contrazione del suo antagonista (Iwamoto et al, 2010).



Figura 9. a, b) Il dittero *Epistrophe eligans* in riposo (a) e in volo (b). Il riquadro in (a) evidenzia un bilanciere. c) Ali e bilancieri (riquadro) di una tipula (dittero) visti dall'alto. d) Dettaglio della struttura del bilanciere evidenziato in (c). e, f) Aree sensoriali dei bilancieri in *Chrysomya nigripes* (evidenziate in colore) osservate a progressivo ingrandimento al SEM (Microscopio Elettronico a Scansione). Co: organo cordotonale.

Adattamenti specifici riguardano anche le caratteristiche aerodinamiche e gli "strumenti di volo". Mosche e zanzare appartengono al gruppo dei ditteri, che sono fra i migliori volatori e utilizzano il solo paio di ali anteriori per il volo (Fig.9 a, b). Il paio di ali posteriori sono modificate e ridotte ad appendici clavate dette bilancieri (Fig.9 a, c, d, Fig.10 a), che funzionano efficacemente come strumenti sofisticati per la navigazione, e cioè come organi equilibratori del volo (giroscopi a diapason) e come sofisticati sensori per la rilevazione dei flussi d'aria: infatti alla loro base sono inseriti specifici



meccanocettori come organi cordotonali e sensilli campaniformi (Fig.9 e, f). I bilancieri, che variano molto per forma e dimensioni fra una specie e l'altra, oscillano durante il volo in modo sincrono rispetto alle ali e sono organi essenziali per il volo, senza i quali l'insetto non riesce a volare (Yarger & Fox, 2016). Ma non solo: infatti oscillano indipendentemente dalle ali anche durante la locomozione sul substrato.

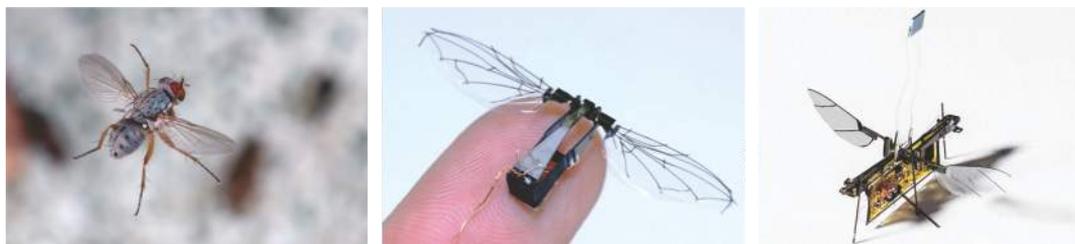


Figura 10. a) Una mosca in volo. Evidenti le due ali e i due bilancieri. b) Prototipo di RoboBee, un robot-mosca biomimetico (progetto dell'Università di Harvard).

Modernissimi prototipi di insetti micromeccanici volanti, ispirati ai modelli di ditteri, sono stati messi a punto da gruppi di ricercatori in diverse prestigiose università (Fig.10). Un primo prototipo è il *RoboBee* progettato da un team di ricercatori dell'Università di Harvard, un robot-mosca piccolissimo e infinitamente leggero, e come altri basato sull'assemblaggio di nano-componenti (Ma et al., 2013): ha un'ampiezza alare di 3 cm, è in grado di riprodurre, sia pure al rallentatore (120 battiti/sec) il battito d'ali dei modelli naturali (mosche e zanzare), ma non è dotato di autonomia di volo in termini energetici, perché va alimentato dall'esterno. I robot di nuova generazione, come il *RoboFly* progettato dall'Università di Washington o il modello avanzato di *RoboBee*, recentemente realizzato dallo stesso team di Harvard, sono senza fili e possono volare in autonomia, in quanto dotati di micro-pannelli fotovoltaici alimentati da laser o ad energia solare (Jafferis et al., 2019; James et al., 2018). Una mosca-robotica di questo tipo potrebbe essere in futuro largamente impiegata per il monitoraggio ambientale, o il supporto in operazioni di ricerca e salvataggio, o ancora per l'assistenza nell'impollinazione delle colture.

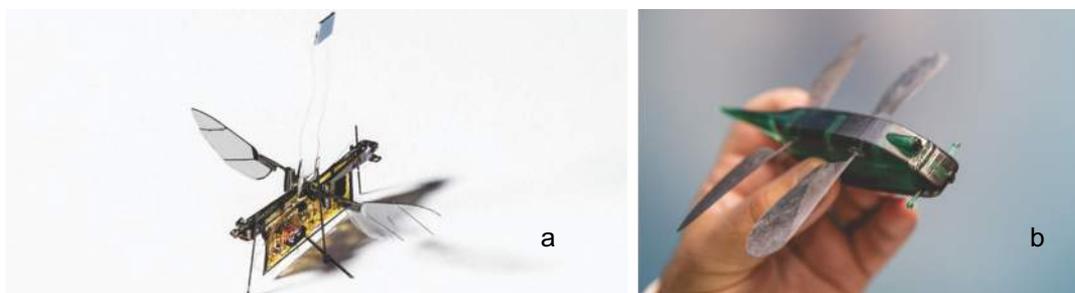


Figura 11. a) Una libellula in volo. b) Prototipo di Skeeter, un piccolo drone a 4 ali e a volo battente ispirato alla libellula (progetto dell'Università di Oxford).

Altre applicazioni, con modelli a 4 ali ispirati alle libellule, prevedono l'impiego di insetti-droni persino in ambito militare: all'Università di Oxford è stato recentemente attivato uno spin-off dedicato allo sviluppo di *Skeeter*, un piccolo drone a volo battente, il cui peso (30g) e costi sono minimizzati e il cui volo dura più a lungo dei droni lanciati a mano, che è stato specificamente progettato per la sorveglianza nascosta e per impieghi militari a basso impatto.

[PROSPETTIVE DELLA BIOMIMETICA]

In conclusione: i tempi molto lunghi di ricerca, la difficoltà di trovare applicazioni realmente pratiche per sistemi di questo tipo e soprattutto l'enorme complessità di quello che la natura ha assemblato nel corso di milioni di anni di evoluzione, sono la spiegazione al fatto che la *biomimetica* non si sia ancora sviluppata al meglio delle sue potenzialità.

L'industria del futuro dovrà promuovere al massimo l'approccio biomimetico puntando all'introduzione di nuovi materiali, economici, riciclabili, a basso impatto ambientale e in grado di rispondere a bisogni energetici e produttivi crescenti, al ritmo della crescita della popolazione del nostro pianeta. Occorre dedicarsi a larga scala a studi integrati di biomimetica che, oltre a comportare l'interdisciplinarietà, vanno affrontati con impegno, perseveranza e umiltà nei confronti della natura, *mater magistra*. Alcuni meccanismi naturali, nella loro apparente semplicità ed estrema eleganza, sono in realtà enormemente complessi: il carattere multi-livello di gran parte dell'ingegneria naturale ne



rende particolarmente difficile la riproducibilità in un modello artificiale e dunque occorrerà accettare la sfida con consapevolezza dei limiti odierni per puntare a risultati anche solo parziali, correndo il rischio di momentanei insuccessi. Nel corso degli ultimi millenni l'uomo ha saccheggiato la natura in modo sconsiderato per estrarne risorse (Kolbert, 2014). Per la sopravvivenza stessa del pianeta è ora urgente cambiare pagina: le attuali conoscenze scientifiche e tecnologiche permettono di stabilire un nuovo rapporto fra naturale e artificiale con l'obiettivo di sviluppare una società veramente sostenibile che funzioni come un ecosistema tra ecosistemi, e cioè ne rispetti i principi fondamentali fondati su: cicli chiusi ed economia circolare (eliminando o minimizzando i rifiuti); interdipendenza, interconnessione, cooperazione; conversione dell'energia; valorizzazione della diversità.

La biomimetica, se perseguita con metodo e determinazione, permetterà sempre di più di ottenere un elevato livello di efficienza, sostenibilità e integrazione con l'ambiente, perché le tecnologie bioispirate nascono dall'ecosistema stesso (Hayez et.al., 2019).

"Più il mondo dell'uomo funzionerà in modo simile a quello naturale, più a lungo resisteremo in questa grande casa, che è anche nostra, ma non solo nostra". Janine Banyus

[BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE]

- Bar-Cohen Y (2005) Biomimetics: Biologically Inspired Technologies. Taylor & Francis Group.
- Barnes RSK, Calow P, Olive P (1990) Invertebrati. Una nuova sintesi. Zanichelli, Bologna.
- Benyus JM (1997) Biomimicry. Innovation inspired by nature. Harper Collins Publishers, New York.
- Bomphrey RJ, Taylor GK, Thomas A (2010) Smoke visualization of free-flying bumblebees indicates independent leading-edge vortices on each wing pair. *Experiments in Fluids*, 46:249-259.
- Burnett AL (1964) Animal adaptation. Rinehart and Winstone, Inc. Holt, Rinehart and Winstone, Inc. Ediz. Italiana: L'adattamento negli animali. Zanichelli, Bologna. 1967.
- Bhushan B (2012) Biomimetics. Bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Cheng J, Lee SH (2016) Development of New Smart Materials and Spinning Systems Inspired by Natural Silks and Their Applications. *Front. Mater.* <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00074>
- Candia Carnevali MD (1997) Forma e Funzione. In: Ripensare il Design, Tecniche Nuove.
- Coineau Y, Kresling B (1989) Le invenzioni della natura e la bionica. Edizioni Paoline
- Cooper RL, Thiery AP, AG, Fletcher AJ, Delbarre DJ, Rash LJ, Fraser GJ (2018) An ancient Turing-like patterning mechanism regulates skin denticle development in sharks. *Science Advances*, 4.
- Deora T, Gundiah N, Sane SP (2017) Mechanics of the thorax in flies. *J Exp Biol*, 220: 1382-1395.
- Dickinson MH, Muijres F. (2016). The aerodynamics and control of free flight maneuvers in *Drosophila*. *Proc. R. Soc. Lond. B* 371:20150388.
- Dawkins R (1976) *The Selfish Gene*. 40th Anniversary edition 2017, Oxford Landmark Science.
- Darwin C (1859) *On the Origin of Species*. Murray, London. Ediz. Italiana: *L'Origine delle Specie*. Boringhieri, Torino, 1969.
- Dudley R (2002) *The Biomechanics of insect flight: Form, Function, Evolution*. Princeton University Press.
- Engels T, Kolomenskiy D, Schneider K, Farge M, Lehmann FO, Sesterhenn J (2019) Impact of turbulence on flying insects in tethered and free flight: High-resolution numerical experiments. *Phys. Rev. Fluids*, 4: 013103.
- Elzinga M, Dickinson MH (2014) Wing kinematics and the stabilization of longitudinal forward flight in flies. *Bioinspiration and Biomimetics* 9, 025001.
- Gernay S, Federle W, Lambert P, Gilet T (2016) Elasto-capillarity in insect fibrillar adhesion. *J. R. Soc. Interface*, 13: 20160371.
- Gould SJ (2002) *The structure of the evolutionary theory*. Harvard University Press.
- Gould SJ, Vrba E.S (2008) *Exaptation. Il bricolage dell'evoluzione*. Bollati Boringhieri.
- Haeckel E (1904). *Kunstformen der Natur*. Verlag der Bibliographischen Instituts, Leipzig-Vienna.
- Hayez S, Desh M, Gibbs M (2019) Findings of Case-Study Analysis: System-Level Biomimicry in Built-Environment Design. *Biomimetics*, 4: 73.
- Isozaki A, Oshima KT (2009) *Arata Isozaki*. Phaidon Press.
- Iwamoto H, Inoue K, Yagi N (2010)



Fast X-ray recordings reveal dynamic action of contractile and regulatory proteins in stretch-activated insect flight muscle. *Biophysical journal*, 99:184-192.

Jacob F (1978). *Evoluzione e bricolage*. Einaudi, Torino.

Jafferis NT, Helbling EF, Karpelson M, Wood R (2019) Untethered flight of an insect-sized flapping-wing microscale aerial vehicle. *Nature*, 570: 491-495.

James J, Iyer V, Chukewad Y, Gollakota S, Fuller SB (2018) Liftoff of a 190 mg Laser-Powered Aerial Vehicle: The Lightest Wireless Robot to Fly . Robotics and Automation (ICRA) IEEE International Conference 2018.

Kang D, Pikhitsal PV, Choi YW, Lee C, Shin SS, Linfeng P, Park B, Suh KY, Kim T, Choil M (2014) Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system. *Nature*, 516: 222-226.

Knight K (200 JL9) How climbing leaf beetles hang on. *J. Exp. Biol.* 212: i doi: 10.1242/jeb.033464

Kolbert E (2014) *The sixth extinction. An unnatural history*. Bloomsbury Publishing.

Koski KJ, Akhenblit P, McKiernan K, Yarger JL (2013) Non-invasive determination of the complete elastic moduli of spider silks. *Nature Materials*, 12: 262-267.

Lanzara G, Salowitz N, Guo Z, Chang FK (2010) A Spider-Web-Like Highly Expandable Sensor Network for Multifunctional Materials. *Adv.Mater*, 22, 4643-4648.

Lehmann FO (2004) The mechaisms of lift enhancement in insect flight. *Naturwissenschaften*, 91:101-22.

Ma KY, Chirarattananon P, Fuller SB, Wood, RJ (2013) Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot. *Science*. 340: 603-607.

Mayr E (1976) *Evolution and the Diversity of Life*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge. Ediz. Italiana: *Evoluzione e varietà dei viventi*. Einaudi, Torno, 1983.

Miller L, Peskin CS (2009) Flexible clap and fling in tiny insect flight. *J Exp Biol*, 212: 3076-3090.

Miniaci M, Krushynska AO, Movchan A, Pugno NM (2016) Spider web-inspired acoustic metamaterials. *Appl. Phys. Lett.* 109. doi:10.1063/1.4961307

Parness A, Soto D, Esparza1 N, Gravish N, Wilkinson M, Autumn K, Cutkosky M (2009) A microfabricated wedge-shaped adhesive array displaying gecko-like dynamic adhesion, directionality and long lifetime. *R. Soc. Interface*, 6: 1223 -1232.

Pievani T (2006). *La teoria dell'evoluzione*. Il Mulino, Bologna.

Santos D, Heyneman B, Sangbae K, Esparza N, Cutkosky M (2008) Gecko-inspired climbing behaviors on vertical and overhanging surfaces. Robotics and Automation (ICRA) IEEE International Conference, 2008:1125 - 1131.

Soto D, Hill G, Parness A, Esparza N, Cutkosky M, Kenny T (2010) Effect of fibril shape on adhesive properties. *Appl. Phys. Lett.* 97. doi:10.1063/1.3464553

Steven E, Saleh W, Lebedev V, Acquah SFA, Laukhins V, Alamo RG, Brooks JS (2013) Carbon nanotubes on a spider silk scaffold. *Nat. Commun.* 4, 2435. doi:10.1038/ncomms3435

Thompson DW (1917) *On growth and Form*. Cambridge University Press. Ediz.Italiana: *Crescita e forma*. Boringhieri, Torino, 1969.

Turing AM (1952) *The Chemical Basis of Morphogenesis*. *Phil. Trans. R. Society London*, 237: 37-72.

Vance JT, Altshuler DL, Dickson W, Dickinson MH, Roberts SP (2014) Hovering flight in the honey bee *Apis mellifera*: Kinematic mechanisms for varying aerodynamic forces. *Physiol. Biochem. Zool.*, 87: 870-881

Vogel S (1988). *Life's Devices: The Physical World of Animals and Plants*. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-02418-9.

Wang ZJ (2004) The role of drag in insect hovering. *J Exp Biol*, 207: 4147-4155.

Wen L, Weaver JC, Lauder GV (2014) Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *J. Exp. Biol.* 217: 1656-1666.

Yarger A, Fox JL (2016) Impact of turbulence on flying insects in tethered and free flight: High-resolution numerical experiments. *Integrat Comp Biol*, 56: doi: 10.1093/icb/icw086.

oung J, Walker SM, Bomphrey RJ, Taylor GK, Thomas AL (2009) Details of insect wing design and deformation enhance aerodynamic function and flight efficiency. *Science*, 18: 1549-1552.

Zhao Q, Buehler MJ (2013) Webs measure up. *Nature Materials* 12: 185-187.

Zhao HY, Zhang PF, Ma Y, Ning JG (2014) The Design of a Low-speed Wind Tunnel for Studying the Flow Field of Insects' Flight. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 9302. doi: 10.1117/12.2080734.