

La bioinspiración como herramienta de la tecnología

Arturo Romero Salvador

aromeros@ucm.es

Académico Numerario de la RAC

Departamento de Química en Ciencias Farmacéuticas.
Universidad Complutense de Madrid.

Palabras clave: bioinspiración, función, principio de funcionamiento, ingeniería de diseño.



RESUMEN:

En la naturaleza se encuentran estructuras y procesos que pueden servir como modelo para una gran variedad de tecnologías. El objetivo de la bioinspiración es el diseño de sistemas artificiales a los que se incorporan características de los sistemas naturales. Las realizaciones bioinspiradas adoptan ideas y principios de la biología, pero agregan características que no están disponibles en los modelos biológicos utilizados. A lo largo de la historia de la humanidad se pueden encontrar tecnologías cuya fuente de inspiración ha sido la naturaleza: el aeroplano y el vuelo de las aves, el cierre gancho/bucle y las semillas de bardana, el Sinkansen y el martín pescador, geckos y adhesivos, etc.

La identificación de las etapas de trabajo, que de forma consciente o inconsciente se han seguido en el desarrollo de algunos sistemas bioinspirados, puede ser útil para establecer la metodología a seguir con esta forma de innovar. Los conceptos de "estructura", "función" y "principio de funcionamiento" se identifican como elementos centrales en el proceso de transferencia de conocimiento biomimético a sus aplicaciones.

ABSTRACT:

Structures and processes that are found in nature can serve as a model for a wide range of technologies. The goal of bioinspiration is the design of artificial systems to which characteristics of natural systems are incorporated. Bioinspired devices adopt ideas and principles from biology, but features are added which are not available in the biological models used. Throughout the history of mankind, we can find technologies which source of inspiration has been nature: the airplane and the flight of birds, the hook / loop closure and the seeds of burdock, the Sinkansen and the kingfisher, geckos and adhesives, etc.

The identification of the work stages, which have been consciously or unconsciously followed in the development of some bio-inspired systems, can be useful to establish the methodology to follow with this way of innovation. The concepts of "structure", "function" and "principle of operation" are identified as central elements in the process of transferring biomimetic knowledge to its applications.



1. INTRODUCCIÓN

La humanidad ha tratado de satisfacer sus necesidades materiales desarrollando y aplicando una gran variedad de tecnologías. A medida que la sociedad evolucionaba, también lo hacían sus demandas y, en consecuencia, los métodos con los que lograba satisfacerlas. Primero fueron los conocimientos empíricos, basados en la experiencia, los que permitieron desarrollar procedimientos tecnológicos. Después, este desarrollo se basó en la aplicación sistemática de los descubrimientos científicos.

Cuando el hombre comenzó a fabricar útiles para compensar sus carencias y limitaciones, trató imitar las habilidades de la naturaleza. Se vistió con pieles para mantenerse a una temperatura cálida y desarrolló herramientas de piedra y de hueso que emulaban los dientes y las garras de los animales. Posteriormente, se pueden encontrar creaciones humanas que tienen un claro referente biológico. Artesanos, diseñadores o ingenieros han usado el conocimiento adquirido con el estudio de los seres vivos para sus invenciones y desarrollos.

Estamos rodeados de una inmensa variedad de especies que han sido capaces de sobrevivir desde que aparecieron en la naturaleza. Todas ellas han desarrollado las habilidades necesarias para resistir y competir en el medio en que habitan. Unas veces han desarrollado estructuras, construidas con materiales apropiados, que les permiten realizar una determinada función con la que ejecutar sus actividades. Otras, alcanzan el objetivo generando y liberando sustancias que son percibidas por individuos, de la misma o de distinta especie, y reaccionan de una manera beneficiosa para quien la liberó. La naturaleza pone ante nuestros ojos estructuras, materiales, sustancias, funciones y mecanismos que han permitido a los distintos seres vivos sobrevivir en un determinado entorno ambiental.

Toda esta información, tecnología natural, se puede utilizar para desarrollar tecnología artificial. Los seres vivos han resuelto los problemas a los que se han enfrentado mediante el lento, millones de años, proceso de la evolución y nosotros queremos resolverlos en decenas de meses, utilizando los conocimientos disponibles e incorporando criterios económicos. A pesar de las profundas diferencias entre ambas tecnologías, la naturaleza ofrece una valiosa fuente de innovación que puede aprovecharse para disponer de bienes y servicios de carácter tecnológico con los que aumentar el bienestar humano. En la biología pueden encontrarse muchos ejemplos de estructuras y procesos que pueden inspirar nuevas ideas y sugerir objetivos alcanzables sin recurrir a instalaciones de gran complejidad tecnológica.

La emulación consciente de la genialidad creativa de la naturaleza es una estrategia adecuada para desarrollar

productos, realizar diseños o aplicar procedimientos técnicos. Muchos logros que han conseguido los seres vivos pueden transferirse a los procesos de manufactura si se estudian modelos de la naturaleza con el fin de imitarlos o inspirarse en ellos para resolver algunos problemas que nos planteamos (Whitesides, 2015).

2. LA NATURALEZA COMO MODELO TECNOLÓGICO

Los seres vivos, sin excepción, son extraordinariamente complejos. Incluso el organismo unicelular más simple sigue mostrando propiedades y procesos que todavía no son bien conocidos. Sin embargo y a pesar de su gran complejidad, es posible comprender algunos aspectos que ponen de manifiesto la optimización de funciones que han alcanzado a lo largo de millones de años de evolución.

No es necesario comprender los mecanismos detallados que hacen funcionar a los seres vivos para desarrollar aplicaciones prácticas. Basta con disponer del conocimiento científico de determinados fenómenos que caracterizan los sistemas biológicos para desarrollar aplicaciones tecnológicas. Generalmente, el análisis de sus estructuras destinado a conocer las ventajas competitivas que le aportan suele conducir a la identificación de funciones. Como gran parte de la actividad tecnológica busca, en última instancia, la función, es necesario conocer y entender como son las estructuras y las funciones de los sistemas biológicos. Afortunadamente, para imitar una determinada función, no es necesario comprenderla por completo, del mismo modo que no necesitamos saber cómo funcionan los disolventes a nivel molecular para emplearlos en la síntesis de productos químicos.

Cuando se utilizan sistemas biológicos como modelo de comportamiento, pueden seguirse diferentes estrategias para conseguir las innovaciones tecnológicas. Se han empleado varios términos para describir el procedimiento de transferencia de "tecnología natural" a "tecnología humana". Biomimética, bioinspiración, bioderivación, bioadaptación, bioasistencia y bioextracción, etc., son algunos términos empleados para denominar el trabajo tecnológico dirigido por la emulación de la naturaleza.

En la década de 1970 se generalizó el término biomimético para referirse a los procedimientos de innovación basados en la imitación de sistemas biológicos. De acuerdo con su significado-biomimética deriva de bios, que significa vida, y mimesis, que significa imitar- esta disciplina científica estudia realizaciones de la naturaleza con la finalidad de imitarlas en diseños y procesos destinados a resolver problemas humanos. Mediante la biomimética, los diseñadores e ingenieros disponen de un método de trabajo basado en los procedimientos que han desarrollado



los organismos vivos para resolver problemas complejos. Estos profesionales, pueden utilizar el diseño que ha permitido a los seres vivos alcanzar soluciones a través de millones de años de evolución, para obtener un diseño actual (Patek, 2014).

Gracias a la investigación realizada durante varias décadas, se ha podido valorar la aplicación del conocimiento obtenido con el estudio de muchos sistemas biológicos en diferentes niveles, molecular, orgánulos, células, tejidos, órganos, organismos y colonias. La solución de problemas técnicos con modelos biológicos (Vicent et al., 2006) se ha abordado fusionando conceptos biológicos y tecnológicos. Por ello, puede definirse la biomimética como la cooperación interdisciplinaria, principalmente de la biología y la tecnología, con el objetivo de resolver problemas prácticos mediante el estudio de funciones de sistemas biológicos, su abstracción, transferencia y aplicación a la solución. Aunque la correcta comprensión de los factores que gobiernan los procesos biológicos ha permitido conseguir la funcionalidad esperada, mediante la imitación simplificada de sistemas vivos no se logran necesariamente las mejores respuestas tecnológicas.

Los procesos de innovación basados en la naturaleza no se han limitado a la imitación y recreación de las relaciones estructura/función. El término bioinspiración, introducido en la literatura científica dos décadas más tarde que el de biomimética, se utiliza para describir los procesos de transferencia de tecnología que se basan en el estudio y comprensión de los aspectos fundamentales de alguna actividad biológica, con el fin de aplicarlos en la construcción de un artefacto o en el diseño de un procedimiento. Es necesario identificar aquellas funciones que son útiles para el organismo y que también pueden ser útiles para resolver un determinado problema tecnológico. Los sistemas bioinspirados adoptan ideas y principios de la biología, pero agregan características que no están disponibles en sus modelos biológicos. La ingeniería bioinspirada necesita comprender el funcionamiento de los sistemas vivientes pero sus construcciones no guardan, aparentemente, semejanza con sus modelos biológicos. Este planteamiento permite diseñar y obtener productos, artificios o procesos que logran rendimientos superiores al del modelo o al de una solución biomimética (Drack et al., 2018).

El empleo de los términos biomimético y bioinspirado es bastante reciente, pero la utilización de modelos biológicos, para recrear algunas de sus características en sistemas inanimados, ha acompañado al progreso de la tecnología a lo largo de los siglos. Por medio de la bioimitación y la bioinspiración, aprendimos la manera de volar, desarrollamos algoritmos de optimización (Ant Colony Optimisation-ACO) o facilitamos el trabajo humano por medio de la robótica. Aunque ambos términos utilizan

diferentes caminos para conseguir las innovaciones, tienen un mismo objetivo y muchas acciones comunes. Por ello, denominaremos bioinspiración a los distintos procedimientos, incluyendo la imitación deliberada, destinados a lograr versiones artificiales del modelo biológico original.

3. EL PROYECTO BIOINSPIRADO

Se inicia un proyecto de ingeniería estableciendo la tarea a realizar y se continúa definiendo la función que permite cumplir el objetivo, identificando los principios físicos que la rigen, realizando el diseño del dispositivo que ejecutará la tarea y se finaliza con la construcción del equipo (Wolff, 2017). El proyecto bioinspirado se puede abordar de dos maneras diferentes, dependiendo de que se parta de la observación de un fenómeno en un sistema biológico o con una pregunta que procede de la tecnología. La primera, que se conoce como de abajo-arriba (Bottom-up), comienza con el análisis del sujeto natural y continúa con un proceso de comprensión de los principios y de abstracción del modelo, finalizando con la implementación técnica. La segunda, de arriba-abajo (Top-down), parte del problema técnico y continúa con la búsqueda de analogías biológicas, la identificación de los principios que se quieren transferir, la abstracción (independencia del modelo biológico) y finaliza con el estudio de la viabilidad técnica y el prototipo (Speck et al., 2017).

Con frecuencia, la tarea y la función de un sistema biológico son obvias. Por ejemplo, la tarea de las alas de las aves es volar y la función que deben realizar es generar elevación. Es decir, para alcanzar el objetivo (cumplir la tarea), volar, se debe establecer la función, resolver el problema de conseguir elevación. El aeroplano construido por los hermanos Wright puede considerarse un ejemplo de tecnología bioinspirada, aunque no utiliza los mismos procesos que un pájaro para volar. Para que un objeto más pesado que el aire pudiera elevarse y desplazarse varios metros por encima de la superficie terrestre, se inspiraron en el vuelo de las aves con el fin de buscar la manera de conseguir elevación, control y propulsión. Imitando el contorno y la curvatura del ala de las aves, consiguieron que su artefacto se pudiera elevar y controlar, para lo que utilizaron manivelas, poleas, cuerdas y ruedas dentadas que simulan las alas y articulaciones de los murciélagos. Sin embargo, para el tercer elemento, la propulsión, tuvieron que concebir un sistema totalmente diferente, una hélice impulsada por un motor.

Cuando el origen de la investigación procede de la biología, el proyecto se inicia con la observación de un fenómeno en un sistema biológico que se considera de interés potencial para transferirlo a una aplicación, por lo



que preciso plantear una función tecnológica que coincida con la función biológica identificada. El ingeniero suizo, George de Mestral, se dio cuenta de que los diminutos frutos de una planta llamada bardana (*Arctium lappa*), se adherían a su propia ropa y al pelaje de su perro mediante unos ganchos. La planta había desarrollado este sistema de unión, función de los ganchos, para realizar la tarea de dispersar las semillas. Mediante lentes de aumento observó detalles de la manera con la que se unían y se separaban los pequeños ganchos y los filamentos de las superficies. Estas observaciones le permitieron establecer el principio de funcionamiento que consigue la unión y la separación de la semilla con el objeto filamentos, que podía enunciarse así, «unir objetos de manera reversible». Inspirándose en la semilla, creó el cierre gancho/bucle para la ropa y lo registro en 1955 con la marca Velcro (de las palabras francesas *velours* "terciopelo" y *crochet* "gancho"). Aunque el principio de funcionamiento es el mismo que en el modelo biológico, se produce un cambio en el comportamiento de los materiales que se unen. Mientras que el gancho es rígido en las semillas de bardana, en la aplicación es elástico y se dobla al desprenderse. El cambio se debe a la conveniencia de priorizar la dificultad o la facilidad de desprendimiento. Este tipo de unión biomimética se utiliza en un gran número de sectores entre los que se encuentran algunos tan alejados como el doméstico, el médico o el militar.

En ambos ejemplos de trabajo bioinspirado de abajo-arriba, se parte de un fenómeno observado en un sistema biológico que puede tener interés para transferirlo a una aplicación, y se termina con el sistema artificial capaz de realizar la tarea. Figura 1.



Figura 1. Metodología de trabajo bioinspirado "de abajo hacia arriba (bottom-up)". Elección del sistema biológico (1). Tarea realizada (2). Análisis de la estructura y de la función (3). Identificación de los principios de funcionamiento (4). Modelo tecnológico y prototipos (5)

Cuando se plantea el proyecto bioinspirado de arriba-abajo, se pretende encontrar soluciones a problemas ingenieriles buscando modelos en el mundo biológico. Se toman como modelo los sistemas biológicos que realizan con éxito una tarea similar a la que se pretende lograr. Es preciso identificar la función con la que consiguen realizar con éxito la tarea para poder incorporarla en el prototipo

tecnológico. La metodología de trabajo, cuando el origen de la idea a explorar procede de la ingeniería, se denomina también "Tecnología de extracción".

Japón abrió el 1 de octubre de 1964 el tren más rápido del mundo, conocido como Shinkansen ("Nueva Línea Troncal") y "súper exprés de los sueños", cuando la alta velocidad todavía era un concepto próximo a la utopía en Europa y en Estados Unidos. Sin embargo, tuvo que resolver problemas no previstos y que aparecieron al entrar en servicio. Cada vez que el famoso tren bala japonés se aproximaba a 260 km/h, los cambios de presión atmosférica producían un ruido estrepitoso cuando el tren salía del túnel. Como la explosión sónica se extendía en un radio de varios cientos de metros, el tren más rápido del mundo afectaba gravemente a las zonas residenciales cercanas a los túneles. Afortunadamente para la empresa ferroviaria West Japan Railway Company, uno de sus ingenieros, Eiji Nakatsu, era un gran aficionado a la observación de aves y se inspiró en el martín pescador para resolver el problema. Cuando el martín pescador se zambulle, desde el aire al agua para capturar peces, no provoca salpicaduras porque es capaz de desplazarse de manera suave y rápida entre dos medios que ofrecen resistencias muy diferentes. Comparando varios prototipos de la máquina de tracción en ensayos de laboratorio dedujeron que el más parecido al pico del ave era el que producía menos ruido. Figura 2.

Pero había otro elemento del tren que también contribuía al excesivo ruido. Este elemento, conocido con el nombre de pantógrafo ferroviario, es el mecanismo articulado de la parte superior que transmite la energía eléctrica. Al pasar el aire a través del pantógrafo forma unos

torbellinos denominados vórtices de Karman. El ingeniero Nakatsu se inspiró en otras dos aves, la lechuza y el pingüino, para diseñar el nuevo pantógrafo. De la primera, imitó su vuelo silencioso mediante estructuras similares a las plumas primarias, dotadas de bordes dentados con las que fragmenta el flujo de aire que las atraviesa. Para la base del dispositivo se inspiró en el abdomen liso de



los pingüinos que les permite deslizarse con muy poca resistencia. El nuevo tren bala rediseñado por Nakatsu, Shinkansen 500, entró en funcionamiento en 1997 y logró alcanzar una velocidad de 320 km/hr, sin superar el límite de 70 decibelios y con un descenso del 15% del consumo de energía eléctrica.

las dificultades que se derivan de la complejidad de los sistemas vivos y de las profundas diferencias entre los modos con que opera la tecnología humana y la evolución natural.

Normalmente, en el modelo biológico se encuentran,

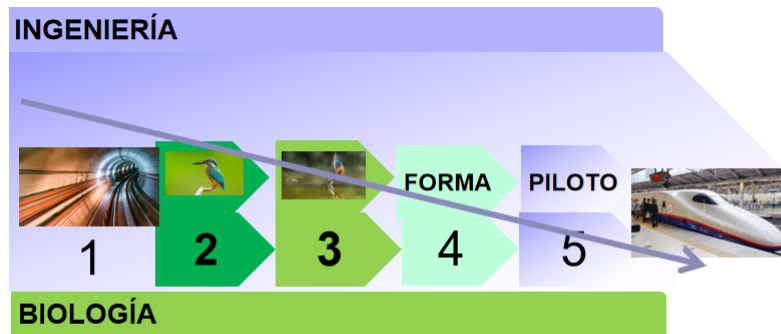


Figura 2. Metodología de trabajo bioinspirado “de arriba hacia abajo (top-down)”. Formulación del problema técnico (1). Búsqueda de analogías en la naturaleza (2). Identificación de estructura y principios de funcionamiento (3). Modelo tecnológicogico (4). Prototipos y pruebas (5)

Aunque un organismo comprende innumerables características (estética, dimensiones, materiales, formas, colores, etc.), en el proyecto biomimético se debe identificar la que se quiere transferir, separándola, al menos mentalmente, de las entidades que constituyen el sistema biológico completo. Así, las propiedades específicas del contorno (ajenas al objetivo que se busca) del sistema biológico deben ser aisladas para que puedan identificarse las funciones inherentes y los principios de trabajo.

Tanto en los dos ejemplos anteriores, correspondientes al trabajo de abajo-arriba, como en este último, de arriba-abajo, se pueden comparar los tres elementos característicos del proyecto bioinspirado, tarea, función y principio de funcionamiento, entre el modelo biológico y el producto tecnológico. El ave y el aeroplano tienen la misma tarea, volar, la misma función, generar elevación con las alas, y el mismo principio de funcionamiento, efectos aerodinámicos. La semilla de la bardana, cadillo, y el cierre Velcro, realizan diferentes tareas, dispersar las semillas y lograr uniones, pero ambos tienen en común la función, conseguir una unión reversible entre materiales de distinta naturaleza y el mismo principio de funcionamiento, interacción flexible entre varios elementos de estos materiales. La tarea del martín pescador es diferente a la del tren, pesca y desplazamiento a elevada velocidad, pero coincide la función que tiene la forma de la cabeza con la forma que tiene la máquina tractora; función que se basa en el mismo principio.

El proceso de identificación de la función que realiza el modelo biológico, tanto para lograr una aplicación como para resolver un problema técnico, debe superar

además de la función a transferir, distintas funciones que interfieren con ella. Por ello, es conveniente hacerse la siguiente pregunta, ¿Es correcta la función identificada o hay otra función más significativa para la tarea que se debe transferir? Para responder a esta pregunta utilizaremos un ejemplo histórico que pueden ser muy ilustrativo para reconocer funciones en los modelos biológicos. En la antigua Roma, la Escuela neumática de medicina consideraba que los pulmones tenían como función enfriar el corazón. Actualmente nos parece una interpretación absurda, pero teniendo en cuenta la evidencia disponible para Ateneo de Atalea y sus discípulos, quizás nos parezca bastante razonable. Dos observaciones: morfológicamente los pulmones rodean al corazón y el aire inhalado es generalmente más fresco que el aire exhalado. Con ambas observaciones se puede concluir que se produce un transporte de calor que enfría el corazón.

Había que esperar hasta 1774 para que Priestley descubriera el aire deflogistizado y reconociera su papel fundamental para los seres vivos. Es indudable que los humanos no pueden sobrevivir sin oxígeno, siendo el intercambio de gases la principal función de los pulmones mientras que la refrigeración es una función secundaria. En la investigación bioinspirada se debe explorar la posible multifuncionalidad de los órganos objeto de transferencia (p. intercambiar gas y enfriar el corazón, en el caso del pulmón).

Los métodos de adhesión baratos y confiables siguen siendo un objetivo de la ingeniería para cubrir diversas necesidades de unión reversible entre dos sustratos. En aplicaciones de movilidad en paredes, es necesario que



la adhesión sea segura y que, además, pueda realizarse la separación de manera sencilla. La falta de seguridad dificulta el desarrollo de robots capaces de adherirse y moverse en superficies verticales para vigilancia y mantenimiento de estructuras artificiales, como fachadas de edificios, plantas de generación de energía nuclear o torres de turbinas eólicas. En la última aplicación se evitaría la necesidad de montar y desmontar andamios cada vez que hay que repintar la torre.

La adhesión exhibida por los reptiles pertenecientes a la familia de los gecónidos (Gekkonidae), conocidos popularmente como geckos, para desplazarse rápidamente en paredes verticales y techos, ha fascinado a los humanos desde hace milenios. Estos reptiles pueden aferrarse a prácticamente cualquier tipo de superficie y soportar su masa corporal con la almohadilla de un solo dedo. Transferir el procedimiento de adhesión que utilizan los geckos a estructuras sintéticas, es el reto que hay que superar para disponer de cintas de unión de superficies sin necesidad de un pegamento intermedio, o de robots capaces de escalar paredes verticales de cualquier material. Mientras que la transferencia del cadillo al cierre Velcro es sencilla, el desarrollo de un sistema de unión de superficies, también reversible, inspirado en los geckos, es mucho más complejo, tanto por la dificultad de conocer cuál es la estructura de las patas del reptil, saber la función que realiza y el principio de funcionamiento, como por la dificultad de transferir este conocimiento, construcción de estructuras artificiales bioinspiradas, a sistemas tecnológicos (Autumn et al., 2014).

Después de casi un siglo de descripción anatómica, los estudios de microscopía demostraron que el pie del gecko tiene una estructura jerárquica compleja, formada por cerca de quinientos mil pelos de queratina, denominados setas. Cada una de estas setas tiene una longitud de 30-130 μm , un diámetro de aproximadamente la décima parte del de un cabello humano y termina en cientos proyecciones en forma de espátula de 0,2-0,5 μm de diámetro. La función de esta estructura jerárquica es unirse fuertemente a la superficie y soltarse de ella sin dificultad, dependiendo de la posición que determina el movimiento del pie.

Solo con la aplicación de las modernas técnicas de imagen (Microscopía electrónica de barrido (SEM), Microscopía electrónica de transmisión (TEM), Microscopía de fuerza atómica (AFM)) se pudieron investigar con detalle los mecanismos por los que se produce la adhesión a las superficies. Rechazando otras hipótesis, entre ellas las basadas en fuerzas capilares que dependen de la hidrofobicidad, se ha demostrado que la adhesión se produce por las fuerzas de van der Waals. La identificación del principio físico de la función que tiene la estructura jerárquica de las almohadillas del pie del gecko no es suficiente para disponer de la información

que se necesita para realizar la transferencia a cintas y robots. La comprensión del funcionamiento del sistema adhesivo del gecko se logra cuando se integran las fuerzas intermoleculares a escala atómica, la mecánica de contacto a escala nanométrica y milimétrica y la biomecánica de locomoción a escala del animal completo (Autumn et al., 2000).

La transferencia de estas estructuras biológicas a superficies adhesivas sintéticas es un problema complejo por la dificultad de fabricar estructuras fibrilares capaces de imitar las habilidades de los geckos (Brodoceanu, 2016). Para que estas configuraciones puedan emplearse como adhesivos secos deben cumplir simultáneamente varios requisitos. Las interacciones de van der Waals, en las que se basa la unión a superficies, requieren un gran número de fibras de contacto por unidad de área. Debe evitarse la aglomeración de las fibras aumentando el espacio entre ellas (disminuyendo la relación entre el diámetro y la longitud de la fibra) y aumentando la rigidez de la fibra. Otra propiedad deseable es la anisotropía adhesiva que permita un desprendimiento fácil a lo largo de una dirección preferencial. Figura 3.

Aunque se está realizando un gran esfuerzo para diseñar un sistema que funcione como el adhesivo gecko, es poco probable que los intentos biomiméticos de copiar directamente las setas tenga éxito, debido a la complejidad que supone reproducir el modelo. Sin embargo, el enfoque bioinspirado basado en el conocimiento detallado del sistema biológico y en principios de diseño adecuados, han aportado y seguirán aportando materiales con propiedades funcionales similares a las de los geckos.

Cualquier actividad socioeconómica consume energía. Por ello, la energía es imprescindible para el desarrollo de las sociedades humanas. Sin embargo, el actual modelo de consumo y abastecimiento energético compromete el futuro de las actuales fuentes de combustible y ocasiona graves problemas al medioambiente. Los países desarrollados impulsan dos tipos de medidas para enfrentarse a las consecuencias ambientales, económicas y sociales de su consumo. Por un lado, promueven acciones destinadas a racionalizar el empleo de la energía, ahorrado y evitando gastos innecesarios y por otro, aumentando la participación de las energías renovables en su estructura energética.

En la naturaleza hay especies animales que han sido capaces de adaptarse, optimizando la energía disponible, para vivir en condiciones extremas. Mientras que el oso blanco y el pingüino habitan en las heladas aguas del Océano Glaciar Ártico o de la Antártida, algunos tipos de termitas viven en las calurosas arenas del desierto.

Al *Ursus maritimus* se le considera uno de los grandes



Figura 3. Trabajo bioinspirado en el gecko “de abajo hacia arriba bottom-up”. Identificación del modelo biológico (1). Análisis de la morfología funcional (2). Identificación los principios de funcionamiento (3). Abstracción del modelo biológico y formulación de modelos tecnológicos (4). Aplicación de la tecnología y pruebas en prototipos (5.)

maestros de la naturaleza en la conservación de energía. Los mecanismos por los que la capa externa de este animal es capaz de mantener la gran diferencia de temperatura, 37°C de su cuerpo y -40°C del exterior, durante mucho tiempo, han despertado el interés de científicos y de ingenieros interesados en el aislamiento térmico. Otro maestro, el pingüino emperador (*Aptenodytes forsteri*), consigue mantener una diferencia de temperatura similar mediante su plumaje, plumas de contorno, semiplumas asociadas y filoplumas adyacentes, con las que logra una cubierta impermeable e impenetrable que cubre una gruesa capa de plumón. La comprensión de estos procesos se utiliza en varias aplicaciones bioinspiradas como aislamiento en edificios, impermeabilización dinámica, ropa para climas fríos o de camuflaje, etc.

El termitero es el lugar que emplea una colonia de termitas para realizar todas sus actividades, agricultura, defensa o construcción, en las distintas zonas destinadas al alojamiento, cámara real, cultivo de los hongos y canales de ventilación. Estos insectos deben mantener una temperatura muy próxima (variaciones inferiores a 1°C) a 30°C para disponer de su fuente de alimentación. En el África subsahariana la temperatura del exterior oscila entre máximas de 40°C durante el día y mínimas de 2°C durante la noche. La actividad de estos organismos aerobios desprende calor y dióxido de carbono, consumiendo materia orgánica, los hongos que cultivan debajo del nido, y el oxígeno del aire. La ingeniosa construcción de barro poroso en la que habitan les permite mantener constante la temperatura, extraer el dióxido de carbono y aportar el oxígeno que necesitan para sus funciones vitales, utilizando una red de canales y tuberías. Algunos edificios bioinspirados han resuelto los problemas del aire acondicionado basándose en la estructura de los termiteros. Se considera que el centro comercial de la ciudad de Harare, Zimbabwe, conocido como Centro Eastgate, es el primero que se diseñó con una ventilación y refrigeración natural. Mick Pearce, su arquitecto, se inspiró en el termitero para lograr que el gasto de energía fuera el 10% del requerido por los edificios convencionales.

El consumo mundial de energía en un año es aproximadamente la energía que recibimos del sol en una hora. Su conversión y almacenamiento para satisfacer nuestras necesidades energéticas es un gran desafío científico y tecnológico. A lo largo de muchos siglos, plantas, algas y algunas bacterias han perfeccionado un procedimiento, fotosíntesis, que utiliza luz solar como fuente de energía y dióxido de carbono y agua, como materias primas. El resultado de este proceso puede simplificarse a dos reacciones que son fundamentales para la vida en nuestro planeta. Una es la oxidación del agua, con formación de oxígeno molecular, y la otra, es la reducción de dióxido de carbono para formar carbohidratos. Mediante la fotosíntesis, se transforma la energía solar en energía química que se almacena en los compuestos orgánicos sintetizados. En la fotosíntesis natural toman parte decenas de enzimas para catalizar el gran número de reacciones individuales que la hacen posible. La gran complejidad del proceso y el gran número de variables que intervienen hace muy difícil mimetizar la fotosíntesis, incluso replicarla en el laboratorio. Sin embargo, pueden identificarse algunas etapas en las que inspirarse para proponer procedimientos tecnológicos, fotosíntesis artificial, capaces de aprovechar la radiación solar para producir otros tipos de energía que pueden ser utilizados de manera eficiente. Los trabajos bioinspirados se dirigen hacia la transformación de la energía solar en energía eléctrica o en energía química de compuestos sencillos como hidrógeno o moléculas de pocos átomos de carbono y, si es posible, con un rendimiento energético superior al de las plantas que sólo aprovechan entre el 1 y el 2% de la radiación que reciben. El desarrollo de estos dispositivos artificiales se basa en los tres elementos fundamentales de la fotosíntesis, absorción eficiente de la luz solar, catalizadores apropiados para favorecer las reacciones deseadas y medios eficaces para lograr la separación y el movimiento de cargas.



4. BIBLIOGRAFÍA

Autumn, K., Liang, Y. A., Hsieh, S. T., Zesch, W., Chan, W. P., Kenny, T. W., ... & Full, R. J. (2000). Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, *405*(6787), 681-685.

Autumn, K., Niewiarowski, P. H., & Puthoff, J. B. (2014). Gecko adhesion as a model system for integrative biology, interdisciplinary science, and bioinspired engineering. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *45*, 445-470.

Brodoceanu, D., Bauer, C. T., Kroner, E., Arzt, E., & Kraus, T. (2016). Hierarchical bioinspired adhesive surfaces—a review. *Bioinspiration & Biomimetics*, *11*(5), 051001.

Drack, M., Limpinsel, M., de Bruyn, G., Nebelsick, J. H., & Betz, O. (2017). Towards a theoretical clarification of biomimetics using conceptual tools from engineering design. *Bioinspiration & Biomimetics* 2018, *13*(1), 016007.

Patek, S. N. (2014). Biomimetics and evolution. *Science*, *345*(6203), 1448-1449.

Speck, O., Speck, D., Horn, R., Gantner, J., & Sedlbauer, K. P. (2017). Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments. *Bioinspiration & Biomimetics*, *12*(1), 011004.

Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, *3*(9), 471-482.

Whitesides, G. M. (2015). Bioinspiration: something for everyone. *Interface Focus*, *5*(4), 20150031.

Wolff, J. O., Wells, D., Reid, C. R., & Blamires, S. J. (2017). Clarity of objectives and working principles enhances the success of biomimetic programs. *Bioinspiration & Biomimetics*, *12*(5), 051001.