



Real Academia de Doctores de España

LA BIOINSPIRACIÓN COMO HERRAMIENTA DE LA TECNOLOGÍA

DOCTOR D. ARTURO ROMERO SALVADOR
Académico de Número de la Sección de Ciencias Experimentales

Excmo. Sr. Presidente, Excmas. Señoras Académicas, Excmos. Señores Académicos, Señoras y Señores.

Me corresponde el honor de dirigirme a ustedes para pronunciar el discurso inaugural del Curso 2018-2019 y quiero comenzar agradeciendo el encargo a nuestro Presidente y a mis compañeros de la Sección de Ciencias Experimentales que hicieron la propuesta.

He escogido como tema de mi intervención, el empleo de la biomimética con el fin de encontrar soluciones a problemas tecnológicos.

En la naturaleza se pueden localizar muchos modelos que pueden imitarse o utilizarse como fuente de inspiración en la búsqueda de respuestas a los retos asociados a las demandas de nuestras sociedades. Tras 3.800 millones de años, los seres vivos han descubierto procedimientos que les han permitido desarrollar sus actividades y perdurar. Nuestra civilización se está aproximando al límite de tolerancia de la naturaleza y debe enfrentarse a dos graves problemas relacionados con el consumo de energía. Uno es el agotamiento de los recursos convencionales, y otro es el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero.

A través de la evolución, la naturaleza ha experimentado diferentes soluciones a los desafíos a los que se ha enfrentado, y ya ha resuelto muchos problemas que nosotros intentamos resolver. La emulación consciente de la naturaleza, utilizando los principios de las ciencias y de la ingeniería, es una opción adecuada para caminar hacia un futuro sostenible.

Los seres humanos han utilizado una gran variedad de procedimientos para aprovechar los recursos físicos que ofrece la naturaleza. Sin embargo, cuando tenemos la posibilidad de imitar el comportamiento de los sistemas biológicos, no parece razonable que nuestra estrategia de desarrollo se limite a explotar el potencial brindado por los recursos naturales. La bioinspiración pretende diseñar sistemas artificiales incorporando características de los sistemas naturales, con el fin mejorar procesos y productos tecnológicos. En este término de bioinspiración se incluyen las actividades destinadas a emular procedimientos naturales de fabricación, mecanismos que utiliza la naturaleza para cumplir sus fines y principios que determinan la conducta social de organismos.

A lo largo de esta exposición me gustaría poner de manifiesto que la comprensión de aspectos fundamentales de alguna actividad biológica para reconstruirlos con un determinado fin, se basa en el trabajo multidisciplinar y en el empleo de una metodología específica del trabajo bioinspirado.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología engloba un conjunto de conocimientos y hallazgos extraordinariamente variados por medio de los cuales el hombre ha ido dominando progresivamente su medio natural. Primero fueron los conocimientos empíricos, basados en la experiencia, los que permitieron desarrollar procedimientos con los que satisfacer sus necesidades materiales. Después, este desarrollo se basó en la aplicación sistemática de los descubrimientos científicos. Gracias a esta poderosa herramienta intelectual, aumentó la eficiencia de la mayor parte de las tecnologías implantadas y se generaron otras muchas que aportaron soluciones a problemas considerados, hasta entonces, irresolubles.

A medida que la sociedad ha ido evolucionando, también lo han hecho sus necesidades y, en consecuencia, los métodos con los que logra satisfacerlas. Los continuos avances tecnológicos han provocado profundos cambios en el modo de vida de nuestras sociedades y, también, impactos significativos sobre los recursos y ecosistemas del planeta. Actualmente, el hombre se enfrenta a la comprensión de la naturaleza con un procedimiento: el método científico. Este método consiste en un conjunto de reglas y operaciones que permiten conocer fenómenos y objetos de la naturaleza. El conocimiento que se adquiere sobre la naturaleza es propio de las ciencias experimentales y se distingue por su objetividad. Esta cualidad, la más importante y distintiva del método científico, permite que el conocimiento adquirido sea válido para cualquier sujeto.

Partiendo de una serie de observaciones sobre lo que ocurre en la naturaleza y sobre el modo con que responde a ciertas modificaciones, que intencionadamente se provocan, se ha construido una serie de teorías y de leyes que son capaces de cuantificarlos y de explicarlos, sin que existan contradicciones al analizarlas con el método de la ciencia. Las denominadas leyes de la naturaleza son una relación entre causa y efecto, aunque las leyes no son las de la naturaleza ni las relaciones de causa y efecto aparecen en la naturaleza. Mediante los resultados obtenidos con el trabajo científico a lo largo de los años se ha logrado una representación cambiante del mundo natural. El conocimiento científico es una creación intelectual que permite predecir sucesos y fenómenos naturales y, además, puede aplicarse para adaptar el medio a las necesidades y deseos del hombre. Esta capacidad de predicción es una poderosa herramienta que sirve para acertar en realizaciones prácticas como construir un puente, enviar una nave a un planeta o curar una enfermedad.

Al relacionar las acciones humanas con la degradación medioambiental, se reconoció la necesidad de establecer límites a los procesos de

crecimiento y de desarrollo económico. Durante el siglo XX fue aumentando la preocupación de la sociedad por hacer compatible el modelo productivo con la calidad medioambiental. Junto a esta preocupación por el medioambiente, fueron apareciendo numerosos estudios destinados a conocer la capacidad de los recursos naturales para aportar bienes y servicios de carácter tecnológico. Sus resultados sirvieron de base en debates institucionales, empresariales y científicos, destinados a encontrar respuestas a esta preocupación por conservar, en un contexto de crecimiento económico, las funciones vitales del planeta.

El ser humano, desde que comenzó a fabricar útiles para compensar sus carencias y limitaciones, trató de imitar las habilidades de la naturaleza. Así, por ejemplo, el ser humano 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. Sin embargo, la actividad tecnológica del hombre no se limitó a copiar ciegamente las realizaciones de la naturaleza. Unas veces, su actividad tecnológica se ha inspirado en ella para desarrollar productos, realizar diseños o aplicar procedimientos técnicos. Otras veces, creó artefactos sin precedentes, como ocurrió con la invención del eje y de la rueda, que se implantaron en la mayor parte de las culturas para resolver problemas de transporte de personas y mercancías.

Parece que el ser humano se está aproximando a una etapa de su evolución tecnológica en la que los hábitos adquiridos y la población del planeta no son sostenibles (INFORME, 2017). Hasta ahora, la humanidad ha sido capaz de encontrar las estrategias adecuadas para aprovechar los recursos físicos con los que atender las demandas sociales, sin llegar al límite de tolerancia que impone la naturaleza. La sostenibilidad es un proceso dinámico que permite a los individuos desarrollar sus capacidades y mejorar su calidad de vida mediante conductas que protegen y mejoran

los sistemas que soportan la vida en la tierra. Mientras que la materia y la energía están sujetas a las leyes de conservación, de modo que aquello que recibe un sistema, otro sistema debe proporcionarlo, el conocimiento crece continuamente.

Las economías de recursos agotables y de recursos renovables o de la equidad intergeneracional, consideran que los procesos productivos convencionales implican un agotamiento continuado del potencial de la Naturaleza como fuente de materias primas (Gómez Olaya, A.P., 2015). Junto a una explotación racional de los recursos naturales, la emulación de las conductas de los sistemas biológicos puede aportar soluciones en la dirección de la sostenibilidad. Los animales, las plantas o los microorganismos pueden considerarse “científicos” e “ingenieros” que experimentan en física, química, mecánica, ciencia de materiales, movilidad, control, sensores y en muchos otros campos. Es indudable que su paciente evolución y su voluntad de supervivencia les han permitido encontrar aquello que funciona, aquello que es apropiado, en definitiva, lo que perdura en el planeta Tierra.

2. BIOMIMÉTICA Y BIOINSPIRACIÓN

La naturaleza es rica en fuentes de inspiración para nuevas ideas, y no es difícil encontrar importantes teorías científicas que han surgido de su observación. Newton realizó sus primeras descripciones empíricas de la gravedad examinando el movimiento del Sol y de los planetas; Faraday y Maxwell determinaron las interacciones entre la corriente eléctrica y los imanes para deducir los fundamentos del electromagnetismo, y la termodinámica, es una consecuencia de los estudios de transmisión de calor y de trabajo mecánico.

El estudio de la vida -y de los fenómenos relacionados con ella-, desde células individuales hasta organismos complejos, es el objetivo de la biología. Los sistemas 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 lograda a lo largo de millones de años de evolución darwiniana. En la biología pueden encontrarse muchos ejemplos de estructuras y procesos que son útiles para inspirar nuevas ideas y sugerir objetivos que son alcanzables sin necesidad de recurrir a instalaciones de gran complejidad tecnológica (Whitesides, G. M., 2015).

Los organismos no desperdician energía en la generación de estructuras que no cumplan alguna función y se centran en aquellas características que le aportan ventajas competitivas. Aunque los mecanismos detallados que hacen funcionar a los seres vivos no se comprendan bien, el estudio de los fenómenos que caracterizan a los sistemas biológicos aporta el conocimiento científico necesario para desarrollar aplicaciones tecnológicas. Así, el análisis de sus estructuras para saber cuál es la ventaja competitiva que le aporta suele conducir a la identificación de funciones. Como gran parte de la actividad tecnológica busca, en última instancia, la función, entender las estructuras y funciones de los sistemas biológicos facilita el diseño tecnológico. Para imitar una determinada función no es necesario comprenderla por completo, del mismo modo que no necesitamos entender cómo funcionan los disolventes a nivel molecular para usarlos en síntesis orgánica.

En la década de los setenta del pasado siglo se introdujo el término biomimético para definir un procedimiento de innovación basado en la

imitación de sistemas biológicos. A lo largo de estas décadas de investigación, la biomimética ha permitido examinar diferentes modos de aplicar el conocimiento de los sistemas biológicos en diferentes niveles: molecular, subcelular (orgánulos), celular, tejidos, órganos, organismos y colonias. Fusionando conceptos de biología y de tecnología, la biomimética puede resolver problemas técnicos mediante abstracción, transferencia y aplicación de conocimientos obtenidos con modelos biológicos. Sus resultados han sido “modelos tecnológicos” con los que se ha puesto a prueba nuestra comprensión del funcionamiento de los sistemas biológicos y se han aportado pruebas inequívocas de la relación entre estructura y función, sin necesidad de abordar la complejidad de los sistemas vivos.

Gracias al conocimiento de los factores que gobiernan procesos biológicos, se ha podido conseguir el objetivo de funcionalidad tecnológica mediante la imitación simplificada de sistemas vivos. En el trabajo biomimético es fundamental la aportación de la ciencia básica, pero no es suficiente para implementar modelos tecnológicos. Se necesita aplicar la ciencia básica y, además, realizar la investigación necesaria para transformar la exploración en desarrollo.

Para incorporar las diferentes maneras de realizar el enlace entre la ciencia básica y la ingeniería se introdujo el término bioinspiración. Este concepto, más amplio que el de biomimética, se basa en la identificación de aquellas funciones que son útiles para el organismo y que también podrían ser útiles para resolver un determinado problema. Los sistemas bioinspirados adoptan ideas y principios de la biología, pero agregan características que no están disponibles en los modelos biológicos en los que se apoyan. La ingeniería bioinspirada necesita comprender el funcionamiento de los sistemas vivientes, pero sus construcciones no guardan, aparentemente, semejanza con los sistemas biológicos.

La evolución ha permitido la supervivencia de los organismos, pero su imitación no conduce necesariamente a las mejores respuestas tecnológicas. Por ello, los planteamientos tecnológicos han ido cambiando desde la imitación y recreación de las relaciones estructura-función que aparecen en la naturaleza, hasta los sistemas diseñados para conseguir un rendimiento superior al de un sistema viviente o al de un sistema biomimético. Aunque los términos biomimética y bioinspiración responden a diferentes modos de utilizar los conocimientos biológicos en aplicaciones ingenieriles, aquí se utilizarán como sinónimos porque un determinado sistema se puede abordar desde ambos enfoques.

El proceso de trabajo en ingeniería se inicia estableciendo una tarea, se continúa definiendo la función que debe realizarse, identificando los principios físicos que la rigen, realizando el diseño del dispositivo que ejecutará la tarea, y se finaliza con la construcción del dispositivo diseñado. Cuando se utiliza un procedimiento de trabajo bioinspirado, el punto de partida es el sistema biológico que debe ser investigado y termina con la tarea que debe realizar el sistema artificial. Con frecuencia, la tarea y la función de un sistema biológico son obvias. Por ejemplo, la tarea de las alas del pájaro 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. Mientras que en muchos organismos se conocen bien las formas o estructuras biológicas, sus funciones no suelen ser tan claras. Por ejemplo, el mentón de los humanos que difiere del de otros primates sin razón obvia. Dos preguntas que se plantean en el trabajo bioinspirado son: ¿Cuál es la tarea y la función de una construcción biológica particular? y ¿Qué conocimiento se transfiere de un modelo biológico a una aplicación de ingeniería?

La identificación de las etapas de trabajo que, de forma consciente o inconsciente, se han seguido para disponer de algunos sistemas bioins-

pirados puede ser útil para establecer la metodología que debe seguirse en esta nueva forma de innovar.

3. ANÁLISIS DE REALIZACIONES BIOINSPIRADAS

A lo largo de la historia de la humanidad se pueden encontrar muchas realizaciones tecnológicas cuya fuente de inspiración ha sido la naturaleza, es decir, productos, artefactos y procesos biomiméticos o bioinspirados. Ya en la antigüedad aparecen diversas creaciones humanas, conscientes o inconscientes, con una fuerte inspiración natural. En el Renacimiento italiano, Leonardo da Vinci desarrolló varios modelos de máquinas voladoras y acuáticas con un claro referente biológico.

Cuando los hermanos Wright decidieron construir el aeroplano, para lograr 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 para la elevación, control y propulsión. Imitando el contorno y la curvatura del ala de las aves, consiguieron diseñar los dos primeros elementos, elevación y control. Las manivelas, poleas, cuerdas y ruedas dentadas son una réplica de 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 (Jackson, R., 2014).

El aeroplano es un ejemplo paradigmático de producto biomimético en el que se transfieren tarea, función y principio de funcionamiento. La tarea que debe realizar un avión basado en las alas de los pájaros es la misma que la del modelo biológico, volar. La función de las alas es generar elevación y su principio de funcionamiento es el resultado de los efectos aerodinámicos del ala.

En la década de los años cuarenta del siglo XX (1948) un ingeniero suizo, George de Mestral, paseaba con su perro y se dio cuenta de que los diminutos frutos de una planta llamada bardana (*Arctium lappa*), estaban pegados a su propia ropa y al pelo del perro. Era bien conocido que las semillas de la planta se adherían con unos pequeños ganchos a superficies con filamentos, como la piel de los perros. También se sabía, por simple observación, que la tarea de esta configuración era la dispersión de las semillas. Aparte de estas observaciones en el sistema biológico, no se conocían las restantes etapas que se necesitan para realizar un diseño biomimético y conseguir una aplicación. Los detalles de los pequeños ganchos y su interacción con las superficies fueron fáciles de visualizar mediante lentes de aumento o microscopía electrónica de barrido. Con esta información se podía establecer el principio de funcionamiento que permitía la unión y la separación de las semillas de los pelos del perro y que consiste en una combinación de un comportamiento de flexión elástica y una conexión apretada.

Estos resultados, obtenidos al estudiar la interacción de la semilla con las superficies a las que se adherían, permitieron especificar la función con la que se realizaba la tarea y que podía enunciarse así: “unir objetos de manera reversible”. Inspirándose en la semilla, Mestral creó el cierre gancho/bucle para la ropa y lo registró en 1955 con la marca Velcro (de las palabras francesas *velours* “terciopelo” y *crochet* “gancho”).

Aunque el principio de funcionamiento en la aplicación es el mismo que el del modelo biológico, se produce un cambio en las estructuras involucradas. Mientras que el gancho es rígido en el modelo biológico, en la aplicación, el gancho es elástico y se dobla al desprenderse, respondiendo a que se priorice la dificultad o la facilidad de desprenderse. En este ejemplo se observa que muchas características del modelo biológico han sido

abstraídas y no se han transferido: materia, forma, tamaño, etcétera. Sin embargo, tanto la función como el principio de funcionamiento son idénticos y son los que se han transferido. Este tipo de unión biomimética se utiliza en un gran número de sectores, entre los que se encuentran algunos tan alejados como el médico y el militar (Autumn, K., 2014). La NASA utiliza el mismo principio de unión para evitar que las bandejas floten cuando las naves espaciales se desplazan en un ambiente sin gravedad.

En cada uno de estos dos ejemplos, avión y semilla, se ha identificado una función particular entre las distintas funciones que realiza el modelo biológico, pero existe una importante diferencia entre ambos. Mientras que en el caso de Velcro, se produce la transferencia de conocimiento biomimético que incluye función y principio de funcionamiento, en el caso del avión, se transfiere, además, la tarea u objetivo.

Otra fuente que nos ofrece la naturaleza para el trabajo bioinspirado es la conducta de las especies que realizan tareas siguiendo el principio de la inteligencia de enjambre, según el cual, un solo individuo carece de la inteligencia necesaria para solucionar problemas, pero mediante la cooperación entre ellos son capaces de resolverlos con eficiencia. Este comportamiento cooperativo es frecuente en la naturaleza y se puede encontrar en las colonias de hormigas, enjambres de abejas, poblaciones de termitas, bancos de peces, etcétera. La inteligencia colectiva es la que hace de los algoritmos bioinspirados candidatos perfectos para aportar soluciones cuando se presentan problemas no determinísticos en los campos de la economía, el comercio, la ingeniería, la industria o la medicina.

El proceso que sigue una colonia de hormigas para buscar alimento y regresar al hormiguero inspiró a Marco Dorigo para proponer, en su tesis doctoral de 1992, un importante algoritmo de optimización (Dorigo,

M., 1996), conocido como algoritmo ACO (Optimización por Colonia de Hormigas), del que han ido derivando otros muchos con el fin de adaptarlo a los diferentes problemas. Una colonia de hormigas, reales o virtuales, es una población de individuos independientes que cooperan para encontrar una buena solución a un determinado problema. En el caso de las hormigas reales, el objetivo es encontrar comida y en el caso de las hormigas virtuales, es resolver un problema de optimización. Una sola hormiga es capaz de encontrar una solución al problema, pero las buenas soluciones sólo las logran cuando cooperan muchos individuos a través de un medio físico, proceso denominado estigmergia.

Cuando las hormigas reales salen en busca de comida, caminan de forma aleatoria y, cuando la encuentran, regresan al hormiguero dejando sobre la tierra un rastro de feromona de reclutamiento o forrajeo. Esta sustancia química se caracteriza porque cualquier individuo la reconoce al entrar en contacto con ella y porque al evaporarse -proceso dependiente de la presión de vapor-, disminuye su concentración a medida que pasa el tiempo. Es probable que las hormigas que encuentran el rastro de feromonas lo sigan, en lugar de seguir caminando al azar, y que regresen por el mismo camino por el que fueron, si al recorrerlo encontraron comida. Por un lado, cuantas más hormigas sigan los caminos que conducen a la comida mayor será la concentración de feromonas y mayor el poder de atracción para que lo elijan otros individuos que emprenden la búsqueda. Por otro, cuanto más tiempo tarde una hormiga en viajar por un camino para regresar al hormiguero, más tiempo tienen las feromonas para evaporarse. La consecuencia de estos dos fenómenos, identificación y evaporación de las feromonas, es una mayor concentración de feromonas en los caminos más cortos, y por tanto serán los más frecuentados. Este es el procedimiento que utilizan las hormigas para seleccionar el camino óptimo entre un gran número de alternativas.

El otro tipo de hormigas, las hormigas simuladas, viven en un mundo virtual en el que modifican los valores numéricos, feromona artificial, asociados a los estados del problema. En los algoritmos ACO, los rastros de feromona artificial son los únicos medios de comunicación entre hormigas virtuales. El efecto de la evaporación de feromona en colonias de hormigas reales, se sustituye por un mecanismo que permite a las hormigas artificiales olvidar la historia para emprender otras direcciones de búsqueda. Mientras que las hormigas reales eligen, en cada momento, una dirección de búsqueda en función de la concentración local de feromona y de un proceso aleatorio de decisión, las hormigas artificiales crean soluciones paso a paso al moverse a través de los estados del problema disponibles y tomando decisiones aleatorias a cada paso (Dorigo, M. 2006).

Los algoritmos de optimización por colonia de hormigas se han utilizado en muchos campos y situaciones que pueden ir, desde el cálculo de rutas de una flota de transporte, planificación de los horarios de vuelo del personal aéreo, fabricación de automóviles u optimización dinámica de procesos químicos, hasta las redes neuronales, optimización de funciones numéricas, sistemas difusos, procesamiento de imágenes, control de sistemas o inteligencia artificial.

4. EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN BIOINSPIRADO

Muchos logros que han conseguido los seres vivos pueden transferirse a los procesos de manufactura (Haseyama, M., 2017). Mediante la biomimética y la bioinspiración, los diseñadores e ingenieros disponen de un método de trabajo, basado en el conocimiento de los procedimientos con los que los organismos vivos resuelven problemas complejos, que les permite realizar la transferencia de "tecnología natural" a "tecnología humana".

Un proyecto bioinspirado se inicia con la observación de un fenómeno en un sistema biológico o con una pregunta que procede de la tecnología. En el primer caso, se considera que el fenómeno observado, por ejemplo el cadillo que se adhiere a la piel de un perro, puede tener interés para transferirlo a una aplicación. En el segundo, se pretenden encontrar soluciones a problemas ingenieriles buscando casos análogos en el mundo biológico. Cuando el origen de la investigación procede de la biología es preciso plantear una función tecnológica que coincida con la función biológica identificada. Si el origen es tecnológico, la función a realizar es aquella que permita lograr el objetivo por lo que el proyecto debe encontrar algún sistema biológico en el que ya se hayan explorado funciones similares. La metodología de trabajo, cuando el origen de la idea a explorar procede de la ingeniería, se denomina “tecnología de extracción” (Drack, M. et al., 2018).

Aunque un organismo comprende innumerables características (estética, dimensiones, materiales, formas, colores, etcétera), en el proyecto biomimético se debe identificar la característica a transferir, separando, al menos mentalmente, las entidades que constituyen el sistema biológico completo. Así, las propiedades específicas relativas al contorno (forma o material) del sistema biológico deben ser olvidadas para que puedan identificarse las funciones inherentes y los principios de trabajo.

A medida que progresa la investigación, se van eliminando, abstrayendo, las características que se consideran irrelevantes para el objetivo particular. Se utiliza el término abstracción como sinónimo de “eliminación” en el pensamiento de algunas características, particularidades o propiedades de un objeto o de un sistema que no son relevantes para describir el comportamiento que se estudia. Mediante este método atomista, se logra disminuir la complejidad de la entidad investigada a medida que aumenta el grado de abstracción.

La necesidad de conocer en detalle el sistema biológico global implica comenzar la investigación con un grado de complejidad muy grande. Según va progresando el trabajo, va aumentando la abstracción y va disminuyendo la complejidad hasta que se logra comprender la función y el principio de funcionamiento que deben transferirse a la aplicación. El máximo valor de abstracción y el mínimo grado de complejidad coinciden cuando se ha logrado la comprensión que se necesita para llevar a cabo la transferencia. La investigación continúa hacia la construcción del sistema biomimético que es el que determina, en esta fase, la complejidad. Ahora se parte de la mínima complejidad y de la máxima abstracción. A medida que se va avanzando hacia la construcción inanimada, la primera va aumentando y la segunda va disminuyendo para que sea posible la transferencia. El proceso biomimético se basa en la correspondencia de funciones entre el organismo y el artefacto técnico.

Mientras que en la primera fase, el trabajo fundamental procede del campo de la biología, que debe reducir la complejidad del sistema mediante la abstracción, en la segunda, es la ingeniería la que usa la función y el principio de trabajo para realizar su tarea de proyectar y construir. El trabajo de los ingenieros consiste en aplicar leyes físicas (por ejemplo, tomadas de la mecánica de Newton), principios (por ejemplo, funciones y principios del trabajo biomimético) y reglas (por ejemplo, duración de un determinado material en las condiciones de operación), así como poner condiciones de contorno (por ejemplo, material o geometría) para conseguir un objetivo de ingeniería.

En el proceso de transferencia del modelo biológico a la aplicación, se utilizan imágenes y dibujos que representan la evolución del modelo a lo largo del proyecto. Las representaciones gráficas reflejan el grado de complejidad y abstracción a lo largo del proceso biomimético. Las primeras, que corresponden a niveles próximos al modelo biológico, van evolu-

cionando hasta lograr un diagrama que simbolice la función y el principio de trabajo. El resultado de la información aportada por la biología es un esquema que refleja la transferencia de conocimiento biomimético y permite construir un primer prototipo, incorporando los elementos de contorno necesarios (materiales, forma, tamaño, etcétera) para demostrar el principio de trabajo mediante pruebas experimentales. Es necesario probar varias combinaciones de los elementos que constituyen el prototipo y realizar la evaluación experimental de cada uno de los prototipos para obtener un conocimiento que los ingenieros transfieren a los biólogos. Esta transferencia de conocimiento biomimético inverso (de la ingeniería a la biología) puede informar a los biólogos sobre qué combinación de parámetros funciona mejor en el artefacto, y por lo tanto, potencialmente también en el sistema biológico. A medida que el proyecto se acerca a su fase final, las imágenes van adquiriendo mayor detalle y el proceso acaba cuando incluyen todos los detalles que permiten la construcción del sistema biomimético.

Normalmente, en el modelo biológico se encuentran, además de la función a transferir, distintas funciones que interfieren con ella. Es necesario discriminar funciones para identificar correctamente la función que realiza la tarea. Como no es una actividad sencilla, el investigador debe formularse la siguiente pregunta, ¿Es correcta la función identificada o es otra función la más significativa para realizar la tarea que debe realizar el artefacto?

El siguiente ejemplo histórico es muy instructivo para mostrar el problema que supone inferir las funciones que realizan una determinada tarea. En la antigua Roma, la escuela neumática de medicina consideraba que el pulmón tenía como función enfriar el corazón (Eckart, W. U., 2005). 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 avalan esta hipótesis. Por una parte, los pulmones rodean al corazón y por otra, el aire inhalado es generalmente más fresco que el aire exhalado. Con ambas observaciones se puede concluir que en el pulmón se produce un transporte de calor que enfría el corazón.

Hubo que esperar hasta 1774 para que Priestley descubriera el aire deflogistizado y se 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 del pulmón, mientras que la refrigeración es una función secundaria. En la investigación bioinspirada se debe explorar la multifuncionalidad de los órganos objeto de transferencia (por ejemplo, intercambiar gas y enfriar el corazón, en el caso del pulmón) porque el sistema biológico suele seguir el principio de diseño multifuncional, según el cual cada componente tiene varias funciones. Esta característica es fundamental en biomimética porque en los sistemas tecnológicos, en la mayor parte de los casos, cada componente sólo tiene una, o muy pocas funciones.

La emulación consciente de la genialidad creativa de la naturaleza es una estrategia adecuada para buscar respuestas tecnológicas con las que satisfacer de manera sostenible las necesidades humanas. En los organismos encontramos una valiosa fuente de innovación que puede aprovecharse por el sistema económico para disponer de bienes y servicios de carácter tecnológico con los que aumentar el bienestar humano.

5. APLICACIONES ENERGÉTICAS

El crecimiento del consumo de energía en el mundo, principalmente en los países en vías de desarrollo, ha intensificado la preocupación por

el gran número de problemas asociados a su producción, distribución y utilización. Tanto los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) como la energía nuclear, tienen un ciclo de formación de millones de años lo que implica, si el ritmo de consumo es similar al actual, que terminarán por agotarse.

Cualquier actividad socioeconómica consume energía. Por ello, la energía es imprescindible para el desarrollo social y económico de las organizaciones humanas. Sin embargo, el actual modelo de consumo y abastecimiento energético puede comprometer el desarrollo de las futuras generaciones, tanto por la desaparición de las fuentes de combustibles, como por los problemas globales que ocasiona. El cambio climático es una realidad que ha interiorizado la sociedad y que se suma a otras preocupaciones ambientales como la elevada velocidad de consumo de unos recursos escasos y la emisión de sustancias contaminantes asociada a los combustibles.

Ahorro de combustibles fósiles, descenso de la contaminación ambiental, aumento de la competitividad de los procesos o descenso de la dependencia energética son objetivos que persiguen las sociedades actuales. Los países desarrollados impulsan dos tipos de medidas para enfrentarse a las previsibles consecuencias ambientales, económicas y sociales del consumo de energía. Por un lado, tratan de aumentar la participación de las energías renovables en su estructura energética y por otro, promueven acciones destinadas a racionalizar el empleo de la energía. Se puede minimizar el impacto ambiental y el efecto económico de la energía mediante el ahorro basado en la supresión de consumos innecesarios, la utilización de la fuente de energía más adecuada para cada uso o la aplicación de aquellas tecnologías que sean capaces de integrar varios procesos.

5.1. Eficiencia energética

La eficiencia energética es una herramienta que contribuye a afrontar, a corto y medio plazo, los retos de la seguridad energética, el cambio climático y la mejora de la competitividad. Aumentando la eficiencia energética se puede disminuir su consumo manteniendo los mismos servicios y prestaciones, protegiendo el medio ambiente, asegurando un mejor abastecimiento energético y fomentando un comportamiento sostenible de su empleo.

Con el término de eficiencia energética, se pretende establecer la relación entre la energía consumida y los productos y servicios obtenidos. Por ello, las iniciativas destinadas a su optimización permiten, manteniendo las mismas prestaciones, reducir el consumo de energía. Un sistema tiene una eficiencia energética tanto más grande cuanto menor sea el consumo con el que se consiguen los servicios energéticos que requiere un determinado nivel de calidad de vida. Al aumentar la eficiencia energética disminuye el impacto ambiental y, a la vez, aumentan la seguridad de suministro, la competitividad de la economía y la sostenibilidad. La consecución de estos objetivos requiere la implantación de medidas que afectan a la tecnología, a los procedimientos de gestión y a los hábitos de consumo (Romero, A., 2011).

El transporte no sólo es el sector más consumidor de energía, sino que, además, es el sector en el que el consumo energético tiende a crecer más. Se considera que el ferrocarril es el medio de transporte más acorde con el modelo de desarrollo sostenible, dado su bajo consumo energético y su capacidad para adaptarse a las fuentes de energía renovables. Independientemente de su masa, tamaño y prestaciones, es posible optimizar la arquitectura y configuración de los trenes para disminuir el consumo energético y la contaminación acústica.

Japón inauguró el 1 de octubre de 1964 el tren más rápido del mundo, conocido como Sinkansen (“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, no fue sencillo alcanzar velocidades superiores a 220 km/h. Cada vez que el famoso tren bala japonés se aproximaba a 260 km/h, la empresa ferroviaria West Japan Railway Company se enfrentaba a un grave problema. 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 compañía, uno de sus ingenieros, Eiji Nakatsu, era un gran aficionado a la observación de aves y se inspiró en el martín pescador (*Alcedo atthis*) 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. Nakatsu diseñó varios prototipos de la máquina de tracción y los ensayos en laboratorio pusieron que manifiesto que el más parecido al pico del ave era el que producía menos ruido. 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. Cuando el aire pasa a través del pantógrafo, forma unos torbellinos conocidos como 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 con estructuras similares a las plumas primarias con 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 en agua 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/h, sin superar el límite de 70 decibelios y con un descenso del 15% del consumo de energía eléctrica (BBC, 2017).

Estudios recientes, estiman que el sector residencial destina a la climatización de edificios el 40% de toda la energía que se consume en Europa. En España este porcentaje se reduce al 18,5% (INFORME b, 2017). La Directiva 2010/31/UE (Directiva Europea de Eficiencia Energética) obliga a que los edificios que se construyan a partir de 2020, 2018 en el caso de los de uso público, sean edificios de consumo de energía casi nulo. Surge así un nuevo concepto de edificación, edificios ECCN (Edificios de consumo casi nulo), que pretende alcanzar un nivel de eficiencia energética muy alto con el fin de que consuman muy poca energía para funcionar y, además, que gran parte de esta energía proceda de fuentes renovables y que sea producida “in situ” o en el entorno (Aanuoluwapo, O. O. el al., 2017). Para que los nuevos edificios sean ECCN y cumplan la Directiva Europea deben disponer de sistemas constructivos pasivos (bioclimatización y orientación), hermeticidad y aislamiento (accesos, ventanas, intersecciones de elementos constructivos), y sistemas de climatización (aerotermia, ventilación mecánica controlada) alimentados con energía solar fotovoltaica.

En los siguientes ejemplos se aplica la metodología de bioinspiración comentada en el apartado anterior. Se define la tarea que debe realizar el prototipo tecnológico, lograr un aislamiento eficiente del exterior, y se han seleccionado tres modelos biológicos que realizan la misma tarea para sobrevivir. El conocimiento de cada uno de estos modelos biológicos permite identificar la función empleada y el principio físico de la función con la que logra el objetivo. La función que se busca es lograr el máximo aislamiento del exterior en los tres casos. Las diferencias se encuentran

en el procedimiento y principios físicos que cada uno utiliza para realizar la función. Por tanto, en los tres modelos seleccionados se conoce la tarea, sobrevivir en condiciones extremas de temperatura, la función que le permite lograr esta tarea, el aislamiento térmico del exterior, pero no el procedimiento, ni los principios físicos que les permiten lograrlo.

En la naturaleza hay especies de animales que han sido capaces de adaptarse, optimizando la energía disponible, para vivir en condiciones extremas. Mientras que algunos tipos de termitas viven en las calurosas arenas del desierto, otras, como el oso blanco y el pingüino habitan en las heladas aguas del Océano Glaciar Ártico o de la Antártida. El estudio de los procedimientos que utilizan estas termitas para sobrevivir en condiciones climáticas extremas, aporta información que puede utilizarse para aumentar la eficiencia energética de nuestras actividades (Chayaamor-Heil, N. et al., 2017).

El termitero es el lugar que emplea una colonia de termitas para realizar todas sus actividades. Debe servir como zona de cultivo, cámara real, alojamiento de los individuos con distintas especializaciones (agricultura, defensa, construcción) y debe disponer de apropiados sistemas de ventilación y de refrigeración. Estos insectos necesitan que su habitáculo tenga una temperatura muy próxima a 30°C para disponer de los hongos que utilizan como fuente de alimentación. Las termitas de África subsahariana deben mantener esta temperatura con variaciones inferiores a 1°C en un ambiente en el que la temperatura del exterior oscila entre máximas de 40°C durante el día y mínimas de 2°C durante la noche.

Como el nido, o cámara principal, que da cobijo a varios millones de individuos está localizado unos metros por debajo del suelo, necesita un sistema adecuado de ventilación. Construyen una ingeniosa estructura de barro con la que consiguen mantener constante la temperatura y renovar

continuamente el aire del interior. De la parte inferior del termitero salen canales hacia el nivel freático que son utilizados por las obreras para recoger y transportar el barro con el que fabrican la estructura, y una parte aérea similar a una pequeña chimenea, que sobresale del suelo y cuya misión es la ventilación y refrigeración de todo el recinto, mientras que en el entorno exterior se dan condiciones meteorológicas en las que la colonia perecería. La altura y orientación de su chimenea central, siempre orientada al norte, mejora la circulación del aire y es un factor importante, igual que el grosor de sus paredes (inercia térmica), para que el calor acumulado en los muros durante el día se libere al interior durante la noche, y las paredes ya enfriadas se vuelvan a calentar durante el día.

Los termiteros pueden alcanzar cerca de 8 metros de altura y una profundidad de 3 metros bajo el suelo. 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. Hay que eliminar el calor y extraer el dióxido de carbono que generan los millones de individuos para proteger la colonia y, además, es necesario aportar el oxígeno que necesitan para sus funciones vitales.

Han solucionado estos problemas construyendo una red de canales y galerías que recorren el termitero y comunican el nivel freático con el aire del exterior. Cuando el aire circula a través de los canales abiertos en el lodo húmedo de la parte inferior del nido, disminuye su temperatura debido al proceso de refrigeración por evaporación. El contacto del aire seco con el agua permite alcanzar, si el contacto es el adecuado, la humedad que necesitan los habitantes de la estructura. Las corrientes de convección son responsables de que el aire caliente del nido se eleve desde las galerías inferiores a las superiores hasta alcanzar la chimenea desde donde se desplaza hacia los laterales y desciende por canales próximos a la superficie, hasta

el sótano. A lo largo de ese recorrido por las galerías laterales se produce la difusión de dióxido de carbono y del oxígeno a través de los poros del material de construcción del recinto. Este intercambio de gases, entre el aire del interior y el aire del exterior, da lugar a la eliminación del dióxido de carbono generado y al aporte del oxígeno necesario para mantener las funciones vitales. Las termitas tienen que trabajar día y noche abriendo túneles nuevos y cerrando otros ya construidos para que este ingenioso sistema de acondicionamiento de aire funcione correctamente y pueda lograr la temperatura, humedad y composición de los gases del aire del interior que requiere la colmena.

Al oso polar (*Ursus maritimus*) se le considera uno de los grandes maestros de la naturaleza en la conservación de energía. Su cuerpo, unos tres metros de longitud y casi una tonelada de peso, se encuentra a 37°C y debe soportar las temperaturas invernales del Ártico, cercanas a 50°C bajo cero. Su existencia es posible porque dispone de un sistema muy eficiente de aislamiento que le permite retener el calor corporal. Conocer las causas por las que la capa externa de este animal es capaz de mantener esta gran diferencia de temperatura durante mucho tiempo, ha sido el objetivo de un gran número de trabajos de investigación.

Dispone de una capa de grasa, material de muy baja conductividad térmica, entre 7 y 10 cm de espesor debajo de una piel de color negro que está recubierta de un pelaje muy denso, en el que los pelos tienen distintas longitudes y crean un elevado efecto albedo (radiación solar que incide y es devuelta a la atmósfera), razón por la que se le conoce también como oso blanco. Sin embargo, los pelos son transparentes y huecos, característica que le permite minimizar las pérdidas del calor procedente de la piel y, además, los hace invisibles a la luz infrarroja. Del mismo modo que la nieve es blanca porque entre los cristales de hielo, que son transparentes, quedan

retenidas minúsculas burbujas de aire, los pelos del oso polar son huecos y en su interior retienen aire. En ambos casos, es el aire el responsable del color blanco porque dispersa la luz, es decir, primero la absorbe y después la emite en todas las direcciones (Liwanag, H E.M. et al. 2012).

Es evidente que cuanto mejor sea el aislamiento, menor será la transmisión de calor. Haría falta un aislamiento perfecto (conductividad térmica nula) para que el oso no perdiera nada de calor y pudiera mantener su temperatura corporal, 37°C, siendo la del exterior de -40°C. Esta es una explicación demasiado simple y alejada de la realidad, que está basada en el transporte de calor por conducción entre dos sólidos que se encuentran a diferente temperatura y que deben estar separados por un material cuya conductividad térmica sea nula. Sabemos que, además del mecanismo de transmisión de calor por conducción, existen otros dos mecanismos, convección y radiación. La convección requiere el movimiento de un fluido. En el caso de los osos este mecanismo de transporte de calor se realizaría por medio del aire retenido en el pelaje, pero su contribución es insignificante debido a que está prácticamente estancado. Por ello, hay que buscar en la transmisión de calor por radiación la causa por la que estos animales son capaces de mantener esa diferencia de temperatura tan grande.

Se intentó explicar la gran capacidad de aislamiento del oso suponiendo que una parte de la radiación solar que incide sobre su pelaje se utiliza para calentar el aire del interior de los pelos. Este aire caliente transmitiría calor a la piel negra del oso y, de esta forma, se compensaban las pérdidas de calor por conducción (baja, no nula, conductividad térmica). Sin embargo, esta teoría no explicaba algunas observaciones experimentales, como la invisibilidad de los osos para las cámaras de infrarrojo. Si su piel se encontrase, como considera esta hipótesis, a mayor temperatura que el exterior, debería poder observarse con estas cámaras.

Las medidas destinadas a conocer las pérdidas de calor por radiación de un cuerpo que se encuentra a 37°C pusieron de manifiesto que son 10 veces mayores que las pérdidas debidas a la conducción. Para evitar que esta emisión de energía escape al exterior, el oso dispone del sistema pelaje-piel. La pérdida de calor ocurre por radiación infrarroja que es la que permite obtener imágenes térmicas. Como la piel está cubierta con pelos blancos la radiación que le llega, entre ellas la infrarroja, se refleja en todas las direcciones de modo que cuando llega a la piel de color negro, se reabsorbe y no emite radiación al exterior. Mediante este mecanismo (Simonis, Pet al., 2014) se produce el aislamiento térmico, y todo el calor que se genera en su interior y se emite a través de la piel, vuelve de nuevo y queda retenido en su interior. Además, al estar la capa externa del oso a la misma temperatura que su entorno, no pueden detectarse con cámaras de visión por infrarrojo.

Los animales de la Antártida deben superar los desafíos ambientales que implica vivir en una de las zonas más inhóspitas de nuestro planeta. Por ejemplo, los pingüinos emperador (*Aptenodytes forsteri*) deben pasar seis meses al año criando durante el invierno austral, donde la temperatura del aire cae por debajo de -40°C y los vientos alcanzan velocidades de 26 m/s. Para alimentar a sus crías, bucean en aguas cuya temperatura es de -1.8°C y alcanzan profundidades superiores a 500 m. Ningún otro animal de buceo dotado de plumas o de piel es capaz de alcanzar esta profundidad.

Para mantener la temperatura de su interior a 38°C , los pingüinos emperador disponen de un plumaje espeso y morfológicamente especializado que les proporciona entre el 80 y el 90% del aislamiento necesario. Además, es probable que la estructura del plumaje se conserve durante sus continuas y profundas inmersiones, con cortos intervalos de superficie, para mantener su capacidad aislante.

El plumaje del pingüino emperador es uno de los factores clave que le permiten sobrevivir en la Antártida. Sus impresionantes cualidades térmicas, y el papel determinante de éstas en la supervivencia de los pingüinos, han despertado el interés por conocer su estructura y sus funciones (Dawson, C. et al., 1999) Sin embargo, muchos estudios aportan información contradictoria que puede conducir a errores en la estimación de propiedades como la transferencia de calor o el comportamiento mecánico y, también, en los modelos que se utilizan para posibles aplicaciones biomiméticas con las que lograr materiales aislantes más efectivos en ropa o en edificios.

En 2015 (Williams, C. L. et al., 2015) se publicó un estudio cuyo objetivo era determinar experimentalmente el tipo de plumas y la densidad de cada tipo, así como modelar su patrón de distribución y deducir las funciones que realizan las plumas del cuerpo del pingüino emperador. Algunos de sus hallazgos son de gran interés para el trabajo biomimético. Por un lado, ponen de manifiesto observaciones e interpretaciones erróneas que se han empleado en la transferencia de datos. Por otro, desvelan importantes claves de la adaptación del pingüino emperador al medio en el que vive.

La capacidad del pingüino emperador para mantener una temperatura corporal de 38°C, mientras se alimenta en agua helada o habita en las condiciones climáticas más adversas, es el resultado de una disposición adecuada de los diferentes tipos de plumas que constituyen su plumaje. Mediante las plumas de contorno, las semiplumas asociadas y filoplumas adyacentes consigue una cubierta impermeable e impenetrable que cubren una gruesa capa de plumón. La densidad de las plumas de contorno no es superior a la que tienen otros pájaros, pero disponen de una concentración de plumón muy superior. Es el plumón el principal responsable

de aislamiento, ya que forman una capa densa debajo de las otras plumas. Las filoplumas ayudan a mantener cerrado el plumaje cuando se producen desplazamientos de las plumas de contorno. Pueden identificar la aparición y ubicación si se produce el desplazamiento de la pluma con la que está asociada. Sus diferentes alturas le permiten mantener la capa exterior impermeable y unas condiciones hidrodinámicas que facilitan el buceo del pingüino.

A esta suave capa de plumón y plumas secundarias se le atribuye un papel fundamental en el rápido ascenso submarino de los pingüinos. La hipótesis sugiere que la liberación de aire atrapado en esta capa forma una película que reduce la resistencia de arrastre, permitiendo que los pingüinos alcancen altas velocidades bajo el agua antes de salir a la superficie (Davenport, J. et al. 2011). El plumón y la estructura de las plumas de acompañamiento son responsables de la retención de aire y de la formación de burbujas diminutas. Estas burbujas son tan pequeñas cuando salen del agua que parece como si un rastro de humo proviniera de las plumas. Se ha calculado que el volumen de aire contenido en el plumaje de un pingüino emperador es de unos 5 litros en condiciones normales.

También es sorprendente que la densidad de plumas de contorno sea mayor en la parte ventral que en la dorsal. La mayor densidad de plumas le proporciona mayor amortiguación cuando se desliza sobre los bordes rugosos de la nieve y le facilita el aterrizaje cuando salta desde el agua. Además, le proporciona mejor aislamiento mientras descansa sobre el hielo.

La densidad de plumas no es estática en el cuerpo del pingüino emperador porque aumenta y disminuye en función de los cambios de volumen que, anualmente, se producen en su cuerpo. El ciclo de búsqueda de alimento es casi continuo desde que, en enero, se prepara para temporada

de cría (Kooyman, G. L. et al. 2004). En abril los pingüinos pesan entre 30 y 40 kg, y los lípidos representan hasta 25% de la masa corporal (Ancel, A. et al. 1992). Es en este momento cuando alcanzan el máximo volumen y la mínima densidad de plumas. Durante los tres meses siguientes, la masa corporal disminuye un 35-50% siendo la pérdida de grasa subcutánea del 80-90% (Robin, J-P, et al. 1988). La consecuencia es una la reducción de la circunferencia y de la superficie externa que van acompañadas por un aumento de la densidad de plumas sin que cambie su número. Como el descenso de densidad coincide con el aumento de la grasa subcutánea y el aumento de densidad lo hace con la reducción de grasa, el pingüino emperador mantiene un aislamiento similar a lo largo del año.

Y ¿qué utilidad tecnológica ha tenido y tiene el conocimiento sobre estos seres vivos? En primer lugar, algunos edificios bioinspirados han resuelto los problemas del aire acondicionado basándose en la estructura de los termiteros. Los métodos de construcción que han desarrollado las termitas a lo largo de muchos años de evolución les ha permitido sobrevivir, en condiciones muy distintas a las del ambiente exterior, utilizando únicamente fuentes de energía renovables y aprovechando lo que ofrece el terreno de la zona en la que se asientan.

Se considera que el centro comercial y edificio de oficinas en la ciudad de Harare, Zimbabwe, conocido como Centro Eastgate, es el primero que se diseñó para que se pudiera ventilar y refrigerar por medios naturales. Este edificio de 5.600 m² de espacio comercial, 26.000 m² de espacio para oficinas y con una dotación de plazas de estacionamiento para 450 automóviles, abrió sus puertas en 1996. Su arquitecto, Mick Pearce, se inspiró en el funcionamiento de las termitas para diseñar un edificio comercial que regula su temperatura haciendo uso del efecto chimenea de los termiteros con el que se consigue disminuir el 90% del consumo de energía de un edificio convencional (Atkinson, J., 1995).

Universidades, como Loughborough, Harvard, participan en el proyecto TERMES destinado a comprender las complejas estructuras de los termiteros, simular la inteligencia social de las termitas y reproducir sus construcciones. Mediante el escaneo de uno de ellos se obtuvo una imagen tridimensional de su estructura y valiosa información sobre los métodos de construcción. En febrero de 2014 fueron publicados algunos resultados en la revista *Science* (Werfel, J., 2014), que muestran una colonia de pequeños robots-insecto capaces de levantar estructuras arquitectónicas utilizando ladrillos prefabricados y que actúan en función de una inteligencia colectiva descentralizada, sin la supervisión de ningún ordenador central. El usuario especifica una estructura deseada, y el sistema genera automáticamente reglas sencillas para que los robots que realizan la tarea de manera independiente sean capaces de construir la estructura. Los robots sólo usan detección local y coordinan su actividad mediante un entorno compartido. A través de una realización física con tres robots de escalada, autónomos y limitados a la detección a bordo, los autores demostraron que se pueden alcanzar objetivos específicos diseñando sistemas complejos.

En segundo lugar, los conocimientos obtenidos al interpretar la capacidad del oso para sobrevivir en un medio sometido a temperaturas tan bajas, pueden aplicarse para lograr aislamientos altamente eficaces en edificios. Uno de estos trabajos fue el realizado por investigadores de la Universidad de Melbourne en 2011 en el que describen un modelo de fachada bioinspirada y la comparan con una fachada convencional. El resultado de la comparación pone de manifiesto que las pérdidas de calor del edificio durante el invierno se reducen un 50% y también se reduce el mismo porcentaje en las ganancias de calor en verano, es decir, el ahorro energético debido al aislamiento es del 50%. Este rendimiento térmico no es el límite de una capa de aislamiento bioinspirada, ya que se puede aumentar optimi-

zando cuatro variables que pueden controlarse con facilidad: espesor de la capa, fibra de la capa, orientación angular de las fibras y número de fibras por unidad de área (Oguntona, O. A., 2017).

Y, finalmente, la compresión de los mecanismos que hacen posible que el pingüino emperador mantenga el interior de su cuerpo a 38°C en un ambiente externo en el que la temperatura es del orden de -40°C, puede emplearse para lograr aislamientos biomiméticos. Del mismo modo puede utilizarse el conocimiento sobre su pelaje para lograr aplicaciones bioinspiradas que requieran impermeabilización dinámica, bajos coeficientes de fricción, modificar la conductividad térmica acoplando factores estructurales y geométricos, etcétera.

Además del aislamiento de edificios (Badarnah, L., 2015), existen muchas aplicaciones bioinspiradas en el procedimiento que utilizan los grandes animales que viven en las zonas más frías del planeta para mantener su temperatura corporal (McCafferty, D. J., et al., 2018). Por ejemplo, el tejido destinado a realizar actividades deportivas en climas muy fríos, la ropa de camuflaje que evita la detección por infrarrojos o el aumento de la eficiencia de los equipos destinados al empleo de la energía solar con fines térmicos.

5.2. Transformación de energía solar en energía eléctrica

La luz del sol es la principal fuente de energía en la naturaleza y su uso técnico es un gran desafío para los seres humanos. Se estima que el aporte de energía solar que recibe anualmente la superficie de la tierra puede superar los 2.200 kWh/m² en zonas propicias, como el Sáhara, mientras que disminuye 2.500 veces en las menos favorables. Esta enorme cantidad de energía solar llega a la tierra con distintas longitudes de onda, aproximadamente el 3% corresponde al ultravioleta, el 46% al visible y

el 51% al infrarrojo. De los casi 4 millones de exajulios (10 elevado a 18 julios) que absorben la atmósfera, los océanos y los continentes al año, la fotosíntesis captura el 0,08% en forma de biomasa. El consumo mundial de energía en un año es aproximadamente la energía que recibimos del sol en una hora. Si se pudiera convertir y almacenar un pequeño porcentaje de esta fuente de energía, libre y abundante, las necesidades energéticas de nuestras sociedades estarían cubiertas de manera sostenible (Lewis, N. S., 2007)

Mediante los colectores solares que convierten la radiación en energía térmica se aprovecha la energía solar para satisfacer la demanda de calor. Es necesario buscar otros modos de transformar la energía procedente del sol para que esté disponible en la forma que demandan nuestras sociedades. La conversión fotoquímica y el almacenamiento de energía solar son los caminos a seguir para disponer de la energía necesaria. El primero pretende generar electricidad directamente de la energía solar. Esta forma de energía puede usarse para satisfacer la mayor parte de nuestras necesidades. Por el segundo camino se obtendrían combustibles sintéticos, como hidrógeno molecular o compuestos hidrocarbonados.

Las celdas solares más empleadas están basadas en el silicio. Como el proceso de fabricación de este metal es costoso, su introducción en el mercado depende de la competitividad con otras fuentes de energía renovable y, especialmente, con las que utilizan combustibles fósiles. Se han desarrollado celdas construidas con otros materiales, como el telurio de cadmio o telurio de azufre (CdTe/STe), que han alcanzado eficiencias de transformación superior al 10%. Desgraciadamente son demasiado costosas para aplicaciones comerciales terrestres.

Una variante en la conversión fotovoltaica son las celdas solares fotoelectroquímicas basadas en la unión de un semiconductor con un elec-

trolito. La facilidad de conseguir la interfase semiconductor-electrolito supone un descenso de los costes. Aunque con estas celdas se han logrado eficiencias superiores al 15% en la conversión fotovoltaica, no se han podido aplicar comercialmente porque los semiconductores idóneos para el aprovechamiento de la energía solar se degradan con demasiada rapidez, al estar en contacto con los electrolitos.

A lo largo de muchos siglos, la naturaleza ha perfeccionado un proceso por medio del cual plantas, algas y algunas bacterias utilizan luz solar como fuente de energía, y CO₂ y agua, como materias primas. El resultado final de este proceso puede simplificarse a dos reacciones que son fundamentales para la supervivencia de la humanidad. Una es la oxidación del agua, con formación de oxígeno molecular y la otra, es la reducción de dióxido de carbono para formar carbohidratos. Gracias a este proceso natural, se transforma la energía solar en energía química y se almacena en los compuestos orgánicos sintetizados (Leslie, N., 2009).

En la fotosíntesis natural toman parte decenas de enzimas para catalizar el gran número de reacciones individuales que la hacen posible. No se puede mimetizar la fotosíntesis porque es un proceso tan complejo y con tantas variables que, incluso en el laboratorio, es muy difícil de replicar. Sin embargo, pueden identificarse las etapas de la fotosíntesis en las que inspirarse para proponer procedimientos tecnológicos capaces de aprovechar la radiación solar. El proceso de la fotosíntesis se realiza en dos fases que interactúan mediante moléculas transportadoras de energía. Una fase la constituyen las reacciones que necesitan la intervención de la luz solar, fase luminosa. La otra es la fase oscura en la que participan las reacciones que no necesitan la intervención de la luz. El estudio de las transformaciones que tienen lugar en ambas fases es de gran ayuda para facilitar el aprovechamiento de la energía solar, tanto para producir hidrógeno o

electricidad, fase luminosa, como para sintetizar compuestos orgánicos a partir de dióxido de carbono, fase oscura.

La unidad estructural de la fotosíntesis en las células eucariotas fotosintéticas es el cloroplasto. Dentro del cloroplasto, se encuentran los tilacoides configurando estructuras en forma de disco o de saco aplanado que se apilan formando los grana, y es en ellos donde se producen las reacciones captadoras de la luz para la fotosíntesis. Los tilacoides están rodeados por una membrana que separa el espacio interior, denominado lumen (Pérez-Urria, E., 2009), del medio exterior, denominado estroma. Las membranas de los tilacoides están formadas por pigmentos fotosintéticos (clorofilas a y b, carotenoides, etcétera), lípidos, enzimas y proteínas responsables de la cadena de transporte de electrones, que constituyen los denominados fotosistemas o complejos antena I y II.

Cuando los pigmentos (clorofilas a y b) presentes en los complejos antena, complejos colector o complejos captador de luz, que se identifican con sus siglas LHC (Light Harvesting Complex), captan un fotón se desencadena la fotosíntesis (Gust, D. et al. 1993). Existen dos complejos fotoquímicos denominados fotosistema I (PSI) y fotosistema II (PSII) o complejo antena I y complejo antena II en los que tienen lugar las reacciones iniciales de almacenamiento de energía. El PSI absorbe luz de una longitud de onda de 700nm y produce un reductor fuerte, capaz de reducir NADP+, y un oxidante débil. El PSII absorbe luz de 680nm y produce un oxidante muy fuerte capaz de oxidar al agua y un reductor más débil que el producido por el PSI. Ambos fotosistemas funcionan en serie.

La energía del fotón se va transportando hasta excitar la clorofila P680 (denominada así porque absorbe radiación de 680 nm). Una vez excitado este pigmento, se produce la transferencia de un electrón mediante una cadena de reacciones de oxidación/reducción que finaliza con la pér-

dida de un electrón (oxidación) del denominado complejo emisor de oxígeno (OEC). Es en este complejo emisor de oxígeno, cuando ha perdido cuatro electrones, donde se produce la oxidación del agua a una velocidad de unos 200 ciclos por segundo, formando oxígeno y liberando protones al lumen mediante un mecanismo de reacción todavía no bien conocido.

Los electrones procedentes de la oxidación del agua se conducen desde el complejo emisor de oxígeno (OEC) por medio de los diferentes transportadores de carga del PSII hasta el PSI. Este complejo antena I se activa, de modo similar al complejo antena II, cuando la energía de un fotón excita la clorofila P700 (absorbe radiación de 700 nm). El electrón es transportado por medio de diversos transportadores de carga hasta el centro reactivo, en el que se encuentra la proteína ferredoxina NADP⁺-reductasa (FNR), donde se produce la reducción de NADP⁺ a NADPH y la formación de ATP, consumiendo protones del estroma. La energía química de los enlaces del ATP y NADPH se utiliza en la fase oscura, fase de síntesis, para reducir el dióxido de carbono a compuestos hidrocarbonados (Vullev, V.I., 2011).

El término fotosíntesis artificial se utiliza para identificar los procesos, inspirados en la fotosíntesis natural, que tienen como objetivo el aprovechamiento de la energía solar para producir otros tipos de energía que pueden ser utilizados por el hombre de forma eficiente. Los estudios actuales sobre fotosíntesis artificial no tienen como objetivo sintetizar los productos finales, azúcares o lípidos. Su interés se dirige hacia la transformación de la energía solar en energía eléctrica o en energía química de compuestos sencillos como hidrógeno o moléculas de muy 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. Cuando estos procedimientos hayan superado los criterios técni-

cos y económicos establecidos para su aplicación, contribuirán a mitigar y a revertir gran parte de los efectos adversos, entre ellos el calentamiento global, causado por el consumo de combustibles fósiles.

A principios del siglo XIX se descubrió el procedimiento, conocido como electrolisis del agua, que permite separar el oxígeno y el hidrógeno aplicando una fuente de alimentación eléctrica. La fotoelectrolisis es un método cuyo objetivo es la producción de hidrógeno a partir de agua utilizando energía luminosa en lugar de eléctrica.

Ambos procedimientos, electrolisis y fotoelectrolisis, se basan en los mismos principios, aunque los problemas a resolver son muy diferentes. Disponen de un cátodo por el que circulan los electrones en sentido descendente y es hacia donde se dirigen los cationes y donde tiene lugar el proceso de reducción. En el cátodo es donde se forma la molécula de hidrógeno a partir de los protones (ATP y NADPH en la fase luminosa de la fotosíntesis). El otro electrodo es el ánodo, por el que también circulan los electrones, pero en sentido ascendente. Hacia él se dirigen los aniones (carga positiva) y es donde se produce el proceso de oxidación. En el ánodo se forma la molécula de oxígeno y se liberan los correspondientes protones. Entre ambos electrodos se produce el transporte de las cargas de distinto signo que se generan en el proceso, mediante un medio que facilita el transporte y que dificulta su contacto y consiguiente neutralización. Finalmente, es necesario aportar la energía que requiere el proceso, en un caso es energía eléctrica procedente de una pila o de una batería cuyos polos están conectados a los electrodos, y en el otro, la radiación solar de la frecuencia apropiada para que pueda ser absorbida (en el caso de la fotosíntesis, por las moléculas de clorofila P680 y P700) y transportada hasta los electrodos (en el caso de fotosíntesis, por las antenas hasta los centros reactivos).

Todos los organismos con capacidad fotosintética contienen uno o varios pigmentos que absorben radiación visible para desencadenar las reacciones fotoquímicas que dan lugar a la fotosíntesis. Estos pigmentos forman parte de las antenas que captan y transportan la energía hasta centros con actividad química donde se produce la transferencia de electrones provenientes de las moléculas de agua al descomponerse en oxígeno, protones y electrones, y donde se produce la conversión de la energía luminosa en energía química en forma de moléculas transportadoras, ATP y NADPH.

Existen diferentes métodos para desarrollar sistemas fotosintéticos artificiales, pero los que ofrecen mayores oportunidades para su implantación consisten en el ensamblaje molecular de fotocatalizadores y cromóforos capaces de actuar como centros reactivos en disolución: electrolisis fotovoltaica en la que la fuente de alimentación es solar y celdas fotoelectrolíticas en las que los electrodos actúan como fotocatalizadores.

Las celdas solares sensibilizadas con colorante, celdas DSSC (Dye Sensitized Solar Cells), constituyen una alternativa, bioinspirada en la fotosíntesis, a las celdas solares de silicio, de primera y de segunda generación. Estos dispositivos están formados por un electrodo de vidrio recubierto por un óxido conductor transparente sobre el que se coloca una capa delgada de un semiconductor nanoparticulado, generalmente TiO_2 , al que se incorpora el colorante cuya misión es absorber luz visible de una determinada longitud de onda. Cuando estas moléculas se excitan, se produce un aporte de electrones al semiconductor del electrodo que, por medio de un circuito externo, llegan al contraelectrodo, recubierto por una capa de platino que actúa como catalizador del proceso de oxidación-reducción, para cerrar el circuito y transformar la energía solar en energía eléctrica. Las moléculas de colorante se regeneran mediante el par redox del interior

de la celda, mientras que los electrones que llegan al contraelectrodo regeneran el par redox (Ko, K. H. et al., 2005). Actualmente, la eficiencia de conversión de energía de las DSSC es menor que las celdas de silicio, entre 10-12% para módulos de laboratorio, y del 15% para DSSC en estado sólido (Burschka, et al, 2013).

El desarrollo de sistemas fotosintéticos artificiales se basa en los avances que se logren en cada uno de los tres elementos fundamentales de la fotosíntesis: absorción eficiente de luz solar, catalizadores apropiados para favorecer las reacciones deseadas y un medio eficaz para conseguir una separación y movimiento de cargas. Ensamblando estos elementos, se puede conseguir un dispositivo fotosintético artificial que permite transformar la energía solar en energía eléctrica o en energía química. (Casadevall, C. et al., 2016).

Antes de finalizar mi intervención me gustaría destacar el potencial que tienen la biomimética y la bioinspiración en muchos campos de la ciencia y de la tecnología. La imitación y recreación de algunas características de los sistemas biológicos en sistemas inanimados o tecnológicos es una buena estrategia para resolver muchos problemas que se plantean en nuestras sociedades. A medida que el funcionamiento del mundo creado por las actividades humanas se vaya pareciendo al funcionamiento del mundo natural, mayores serán nuestras posibilidades de permanecer en él.

Muchas gracias por su atención.

BIBLIOGRAFÍA

Aanuoluwapo, O. O. y Ohis, A. C. (2017) “Biomimetic strategies for climate change mitigation in the built environment” *Energy Procedia* **105**, 3868 – 3875

Ancel, A et al. (1992) “Foraging behavior of emperor penguins as a resource detector in winter and summer” *Nature* **360**, 336–339

Atkinson, J. (1995) “Emulating termites” *The Zimbabwean Review*, **1**(3), 16-19

Autumn, K.; Niewiarowski, P.H. y Puthoff, J.B. (2014) “Gecko Adhesion as a Model System for Integrative Biology, Interdisciplinary Science, and Bioinspired Engineering” *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **45**, 445–70

Badarnah, L. (2015) “A biophysical framework of heat regulation strategies for the design of biomimetic building envelopes” *Procedia Engineering* **118**, 1225 – 1235

BBC. (2017) “Cómo el hobby de un ingeniero japonés permitió resolver el gran problema del famoso tren bala” <https://www.bbc.com/mundo/noticias-42169433>

Buchanan, B.B.; Gruissem, W. y Jones, R.L. (2000) “Biochemistry and Molecular Biology of Plants” ASPP. Rockville. Maryland

Burschka, J.; Pellet, N.; Moon, S. J.; Humphry-Baker, R.; Gao, P.; Nazeeruddin, M. K.; y Grätzel, M. (2013) “Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells” *Nature* **499**(7458), 316–9.

Casadevall, C.; Call, A.; Codolà, Z.; Acuña-Parés, F. y Lloret-Fillol, J. (2016) “Catalizadores para la conversión de la energía solar en enlaces químicos” *An.Quim.* **112**(3), 133-141

Chayaamor-Heil, N. y Hannachi-Belkadi, N. (2017) “Towards a Platform of Investigative Tools for Biomimicry as a New Approach for Energy-Efficient Building Design” *Buildings* **7**(19), 1-18

Davenport, J.; Hughes, R. N.; Shorten, M. y Larsen, P. S. (2011) “Drag reduction by air release promotes fast ascent in jumping emperor penguins—a novel hypothesis” *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **430**, 171-182

Dawson, C.; Julian, F. V.; Vincent, J. F. V.; Jeronimides, G.; Rice, G. y Forshaw, P. (1999) “Heat Transfer through Penguin Feathers” *J. Theor. Biol.* **199**, 291-295.

Dorigo, M.; Birattari, M. y Stützle, T. (2016) “Ant Colony Optimization: Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique” *IRIDIA – Technical Report Series. Technical Report No.TR/IRIDIA/2006-023* (2016)

Dorigo, M.; Maniezzo, V. y Colorni, A. (1996) “Ant System: Optimization by a colony of cooperating agent” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B*, **26**(1), 29–41

Drak, M. et al. (2018) “Towards a theoretical clarification of biomimetics using conceptual tools from engineering design” *Bioinspiration and Biomimetics* **13**: 016007

Eckart, W. U. (2005) *Geschichte der Medizin* 5th ed. (Berlin.Springer) (<https://doi.org/10.1007/b137329>)

Gómez Olaya, A.P. (2015) “Desarrollo sostenible, aprendizaje desde el capital natural y discontinuidad tecnológica” Tesis Doctoral. Universidad Complutense. Madrid.

Gust, D.; Moore, T. A. y Moore, A. L. (1993) “Molecular Mimicry of Photosynthetic Energy and Electron Transfer” *Acc. Chem. Res.* **26**, 198-205

Haseyama, M. et al. (2017) “Biomimetics Image Retrieval Platform” *Ieice Trans. Inf. & Syst.* **100–D**. NO.8

INFORME a. (2017) “Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2017” Naciones Unidas.

INFORME b. (2017) “Plan nacional de acción de eficiencia energética 2017-2020” Versión 26 de abril de 2017.

Jackson, R. y Bowman, M.W. (2014) “La enciclopedia de la aviación” Edimat.

Ko, K. H.; Lee, Y. C. y Jung, Y. J. (2005) “Enhanced efficiency of dye-sensitized TiO₂ solar cells (DSSC) by doping of metal ions” *Journal of colloid and interface science*, **283**(2), 482–7.

Kooyman, G. L.; Siniff, D. B.; Stirling, I. y Bengtson, J. L. (2004) “Moult habitat, re- and post-moult diet and postmoult travel of Ross Sea emperor penguins”. *Mar.Ecol.Prog. Ser.* **267**, 281–290.

Leslie, N. (2009) “On the Origin of Photosynthesis” *Science* **323**, 1286-1287

Lewis, N. S. (2007) “Toward Cost-Effective Solar Energy Use” *Science* **315**, 798-801

Liwanag, H. E. M.; Berta, A.; Costa, D. P.; Abney, M. y Williams, T. M. (2012) “Morphological and thermal properties of mammalian insulation: the evolution fur for aquatic living” *Biol. J. Linn. Soc.* **106**, 926–939

McCafferty, D. J., et al. (2018) ”Animal thermoregulation: a review of insulation, physiology and behaviour relevant to temperature control in buildings” *Bioinspiration and Biomimetics* **13**: 011001

Oguntona, O. A. y Aigbavboa, C. O. (2017)“Biomimetic materials and technologies for carbon neutral cities in South Africa: a literature review” *Procedia Engineering* **196**, 152 – 158

Pérez-Urria, E. (2009) “Fotosíntesis: Aspectos Básicos” *Reduca (Biología)*. Serie Fisiología Vegetal **2**(3), 1-47

Robin, J-P; Groscolas, R. y Le Maho, Y. (1988) “Protein and lipid utilization during long term fasting in emperor penguins” *Am. J. Physiol.* **254**, 61–68.

Romero, A. (2011) “La eficiencia energética como instrumento de ahorro” *Rev.R.Acad.Cien.Exact.Fis.Nat.* **105** (1), 151-162

Routti, H. et al. (2016) “Environmental Chemicals Modulate Polar Bear (*Ursus maritimus*) Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Gamma (PPARG) and dipogenesis in Vitro” *Environ. Sci. Technol.* **50** (19), 10708–10720

Speck, O. et al. (2017) “Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments” *Bioinspiration and Biomimetics* **12**: 011004

Simonis, P.; Rattal, M.; Oualim, E.M.; Mouhse, A. y Vigneron, J. (2014) “Radiative contribution to the thermal conductance in animal furs and other wooly insulators” *Optics Express* **22**, 1940-1952

Taiz, L. y Zeiger, E. (2006) “Plant Physiology” Sinauer Associates, Inc. Sunderland. Massachusetts

Vullev, V. I. (2011) “From Biomimesis to Bioinspiration: What’s the Benefit for Solar Energy Conversion Applications?” *J. Phys. Chem. Lett.* **2**, 503-508

Webb, M.; Hertzsch, E. y Green, R. (2011). “Modelling and Optimisation of a Biomimetic Façade Based on Animal Fur” *Proceedings* pp 458-465. 12 Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney, Australia, 14-16 Nov 2011. bldg-sim@lists.onebuilding.org

Werfel, J.; Petersen, K. y Nagpal, R. (2014) “Designing Collective Behavior in a Termite-Inspired Robot Construction Team” *Science* **343**, 754-758

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

Williams, C. L.; Hagelin, J. C. y Kooyman, G. L. (2015) “Hidden keys to survival: the type, density, pattern and functional role of emperor penguin body feathers” *Proc. R. Soc. B* **282**: 20152033.

INDICE

1. Introducción	34
2. Biomimética y bioinspiración	37
3. Análisis de realizaciones bioinspiradas	41
4. El proyecto de investigación bioinspirado	45
5. Aplicaciones energéticas	49
5.1. Eficiencia Energética	51
5.2. Transformación de Energía Solar en Energía Eléctrica	63
6. Bibliografía	71

