

Approach to biomimetic design. Learning and application

Ignacio López-Forniés^a & Luis Berges-Muro^b

^a Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. ignlopez@unizar.es

^b Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. bergesl@unizar.es

Received: January 22th, 2014. Received in revised form: July 23th, 2014. Accepted: July 28th, 2018.

Abstract

Learning biomimetic design methods can be difficult and involve a long period of time, previous experiences have shown that the application of biomimetics in industrial design and product development projects requires an adaptation to traditional methods through a simpler model and a learning system. There are various biomimetic design processes, adaptation, integration and application corresponds to objectives of each project.

A learning method for the application of biomimetics in design projects, step by step or globally, is presented. The knowledge of biological principles and translating them into engineering principles underlie each method, learning is augmented by adding methods based on creativity and functional analysis to achieve innovative products thanks to a biomimetic approach.

Keywords: Design methods, learning biomimetics, biomimetic design methodology, bioinspired design, creative process, functional innovation, solutions from nature.

Aproximación al diseño biomimético. Aprendizaje y aplicación

Resumen

El aprendizaje de los métodos de diseño biomimético puede resultar difícil e implicar un largo periodo de tiempo. Experiencias previas han demostrado que la aplicación de la biomimética en proyectos de diseño industrial y desarrollo de producto necesita de una adaptación a los métodos tradicionales por medio de un modelo más sencillo y a través de un sistema de aprendizaje. Existen diversos procesos de diseño biomimético, su adaptación, integración y aplicación se corresponde con objetivos propios de cada proyecto.

Se presenta un modelo de aprendizaje de la biomimética para aplicación en proyectos de diseño, de sus partes y de manera global. El conocimiento de los principios biológicos y su traducción a los principios de ingeniería son la base de cada método, incrementando el aprendizaje con aquellos que se basan en técnicas creativas y de análisis funcional para conseguir innovación funcional de productos gracias al enfoque biomimético.

Palabras clave: Métodos de diseño, aprendizaje en biomimética, metodología de diseño biomimético, diseño bioinspirado, proceso creativo, innovación funcional, soluciones naturales.

1. Introducción

La naturaleza es un modelo para la tecnología y por lo tanto fundamental para sentar las bases para el desarrollo de nuevos productos [1]. La biomimética está empezando a formar parte del aprendizaje de métodos de diseño y desarrollo de producto, se usa como fuente creativa y por el potencial demostrado en combinación con otras metodologías [2].

La biomimética, como observación de la naturaleza de la que extraer soluciones para la resolución de problemas técnicos, ha tomado un fuerte empuje en la investigación en ingeniería [3]. Áreas como la biomecánica [4,5], ciencia de los materiales [6,7] o robótica [8] entre otras cuentan con

numerosos casos de éxito, y es en el campo del diseño de producto donde comienzan a emerger metodologías de trabajo.

No ha sido desarrollado un método general y único para la biomimética, actualmente se están desarrollando métodos para buscar analogías funcionales en la literatura biológica para llevarlas a la práctica [3,9].

Con el modelo propuesto se consiguen mejoras funcionales de producto, aspecto poco explorado en biomimética. Para hacer la biomimética más accesible a los diseñadores es preciso un método generalizado, que identifique y utilice los fenómenos biológicos relevantes aplicables a problemas de ingeniería de una manera objetiva y repetible [10].

Existen esencialmente dos procesos de diseño biomimético. Los procesos dónde el diseño se inspira en la biología y ante un problema de diseño se emplean referentes de la naturaleza para dar una solución. Y los procesos de investigación biológica que producen conocimiento científico con valor añadido, que permiten desarrollarlo y traducirlo a soluciones aplicables en el ámbito artificial.

Según los investigadores se han denominado por pares y de diversas formas: directos/indirectos, bottom-up/top-down, diseño bioinspirado dirigido por una solución encontrada/ diseño bioinspirado dirigido por un problema dado o el caso particular del BioTRIZ [3,11-15]. El modelo presentado aúna ambos procesos de manera individual e integrada en un aprendizaje por experimentación.

La búsqueda de alternativas funcionales de producto tiene un carácter exploratorio, investigar las funciones resueltas por la naturaleza permite comprender como se resuelven para aplicarlas al diseño. La innovación de productos implica la integración y uso de nuevos métodos de diseño según modelos basados en analogías de estructura-función-comportamiento, donde la definición de las características estéticas y técnicas es determinante [16-20].

Este modelo de aprendizaje biomimético se fundamenta en proyectos de aprendizaje basado en proyectos [21] y aprendizaje por experimentación [22]. Está validado teórica y empíricamente por el Cuadro de Validación [23], y cualitativa y cuantitativamente por una encuesta a quienes lo han puesto en práctica por su aplicabilidad, beneficios y utilidad [24].

2. Contexto

Existe una gran variedad de métodos y procesos que han sido estudiados y empleados en diseño industrial [25-28] y entre ellos se encuentra la biomimética, el método aquí propuesto destaca por presentar a los diseñadores la observación de la naturaleza como ámbito de estudio, siendo un espacio en el que encontrar soluciones análogas aplicables a funciones innovadoras.

La biomimética no es una enseñanza generalizada en los grados de diseño industrial y son pocas las universidades que la integran en su currículo. Las metodologías biomiméticas son difíciles de aprender y de aplicar por los diseñadores noveles, además implican una excesiva carga de trabajo en ámbitos desconocidos como la biología [29]. Por esta razón, evidenciada en experiencias previas [30], es necesario realizar un nuevo modelo y un sistema de aprendizaje, como se ha realizado desde el Biomimicry Institute [31] en sus programas de inmersión.

El objetivo principal es familiarizar al diseñador con el diseño biomimético y con la comprensión de los principios observados en las soluciones funcionales de la naturaleza. Otro objetivo es realizar un aprendizaje incremental por medio de métodos parciales de experimentación, por ello se proponen tres experiencias de aprendizaje, todas ellas efectivas en si mismas que afianzan una serie de conocimientos sobre biomimética que harán más sencillos los futuros proyectos.

Si bien la aplicación de la metodología completa supone

un trabajo muy amplio, cada uno de estos métodos se puede utilizar por separado, esto ha sido probado en ejercicios y proyectos realizados con dos grupos de alumnos de la asignatura de Biónica en el grado de Diseño Industrial y Desarrollo de Producto y un grupo de alumnos del curso "Biomimética, la naturaleza como fuente de soluciones" organizado por Universa y la propia Universidad de Zaragoza.

La utilización de dos grupos permite contrastar los resultados de los proyectos y la evaluación y valoración personal de todos los integrantes. Estos grupos están constituidos por sujetos con diferentes perfiles.

El primero es un grupo homogéneo y con formación en diseño, pertenecen a la titulación de Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto y cursan Biónica como optativa, asignatura de reciente incorporación a los estudios de diseño para mejorar los contenidos formativos. El grupo tiene 36 componentes, que trabajaron individualmente, en parejas y en 9 grupos de 4 componentes, según el ejercicio desarrollado. Todos los integrantes tienen experiencia en aplicación de métodos de diseño y están familiarizados con metodologías de diseño por fases. Previamente han realizado ejercicios y proyectos en los que realizan fases según el proceso tradicional. Para el primer grupo no se plantean dificultades en la aplicación de esta metodología, ni en el desarrollo de este proceso, ya que utilizan métodos conocidos y los relacionan con otros nuevos.

El segundo grupo es heterogéneo y está constituido por licenciados y diplomados de diferentes titulaciones, ingeniería mecánica, electrónica, arquitectura, estadística, química, veterinaria, geología y algunos diseñadores. El grupo está formado por 12 componentes, que formaron 4 grupos de 3 integrantes. Tan solo los diseñadores tenían experiencia previa en desarrollo de este tipo de proyectos por lo que se formaron tres grupos con un diseñador cada uno, los ingenieros y arquitectos tenían experiencia en proyectos pero no de este tipo. Para alguno de los componentes este modo de trabajo era completamente nuevo y no tenían referencia anterior.

Los alumnos del segundo grupo pertenecen a un curso de formación complementaria no reglada, por lo que la duración y dedicación al proyecto es menor. Hay que destacar que en este grupo todos los individuos tienen interés en la biomimética, por lo que su actitud era positiva y participativa. Su madurez les ha ayudado a superar la falta de hábito con la metodología, asimilar los conocimientos de manera rápida, y a tomar decisiones de una manera eficaz.

3. Descripción del modelo

La principal contribución del modelo propuesto al proceso de enseñanza de diseño industrial radica en que la biomimética se utiliza como un método creativo de los clasificados como analógicos [32], que recurren a la aproximación de componentes, estructuras o funciones del ámbito natural al tecnológico, de este modo los métodos creativos aplicados al diseño se enriquecen con una gran diversidad de soluciones.

La analogía constituye la relación de similitud entre

elementos de dos hechos u objetos, que permite deducir mentalmente cierto grado de vínculo entre dichos hechos u objetos. El proceso creativo por analogía biológica se establece en la búsqueda de la relación de similitud, se genera una imagen mental del problema a solucionar y se vincula a seres vivos que ya han solucionado dicho problema. La analogía biológica permite hacer una interpretación técnica de algo que ya existe en la naturaleza sin necesidad de generar una invención, establece una transferencia de conocimiento.

Se define experiencia de aprendizaje (EA) como la actividad realizada para llegar a conocer un método parcial y su integración en una metodología global. Estas experiencias permiten evaluar el aprendizaje del método y su aplicabilidad, en estas experiencias se ha evidenciado la posibilidad de conexión entre métodos. Se entiende por analogía biomimética la acción de aislar el principio de la naturaleza y representarlo de una manera técnica, como un principio de física, química, ciencia de los materiales, de ingeniería, etc. De esta manera se relacionan el principio biológico y el ingenieril.

La Tabla 1 presenta un resumen del modelo, que integra diversos métodos de diseño, relacionados con la analogía biomimética y aplicables al diseño conceptual. Su ensayo consiste en realizar ejercicios como partes de un proyecto en el que dar solución a un problema técnico basándose en soluciones extraídas de la naturaleza. En la EA3 se integran los resultados del aprendizaje de la EA1 y EA2. En la columna derecha de la Tabla 1 se observan las actividades realizadas y los aspectos valorados en cada experiencia de aprendizaje.

Tabla 1.
Actividades y valoración del aprendizaje.

Experiencia de aprendizaje.	Actividades y valoración de la experiencia.
EA1 Análisis de un caso real de biomimética.	Selección del caso, su referente natural y el principio biológico utilizado. Principio ingenieril del caso y su relación con el principio biológico. Principio ingenieril de la propuesta y su relación con el principio biológico. Diferencias entre el principio ingenieril del caso y de la propuesta. Fuentes de información utilizadas.
EA2 Solución natural aplicable al diseño de un objeto.	Individuo natural y característica propia. Análisis del principio biológico. Traducción al principio ingenieril. Grado de relación entre el principio biológico y el ingenieril. Propuesta de aplicación conceptual.
EA3 Problema técnico y resolución gracias a la biomimética.	Definición del marco de trabajo. Definición de las funciones clave. Tabla biomimética, búsqueda de los referentes naturales. Grado de relación. Analogía entre principio biomimético y principio ingenieril. Propuesta conceptual. Aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.

Fuente: Elaboración propia.

3.1. EA1. Estudio de un caso de biomimética.

La primera experiencia de aprendizaje se realiza de forma individual y es un ejercicio de investigación documental, se busca información para describir un caso de biomimética, y adquirir conocimiento suficiente que se utilice en el diseño de un objeto, distinto al objeto de referencia. Se aprende a hacer búsquedas en bases de datos específicas, en publicaciones científicas o en internet y se valora la calidad de la información encontrada y su utilidad. Las búsquedas principalmente se realizan en www.asknature.com que tiene un repositorio de ejemplos, referencias y casos de estudio fácilmente accesible, además cuenta con links a los artículos científicos para examinar el principio biológico.

El objetivo de este ejercicio es comprender cómo en el caso el análisis del principio biológico es aplicado en una solución técnica o en un producto gracias a la descripción de un principio de ingeniería. Una vez que este principio se conoce se reutiliza aplicándolo en una nueva solución o producto, definiendo a nivel conceptual un producto. Se define el tipo de analogía biomimética entre la solución natural y la técnica, describiendo si se trata de una copia, imitación, emulación, inspiración, etc., y justificándolo adecuadamente.

En la Fig.1 se describe el proceso de diseño aplicado a esta EA1, que se inicia con la selección de un caso en las fuentes antes citadas en el que se describe la analogía biológica para comprender la traducción del principio biológico en ingenieril, posteriormente el alumno puede crear una nueva aplicación de este mismo principio que le servirá para definir una nueva solución de diseño a nivel conceptual.

Definimos principio biológico como la base o razón fundamental que da sentido y explica un fenómeno que se da en la naturaleza, ya sea de carácter funcional, estructural, material, formal o de comportamiento. Llamamos principio ingenieril a la justificación y demostración del principio técnico obtenido de la transformación del principio biológico, es decir, es una explicación técnica razonada y útil que toma como base de entendimiento un fundamento de la naturaleza.

A modo de ejemplo podemos citar un ejercicio en el que se seleccionó el caso del vendaje inteligente [33], cuya característica es que el textil de polipropileno tiene estructuras microscópicas en forma de sacos que imitan las células humanas, causando que las bacterias nocivas las ataquen. Cuando las bacterias dañinas liberan toxinas o

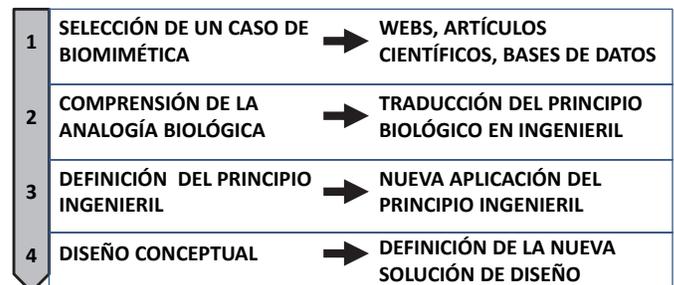


Figura 1. Proceso de diseño de la EA1.

Fuente: Elaboración propia.

enzimas para romper la pared de estas estructuras que imitan a las células, los agentes antibacterianos son liberados, matando inmediatamente a las bacterias ofensivas. Este principio ingenieril que se basa en la degradación del material se aplica de manera conceptual en una “jeringa inteligente” que con un textil similar puede detectar la presencia de patógenos en las extracciones de sangre.

La traducción en un fundamento ingenieril puede tener distintos niveles de analogía (ver Fig. 2). Cuando el principio ingenieril tiene un parecido bajo con la naturaleza se puede decir que son analogías basadas en la inspiración, la sugerencia o la interpretación, con un grado de resolución técnica bajo, mientras que cuando el parecido es alto se trata de réplicas o copias de la naturaleza y la resolución técnica es alta y muy sofisticada.

Vincent [34] plantea en los mapas biomiméticos que cuanto más abstracto es el principio biológico de origen más potencial tendrá el concepto, sin embargo la solución técnica requiere ser lo más específica posible y eso implica que se debe tender a una réplica del proceso natural como se plantea en el diseño de materiales.

La inspiración formal y ornamental [35] ha sido un elemento clave en el diseño de objetos aplicando un alto grado de abstracción del parecido con la naturaleza pero con una baja componente técnica, ejemplos claros se encuentran en el diseño de muebles o en iluminación.

Sin embargo cuando tenemos necesidad de un alto grado de resolución técnica el parecido con la naturaleza es muy alto y se llega a la copia literal de estructuras o materiales de los que existen numerosos ejemplos [36,37], como el ejemplo de los “Double Layer Anti Reflective (DLAR) coatings” empleados en los recubrimientos de las placas solares para aumentar la eficiencia energética y que se inspiran en los ojos de la polilla.

3.2. EA2. Aplicación de una solución de la naturaleza.

Se realiza en parejas y se trata de un ejercicio en el que una solución de la naturaleza se aplica al diseño de un objeto. En la Fig. 3 se resume el proceso de la EA2 que comienza por la búsqueda y estudio de algún individuo o grupo de individuos que tenga alguna característica, principio o facultad destacable, la elección de la característica es libre y se debe aplicar al diseño conceptual posteriormente. Una vez obtenida dicha característica se estudia y se define el principio biológico por medio de documentación específica y científica de la biología, cuanto más calidad y detalle tenga la información más

1	SELECCIÓN DE INDIVIDUO DE LA NATURALEZA	➔	BÚSQUEDA DE UNA CARACTERÍSTICA DESTACABLE
2	ANÁLISIS DEL PRINCIPIO BIOLÓGICO	➔	DEFINICIÓN DE LA CARACTERÍSTICA
3	TRADUCCIÓN AL PRINCIPIO INGENIERIL	➔	DEFINICIÓN DEL GRADO DE RELACIÓN ENTRE PB Y PI
4	DISEÑO CONCEPTUAL	➔	DEFINICIÓN DE LA NUEVA SOLUCIÓN DE DISEÑO

Figura 3. Proceso de diseño de la EA2. Fuente: Elaboración propia.

posibilidades de obtener un grado de resolución técnica alto y menor será el grado de abstracción. A continuación se establece la analogía y traducción al principio ingenieril, definiendo a su vez el grado de relación entre ambos principios aplicando el aprendizaje adquirido en la definición de la analogía biomimética, experimentado en la EA1. Finalmente se aplica dicho principio ingenieril al diseño conceptual de un objeto tratando de superar los ya existentes.

El objetivo de este ejercicio es familiarizarse con la descripción de una característica natural y el modo en que se puede aplicar técnicamente, buscando la posibilidad de utilización en diferentes objetos por la diversidad de opciones de aplicación. La característica no necesariamente ha de ser la función principal del objeto, además no debe depender del objeto diseñado, por ejemplo si analizamos un mejillón por su característica filtrante no necesariamente debemos diseñar un filtro sino que debemos abstraer la característica de filtro de fluidos para aplicarla a objetos que necesiten de esta función.

En esta EA2 ponemos como ejemplo dos ejercicios, el primero con una documentación muy precisa que llevará a una resolución técnica alta y el segundo con una documentación de menor calidad. En el primer ejercicio se selecciona la “LABIA MINOR” de los Dermaptera, un pequeño artrópodo conocido comúnmente como Tijereta o Cortapicos, su característica destacable es el plegado y articulación de las alas por medio de su fluido sanguíneo, las articulaciones flexibles, la naturaleza flexible del ala, los patrones de plegado y la presencia de la resilina [38], el estudio pormenorizado detalla la importancia del cambio de presiones en el fluido en combinación con el material del ala para evitar la rotura. Este estudio ha llevado a la definición del principio ingenieril y a un pequeño prototipo realizado con láminas plásticas y globos inflables que dan como resultado el diseño conceptual de una bisagra que se puede aplicar en diversos dispositivos como por ejemplo en equipamiento médico para el despliegue de un globo esofágico traqueal por medio de fluidos en vez de gases.

En el segundo ejercicio el ser vivo es el ASTACUS conocida como cangrejo de río y la característica elegida es la articulación estanca con varios grados de libertad y restricción de movimiento, la calidad de la información es inferior y se basa en libros de biología, páginas web con poco carácter científico. El análisis del principio biológico resulta suficiente para definir el principio ingenieril que se basa en la geometría, el cambio de sección y el material. Se



Figura 2. Grados de analogía en el principio ingenieril. Fuente: Elaboración propia.

define a nivel conceptual la aplicación en carcasas articuladas estancas para contener fluidos para uso en cosmética o alimentación. En este caso la falta de precisión en la información de partida impide el realizar una mejor relación entre el principio ingenieril y el biológico.

3.3. EA3. Solución de problema técnico.

Esta experiencia de aprendizaje se realiza por medio de un proyecto en grupos de 4 alumnos en el que se da solución a un problema técnico existente y común a un grupo de productos. Se pretende que la resolución del problema técnico sea extrapolable a productos distintos entre sí. Muchos objetos cotidianos con una característica común están condicionados por las soluciones técnicas existentes, siendo necesario encontrar soluciones más innovadoras.

En la figura 4 se observa la comparativa del modelo genérico de diseño frente al modelo propuesto con aplicación de biomimética. Inicialmente se establece un marco de trabajo que incluye el grupo de objetos que pueden presentar el problema técnico y se definen por medio de una búsqueda de referencias existentes en el mercado que describan el estado actual de la técnica. El tipo de problema técnico se asocia a una característica deseada en el producto que puede ser del tipo estanqueidad, flexibilidad, modularidad, adaptabilidad, etc. En un modelo genérico de diseño se correspondería en cierto modo a la fase del encargo de diseño donde se establecen los requisitos iniciales del proyecto. En esta fase se determina la característica que posteriormente analizaremos por su principio biológico.

El objetivo es establecer el espacio de diseño en el que el diseñador desarrolla su proyecto, a modo de ejemplo podemos determinar que la característica deseada es la ventilación de una carcasa, el marco de trabajo nos limita a objetos o productos que requieran ventilación como por ejemplo máquinas eléctricas, dispositivos electrónicos, contenedores de productos químicos, etc. Cada uno de ellos representa un espacio de diseño, pero estos espacios se pueden ampliar estableciendo un marco de trabajo más

genérico o especializar al definir concretamente un objeto que necesita una innovación vinculada a esta característica; hablaríamos genéricamente de una carcasa que permita el flujo de un fluido o concretamente de un objeto como una máquina herramienta eléctrica de mano que debe disipar calor.

A continuación, se identifican las funciones clave como oportunidades de innovación, se hace un listado de funciones clave, por medio de los mapas mentales. El objetivo es definir una potencial innovación funcional. Los mapas mentales o pensamiento radiante [39] se relacionan con el método de análisis funcional estableciendo niveles y jerarquías, desde funciones genéricas hasta funciones muy específicas y concretas.

Las funciones específicas pueden ser requisitos de diseño concretos, en ellas se ha perdido el carácter de abstracto y su definición técnica debe ser muy alta.

Una vez que las funciones clave están seleccionadas, se realiza un estudio del estado del arte, tanto biológico como industrial. El estado del arte en el ámbito industrial se plantea como búsqueda de objetos o productos que tengan la característica descrita y sean paradigmáticas, utilizando bases de datos de patentes. El objetivo es evitar que se planteen soluciones ya existentes, aportando otras nuevas o alternativas.

Para la investigación en la naturaleza es necesario utilizar la tabla de referentes naturales (ver tabla 2), las funciones se sitúan como objetivos a conseguir y por medio de la técnica creativa “el arte de preguntar” se van perfilando los posibles seres vivos que mejor desarrollen esa función, estas preguntas se orientan hacia el campo biológico [40]. Aprovechando el potencial de la diversidad biológica, y dado que en la naturaleza existen diferentes seres vivos con soluciones diferentes para un mismo problema técnico, se buscan los mejores candidatos para establecer la analogía biomimética. Del mismo modo se consiguen diferentes aplicaciones de las soluciones en objetos distintos por mera adaptación, ya que el propio

Tabla 2. Ejemplo de búsqueda de referentes naturales.

Función Clave	Preguntas Biologizantes	Referente Natural
Hermetizar cíclico y al vacío.	¿Para qué? - Evitar oxidación. ¿Cómo? - Sacando fluidos - Mediante válvula antirretorno. - Diferencia de presiones. - Atmósfera estéril.	- Arañas, mosquitos, Sanguijuelas, caracoles y babosas. - Utricularia. - Caracoles y lapas. - Cráneo
Evitar agresiones	¿Dónde? - Cualquier entorno. ¿Cómo? - Contrataque - Mimetización con entorno - Defensa - Sonido - Color (advertencia) ¿Para qué? - Proteger	- Escarabajo violín, mofeta. - Camaleón, insecto palo, pulpo. - Escarabajo tortuga, armadillo, pez globo. - Babuinos, serpiente de cascabel.

Fuente: Elaboración propia.

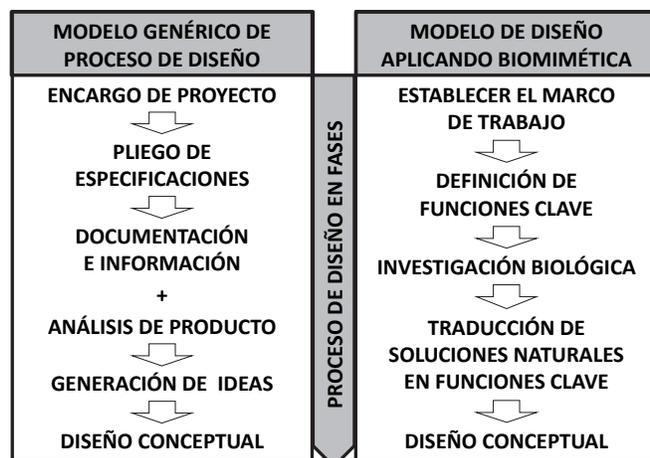


Figura 4. Cuadro comparativo entre modelos de proceso de diseño. Fuente: Elaboración propia.

marco de trabajo establece la relación entre objetos. El objetivo es conocer una serie de candidatos naturales capaces de aportar innovación funcional.

En la Tabla 2 se presentan dos funciones clave diferentes en la columna izquierda, en la columna central se plantean las “preguntas biologizantes” con las que identificar los posibles candidatos y en la columna derecha se listan una serie de candidatos naturales que de algún modo exhiben la característica perseguida.

Por último se realiza la traducción de las soluciones naturales en funciones clave, empleando la tabla en sentido inverso, aislamos los mejores candidatos para dar solución a las funciones clave, se utilizan los métodos aprendidos en las experiencias de aprendizaje previas para la traducción al principio ingenieril.

Los referentes naturales y la forma en que solucionan cada una de las funciones clave sirven para aplicar el método de definición de especificaciones de diseño utilizado generalizadamente en todos los procesos de conceptualización de producto. El objetivo es conocer la importancia de las especificaciones de diseño y su valor para la definición de conceptos.

En otros modelos se desarrolla el diseño de detalle, sin embargo en este no se contempla esta fase ya que en algunos casos su aplicación es directa pero en otros es necesaria una fase de investigación y desarrollo. Un estudio pormenorizado del individuo natural podría solventarse con una consulta a un especialista o una búsqueda en revistas especializadas, sin embargo el diseñador carece de ese conocimiento y el proyecto necesita una fase específica.

También puede ser necesario el desarrollo de prototipos, experimentos y pruebas que evidencien la correcta traducción del principio biológico en el ingenieril. Por medio de modelos funcionales y virtuales generados con herramientas CAD, módulos de cálculo, simulación o animación se integran los métodos de representación al diseño biomimético en la fase final del proceso.

Es en esta última experiencia de aprendizaje donde se observa claramente la integración de métodos, por la combinación de fases analíticas de investigación técnica y biológica, creativas, y de definición de producto o prototipado.

4. Resultados

4.1. EA 1. Estudio de un caso de biomimética.

En experiencias previas [30] se evidencio la dificultad de comprender el principio biológico y hacer su traducción a un principio ingenieril, se propuso hacer la EA1 para aprender y conocer esa fase y poder hacerla por sí mismos. Se realizaron 41 ejercicios individuales, en la Tabla 3 se observa un resumen de los resultados de la EA1. Los resultados se evalúan Primero por la idoneidad del caso seleccionado y por la cantidad y calidad de la información para describir la analogía biomimética. Todos se consideran idóneos.

Segundo, por el análisis del caso y la definición del grado de relación entre principio biológico e ingenieril (GR1), si la relación entre el principio biológico y el

ingenieril se trata de una mera inspiración se considera muy bajo, si se aproxima a una copia entonces es muy alto, siendo estos los extremos de una escala de 5 niveles (ver Fig. 3). Ninguno se considera muy bajo, 3 se consideran bajos y 3 normales. En 15 ejercicios se considera alto y en 20 muy alto, lo que indica que los casos seleccionados explican detalladamente el principio biológico y su aplicación técnica.

Tercero, por el grado de relación de su propia propuesta (GR2), que utiliza la misma escala. El GR2 indica si el diseñador ha comprendido el GR1 y lo ha sabido aprovechar. Ninguno se considera muy bajo y 3 bajos, una parte muy pequeña de la muestra. Hay 11 ejercicios con un nivel normal, 13 alto y 14 muy alto, lo que indica que la información de los casos es válida y se han aplicado correctamente.

Además se evalúa de manera individual para los 41 ejercicios si el caso original se iguala o se supera. Se compara el GR2 respecto al GR1, se considera superado si el GR2 supera en la escala al GR1 (diferencia positiva, +2 o +1), se iguala cuando no cambia (diferencia igual a cero) y empeora si no lo supera (diferencia negativa. -1 o -2).

Ningún caso de los propuestos por los alumnos supera ampliamente al original, solo 3 lo superan, sin embargo se observa que la mayoría (26 ejercicios) mantiene el nivel, siendo en 12 ocasiones empeorado. Esto indica que en general han comprendido el caso y han aprendido a hacer su propia propuesta, no superando el caso cuando el nivel de la analogía y definición técnica es muy alto pero consiguiéndolo cuando es alto o normal.

4.2. EA 2. Aplicación de una solución de la naturaleza.

El aprendizaje en la EA1 permite al diseñador estar familiarizado con la relación entre el principio biológico e ingenieril y en la EA2 debe aplicarlo al saber identificar un ser vivo con una característica destacable, su comprensión y aplicación técnica. Se han realizado un total de 22 ejercicios en parejas, se encontraron 11 repeticiones en 5 seres vivos comunes, y los resultados se resumen en la Tabla 4.

Primero se evalúa la definición del principio biológico, si han sabido encontrar la información y analizarla. Se evalúa como válido (V) cuando la definición del principio biológico es útil para hacer una analogía biomimética, y no válido (X) cuando no se puede utilizar. Se han clasificado 18 ejercicios como válidos y tan solo 1 como no válido. Existen casos imprecisos que resulta difícil calificarlos como válido o no válido y que evaluaremos como “indefinido” (I), de estos se han observado 3 ejercicios.

Segundo, se evalúa la definición del principio ingenieril, si utilizando la definición realizada en el principio biológico

Tabla 3.
Resumen de resultados de la EA1.

ANALOGÍA BIOMIMÉTICA	1 MUY BAJO	2 BAJO	3 NORMAL	4 ALTO	5 MUY ALTO
GR1	0	3	3	15	20
GR2	0	3	11	13	14
COMPARACIÓN	-2	-1	0	+1	+2
GR2-GR1	5	7	26	3	0

Fuente: Elaboración propia.

han sabido hacer una traducción técnica. Se utiliza el mismo criterio de válido o no válido anterior. En 15 ejercicios se considera como válido, 2 como no válido y se observan 5 calificables como indefinidos.

En general se observa que la definición del principio biológico condiciona la definición del principio ingenieril (17 ejercicios), una buena o mala definición lleva a una buena o mala traducción respectivamente, es decir, se mantiene (=). Y en 5 ejercicios se observa que la traducción es errónea (E), no se aprovecha la definición del principio biológico y lleva a un principio ingenieril no válido, es decir, empeora.

Individualmente se observa que normalmente se mantiene, los que tienen bien definido el principio biológico también lo hacen con el ingenieril, 14 casos (V-V), 2 casos (I-I) y 1 caso (X-X). Y que ninguno puede hacer una mejora es decir si el principio biológico está mal definido o indefinido no es posible tener bien definido el ingenieril (I-X, V-I).

Y tercero, se evalúa el grado de relación entre el principio biológico y el ingenieril, con la misma escala de niveles utilizada en la EA1. Solo 2 ejercicios se consideran con un nivel bajo y ninguno con muy bajo. En 6 ejercicios se obtiene un nivel normal, en 11 alto y en 3 muy alto. Los resultados son satisfactorios, 14 de los 22 ejercicios obtienen un buen nivel de definición de los principios biológico e ingenieril y su analogía biomimética es correcta y útil para generar conceptos de diseño.

4.3. EA 3. Solución de problema técnico.

Se han desarrollado 13 proyectos en grupos de 3 o 4 diseñadores, la Tabla 5 recoge un resumen de los resultados. La elección del marco es válida si la característica técnica se puede implementar en esos productos. Se proponen 3 marcos de trabajo, cada grupo elige el apropiado para su proyecto, 6 grupos han elegido el marco de alimentación, 3 el de electrónica y 3 de sumergible. Uno de los grupos no ha definido un marco sino que ha mezclado varios de ellos. Todos ellos se consideran válidos.

Primero se evalúa el número de funciones clave generadas, los mapas mentales [39] son una herramienta eficaz y eficiente en la búsqueda de funciones potencialmente innovadoras, aunque no exclusiva. Se han encontrado 89 en los diferentes proyectos, 9 se clasifican con un alto grado de oportunidad de generar innovación, 47 grado medio y 33 grado bajo. Se clasifican con un grado

Tabla 4. Resumen de resultados de la EA2.

DEFINICIÓN	X	I	V	=	E
PB	1	3	18	17	5
PI	2	5	15		
COMPARACIÓN	X-X	I-X	I-I	V-I	V-V
INDIVIDUAL	1	1	2	4	14
ANALOGÍA BIOMIMÉTICA	1 MUY BAJO	2 BAJO	3 NORMAL	4 ALTO	5 MUY ALTO
GR PB-PI	0	2	6	11	3

(X) no válido / (I) indefinido / (V) válido / (=) se mantiene / (E) empeora

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Resumen de resultados de la EA3.

MARCO	NO VALIDO		VALIDO		
GRUPOS	0		13		
GRADO DE OPORTUNIDAD	TOTAL	BAJO	MEDIO	ALTO	
FUNCION CLAVE	89	33	47	9	
ANALOGÍA BIOMIMÉTICA	1 MUY BAJO	2 BAJO	3 NORMAL	4 ALTO	5 MUY ALTO
GR PB-PI	0	2	3	5	3
EDP CONCEPTO	INCOMPLETO		COMPLETO		
GRUPOS	5		8		

Fuente: Elaboración propia.

bajo aquellas funciones ya solucionadas, y para las cuales la naturaleza difícilmente aporta valor o diferenciación. Un grado medio se considera a funciones que existen pero se pueden diferenciar y aportar valor. Por último, un grado alto implica que no existen, o que existen en muy pocas aplicaciones, y sería interesante encontrar seres vivos que permitieran desarrollarlas.

Algunos grupos no utilizan los mapas mentales, se limitan a hacer listados organizados de funciones. Los listados de funciones no pueden establecer vínculos entre niveles, sin embargo demuestran ser válidos, se basan en la técnica de listado de atributos [41], propia de la generación de nuevos productos y en la mejora de servicios o productos existentes.

Las funciones clave agrupadas por temas genéricos, como por ejemplo barrera térmica, regulador de humedad y temperatura, resistencia al choque o evitar agresiones, tienen un grado de oportunidad bajo y parece difícil que superen el estado actual de la técnica.

Sin embargo las funciones específicas se clasifican con un grado de oportunidad medio o alto, por lo que dar solución a estas funciones podría tener aplicaciones de interés, por ejemplo una barrera selectiva unidireccional/bidireccional, integridad del hermético dependiente de las condiciones del entorno inspirada en bivalvos como la almeja o evitar contaminación al cocinar alimentos inspirado en la creación de un biofilm como hacen algunas algas con características antibacterianas.

En segundo lugar se evalúa la obtención de referentes naturales por medio de las tablas biomiméticas, método para encontrar referentes naturales a las funciones clave, partiendo de la función clave permite concretar soluciones o seres vivos que desarrollan esa función (ver Tabla 2).

Se ha observado que no todos los grupos las aplican estrictamente, omiten alguna parte, plantean una alternativa o bien obtienen el mismo resultado sin necesidad de ponerlo en un formato de tabla. Hay un total de 328 propuestas, algunas repetidas en varios grupos, el mayor número es 50 y el menor 9, salvando una excepción que no propone tabla biomimética.

El elevado número de seres vivos propuestos para desarrollar el principio biológico evidencia la utilidad de las tablas y de la EA2 en cuanto a la búsqueda de candidatos.

Además se tiene en cuenta la calidad de las propuestas, ya que son necesarias para definir el principio biológico.

Tercero, como en las experiencias de aprendizaje anteriores se evalúa el grado de relación entre principio biológico e ingenieril, con la misma clasificación. Es de destacar que 3 proyectos se clasifican con un grado muy alto, evidenciando que el principio natural está bien definido, con suficiente información y de calidad, y además la relación es clara y fundamentada de modo que el principio ingenieril está satisfactoriamente definido y se puede aplicar al diseño. Con un grado alto hay 5 proyectos, 3 con medio y 2 con bajo, es decir, 8 de 11 se consideran como alto o muy alto para grados de relación definidos por los alumnos, demostrando que el aprendizaje anterior es válido.

En estos proyectos además se valora la propuesta conceptual por la calidad de las especificaciones de diseño que se utilizan para describir el concepto en relación a la innovación pretendida. Se consideran solo dos opciones, que la especificación de diseño de producto está completa, define el concepto y utiliza la función clave (8 casos) o que está incompleta, el concepto no queda claro y bien definido o no utiliza la función clave (5 casos).

Los resultados de las propuestas conceptuales son óptimos, los 8 proyectos considerados con una descripción completa tienen una buena definición conceptual, con un listado de especificaciones vinculadas a los resultados del trabajo realizado con las tablas biomiméticas.

La calidad de las propuestas responde a las experiencias previas y ese es un indicador de los buenos resultados, todos los equipos en las experiencias de aprendizaje anteriores han definido un objeto o producto a nivel conceptual, planteando requisitos de diseño y necesidades a satisfacer por medio del principio ingenieril. Todos los equipos presentan varias opciones conceptuales y eligen una de ellas para desarrollar.

En la propuesta de proyecto no se define un objeto, se solicita resolver el problema técnico o característica de producto por lo que el objeto a diseñar puede ser con propuestas muy abiertas, por esta razón no se precisa coherencia entre los resultados de los diferentes proyectos y lo que realmente se analiza para evaluar es como se definen los requisitos funcionales partiendo del principio ingenieril.

4.4. Resultados globales.

La aplicación satisfactoria de este modelo ha servido para que en el último proyecto los diseñadores hayan sido capaces de ir aplicando los diferentes métodos aprendidos de manera parcial en las EA1 y EA2 y relacionándolos con otros métodos de diseño.

Para la validación del modelo se realizó una encuesta con cuatro bloques de preguntas, que se corresponden con las características de comprensión, aplicabilidad, beneficios y utilidad. En la Tabla 6 se presentan las preguntas con los valores medios de las respuestas de cada grupo, M-DI para el grupo de diseñadores y M-U para el grupo de Universa, además del total del grupo (M) junto con la desviación típica (σ). Las preguntas se formulan en positivo para obtener respuestas numéricas, donde 1 significa muy

negativo (muy en desacuerdo) y 5 muy positivo (totalmente de acuerdo).

Los resultados de la encuesta han permitido realizar un pequeño estudio estadístico (ver Tabla 6), y otro cualitativo gracias a preguntas abiertas para cada bloque, donde escribir observaciones o comentarios, además existe un bloque final en el que se solicita al alumno una evaluación personal que refleje el valor que ha tenido la utilización de la metodología y sus conclusiones.

El resultado general refleja que el modelo es aplicable por diseñadores y personas de otros campos de conocimiento, fácil de comprender y permite alcanzar los objetivos definidos. No se declaran dificultades de aplicabilidad y se reconoce que se emplearía en futuros proyectos teniendo la debida información y conocimiento sobre los requisitos del principio ingenieril. Se destaca como una metodología beneficiosa para el proceso creativo e innovador, y que permite conocer y aplicar el método por partes y de manera global. Los propios diseñadores evalúan positivamente la práctica con este modelo de diseño conceptual.

Además se reconoce como útil en la definición de objetivos y nuevos proyectos, en el establecimiento de ideas y conceptualización así como apoyo a otros métodos en las diferentes fases de diseño. Estos resultados se observan en la columna de valores medios, destacados en gris de la Tabla 6.

5. Conclusiones

La innovación hoy en día exige nuevos procesos creativos y métodos alternativos en diseño industrial. Aquí se ha presentado un modelo de aprendizaje donde cada experiencia de aprendizaje afianza conocimientos útiles aplicables, el diseñador utiliza la naturaleza como fuente de ideas y soluciones técnicas. La resolución de ejercicios de dificultad incremental simplifica la resolución de un problema técnico, obteniendo resultados innovadores al integrar la biomimética.

Se han descrito relaciones entre análisis funcional y creatividad, el proceso creativo establece diferentes niveles en los que encontrar nuevas funciones. Se ha planteado un marco de trabajo en el que la relación entre naturaleza y diseño da buenos resultados.

La calidad de la información dada por el detalle del principio biológico e ingenieril permite al diseñador hacer nuevas y válidas propuestas de la utilización de un principio biológico.

El modelo presentado aporta una visión nueva respecto a la resolución funciones distintas de la principal, así el diseño de producto se beneficia de las soluciones a funciones complementarias. Muchos productos son eficaces por su función principal, pero la diferenciación e innovación se puede encontrar en funciones complementarias o en nuevas formas de conseguirlas.

Si bien existen trabajos de investigación y métodos basados en la explotación de soluciones de la naturaleza sus campos de actividad no se centran en la definición de nuevas funciones, por ello la exploración de soluciones naturales para la resolución de problemas técnicos de carácter funcional se convierte en un rasgo de innovación.

Tabla 6.
Resumen estadístico encuesta.

		Media	Media DI	Media UNIV	Desv T	
COMPRENSIÓN	Sobre las metodologías expuestas en la parte teórica y aplicadas en la parte práctica:	En general se entienden con claridad	4,07	4,09	4,00	0,69
		Se entienden todas y cada una de las fases del proceso	4,13	4,31	3,55	0,86
		Marcan un proceso fácil de seguir	3,89	3,89	3,91	0,80
		Tienen unos objetivos bien definidos y alcanzables	3,84	3,88	3,73	0,93
		Existen dificultades de aplicación en el proceso de diseño	3,82	3,86	3,70	0,72
		Los ejemplos facilitan la aplicación	4,65	4,66	4,64	0,57
APLICACIÓN	Sobre la aplicación de las metodologías de biomimética:	Son necesarios conocimientos previos	3,09	3,15	2,91	1,18
		Son necesarios requisitos iniciales de información	3,59	3,60	3,55	1,05
		Es necesario conocer los requisitos del principio ingenieril	3,80	4,00	3,18	0,84
		Volvería a aplicarlas en otros proyectos	4,39	4,40	4,36	0,74
		Permite generar mayor número de ideas y conceptos	4,52	4,49	4,64	0,69
		Permite generar ideas novedosas e innovadoras	4,74	4,80	4,55	0,49
BENEFICIOS	Aplicar metodologías de biomimética...	Ayuda al diseñador a establecer objetivos de proyecto	3,91	3,94	3,82	0,78
		Ayuda al diseñador en el proceso creativo	4,48	4,49	4,45	0,55
		Ayuda al diseñador en la fase conceptual	4,33	4,46	3,91	0,73
		Ayuda al diseñador en la fase de diseño de detalle	3,72	3,77	3,55	0,98
		La definición de objetivos y nuevos proyectos	3,89	3,86	4,00	0,80
VALIDACIÓN	La metodología biomimética es útil para...	La fase de definición de ideas y conceptualización	4,24	4,29	4,09	0,79
		La fase de desarrollo, definición de materiales y procesos	3,70	3,69	3,73	0,92
		La fase de detalle y definición final del producto	3,48	3,54	3,27	1,07
		La estética y caracterización formal	3,67	3,71	3,55	0,97
		Aplicar soluciones naturales (EA2) al diseño de producto	4,46	4,54	4,18	0,55
		La solución de problemas técnicos (EA3)	4,33	4,31	4,36	0,79
		Aplicarla junto con otros métodos y herramientas (p.ej. El análisis funcional y otros)	4,41	4,43	4,36	0,80

Fuente: Elaboración propia.

References

- [1] Drachsler, K., 2012. Bionik – Mit Einer Neuen Systematik Schneller Zu Innovationen, [Online], [date of reference February 20th of 2012], Available at: http://w3.ipa.fhg.de/PresseMedien/interaktiv/interaktiv_2003_01.pdf
- [2] Viñolas, I. y Marlet, J., Diseño ecológico: Hacia un diseño y una producción en armonía con la naturaleza. Barcelona: Blume, 2005.
- [3] Vincent, J.F.V., Bogatyreva, O.A., Bogatyrev, N.R., Bowyer, A. and Pahl, A.K., Biomimetics: Its practice and theory. Journal of the Royal Society Interface, 3 (9), pp. 471-482, 2006. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>
- [4] Vogel, S., Comparative biomechanics: Life's physical world. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [5] Alcocer, W., Vela, L., Blanco, A., Gonzalez, J. and Oliver, M., Major trends in the development of ankle rehabilitation devices, DYNA, 79 (176), pp. 45-55, 2012.
- [6] Bhushan, B., Biomimetics: Lessons from Nature - an Overview. Philosophical Transactions, Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 367 (1893), pp. 1445-86, 2009.
- [7] Asdrúbal, G., Del editor. El diseño y modelamiento de materiales. DYNA, 75 (156), pp. 251-269, 2008

- [8] Bar-Cohen, Y., *Biomimetics: Biologically inspired technologies*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-3182/1/1/P01>
- [9] Shu, L.H., A natural-language approach to biomimetic design. *Artificial intelligence for engineering design, Analysis and Manufacturing*, 24 (4), pp. 507-519. 2010. <http://dx.doi.org/10.1017/S0890060410000363>
- [10] Mak, T.W. and Shu, L.H., Abstraction of biological analogies for design. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 53 (1), pp.117-120. 2004. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60658-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60658-1)
- [11] Pedersen, Z., *Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability*. Sustainable Building Conference, 2007.
- [12] Roshko, T., The pedagogy of bio-design: Methodology development. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, pp. 545-558, 2010. <http://dx.doi.org/10.2495/DN100491>
- [13] Helms, M., Vattam, S. and Goel, A., Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*, 30 (5), pp. 606-622, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2009.04.003>
- [14] Speck, T. and Speck, O., Process sequences in biomimetic research. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 114, pp. 3-11. 2008. <http://dx.doi.org/10.2495/DN080011>
- [15] Bogatyreva, O.A., Pahl, A.K. and Vincent, J.F., Enriching TRIZ with biology: The biological effects database and implications for teleology and epistemology. *ETRIA World Conference-2002, Strasbourg*, pp. 3-1-307. 2002.
- [16] Manchado-Pérez, E. and Berges-Muro, L., Sistemas de retículas: Un método para diseñar nuevos conceptos de producto hacia el usuario. *DYNA*, 80 (181), pp. 16-24, 2013.
- [17] Goel, A.K. and Bhatta, S.R., Use of design patterns in analogy-based design. *Advanced Engineering Informatics*, 18 (2) pp. 85-94. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2004.09.003>
- [18] Gero, J., The situated function-behaviour-structure framework. *Design Studies*, 25 (4) pp. 373-391, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010>
- [19] Deng, Y.M., Britton, G.A. and Tor, S.B., Constraint-based functional design verification for conceptual design. *Computer-Aided Design*, 32 (14) pp. 889-899. 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00077-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00077-4)
- [20] Yasushi, U., Ishii, M., Yoshioka, M., Shimomura, Y. and Tomiyama, T., Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler. *Artificial intelligence for engineering design, Analysis and Manufacturing: Ai Edam*, 10 (4) pp. 275. 1996.
- [21] Mills, J., Engineering education – Is problem based or project-based learning the answer? *Australasian J. of Engineering Education*, [Online], [date of reference December 20th of 2003], Available: http://www.aeee.com.au/journal/2003/mills_treagust03.pdf
- [22] Anzai, Y., *The theory of learning by doing*. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, 1978.
- [23] Pedersen, K., et al. Validating design methods and research: The validation square, DECTC'00, 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences, Baltimore, MA, 2000.
- [24] López-Forniés, I., *Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético*, PhD. Thesis Dissertation, Design and Manufacturing Department, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2012.
- [25] Tomiyama, T, Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, Ch. and Kimura, F., Design methodologies: Industrial and educational applications. *Cirp Annals - Manufacturing Technology*, 58 (2) pp. 543-565. 2009.
- [26] Cross, N., *Engineering design methods: Strategies for product design*. Chichester: Wiley, 2000.
- [27] Pahl, G. and Wolfgang B., *Engineering design: A systematic approach*. London: Springer, 1996. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-3581-4>
- [28] Design Council. *Introducing design methods*, [Online], [date of reference, July 25th of 2014], Available at: <http://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/introducing-design-methods>
- [29] Santulli, C. and Langella, C., Introducing students to bio-inspiration and biomimetic design: A workshop experience, *International Journal of Technology and Design Education*, 21 (4), pp 471-485, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s10798-010-9132-6>
- [30] López-Forniés, I., Berges-Muro, L., Relation between biomimetic and functional analysis in product design methodology. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, pp 317-328, 2010. <http://dx.doi.org/10.2495/DN100271>
- [31] Biomimicry Institute. *Educating*. [Online], [date of reference, July 25th of 2014]. Available at: <http://www.biomimicry.net/educating/>
- [32] Marín, R. y De La Torre, S., *Manual de creatividad*. Barcelona: Vicens Vives, 2000.
- [33] Ask Nature. *Smart Bandage*. [Online], [date of reference, July 25th of 2014]]. Available at: <http://www.asknature.org/product/84b05783b105ac6f511cb22758a94d13>
- [34] Vincent, J., Stealing ideas from nature, *RSA Journal London*, pp. 36-43, 1997
- [35] Reyes, F., *Nature: Inspiration for Art & Design*, Barcelona: Monsa., 2008.
- [36] Takemura, S-Y., Stavenga, D.G. and Arikawa, K., Absence of eye shine and tapetum in the heterogeneous eye of *Anthocharis* butterflies (Pieridae), *The Journal of Experimental Biolog.*, 210, pp.3075-3081. 2007. <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.002725>
- [37] Jinkuk, K., Park, J.H., Hong, J., Choi, S.J., Kang, G.H., Yu, G.J., Kim, N.S. and Song, H., Double antireflection coating layer with silicon nitride and silicon oxide for crystalline silicon solar cell, *Journal of Electroceramics*, 30, pp. 41-45, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s10832-012-9710-y>
- [38] Haas, F., Elastic joints in dermapteran hind wings: Materials and wing folding. *Arthropod Structure & Development*, 29 (2) pp. 137-146. 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S1467-8039\(00\)00025-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1467-8039(00)00025-6)
- [39] Buzan, T., *The mind map book*. London:BBC Books, 1993.
- [40] Gruber, P., *Skin in architecture: Towards bioinspired facades*, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, pp 503-513, 2010. <http://dx.doi.org/10.2495/DN100451>
- [41] Crawford, R., *The techniques of creative thinking: How to use your ideas to achieve success*, Fraser Pub. Co, Wells, 1964.

I. López-Forniés es Dr por la Universidad de Zaragoza. Ingeniero en Organización Industrial, Bachelor Arts in Consumer Product Design por la Coventry University e Ingeniero Técnico Industrial. Actualmente Profesor Colaborador e investigador perteneciente al I3A de la Universidad de Zaragoza, España. Socio fundador del estudio de diseño industrial y gráfico Mil Asociados, Presidente y fundador de la Asociación de Profesionales de Diseño Industrial de Aragón (DIN-A). Coordinador, responsable y ponente de múltiples cursos de diseño industrial en diversos organismos.

L. Berges-Muro es Dr Ing. Industrial. Profesor Titular de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Zaragoza, España, ha desempeñado numerosos cargos como Vicerrector de Infraestructuras y Servicios Universitarios, Director de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación. Director del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, España. Miembro de la Junta de Gobierno del Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja.