



BIOMIMÉTICA

HERRAMIENTAS DE DISEÑO INSPIRADAS EN LA NATURALEZA

Rafael Muñíz

rmuniz53@gmail.com

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI). Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Historia del Artículo

Recibido 15 de Septiembre de 2017

Aceptado 15 de Septiembre de 2017

Disponible online: 19 de Septiembre de 2017

Resumen: La biomimética (de bios, vida, y mimesis, imitar) es una nueva ciencia basada en el estudio de modelos, sistemas y procesos de la naturaleza con el propósito de imitarlos y así plantear posibles soluciones a problemas de orden práctico para cubrir algunas de las necesidades humanas. La biomimética, es un método por medio del cual los diseñadores e ingenieros se basan en el conocimiento de cómo los organismos resuelven ciertos problemas complejos en su relación con el entorno a lo largo de un proceso evolutivo de miles de millones de años. Con este propósito científicos de diversas áreas del conocimiento han iniciado el desarrollo de múltiples proyectos orientados a emular los procesos naturales introduciendo una serie de conceptos nuevos que hoy en día son empleados por organizaciones a nivel mundial en la construcción de bienes y servicios. Los métodos de diseño actuales requieren de nuevos enfoques para generar innovación. Los enfoques metodológicos que se presentan en este artículo facilitan la conceptualización de las estrategias de diseño de productos, basándose en las especificaciones funcionales que aportan los seres vivos.

Palabras Clave: Biomimética, biónica, bioingeniería, métodos de diseño, innovación.

Biomimetics Design tools inspired by nature

Abstract: Biomimetics (of bios, life, and mimesis, imitate) is a new science based on the study of models, systems and processes of nature with the purpose of imitating them and thus pose possible solutions to practical problems to cover some of the human needs. Biomimetics is a method by which designers and engineers build on the knowledge of how organisms solve complex problems in their relationship with the environment throughout an evolutionary process of billions of years. To this end, scientists from different areas of knowledge have started the development of multiple projects aimed at emulating natural processes by introducing a series of new concepts that today are used by organizations worldwide in the construction of goods and services. Current design methods require new approaches to generate innovation. The methodological approaches presented in this article facilitate the conceptualization of product design strategies, based on the functional specifications provided by living beings.

Keywords: Biomimetics, bionics, bioengineering, design methods, innovation.

I. INTRODUCCIÓN

“La naturaleza no hace nada superfluo, nada inútil, y sabe sacar múltiples efectos de una sola causa”.

Nicolás Copérnico (1473 - 1543)

La humanidad ha alcanzado un punto crítico en su evolución. El incremento a una tasa exponencial de la población, el consumo excesivo de los recursos no renovables, la acumulación de desechos muchos de ellos tóxicos y la desigualdad en la distribución de esos recursos entre países y en las comunidades que los constituyen, sumado a nuestros hábitos, que no son sustentables nos han llevado un nivel límite de tolerancia de la naturaleza.

La sustentabilidad es un proceso dinámico que podría permitir que los individuos desarrollen todo su potencial evolutivo, mejorando la calidad de vida mediante conductas que preserven los sistemas que soportan la vida en la Tierra.

Por medio de la evolución, los sistemas biológicos han experimentado diversos tipos de soluciones ante los desafíos que implican la supervivencia de las especies. La naturaleza en forma continua realiza experimentos donde se evidencia la presencia de elementos distintivos propios de la física, la química, la mecánica, la ciencia de los materiales, los sistemas cibernéticos de control metabólico por retroalimentación, el desarrollo de sensores que exploran el entorno y muchos otros aspectos que nosotros reconocemos como campos afines a las ciencias básicas y a la ingeniería.

Los procesos de la naturaleza también involucran el escalamiento desde un nivel nano y micro hasta lo macro. Los sistemas vivientes archivan los registros de toda esta información mediante un código genético que se transmite de una generación a otra.

Desde los primeros tiempos de la humanidad la emulación de la naturaleza nos ha servido como una estrategia de supervivencia. Es extensa la lista de casos en la que ingenieros, arquitectos,

científicos y artistas han basado su inspiración en la naturaleza, no solo por la búsqueda de la belleza sino también explorando las diversas cualidades que muestran sus estructuras y materiales, la eficiencia de sus procesos y la posibilidad de aprovechar los recursos que se encuentran a su disposición en el entorno, logrando optimizar sus funciones y orientando su búsqueda hacia nuevas fuentes de energía y el desarrollo de productos innovadores.

La naturaleza en el transcurso de más de 3.8 eones (3.800 millones de años) ha sido capaz de evolucionar logrando resolver de forma exitosa un proceso gradual que involucra el eliminar ciertas especies y dar paso a otras lo que ha generado la inmensa diversidad de organismos que habitan en nuestro planeta en el presente y la cuantiosa variedad de los que han desaparecido según nos indican los registros fósiles.

A diferencia de los diseños que realiza el ser humano que requieren de una copia lo más exacta que sea posible, los organismos realizan sus funciones manteniendo su identidad. Sin embargo, pueden ocurrir pequeños cambios que distinguen a un individuo de otro dentro de la misma especie, en otras palabras lo que se producen son copias pero no réplicas.

Otro aspecto de interés es que en la naturaleza se encuentran individuos que son muy parecidos pero que dependiendo de los requisitos de su entorno utilizan diferentes estrategias para realizar una misma función. También existen especies que presentando diferencias morfológicas evidentes logran adaptarse a su ambiente aplicando el mismo tipo de estrategias.

Se considera que un producto que sea innovador debería aportar tanto un valor agregado en su uso así como un mínimo de elementos que lo diferencien de otros productos similares, además por supuesto de cumplir con el fin último para el que fue concebido.

No obstante, se observa con frecuencia que las necesidades que plantea el mercado actual se expresan muchas veces por un incremento innecesario de la complejidad de los productos, en ciertos casos debido a la incorporación de

tecnologías que son demasiado sofisticadas para el uso que se persigue y en otros por la adición de una serie de funciones que en determinadas circunstancias no se justifican.

La aplicación de una metodología de diseño conceptual basada en la biomimética ofrece ciertas ventajas, una por reconocer que el proceso de diseño no tiene por qué plantear un solo tipo de solución ya que pueden existir otras opciones que permiten explorar nuevos caminos.

Otra de las ventajas que ofrecen los organismos vivos como modelos de diseño es que su estructura se basa en sistemas de células (con excepción de los organismos procariotas). Esta característica les permite crecer dentro de un margen amplio de tolerancia ante los posibles fallos en el sistema. Esta propiedad se expresa mediante funciones como las de auto - ensamblaje y la auto - reparación de sus estructuras.

Las entidades vivientes al mismo tiempo que mantienen su integridad estructural deben realizar una serie de funciones diferentes y de forma simultánea adaptándose a su vez a un entorno cambiante, es por eso que el diseño biológico debe ser plástico pero sin que se llegue a generar un cambio en la forma que sea de tal magnitud que comprometa su comportamiento como especie.

En los organismos vivos estas habilidades se consiguen mediante un sistema modular y al mismo tiempo jerárquico en el que los complejos moleculares, células y órganos actúan en cierta medida de forma autónoma pero al mismo tiempo no pierden su integración y cada parte contribuye a la supervivencia de la totalidad.

Es fascinante la forma en que los sistemas biológicos logran realizar todas sus funciones mediante los fenómenos de auto - organización y de emergencia operando bajo condiciones de temperatura y presión con muy baja tolerancia a los cambios que les permiten mantener la homeostasis y con un consumo de energía envidiable cuando se le compara con nuestras máquinas y a su vez perturbando lo menos posible al medio ambiente.

Los organismos logran sobrevivir sin llegar a alcanzar el estado ideal de perfección en sus funciones, una condición que podría comprometer su grado de plasticidad y con ella su capacidad de poder adaptarse a nuevos entornos.

En resumen, todo lo que necesitan hacer es vivir el tiempo suficiente para que puedan llegar a reproducirse y evolucionar de forma de garantizar que en un futuro dispondrán de suficientes recursos para poder cumplir con las funciones básicas de cada especie.

Estas características del mundo natural ofrecen una amplia gama de posibilidades que no solo involucran al diseñador industrial, al ingeniero o al arquitecto y que incluyen también el campo de otras profesiones, por ejemplo, el caso de aquellos que estudian el comportamiento animal como un modelo para extrapolarlo al del ser humano.

A continuación se plantearán algunas definiciones que consideramos necesarias para acotar el área de acción de la biomimética. Este es un aspecto que no es evidente dado la amplitud de su campo de acción como lo veremos reflejado en los párrafos siguientes mediante una serie de ejemplos de aplicaciones de esta disciplina en casos concretos. La siguiente sección del trabajo prosigue con la descripción y comparación de una serie de enfoques metodológicos que se han desarrollado a partir de la década de los años 60 con la intención de sistematizar los procedimientos de diseño.

El presente trabajo tiene como propósito dar a conocer esta nueva disciplina. No pretende profundizar en los mecanismos ni en los principios científicos que sustentan las distintas aplicaciones, ni tampoco presentar una revisión bibliográfica actualizada sobre el estado del arte en esta ciencia de encrucijada. Si con estas páginas logramos transmitir al lector la fascinación que nos produjo el contacto con esta tecnología capaz de copiar la vida, el esfuerzo realizado sin duda ha valido la pena.

II. DESARROLLO Y APLICACIONES DE LA BIOMIMÉTICA

Desde los primeros tiempos el hombre siempre ha observado la naturaleza como un ejemplo y fuente de inspiración. La idea del primer diseñador biónico se remonta a nuestra prehistoria cuando todavía éramos básicamente cazadores- recolectores.

La necesidad de tener que encontrar nuevos recursos nos llevó a iniciar un proceso de asimilación de conceptos que ya existían en la naturaleza, las garras y los colmillos de las fieras nos sirvieron de modelos para el diseño de armas para la caza, la anatomía comparada de los armadillos, de las tortugas y de otras especies que poseen corazas protectoras nos inspiraron para el diseño de escudos y artefactos de defensa y la copia del mimetismo de otras especies son estrategias que nos sirvieron para desarrollar sistemas de camuflaje y pasar desapercibidos en el entorno de caza.

En los textos de historia de ciencia y tecnología frecuentemente se considera a Leonardo Da Vinci, como un precursor de la metodología basada en la imitación de la naturaleza. Muchos de sus diseños estaban basados, en el estudio y el conocimiento de la naturaleza partiendo de los cuales se diseñó una serie de dispositivos que mostraban una relación muy estrecha en su estructura función con los sistemas naturales.

Un ejemplo de estos primeros desarrollos fue el alambre de espino, mejor conocido hoy en día como alambre de púas. Michael Kelly patentó su diseño en 1868 con el propósito de sustituir al arbusto llamado naranjo de Osage, utilizado en ese entonces para cercar al ganado en zonas en la que escaseaba la piedra y la madera [1].

Georges de Mestral en 1951 patentó el velcro un dispositivo basado en su observación de la naturaleza. Este ingeniero suizo acostumbraba pasear por las montañas de su localidad y un día afortunado percibió que las semillas de *arctium* se enganchaban a su ropa y al pelo de su perro [2]

Mestral examinó el material con un microscopio y pudo comprobar la presencia de filamentos que terminaban en ganchos que permitían su adherencia a los tejidos. La denominación de este material es un acrónimo que proviene de la conjunción de las palabras francesas *velours* y *crochet*, (terciopelo-tejido).

La biomimética debe gran parte de su enfoque y su desarrollo actual a su homóloga la biónica que en la práctica es considerada como su precursora.

Etimológicamente, la palabra biónica viene del griego "bios"; que significa vida y el sufijo "-ico" que significa "relativo a" lo que le confiere un carácter muy genérico a su definición.

El término biónica que está asociado a copiar, imitar y aprender de la biología fue acuñado por Jack E. Steele, de la Fuerza Aérea de los EE.UU. La definición de Steele señala que es "la ciencia de los sistemas que tienen alguna función copiada de la naturaleza, o aquellos que representan las características de los sistemas naturales o sus analogías" según él establece en su Tesis "Bionic Designs of Intelligent Systems" que presentó en un simposio en Dayton, Ohio, en el año 1963 [3].

El Diccionario Webster por vez primera en 1974, define biónica como: "el estudio de la formación, la estructura y función de las sustancias y materiales de origen biológico y los mecanismos y procesos biológicos, con el fin de sintetizar productos similares por mecanismos artificiales que imitan a los naturales". En esta definición se establece de forma implícita el binomio del proceso de análisis síntesis que supera otras definiciones anteriores [4].

Al igual que la biomimética la biónica no es una ciencia especializada, se le considera una disciplina entre ciencias, como sucede con la cibernética. Ambas disciplinas involucran el estudio de los sistemas vivos, la biónica, con el fin de encontrar nuevas ideas útiles para las máquinas y ciertos dispositivos electrónicos y la cibernética para buscar modelos de control por

retroalimentación. En los inicios de su desarrollo los investigadores de la biónica dedicaron considerables esfuerzos al diseño de prótesis y de otros instrumentos electro-mecánicos y también a las aplicaciones militares [5].

Jeanine Benyus en su libro “Biomimicry, innovation inspired by nature” hace referencia por vez primera a un nuevo término que ella define como “echo-inventions” basado en el símil del eco sonoro usado como réplica de las invenciones de la naturaleza [6].

Según Litinetski, “La Biomimética es una ciencia interdisciplinaria, o, como se acostumbra decir ahora, una ciencia encrucijada. Está formada sobre la base de las ciencias naturales y de infinidad de ciencias ingeniero técnicas. En esencia, sintetiza los conocimientos acumulados en biología, cibernética, física, psicología, biofísica” [7]

Vincent conjuga varias definiciones en una sola que resume de la forma siguiente: “Biomimética es conocida por varios términos pero todos ellos, aunque con diferentes palabras y frases, coinciden en que es una copia, adaptación o derivación de la biología, que siendo una ciencia relativamente joven aplica el uso práctico de los mecanismos y funciones de la biología en la ingeniería, el diseño, la química, la electrónica y otros campos de la ciencia” [8]

Como hemos podido notar en los párrafos anteriores no es fácil definir, clasificar y acotar el campo de la biomimética, en parte por su naturaleza inter e intradisciplinaria y por otra por la herencia evolutiva que le confiere la biónica y su confluencia de intereses.

Los temas que tratan ambas disciplinas son diversos y contemplan campos tales como: neurobiología, sistemas analizadores e inteligencia artificial, orientación y defensa, biomecánica y bioenergía, arquitectura y diseño.

En los términos de este trabajo consideramos la biomimética como una rama de la bioingeniería que como ya vimos tiene mucha afinidad con la

biónica pero que se diferencia de otras disciplinas como la biotecnología, bioinformática y la ingeniería genética.

Existen múltiples aplicaciones de la biomimética que parten desde el campo del diseño de productos industriales, pasando por la arquitectura hasta el desarrollo de tecnologías amigables con el ambiente.

La investigación en biomimética contempla el estudio de diversas características según el tipo de aplicación y las especificaciones que requiere el encargo de diseño que incluyen: estructuras, materiales, funciones y formas y con frecuencia la combinación de dos o más de estos atributos.

A continuación, describiremos algunas aplicaciones de la biomimética para el diseño de nuevos productos. Tratamos de colocar al menos un ejemplo de cada uno de los cuatro tipos de atributos que mencionamos antes.

En 1982 el botánico Wilhelm Barthlott, de la Universidad de Bonn (Alemania), descubrió que la hoja de loto (*Nelumbo nucifera*) presentaba una superficie muy hidrófoba que le confería una propiedad autolimpiable. Este desarrollo condujo a la comercialización del Lotusan, nombre comercial de una pintura para superficies autolimpiables.[9]

Barthlott y su equipo pudieron comprobar mediante la microscopia electrónica de barrido la presencia de una estructura rugosa en la epidermis de la hoja que afecta la tensión superficial haciendo que el ángulo de adhesión se incremente de forma que las gotas de agua de la lluvia arrastren las partículas depositadas sobre la superficie. Estos científicos alemanes comprobaron que la micro estructura topográfica de su epidermis, conjuntamente con las propiedades hidrofóbicas de la cera epicuticular eran los responsables de dicha propiedad [10].

Estudiando la estructura de los ojos de ciertas especies de polillas se han podido desarrollar superficies con propiedades de antirreflejo. Este

tipo de material se aplica en el recubrimiento de láminas de paneles solares y en las pantallas de los equipos electrónicos.

Aparte de su valor estético ciertas especies de mariposas han inspirando el desarrollo de nuevas tecnologías. Los colores que percibimos en las alas de algunos de estos lepidópteros no se deben a la presencia de pigmentos sino al modo en que se produce el proceso de reflexión y descomposición espectral de la luz solar que se produce en la superficie del ala.[11]

La investigación biomimética actual en este campo busca reproducir esas estructuras a escala nanométrica con el propósito de aplicarlas entre otros usos como “pigmentos” para la cosmetología exentos de componentes tóxicos. Además, se podrán fabricar estructuras ópticamente activas como recubrimientos para celdas solares y difusores ópticos

Científicos de la compañía General Electric se encuentran trabajando en una nueva tecnología basada en otra propiedad de las alas de las mariposas. Se trata de desarrollar una nueva generación de sensores para detectar explosivos y armas químicas, así como de aportar modelos de biomarcadores capaces de detectar en humanos ciertas enfermedades mediante el análisis de su aliento.

Las alas de color azul iridiscente de las mariposas del género *Morpho* presentan un tipo de escamas que tienen la capacidad de detectar moléculas en la atmósfera a pesar de encontrarse en muy baja concentración. Las nanoestructuras que se hallan debajo de las escamas reaccionan ante diferentes vapores, cambiando la reflectividad espectral del material que constituye las alas del insecto en función de los agentes a los que están expuestas

Un caso ya clásico de la biomimética y tal vez uno de los ejemplos que más se han difundido en el conocimiento popular es el llamado Efecto Gecko que se refiere a la propiedad de adherencia en seco que se produce sobre superficies muy lisas y que fue descubierta por el zoólogo

estadounidense Kellar Autumn, un descubrimiento que ha revolucionado al mundo científico en el campo de los adhesivos.

El Gecko, es un pequeño reptil que logra adherirse a superficies tan lisas como el vidrio y trepar por paredes verticales y techos sin caerse a una considerable velocidad.

La fuerza de adhesión en las patas del reptil es causada por las uniones de Van der Waals que se generan entre la superficie de contacto y unas estructuras altamente especializadas localizadas en los “dedos” del Gecko y se debe a la presencia de unos filamentos llamados setas que ramifican y terminan en unas estructuras distales que se denominan espátulas [12].

Tanto las setas como las espátulas están constituidas por la proteína queratina. El mecanismo de propulsión es muy interesante y explica la forma como logra el Gecko despegar la pata para poder desplazarse con una considerable velocidad a pesar de que el poder de adhesión es significativo (puede soportar un peso de hasta 7 kilos por cada cm² de superficie de contacto). La explicación se debe a que la adhesión es direccional, se pega cuando se mueve en un sentido y se libera cuando se desplaza en el sentido contrario, el efecto recuerda en cierta forma los pasos de baile de Tap.

Los investigadores en el área de la nanotecnología contemplan la posibilidad de poder producir en un futuro cercano espátulas sintéticas para su uso en la fabricación de “adhesivos inteligentes” que copien el efecto Gecko y aplicarlos para unir materiales como láminas de poliéster y nanotubos de carbono.

Mattheck desarrolló un modelo llamado Soft Kill Optio que se utilizó para diseñar el chasis de un coche de la empresa DaimlerChrysler sobre la base de la forma del pez cofre, (*Ostracion Meleagris*). Este vehículo tiene la inusual combinación de un gran volumen con una distancia pequeña entre ejes que le confiere algunas ventajas aerodinámicas que se reflejan en

una menor relación entre el consumo de combustible y su capacidad de carga [13].

La ballena jorobada, *Megaptera novaeangliae*, utiliza un método que es muy eficiente para lograr la captura de cuantiosas cantidades de Krill, un crustáceo pequeño que forma parte del zooplacton y que es muy abundante en los mares de aguas frías donde se alimenta la ballena. Con sus aletas esta ballena genera una serie de vórtices turbulentos en el agua que atrae el Krill. La estrategia del cetáceo se basa en crear cortinas de burbujas separadas por espacios de poco más de un metro.

Biólogos de la Universidad de New Chester en Pennsylvania, Estados Unidos, demostraron que las cortinas se producen por el diseño particular del borde de sus aletas donde se localizan una serie de nódulos con forma de estructuras tubulares dispuestas al azar.

El diseño de sus aletas le confiere ventajas considerables a este cetáceo porque mejora su nivel de sustentación, reduce la fricción y le permite alcanzar un ángulo de giro para poder atrapar el Krill y volver sin dificultad a alcanzar la posición de reposo. La función de los nódulos es compensar el giro del animal para que se pueda estabilizar y supere su considerable inercia pudiéndose desplazar en el agua con relativa facilidad. Se planea utilizar los resultados de estos estudios en el diseño de los generadores eólicos, entre otras aplicaciones, incorporando símiles de estas estructuras nodulares en los bordes de las aspas [14].

Otra aplicación de la hidrodinámica biológica al diseño biomimético viene del estudio de las propiedades de la piel del tiburón. Los vórtices inducidos por las crestas en la piel del escualo pueden reducir en forma significativa la fricción. Esta propiedad se ha aplicado al diseño de los cascos de los barcos y en el revestimiento interior de los conductos que transportan ciertos fluidos. Se ha hecho notoria su aplicación en los trajes de natación para competición de la marca Spido aunque todavía no está claro el valor de su

contribución para reducir los tiempos de los nadadores en las competencias.

El estudio de la piel del tiburón también dio origen a un material para el recubrimiento de paredes y techos de hospitales que evita la proliferación de bacterias y hongos. La empresa biotecnológica Sharklet Technologies Inc. se dedica a comercializar un tipo de láminas con superficie texturizada a micro escala que copian la piel del tiburón basada en las investigaciones realizadas por el Dr. Anthony Brennan en la Universidad de Florida [15].

Otro caso emblemático que demuestra la aplicación del diseño biomimético es el del tren bala construido en Japón en la década de los años 60, el denominado Shinkansen, de la West Japan Railway Company. Este era uno de los trenes regulares más rápidos del mundo en su tiempo, pero en su desempeño se presentaban un serio problema que era el ruido (trueno) causado por la presión del aire que generaba la onda de choque cuando el tren salía de los túneles en su recorrido.

Eiji Nakatsu, un ingeniero aficionado a la observación de aves, resolvió el problema utilizando como modelo la estructura del martin pescador. Como su nombre lo indica esta ave se alimenta de los peces que logra capturar pero lo singular en su caso es que su zambullida prácticamente no produce ondas en la superficie del agua [16].

El martin pescador adopta una hidrodinámica que reduce al máximo la fricción con el agua lo que le confiere una ventaja evolutiva permitiéndole que se pueda sumergir con rapidez y precisión, dos elementos que le son muy ventajosos en sus labores de pesca.

Nakatsu diseñó la cabina del tren bala copiando la estructura del pico y el ángulo de inserción en el cuello del ave en el momento en que se dispone a ingresar en el agua. El diseño logró una disminución considerable de la contaminación acústica que generaba el Shinkansen y ese estudio pasó a ser uno de los primeros triunfos

del enfoque biomimético en el campo del transporte.

Otro desarrollo ligado a los atributos de la forma de un ser vivo viene del estudio de la probóscide del mosquito que sirvió de base para el rediseño de las agujas hipodérmicas. Un equipo de científicos de la Universidad de Kansai en Osaka, Japón, patentaron una aguja hipodérmica casi indolora cuya superficie exterior es dentada en lugar de la aguja clásica que es de superficie lisa.

En realidad la estructura que produce la picada del mosquito son dos maxilares aserrados que forman parte de la probóscide del insecto. Estos maxilares tienen una superficie exterior aserrada por lo que presentan una menor área de contacto con los nervios de la piel disminuyendo la sensación dolorosa [17]

Existen organismos en la naturaleza que son campeones de la forma, otros muestran propiedades notables por su estructura interna o por los materiales que constituyen sus órganos y hay otros que parecen ser diseños cuasi perfectos en el sentido de poder enfrentar las condiciones extremas del medio donde habitan.

Este es el caso de un coleóptero del género *Stenocarasp*, un escarabajo que vive en el desierto (también conocido como escarabajo de Namibia) que investigó Andrew Parker en la Universidad de Oxford en el Reino Unido.

Este insecto obtiene su suministro de agua a partir de la humedad que contiene el aire del rocío que circula a través de los poros de su caparazón. La coraza del animal cuenta con unas estructuras microscópicas en forma de conos huecos que condensan el agua del aire y la conducen mediante canales especiales hacia su boca [18].

La empresa QinetiQ (especializada en tecnología militar) con sede en el Reino Unido, ha desarrollado un material que imita la estructura que recubre el dorso del escarabajo para captar el agua en las torres de refrigeración y en los condensadores industriales y aplicarlo también en zonas áridas con el propósito de condensar

durante la noche el agua de la niebla y paliar la sequía de muchas poblaciones humanas que habitan estas zonas y donde las fallas en el suministro de agua potable puede conducir a la muerte.

Los insectos en general aportan una fuente muy valiosa de información al diseño biomimético. En la Universidad de Newcastle en Gran Bretaña, Claire Rind una doctora en neurobiología estudia el mecanismo que emplean las langostas para evitar chocar entre ellas cuando vuelan en enjambres.

Las langostas y otros insectos sociales que vuelan en grandes colectivos de individuos poseen una neurona especial denominada LGMD (por sus siglas en inglés: Locust Giant Movement Detector) que se ubica en medio de los ojos del insecto. Esta neurona libera un potencial de acción en un lapso de milisegundos que se produce cuando la langosta se encuentra en la trayectoria de colisionar con otro de sus congéneres o con algún obstáculo presente en su entorno [19]

Existe un tipo muy particular de insectos llamados pirófilos que muestran un comportamiento bastante singular ya que se desplazan selectivamente a las áreas de los bosques que se han quemado recientemente debido a que en esas zonas obtienen alimento y logran reproducirse.

Una especie emblemática de ese tipo de insecto es el escarabajo *Melanophila acuminata* que cuenta con receptores de radiación infrarroja en sus patas anteriores lo que le permite detectar la zona donde se origina un incendio a distancias que superan los 100 km.

Los receptores son capaces de detectar fotones en el rango del IR, la radiación infra roja que alcanza la superficie interna del sensor ocasiona que el aire y los fluidos que se encuentran en ella se calienten expandiéndose transmitiendo señales de presión al sistema nervioso del animal. [20]

Entender el funcionamiento de este tipo de receptores biológicos nos ayudaría a desarrollar nuevos tipos de sensores anti-incendios. Como si fuera poco, este escarabajo cuenta también con un segundo mecanismo de refuerzo para detectar incendios debido a que posee antenas detectoras de humo. El escarabajo cuenta con un sistema tan sensible para la detección de partículas en el aire que puede discriminar entre señales distintas cual es la especie de árbol que ha sido la fuente del humo al quemarse

Existen mecanismos biológicos para la detección de incendios pero también hay otros que permiten “refrigerar” los ambientes. Este es el caso de los termiteros que actúan como climatizadores naturales cuyo diseño ha servido de inspiración a ingenieros y arquitectos en la búsqueda de nuevos sistemas de ventilación y control de temperatura que permitan el ahorro de energía en las edificaciones [21].

El punto es que para las colonias de termitas es esencial el poder mantener el sistema de regulación térmica en óptimo funcionamiento porque les permite cultivar un hongo del género *Termitomyces* que les sirve de alimento.

En Zimbabwe, se ha construido un centro comercial llamado Eastgate siguiendo un diseño basado en la estructura de los termiteros que ahorra hasta un 35% de la energía total que consumiría el edificio con refrigeración convencional.

Las termitas construyen sus moradas siguiendo una serie de principios básicos de termorregulación. La estructura interna del termitero cuenta con una chimenea para disipar el aire caliente que por ser más liviano sube por el conducto central. A su vez el aire más frío que proviene de los sectores subterráneos ubicados en la base del termitero intercambia calor por conductos laterales con el aire que asciende.

Estas estructuras llegan a ser tan eficientes que logran controlar la temperatura interna del termitero en un valor que fluctúa en solo un

grado centígrado entre el día y la noche. Se debe recordar que en las regiones desérticas donde habitan las termitas la variación de temperatura que ocurre entre el día y la noche puede llegar a superar una diferencia de 40 grados.

La reciente difusión del conocimiento en el campo de la biomimética, la novedad de sus enfoques y la atractiva visión que conllevan sus aplicaciones se traduce en el interés que muestran las escuelas de diseño y las facultades de ingeniería para incorporar cursos de formación en esta disciplina y ofrecer programas de estudio a nivel de pregrado y postgrado.

Un ejemplo es el del Biomimicry Center de la ASU- Arizona State University (USA) que ofrece anualmente cursos para estudiantes graduados con enseñanza online y actividades de laboratorio de corte presencial.

Uno de estos programas es el Master of Science in Biomimicry que está diseñado para los profesionales que trabajan principalmente en los campos de la biología, diseño, negocios e ingeniería, y que quieren hacer de la práctica de biomimética un aspecto central en sus carreras. El mismo centro cuenta con un segundo programa el Graduate Certificate in Biomimicry diseñado para profesionales que quieren añadir la práctica de la biomimética a una carrera ya existente.

III. METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PRODUCTOS CON ENFOQUE BIOMIMÉTICO

El diseño es una actividad multidisciplinar de investigación, análisis y desarrollo, estructurada y planificada con el fin de concretar y alcanzar unos objetivos previamente establecidos con el propósito de satisfacer una necesidad.

La actividad de diseño busca la mejora de los productos en aspectos tales como su: funcionalidad, estética, ergonomía, aplicación adecuada de los materiales y que además pueda ofrecer procesos de fabricación alternativos y

eficientes, logrando la reducción de costes a lo largo de la cadena de valor del producto.

Hoy en día, contamos con una serie de tablas, base de datos y listas de principios donde se pueden establecer analogías y otras relaciones entre las características de la naturaleza y aquellos de sus atributos que el hombre puede aplicar a los artefactos.

La integración de la biomimética en el proceso de diseño potencia la innovación en los productos y se realiza aplicando una serie metodologías que contemplan todos los niveles desde los más básicos, por asimilación de una forma o una determinada geometría, hasta los más complejos que se aplican a los sistemas de control y detección.

La metodología según Martí es “la descripción, validación, estudio, análisis y utilización de diversos métodos, es decir que realiza un estudio de los métodos más adecuados para su utilización en cada caso en particular”. Según este autor la metodología se puede entender como un metalenguaje de los métodos, la descripción general o específica de estos, su validación, el análisis de sus usos y el estudio y desarrollo de otros nuevos [22].

Existen numerosos modelos metodológicos para el diseño industrial pero en general lo que se busca en todos ellos es que por lo menos cumplan con tres requisitos: a) La flexibilidad, de modo que sea posible aplicar el modelo a distintos tipos de diseños de producto. b) Que se establezca una continua retroalimentación de forma que le permita a los diseñadores mantener un control sobre el desarrollo de cada fase. c) Que cuente entre sus fortalezas con una fase de diseño conceptual que sea sólida para que se facilite la posibilidad de desarrollar otras nuevas soluciones, en lugar de simples copias mejoradas de los sistemas que ya existen.

Describiremos a continuación algunos aspectos en los que se ha basado el desarrollo de una serie de metodologías que se han aplicado (algunas todavía están vigentes) en el campo del diseño

biomimético de productos para el sector industrial.

3.1 La evolución de una metodología basada en la simple observación e imitación de la naturaleza al diseño por etapas.

Las primeras aproximaciones al tema del diseño biomimético se basaban en el simple principio de que la observación per se inspira a la aplicación. Esta metodología planteaba el postulado de que las ideas se pueden copiar directamente del mundo natural sin profundizar en el propio objetivo de diseño. Las ideas luego se deben transformar en soluciones a problemas de diseño o de ingeniería en una fase posterior partiendo de principios y modelos que aportan otras disciplinas. [23].

Lodato, un diseñador biónico reconocido en el campo aunque no descarta el valor de la observación directa propone un esquema por fases más elaborado para el estudio de la naturaleza aplicando un proceso de imitación que diferencia en cinco tipos: imitación completa, parcial, funcional, mediante un proceso de abstracción y por inspiración. Lodato también propone una metodología donde se establecen cuatro fases para el proceso de diseño: a) seleccionar las características de un organismo que sea de interés como un modelo biomimético, b) detectar y obtener los principios y los procesos que otorgan esa superioridad al organismo, c) elaborar métodos y modelos para describir los sistemas biológicos en términos útiles para los diseñadores y d) demostrar la viabilidad del diseño al traducir este conocimiento en un producto eficaz [24]

3.2 Enfoque metodológico del Instituto Europeo de Diseño de Milán [IEDM]

Lozano y Songel, son dos de los exponentes más representativos de esta escuela de diseño que forma parte del departamento de Biónica del IEDM. Estos investigadores proponen el uso de cinco tipos de metodologías de diseño biomimético que como veremos no son excluyentes y pareciera más que asemejan

actividades complementarias a todo el proceso o etapas en la evolución del proceso de diseño [25], [26]

Tipo 1: El propósito es el de construir un banco de datos sobre las propiedades y características del comportamiento de un determinado organismo que sirva como instrumento para la gestión de la biónica aplicada al diseño. En primera instancia con este tipo de metodología no existe ninguna garantía de que toda esta información llegue a ser útil para un encargo de diseño.

Tipo 2: Analiza los elementos de ciertos organismos que resuelven problemas similares al que determina el encargo de diseño. Este tipo de método se vuelve con frecuencia muy selectivo y deja por fuera a otros organismos que pueden aportar una información valiosa y servir también como modelos biomiméticos.

Tipo 3: Involucra una mezcla de los tipos 1 y 2 y se traduce en definir previamente cuales son los principios y fundamentos del problema proyectual de diseño para luego hacer uso de la información recopilada en el banco de datos (T1) acotando el estudio a los organismos cuyas propiedades son las más pertinentes (T2).

Tipo 4: La principal característica de este tipo de metodología es el establecimiento de una analogía desde un principio basado en el planteamiento de la necesidad de diseño. Este tipo de enfoque plantea una visión que es frecuente en este campo que va de arriba hacia abajo que como veremos se repite en otras metodologías que se discutirán más adelante.

Tipo 5: Este tipo de metodología es un poco más elaborado y requiere en un rango mayor de la participación de especialistas en las distintas ramas del conocimiento. El método plantea un proceso de diseño en el que se van integrando los resultados de la investigación biónica en las distintas fases de su desarrollo. Este tipo de metodología conjuga la participación de investigadores del área analítica que se enfocan sobre temas naturales (biólogos) que luego

comunican en forma sistemática sus hallazgos a los investigadores proyectistas (ingenieros).

3.3 Enfoque bidireccional de la Universidad de Friburgo

Este tipo de metodología fue desarrollada por Milwich y su grupo de colaboradores en la Universidad de Friburgo. El enfoque adoptado en Friburgo para hacer diseño biomimético es comenzar con una investigación de corte biológico básico atendiendo a los elementos como la biomecánica y la morfología funcional de los organismos, para después transmitir estos nuevos conocimientos a otros integrantes del equipo de investigación para su procesamiento siguiendo una ruta de abajo hacia arriba [27].

Además, complementan esta primera estrategia con otra ruta alternativa que es un tipo de metodología de arriba hacia abajo buscando posibles soluciones para problemas específicos partiendo de las necesidades que determina el encargo de diseño.

Usualmente se plantea un compromiso entre los dos tipos de estrategias (top-down y bottom-top), la segunda estrategia permite el desarrollo de productos biológicamente inspirados en un tiempo menor, mientras que la primera tiene el potencial de producir mayor diversidad de logros en innovación en el mediano y largo plazo.

Ambos procesos son válidos y tienen en común el hecho de que para ser desarrollados es necesaria la colaboración interdisciplinar entre tecnología y biología, y esto es algo difícil de conseguir tanto para el experto biólogo como para el ingeniero experimentado. Se hace evidente el hecho de que no es sencillo encontrar un especialista capaz de aplicar los resultados de ambos procesos y por eso se hace difícil encontrar la información adecuada en el formato adecuado. Esta limitación está presente en todos los métodos que se han presentado hasta ahora y en los otros que veremos a continuación.

3.4 Enfoque de diseño del Centre for Biologically Inspired Design [CBID]

Un estudio llevado a cabo en el Instituto Tecnológico de Georgia, en Atlanta EE.UU, entre el Design Intelligence Lab, School of Interactive Computing y el Center for Biologically Inspired Design ha establecido una metodología alternativa para el desarrollo de proyectos de diseño biológicamente inspirados [28].

En este estudio se establece un marco en el que se han determinado unas características que hacen del diseño inspirado biológicamente algo más coherente porque plantea algunos de los requisitos y las restricciones para conseguir éxito al definir una metodología que sea aplicable. Estas características se traducen en una metodología descriptiva orientada más a lo que hay que hacer en vez de cómo hay que hacerlo, más típico de los modelos normativos expuestos en las metodologías anteriores.

Estos procesos creativos se inician con el reconocimiento de un problema y su replanteamiento. En una primera aproximación se define cual es el problema por medio de dos técnicas, la descomposición funcional y la optimización funcional.

La descomposición funcional como la misma palabra lo indica permite separar una función compleja en sus subcomponentes funcionales que en diseño se denominan las funciones secundarias o auxiliares. Los sistemas biológicos son complejos, multifuncionales e interconectados por lo que es difícil obtener una función sencilla a partir del todo.

La segunda técnica que es la optimización funcional donde se define una función o grupo de ellas como una ecuación que permita optimizar la solución del problema.

3.5 La Espiral de Diseño del Biomimicry Institute

El Biomimicry Institute fue fundado por Janine Benyus quien promueve el aprendizaje de

biomimetismo emulando las formas naturales, los procesos y los ecosistemas para crear nuevos diseños y tecnologías más sanas y sostenibles [29]

En las secciones anteriores del trabajo ya habíamos mencionado a la Dra. Benyus como la primera en haber acuñado el término biomimética.

Utilizando su lema, “la biomimética una herramienta para la innovación “, Benyus apoya a los innovadores de diversas áreas del conocimiento a utilizar esta disciplina como una herramienta para crear diseños más sostenibles.

El proceso de la biomimética que plantea Benyus y el Biomimicry Institute , se describe por medio de la espiral de diseño que se muestra en la **figura 1**. Una de las ventajas de esta metodología es que puede servir como una guía para ayudar a los innovadores en superar el reto de imitar a la naturaleza en todos los niveles de la organización de los ecosistemas.

La metodología que describe la espiral no extrae información de la naturaleza exclusivamente para el diseño final del producto, sino también se aplica al proceso de fabricación, envasado, y toda la ruta de un producto hasta las etapas del envío, distribución, y de darse el caso de su recuperación. El método sigue en secuencia los seis pasos de la espiral: identificar, interpretar, descubrir, abstraer, emular y evaluar que se definen a continuación.



Figura 1. Espiral de Diseño Biomimético (Fuente: Biomimicry Institute)

Identificar: Desarrollar y perfeccionar diseños basados en las lecciones aprendidas de la evaluación de los principios de la vida.

Interpretar: Trasladar las funciones de diseño en funciones que desarrolla la naturaleza. Preguntar, ¿cómo la naturaleza hace esta función?

Descubrir: Encontrar los mejores modelos naturales para responder a nuestras preguntas.

Resumir: Encontrar los procesos y patrones repetitivos con los que la naturaleza logra el éxito. Crear taxonomías de estrategias de la vida. Seleccionar las estrategias más relevantes que cumplan con su diseño particular.

Emular: Desarrollar nuevas ideas y soluciones basadas en modelos naturales.

Evaluar: Comparar las ideas de diseño con los principios naturales exitosos de la vida e identificar otras formas de mejorar el diseño

En esta metodología se requiere disponer de una base de conocimiento importante sobre los aspectos biológicos del problema. En la Web se cuenta con bases de datos de libre consulta como la ASK Nature 2012 donde se presenta una taxonomía con los resultados biológicos obtenidos de múltiples estudios y donde se organizan y clasifican una serie de estrategias por grupos, subgrupos y funciones obtenidas a partir del ámbito natural.[30]

3.6 BioTriz

BioTriz es una metodología desarrollada por Vincent en la Universidad de Bath, en el Reino Unido, en la que se conjuga el conocimiento de la biología con la técnica Triz que es el acrónimo ruso de la Teoría de la Inventiva de Resolución de Problemas, una colección de herramientas y técnicas, desarrolladas por Genrich Altshuller y Rafik Shapiro [31],

BioTriz se plantea como una herramienta de uso sistemático para la resolución de problemas técnicos basándose en soluciones análogas encontradas en la naturaleza.

El desarrollo de Triz estuvo basado en la observación de la evolución de los objetos técnicos mediante el análisis de miles de patentes de innovación, cuyas soluciones inventivas aplicadas conforman un número de principios inventivos de aplicación general a través del razonamiento inductivo. La presencia de ciertas pautas inventivas que se repetían en distintos sectores industriales, el acceso al conocimiento externo al problema y la evolución de las tecnologías, sentaron las bases para el desarrollo de esta metodología [32].

Triz ha sido muy exitoso en la transferencia de invenciones y soluciones de un campo de la ingeniería a otro. Debido a que el objetivo fundamental de la biomimética coincide también con la transferencia de funciones, mecanismos y principios de la biología a la ingeniería, Triz aparece como un punto de partida ideal como herramienta de aplicación al diseño biomimético.

Biotriz comienza con una etapa de definición donde se utilizan una serie de técnicas que aseguran que el problema se encuentre ubicado dentro de un contexto correcto. Finalizada esta primera etapa se enumeran los recursos disponibles.

El problema es caracterizado mediante la confrontación de características opuestas “que es lo que quiero” frente a “que me impide conseguirlo.

Triz se basa en una matriz de 40x40, a modo de tabla de doble entrada donde se consideran los principios inventivos que sirven como elementos para hacer analogías.

En el caso de BioTriz esta matriz se ha simplificado para poder aislar los campos que afectan a la biología, campos como la información, la energía, el tiempo, el espacio, la estructura y la sustancia.

Aunque conceptualmente Biotriz da una buena respuesta a la utilización de las soluciones naturales en el mundo de la tecnología no es una técnica fácil de implementar ya que requiere que

existan canales muy eficientes de comunicación entre el biólogo y el ingeniero.

Para tratar de solventar estas dificultades se han desarrollado tres tipos de herramientas. La primera herramienta parte de un enfoque que considera a la naturaleza como una gran base de datos de patentes naturales, afortunadamente ya existen bases de datos de principios de biología que permiten extraer funciones, materiales, estructuras o mecanismos que pueden ser útiles para solución a los problemas técnicos planteados en ingeniería [33].

La segunda herramienta ha sido desarrollada por el Centro de Tecnologías para Superficies Biológicas o Bio-inspiradas, en el Instituto Max-Planck y está basada en un sistema selector de materiales que cuenta con una base de datos de unos mil materiales biológicos con sus características y definiciones para su adecuada utilización en aplicaciones concretas [34].

La tercera herramienta, se basa en un sistema de léxico que busca palabras clave en textos y otras publicaciones en el campo de la biología que se corresponden con los términos en los que se puede definir un problema técnico en ingeniería [35].

IV. CONCLUSIONES

El hombre hace biomimética debido a su necesidad natural de descubrir, crear y perfeccionar aquello que le rodea. La naturaleza le sirve de modelo, medida y mentor, haciéndolo al igual que lo hace la naturaleza logra alcanzar el potencial para cambiar el modo de obtener recursos alimenticios, nuevos materiales, aprovechar nuevas fuentes de energía y dirigir negocios.

La idea fundamental no es la de copiarse de la naturaleza, aprendimos que es más provechoso entenderla y aplicar su saber-hacer para solucionar nuestras necesidades. Estudiar la estructura y la evolución de los objetos naturales

puede incluso ayudar a comprender el propio mundo.

Las herramientas de diseño son métodos para la búsqueda de ideas y de posibles soluciones y como hemos podido corroborar de una manera general tanto las herramientas de diseño como las propias metodologías están basadas en métodos creativos descritos como analogías.

En el transcurso hemos sido testigos de la evolución de un proceso que parte de unas primeras aproximaciones al problema de diseño biomimético mediante la observación directa de la naturaleza y que luego llega a diversificarse hacia una metodología por etapas donde se plantea la necesidad de reunir un banco de datos a partir de los cuales se facilite la búsqueda de posibles aplicaciones prácticas a los productos y procesos industriales.

Se promueven dos tipos de enfoques para el análisis del diseño biomimético, el top - down y el bottom - up con sus fortalezas y debilidades respectivas. El primero de arriba hacia abajo aporta como beneficio la direccionalidad del propósito desde el inicio lo que reduce la magnitud del esfuerzo pero limita en cuanto a la amplitud del campo de acción. El segundo de abajo hacia arriba gana por la riqueza de sus indagaciones pero peca por el factor de dilución que se produce debido a la amplia data acumulada.

El enfoque del CBID se centra en un aspecto diferente que otras metodologías en cierta medida habían descuidado que es la preocupación con la naturaleza del método per se y no solo en las etapas del proceso y los objetivos de diseño.

Hasta el presente se han desarrollado dos metodologías que han demostrado poseer una serie de fortalezas que las hacen sobresalir en este campo. La espiral de diseño del Biomimicry Institute es uno de los enfoques que se encuentra entre los de mayor difusión en el campo del diseño biomimético por su versatilidad y al mismo tiempo por su simplicidad. BioTriz también sobresale por su método estructurado que

hereda experiencia obtenida a través de los años de aplicación en la industria del método Triz.

Concluimos el trabajo volviendo al tema de la definición de términos. Biomimética es una disciplina de diseño, una rama de la ciencia, un método para resolver problemas, una ruta de sostenibilidad, un movimiento, una estrategia para crecer vigorosamente, una posición frente a la naturaleza, una nueva manera de ver y de valorar la biodiversidad y en la medida en que más se parezca nuestro mundo al mundo natural tendremos más posibilidades de ser aceptados en este hogar que es el planeta y que es nuestro pero que no es solo nuestro.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. María Isabel López , Directora del CIDI, al Dr. Wilmer Pereira , Director de la revista Tekhne y a la Dra. Beatriz Soledad, Jefe de Redacción , por la confianza brindada al invitarme a participar en la edición especial 2017 de la revista Tekhne en ocasión de cumplirse este año el vigésimo aniversario del Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI).

Igualmente extendiendo mi gratitud al Profesor Alejandro Ríos por su labor en el desarrollo del formato digital y a la Bachiller Vanessa Pérez estudiante asistente del CIDI por su labor de compilación de los artículos.

Y a mi esposa Yolanda como siempre por transmitirme su ánimo inquebrantable y por sus atinadas observaciones durante el desarrollo del artículo.

REFERENCIAS

- [1] Basalla, G., [1988] *The Evolution of Technology*. New York: Cambridge University Press, pp. 49-55.
- [2] Velcro. Disponible en: <<http://www.velcro.es/>>. Consultar: The Biography.com website <https://www.biography.com/people/george-de-mestral-9271201>. Consulta 14/09/2017
- [3] Gray C. [1995]. 'an Interview with Jack E. Steele'. The Cyborg Handbook, 1995. pp. 61-69.
- [4] Webster Dictionary on-line. Design definition. Disponible

- en: <<http://www.websters-online-dictionary.org/definitions/bionics>>. Consulta 14/09/2017
- [5] Di Bartolo C, [2000]. Naturaleza como modelo, naturaleza como sistema. Experimenta: ediciones de diseño, n° 31. pp. 39-45.
- [6] Benyus, J. [2015]. Life principles. The Biomimicry Institute. Montana: Disponible en <https://biomimicry.org> Consulta 14/09/2017
- [7] Litinetski I. [2005], Iniciación a La Biónica. Barcelona: Barral, 2005.
- [8] Vincent J [2009]. Biomimetics — a review. Disponible en: http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/09544119j_eim561. Consulta 14/09/2017
- [9] Brown R [1998] Laboratory vessel having hydrophobic coating and process for manufacturing same Patente USPTO n° 5853894, Issued December 29, 1998
- [10] Koch, K; Bhushan, B y Barthott, W. [2009] Multifunctional Surface Structures of Plants: An Inspiration for Biomimetics. Progress in Materials Science, 2, , vol. 54, n° 2. pp. 137-178.
- [11] Takemura, S., Stavenga, D. y Arikawa, K. [2007], Absence of eye shine and tapetum in the heterogeneous eye of Anthocharis butterflies [Pieridae], The Journal of Experimental Biolog, 210, pp.3075-3081.
- [12] Carlo M y Metin S [2006];. A biomimetic climbing robot based on the gecko. Journal of Bionic Engineering, 9, , vol. 3, n° 3. pp. 115-125.
- [13] Mattheck C y Bethge K [200!]. Encyclopedia of Materials: Science and Technology [Second Edition]. Oxford: Elsevier,. Mechanical Optimization in Nature, Principles of, pp. 5247-5250.
- [14] Miklosovic D ; Murray M ; Howle y Fish F.[2004] Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale “ Megaptera novaeangliae flippers Physics of Fluids Vol 16. N° 5
- [15] Sharklet Technologies, Inc.. Disponible en: <<http://www.sharklet.com/>>. Consulta 14/09/2017
- [16] Nakatsu E: [2012] Lecture on Biomimicry as applied to a Japanese Train Disponible en : http://labs.blogs.com/its_alive_in_the_lab/2012/04/biomimicry-japanese-train.html Consulta 14/09/2017
- [17] Ramasubramanian M, Barham O y Swaminathan V [2008] Mechanics of a mosquito bite with applications to microneedle design. Published 8 September 2008 • 2008 IOP Publishing Ltd Bioinspiration & Biomimetics, Volume 3, Number 4
- [18] Parker A, y Lawrence C [2001]. Water Capture by a Desert Beetle. Nature, 11/01, vol. 414, n° 6859. pp. 33-34.
- [19] Reid R. y Harrison. A [2003] Low-Power Analog VLSI Visual Collision Detector In Proceedings of the Neural Information Processing Systems 2003, December

- [20] Hammer I ; Seigert J ; Stone M ; RylanderIII M y Welch A [2001] Journal of Insect Physiology Infrared spectral sensitivity of *Melanophila acuminata* Volumen 47, Issue 12, December, Pages 1441-1450
- [21] Arquitectura Biomimética : La refrigeración de los Termiteros. Disponible en: <http://wp.cienciaycemento.com/arquitectura-biomimetica-y-la-refrigeracion-de-los-termiteros>. Consulta 14/09/2017
- [22] Marti Font, J [1999]. Introducció a la metodologia del disseny. 1a ed UAB ed.,
- [23] Roshko, T.,[2010] The pedagogy of bio-design: Methodology development. WIT Transactions on Ecology and the Environment.138, pp. 545-558,
- [24] Lodato F [2000]. Biónica: La naturaleza como herramienta de innovación. Experimenta: ediciones de diseño, nº 31. pp. 46-51.
- [25] Lozano Crespo, P [1994]. El diseño natural. Aproximación histórica, metodologías, aplicación y consecuencias. Tesis doctoral U. Complutense de Madrid.
- [26] Songel G [1991]. Estudio metodológico de la biónica aplicada al diseño industrial. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia,
- [27] Milwich M., [2006]. Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom. American Journal of Botany, vol. 93, nº 10. pp. 1455-1465.
- [28] Helms, M., Vattam, S. y Goel, A.[2009], Biologically inspired design: process and products. Design Studies. 30 [5]. pp. 606-622,
- [29] The Biomimicry Institute. Disponible en <https://biomimicry.org>
- [30] Ask Nature. Biomimicry Taxonomy. Disponible en: <https://asknature.org/resource/biomimicry-taxonomy/#.WbvreF7go3g>. Consulta 14/09/2017
- [31] Vincent, J., Bogatyreva, O , Bogatyrev, N., Bowyer, A. y Pahl, A.,[2006] Biomimetics: Its practice and theory. Journal of the Royal Society Interface,3[9],pp.471-482, Disponible en <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>. Consulta 14/09/2017
- [32] Bogatyreva, O ., Pahl, A.. y Vincent, J. [2002] Enriching TRIZ with biology: The biological effects database and implications for teleology and epistemology. ETRIA World Conference-2002, Strasbourg, pp. 3-1-307.
- [33] Sánchez Merino, R. [2015]. Biomimética: una metodología de diseño sostenible. En Arquetipo volumen [11], Julio- Diciembre pp. 25 – 40
- [34] Mak, T.. and Shu, L. [2004] ., Abstraction of biological analogies for design. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 53 [1], pp.117-120. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60658-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60658-1). Consulta 14/09/2017
- [35] López-Forniés, I. y Berges-Muro, L [2010]. Relation between biomimetic and functional analysis in product design methodology. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 138, pp 317-328, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2495/DN100271> . Consulta 14/09/2017