

Ignacio López Forniés

# Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Departamento  
Ingeniería de Diseño y Fabricación

Director/es  
Berges Muro, Luis

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



**Universidad**  
Zaragoza

Tesis Doctoral

# MODELO METODOLÓGICO DE DISEÑO CONCEPTUAL CON ENFOQUE BIOMIMÉTICO

Autor

Ignacio López Forniés

Director/es

Berges Muro, Luis

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

Ingeniería de Diseño y Fabricación





**Universidad Zaragoza**

**Modelo metodológico de diseño conceptual  
con enfoque biomimético**

**Ignacio López Forniés**







**Universidad Zaragoza**

**Escuela de Ingeniería y Arquitectura**

**Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación**

**Modelo metodológico de diseño conceptual  
con enfoque biomimético**

**Tesis Doctoral**

Presentada por: **D. Ignacio López Forniés**

Para la obtención del grado de Doctor en Ingeniería  
por la Universidad de Zaragoza

Dirigida por: **Dr. D. Luis Fernando Berges Muro**



## RESUMEN

En la naturaleza existen funciones acertadamente resueltas y potencialmente innovadoras. La metodología propuesta en esta Tesis facilita de una manera creativa la conceptualización de productos, gracias a especificaciones funcionales satisfechas por soluciones características de los seres vivos. Los métodos de diseño actuales requieren de nuevos enfoques para generar innovación. Se propone un modelo, con una interrelación de métodos, que incluye a la biomimética como un elemento diferenciador que genera soluciones para las funciones clave buscadas.

La definición de marcos de trabajo delimita el espacio de diseño. Con un marco flexible, ampliándolo o reduciéndolo, es posible determinar funciones clave como solución para más de un espacio de diseño. La biomimética en este modelo metodológico responde a la adaptación de una función, a distintos entornos y bajo requisitos diferentes, posibilitando la traducción de soluciones de un ser vivo para varios problemas técnicos o de varios seres para un problema genérico aplicable a varios productos. El modelo propuesto integra biomimética en las fases intermedias del proceso de diseño, investigación por medio de tablas específicas, permitiendo encontrar candidatos óptimos para las funciones innovadoras deseadas.

El modelo se ha verificado doblemente, mediante un método teórico-empírico que valida la estructura y su utilidad, y por medio de una encuesta a los diseñadores que han utilizado la metodología.



## **ABSTRACT**

In nature there are functions correctly solved and potentially innovative. The methodology proposed in this thesis provides a creative product conceptualization, through functional specifications met by solutions owned by living beings. The current design methods require new approaches for innovation. A model is proposed, with connected methods, including biomimetics as a well worth factor that generates solutions for the key functions.

The framework's limit draws the boundaries of the design space. With a flexible framework, that could be expanded or reduced, key functions can be determined as a solution for more than a design space. Biomimetics in this methodological model responds to the adaptation of a function to different environments and under various conditions, enabling the translation of living solutions to several technical problems or translation of some living beings for a generic problem applicable to various products. The proposed model integrates biomimetics in the intermediate stages of the design process, research done by specific tables enables the optimal candidates for the innovative functions searched.

The model has been double tested, using a theoretical-empirical method that validates the structure and utility, and through a survey answered by designers who have used the methodology.



## **AGRADECIMIENTOS**

Un largo periodo de esfuerzo y dedicación han dado como fruto esta Tesis para la cual he necesitado en ocasiones ayuda, apoyo y comprensión pero sobre todo mucho ánimo y estímulo. Por esta razón quiero dedicar mi reconocimiento y gratitud a las personas que a continuación citaré.

Al Dr. D Luis Fernando Berges Muro, por confiar desde el comienzo de esta Tesis en que un tema tan inusitado tenía sentido; por su insistencia, tesón y animo en los momentos de decaimiento.

A mis alumnos de la signatura de biónica del curso 2010-11 y del curso de Biomimética, porque de ellos he aprendido mucho y de gran valor, por haber sido voluntariosos y ante todo muy curiosos. Ese intercambio de conocimiento me ha ayudado a reflexionar y tomar decisiones más adecuadas, mejorando mi trabajo.

A Francisco Javier Mateos, por largas conversaciones acerca de bio-estrategias vinculadas a la creatividad que me daban convicción para seguir en mi investigación, por su teoría de "Exaptación y Diversidad" que ha ayudado a aclarar cuestiones metodológicas que me permiten ir más allá en el campo de la creatividad.

Al personal de la biblioteca Hypatia de Alejandría de la Universidad de Zaragoza, por su esmerado trabajo, rápido y seguro. Posiblemente sin su ayuda aún seguiría perdido en la búsqueda de algún documento interesante.

A todos vosotros muchas gracias.





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

*Nicolás Copérnico (1473-1543)*



## ÍNDICE

<b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 PRESENTACIÓN .....	2
1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	7
<b>CAPITULO 2. INTRODUCCIÓN A LA BIOMIMÉTICA.....</b>	<b>11</b>
2.1 INICIOS DE LA BIOMIMÉTICA .....	12
2.2 DEFINICIONES DE BIONICA Y BIOMIMETICA .....	13
2.3 ANTECEDENTES DE LA BIOMIMETICA Y EJEMPLOS .....	20
2.4 RAZON DE LA BIOMIMETICA .....	29
2.5 METODOLOGIAS UTILIZADAS EN DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTO .....	30
2.5.1 <i>MARÍN</i> .....	30
2.5.2 <i>LODATO</i> .....	31
2.5.3 <i>BOMBARDELLI, Di BARTOLO, SONGEL, LOZANO CRESPO</i> .....	33
2.5.3.1 Primera metodología.....	33
2.5.3.2 Segunda metodología. ....	34
2.5.3.3 Tercera metodología. ....	34
2.5.3.4 Cuarta metodología.....	35
2.5.3.5 Quinta metodología .....	35
2.5.4 <i>BIOMIMICRY INSTITUTE</i> .....	36
2.5.5 <i>UNIVERSIDAD DE FRIBURGO</i> .....	42
2.5.5.1 Proceso de arriba hacia abajo (TOP-DOWN) .....	42
2.5.5.2 Proceso de abajo hacia arriba (BOTTOM-UP).....	43
2.5.6 <i>BIOTRIZ</i> .....	45
2.5.7 <i>HELMS, CENTRE FOR BIOLOGICALLY INSPIRED DESIGN</i> .....	47
2.5.7.1 Proceso de diseño bio-inspirado dirigido por un problema dado .....	48
2.5.7.2 Proceso de diseño bio-inspirado dirigido por una solución encontrada .....	50
2.6 POSIBILIDADES DE APLICACIÓN EN LA INNOVACION DE PRODUCTOS.....	51
2.6.1 <i>Mecanismos inspirados biológicamente</i> .....	52
2.6.2 <i>Estructuras inspiradas biológicamente</i> .....	53
2.6.3 <i>Materiales inspirados biológicamente</i> .....	54
2.6.4 <i>Funciones inspiradas biológicamente</i> .....	55
2.6.5 <i>Formas inspiradas biológicamente</i> .....	56
2.6.6 <i>Otras inspiraciones biológicas</i> .....	57
<b>CAPITULO 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO INDUSTRIAL.....</b>	<b>59</b>
3.1 DEFINICIÓN DE DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DE PRODUCTO .....	60
3.2 DEFINICIÓN DE PROCESO, MODELO, MÉTODO Y METODOLOGÍA .....	64
3.3 NORMALIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO .....	68
3.4 MÉTODOS Y MODELOS DE DISEÑO, EVOLUCIÓN .....	71
3.5 MODELOS METODOLÓGICOS .....	73
3.6 MODELOS METODOLÓGICOS POR FASES .....	76
3.6.1 <i>ASIMOW 1962</i> .....	77
3.6.2 <i>ARCHER 1963</i> .....	77
3.6.3 <i>JONES 1976</i> .....	78
3.6.4 <i>FRENCH 1985</i> .....	79
3.6.5 <i>PUGH. DISEÑO TOTAL 1991</i> .....	81
3.6.6 <i>ROOZENBURG AND EEKELS 1995</i> .....	82

3.6.7	PAHL & BEITZ 1996 .....	84
3.7	MÉTODOS Y HERRAMIENTAS ACTUALES .....	86
3.7.1	<i>Métodos y herramientas para la definición de especificaciones</i> .....	88
3.7.2	<i>Métodos y herramientas para la generación de conceptos, ideación y resolución de problemas.</i> .....	90
<b>CAPITULO 4. MODELO METODOLÓGICO PROPUESTO .....</b>		<b>93</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	94
4.2	OBJETIVOS DE LA METODOLOGÍA .....	97
4.3	ESQUEMA BÁSICO. FASES DEL PROCESO .....	98
4.3.1	<i>Comparación con metodologías de diseño por fases</i> .....	98
4.3.2	<i>Descripción de la metodología.</i> .....	99
4.4	EL MARCO DE TRABAJO .....	101
4.4.1.1	Definición del marco de trabajo .....	101
4.4.2	<i>Justificación de la elección del marco de trabajo</i> .....	102
4.4.3	<i>Relación entre el Brief de diseño y el marco de trabajo.</i> .....	104
4.5	ANÁLISIS FUNCIONAL .....	106
4.5.1	<i>Antecedentes. Análisis funcional, métodos actuales.</i> .....	106
4.5.2	<i>Análisis funcional en relación a las funciones biológicas.</i> .....	109
4.5.3	<i>Típos de funciones. Clasificaciones.</i> .....	110
4.5.4	<i>Definición de funciones.</i> .....	111
4.5.5	<i>Relación entre las funciones técnicas y las biológicas</i> .....	112
4.6	MAPAS MENTALES Y ANALOGIAS .....	115
4.7	RELACIÓN ENTRE ANÁLISIS FUNCIONAL Y MAPAS MENTALES, JUSTIFICACIÓN .....	117
4.8	TABLAS DE RELACIÓN BIOMIMÉTICA .....	120
4.9	INVESTIGACIÓN BIOMIMÉTICA .....	121
4.10	PRINCIPIO DE INGENIERIA .....	124
4.11	CONCEPTUALIZACIÓN DE PRODUCTO .....	126
<b>CAPITULO 5. ENSAYO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA .....</b>		<b>131</b>
5.1	ANTECEDENTES .....	132
5.2	MÉTODO DE ENSAYO .....	133
5.2.1	<i>Grupos de prueba y participantes.</i> .....	134
5.2.2	<i>Modelo aplicado. Problema propuesto</i> .....	135
5.2.2.1	Ejercicio 1. Análisis de un caso real .....	136
5.2.2.2	Ejercicio 2. Solución natural aplicable a un proyecto de diseño .....	137
5.2.2.3	Proyecto completo. Problema técnico y resolución por medio de biomimética .....	138
5.3	RESULTADOS OBTENIDOS. ....	140
5.3.1	<i>Resultados previos. Antecedentes.</i> .....	140
5.3.2	<i>Resultados del ejercicio 1. Análisis de un caso real</i> .....	144
5.3.2.1	Selección del caso, su referente natural y el principio biológico utilizado. ....	145
5.3.2.2	Principio ingenieril del caso y su relación con el principio biológico. ....	146
5.3.2.3	Principio ingenieril y su relación con el principio biológico .....	149
5.3.2.4	Diferencias entre el principio ingenieril del caso y de la propuesta. ....	151
5.3.2.5	Las fuentes de información. ....	153
5.3.3	<i>Resultados del ejercicio 2. Solución natural aplicable a un proyecto de diseño</i> .....	153
5.3.3.1	Individuo natural y característica propia. ....	154

5.3.3.2	Análisis del principio biológico. ....	155
5.3.3.3	Análisis del principio ingenieril. Grado de relación entre el principio biológico el ingenieril ...	158
5.3.3.4	Propuesta de aplicación conceptual.....	160
5.3.3.5	Aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.....	165
5.3.4	<i>Resultados del proyecto. Problema técnico y resolución biomimética</i> .....	166
5.3.4.1	Definición del marco de trabajo.....	167
5.3.4.2	Definición de las funciones clave .....	169
5.3.4.3	Tabla biomimética, búsqueda de los referentes naturales .....	176
5.3.4.4	Grado de relación. Analogía entre principio biónico e ingenieril .....	181
5.3.4.5	Propuesta conceptual .....	188
5.3.4.6	Aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.....	190
5.4	CASOS A ESTUDIO .....	192
5.4.1	<i>Ejemplo caso 1</i> .....	192
5.4.2	<i>Ejemplo caso 2</i> .....	202
<b>CAPITULO 6. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA .....</b>		<b>209</b>
6.1	VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	210
6.2	VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA MEDIANTE EL CUADRO DE VALIDACIÓN.....	210
6.2.1	<i>Descripción del método de validación</i> .....	210
6.2.2	<i>Validación de la metodología propuesta</i> .....	213
6.3	VALIDACIÓN ESTRUCTURAL. ARGUMENTOS 1, 2 Y 3.....	215
6.3.1	<i>Aceptar la validez de los constructos individuales que constituyen el método.</i> .....	215
6.3.1.1	Briefing de diseño.....	215
6.3.1.2	Análisis Funcional .....	216
6.3.1.3	Mapas Mentales.....	217
6.3.1.4	Diseño Conceptual .....	217
6.3.1.5	Tabla de referentes biomiméticos.....	218
6.3.2	<i>Aceptar la estructura y el modo en que se agrupan los constructos individuales.</i> .....	218
6.3.3	<i>Aceptar la pertinencia de los casos utilizados para verificar el funcionamiento del método.</i> 220	
6.4	VALIDACIÓN DE LA PUESTA EN PRÁCTICA. ARGUMENTOS 4, 5 Y 6 .....	221
6.4.1	<i>Aceptar la utilidad del método en relación al propósito inicial.</i> .....	221
6.4.2	<i>Aceptar que la utilidad conseguida está vinculada a la aplicación del método.</i> .....	225
6.4.3	<i>Aceptar que la utilidad del método va más allá de los casos y proyectos de ejemplo.</i> .....	226
6.5	SUMARIZACION DE LA VALIDACIÓN POR MEDIO DEL CUADRO DE VALIDACIÓN .....	228
6.6	VALIDACION DE LA METODOLOGIA MEDIANTE ENCUESTAS .....	229
6.6.1	<i>Encuestas a los participantes. Objetivos y definición de la encuesta.</i> .....	229
6.6.2	<i>Evaluación cuantitativa</i> .....	232
6.6.3	<i>Evaluación cualitativa</i> .....	236
6.6.4	<i>Evaluación de los participantes</i> .....	238
<b>CAPITULO 7. CONCLUSIONES .....</b>		<b>241</b>
7.1	CONCLUSIONES .....	242
7.2	RESULTADOS. SATISFACCION DE LOS OBJETIVOS .....	243
7.3	VALORACION DE LA METODOLOGÍA, SU ENSAYO Y VALIDADCIÓN .....	245
7.4	CONTRIBUCION DE LA TESIS. APORTACIONES .....	250
7.5	CONCLUSION FINAL.REFLEXION .....	251

---

CAPITULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....	253
CAPITULO 9. ANEXOS.....	265
ANEXO I – TABLA RESUMEN EJERCICIO 1 .....	267
ANEXO II – TABLA RESUMEN EJERCICIO 2 .....	277
ANEXO III – TABLA RESUMEN PROYECTO.....	286



Figura 2.1: Esquema resumido de las definiciones y análisis de métodos inspirados en la naturaleza.....	19
Figura 2.2: Ilustración de una maquina voladora y su boceto original de Leonardo da Vinci.....	22
Figura 2.3: Ilustración de una la semilla de arctium y su aplicación como Velcro textil y metálico.....	23
Figura 2.4: Ilustración de la semilla de Alsomitra Macrocarpa y su aplicación artefactos voladores.....	23
Figura 2.5: Imagen de tallo con espinas y su aplicación al alambre de espinas.....	24
Figura 2.6: Imagen de hoja de loto y aplicación de Lotusan sobre paredes.....	24
Figura 2.7: Diseño estructural con Soft Kill Option y analogía al pez cofre en el diseño de coche.....	25
Figura 2.8: Dedos de Gecko y aplicación en cinta de gran adherencia.....	26
Figura 2.9: Piel de tiburón y sus aplicaciones en varias superficies.....	26
Figura 2.10: Robot manta, aplicaciones submarina y aérea.....	27
Figura 2.11: Planta recuperación de agua de niebla basado en el escarabajo de Namibia.....	28
Figura 2.12: Esquema del proceso propuesto por Franco Lodato.....	32
Figura 2.13: Esquema del proceso correspondiente al método 1, Instituto Europeo de Diseño de Milán.....	33
Figura 2.14: Esquema del proceso correspondiente al método 2, Instituto Europeo de Diseño de Milán.....	34
Figura 2.15: Esquema del proceso correspondiente al método 3, Instituto Europeo de Diseño de Milán.....	35
Figura 2.16: Esquema del proceso correspondiente al método 4, Instituto Europeo de Diseño de Milán.....	35
Figura 2.17: Esquema del proceso correspondiente al método 5, Instituto Europeo de Diseño de Milán.....	36
Figura 2.18: Esquema del proceso propuesto por el Biomimicry Institute.....	37
Figura 2.19: Esquema de la taxonomía funcional de la biomimética.....	41
Figura 2.20: Esquema del proceso TOP-DOWN, Universidad de Friburgo.....	42
Figura 2.21: Esquema del proceso BOTTOM-UP, Universidad de Friburgo.....	43
Figura 2.22: Esquema simplificado del proceso TRIZ.....	46
Figura 2.23: Motores lineales basados en el movimiento de gusanos y miriópodos (Bar-Cohen 2006-b).....	52
Figura 2.24: Bomba peristáltica basada en los movimientos del intestino.....	53
Figura 2.25: Experiencias de invisibilidad, mimetismo y camuflaje, Universidad de Keio.....	55
Figura 2.26: Formas orgánicas con influencias de radiolarios en productos, (Ross Lovegrove 2006, 2005).....	56
Figura 2.27: Stickybot basado en el gecko y sus habilidades, Universidad de Stanford.....	57
Figura 3.1: Evolución idealizada de un producto, UNE 66920-1:2000.....	63
Figura 3.2: Representación del proceso de diseño desde la idea hasta la materialización (Fuente: Martí i Font 1999).....	65
Figura 3.3: Esquema de relación entre los conceptos de modelo, proceso, método y metodología. (Fuente: Martí i Font 1999).....	66
Figura 3.4: Esquema de proceso de diseño, control de diseño y del contexto. (Fuente: Martí i Font 1999).....	67
Figura 3.5: Esquema de proceso de diseño de producto según VDI 2221.....	68

Figura 3.6: Esquema de proceso de diseño de producto según UNE 66920-1:2000.....	68
Figura 3.7: Esquema de fases para la gestión de proyectos de diseño y desarrollo de producto según BS7000-2:2008.....	70
Figura 3.8: Métodos de inducción y deducción en relación a Bottom-Up y Top-Down.....	73
Figura 3.9: Circulo de Deming (1989) .....	74
Figura 3.10: Plan de estudios de la Bauhaus (1927).....	75
Figura 3.11: Modelo teórico y básico de diseño descriptivo.....	76
Figura 3.12: Modelo de Morris Asimow 1962. ....	77
Figura 3.13: Modelo de Archer 1963.....	78
Figura 3.14: Modelo de French 1985.....	80
Figura 3.15: Modelo de Pugh 1991, gráfico original del autor y adaptación. ....	81
Figura 3.16: Modelo de Roozenburg y Eekels 1995. ....	83
Figura 3.17: Modelo de Pahl & Beitz 1996. ....	84
Figura 3.18: Modelo de desarrollo integrado de producto, Andreasen 1987.....	89
Figura 3.19: Modelo simplificado de TRIZ. ....	91
Figura 4.1: Procesos de diseño que involucran a la naturaleza.....	95
Figura 4.2: Esquema básico de proceso biomimético indirecto.....	95
Figura 4.3: Esquema básico de proceso biomimético directo.....	96
Figura 4.4: Coincidencias y diferencias entre metodología clásica y la nueva propuesta.....	98
Figura 4.5: El marco de trabajo y sus límites. ....	102
Figura 4.6: Relación de producto y organismo vivo con su entorno a través de carcasa y exoesqueleto. ....	103
Figura 4.7: Lista de productos seleccionados y ejemplos.....	104
Figura 4.8: Esquema de la estructura funcional. (Hubka y Eder 1988) .....	107
Figura 4.9: Descomposición y análisis funcional usando FAST (Wixson 1999).....	109
Figura 4.10: Gráfico de niveles funcionales. Índice de complejidad, abstracción y necesidad de existir.111	
Figura 4.11: Relación entre análisis funcional y mapa mental. ....	117
Figura 4.12: Ejemplo de relación entre análisis funcional y mapa mental para un envase.....	119
Figura 4.13: Software “idea-inspire” del modelo SAPPHIRE” (Srinivasan 2009). ....	123
Figura 4.14: Grados de analogía en el principio ingenieril .....	124
Figura 4.15: Grados de analogía entre biología e ingeniería, según Vincent (2005).....	125
Figura 4.16: Metodología de diseño sistemático, desarrollo de diseño conceptual. Pahl & Beitz, 1996.126	
Figura 4.17: Niveles entre diseño conceptual, conceptos de diseño y productos concretos.....	128
Figura 4.18: Grados de analogía en el principio ingenieril .....	130
Figura 5.1: Esquema del modelo aplicado y acciones realizadas en cada test.....	136
Figura 5.2: Grados de analogía. Clasificación del argumento ingenieril.....	146
Figura 5.3: Superficie del ojo de la polilla, varios aumentos y película de silicio cristalino. (Imágenes: Peng Jiang).....	146
Figura 5.4: Telaraña como referente para evitar los impactos de los pájaros con los cristales de los edificios. (Imágenes: Ornilux) .....	146

## ÍNDICE

---

Figura 5.5: Imagen de martin pescador, detalle de la entrada en el agua y del frontal del tren. (Imágenes: The Biomimicry Institute) .....	149
Figura 5.6: Semilla de samara y prototipo de monocoptero. (Imágenes: Evan Ulrich/A. James Clark School of Engineering, Universidad de Maryland). .....	150
Figura 5.7: Detalle de la articulación entre abdomen y pata de un saltamontes. (Imágenes: Héctor Martínez / David Mur) .....	156
Figura 5.8: Labia Minor, detalles cuerpo y ala. (Imágenes: Haas, F. De Pedro, E. Royo, I.) .....	156
Figura 5.9: Detalle del movimiento de extensión de la pinza del camarón pistola, esquema de barras. (Imágenes: Patek, S.N.) .....	156
Figura 5.10: Conexión flexible, transición entre diámetros que facilita el movimiento. (Imágenes: Héctor Martínez / David Mur) .....	161
Figura 5.11: Conexión flexible, aplicación sobre un enchufe eléctrico. (Imágenes: Héctor Martínez / David Mur) .....	162
Figura 5.12: Uniones articuladas, detalle del movimiento de la membrana interior. (Imágenes: Gui Bonsiepe / Julián Lizán / Javier Ortiz) .....	163
Figura 5.13: El marco de trabajo y sus límites. ....	167
Figura 5.14: Mapa mental para un hermético con aplicaciones para inclemencias. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.) .....	170
Figura 5.15: Mapa mental que diferencia funciones y cuestiones de uso/usuario. (Imagen: Fandos I., López De Lacalle S., Lorente E., Serón A.) .....	171
Figura 5.16: Mapa mental con agrupaciones por temas. (Imagen: Cuella A., Durán B., Plamenov Y., Sánchez C.) .....	172
Figura 5.17: Ficha descripción función clave y relación con ser vivo. (Imagen: De Pedro E., Manzanares L., Martínez M., Royo I.) .....	180
Figura 5.18: Transpiración en el modelo natural y su aplicación ingenieril de uno de los casos. (Imagen: De La Iglesia B., González S., Redondo R.) .....	183
Figura 5.19: Ejemplo de relación principio biónico y principio ingenieril, para un bivalvo y cierre hermético. (Imagen: De Pedro E., Manzanares L., Martínez M., Royo I.) .....	184
Figura 5.20: Ejemplo de relación principio biónico y principio ingenieril, para tortuga y carcasa inflable. (Imagen: Galán S., Notivoli E., Recio A., Sacristán L.) .....	186
Figura 5.21: Ejemplo de relación principio biónico y principio ingenieril, para molusco y carcasa por partes adaptable. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.) .....	187
Figura 5.22: Evolución del ejemplo de carcasa por partes adaptable basada en un molusco. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.) .....	187
Figura 5.23: Mapa mental para funciones de la carcasa perteneciente al ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	192
Figura 5.24: Mapa mental de características de un hermético del ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	193
Figura 5.25: Solución para unión hermética de la tapa y crear depresión. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	197
Figura 5.26: Estudio de la relación forma-material, basado en la bolsa del pelicano. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	198
Figura 5.27: Válvula anti-retorno para regular la presión interior. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	199
Figura 5.28: Detalle de la doble capa de la bolsa. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	200

---

Figura 5.29: Detalle del cierre de la tapa y aplicación de presión para crear el vacío. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.).....	201
Figura 5.30: Secuencia de uso, de llenado y cierre. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)...	201
Figura 5.31: Análisis DAFO del concepto desarrollado y de los resultados de aplicar la metodología. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.).....	202
Figura 6.1: Método de validación por medio de “Cuadro de Validación”. (Pedersen 2000) .....	212
Figura 6.2: Cuadro de validación para validar un método de diseño. (Pedersen 2000).....	214
Figura 6.3: Metodología de diseño conceptual propuesta y acciones a realizar en cada fase.....	219

Tabla 3.1: Clasificación de Finger y Dixon (1989). (Fuente: Tomiyama 2009).....	87
Tabla 3.2: Clasificación de de métodos y herramientas de diseño actuales. ....	87
Tabla 4.1: Tabla de relación biomimética. Búsqueda de la referencias biomiméticas para las funciones clave.....	100
Tabla 4.2: Clasificación jerárquica de funciones biológicas aplicables mediante BioTRIZ. (Bogatyreva 2002).....	113
Tabla 4.3: Tabla que muestra los diferentes niveles de funciones y la relación carcasa-exoesqueleto... 114	114
Tabla 4.4: Síntesis de tablas utilizadas en las metodologías de Gruber y Gosztonyi (2010). ....	114
Tabla 4.5: Tabla tipo para la relación biomimética. ....	121
Tabla 5.1: Evolución de la metodología en el tiempo y cambios propuestos. ....	134
Tabla 5.2: Modelo aplicado y acciones realizadas en cada prueba. ....	140
Tabla 5.3: Tabla que muestra los diferentes niveles de funciones y la relación carcasa-exoesqueleto... 142	142
Tabla 5.4: Proceso de diseño y propuesta preliminar ..... 144	144
Tabla 5.5: Grados de relación entre principios biológico e ingenieril para el ejercicio 1. ....	147
Tabla 5.6: Grados de relación entre principios biológico e ingenieril para el ejercicio 2. ....	159
Tabla 5.7: Relación de funciones clave con marcos de trabajo. Clasificación del grado de oportunidad.175	175
Tabla 5.8: Tabla biomimética que aplica la base teórica. (Imagen: Cuella A., Durán B., Plamenov Y., Sánchez C.).....	176
Tabla 5.9: Tabla biomimética que relaciona el individuo natural con la posible solución. (Imagen: Lizán J., Martínez H., Mur D., Ortiz J.).....	176
Tabla 5.10: Ejemplo de una parte de la tabla biomimética con los posibles referentes naturales que son solución para la función clave barrera térmica. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.) .....	177
Tabla 5.11: Ejemplo de una parte de la tabla biomimética con cambios en las columnas incluyendo referentes ingenieriles. (Imagen: Galán S., Notivoli E., Recio A., Sacristán L.) .....	178
Tabla 5.12: Tabla biomimética alternativa con aproximación a la traducción ingenieril. (Imagen: Fandos I., López de Lacalle S., Lorente E., Serón A.) .....	178
Tabla 5.13: Tabla biomimética alternativa, se incluye el grado de innovación y el modo de aplicación. (Imagen: De la Iglesia B., González S., Redondo R.).....	179
Tabla 5.14: Grados de relación entre principios biológico e ingenieril para el proyecto. ....	181
Tabla 5.15: Tabla biomimética para las funciones clave del ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	181
Tabla 5.16: Tabla biomimética de mejores candidatos y funciones clave elegidas del ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.) .....	181
Tabla 5.17: Tipos de inmersiones y clasificación por profundidades, marco de trabajo caso 2. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.) .....	202
Tabla 5.18: Listado de funciones clave del ejemplo caso 2. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.)203	203
Tabla 5.19: Tabla de funciones clave con aplicaciones industriales existentes y referentes naturales. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.) .....	204
Tabla 5.20: Tabla de selección por el grado de oportunidad. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.)204	204
Tabla 5.21: Tabla de especificaciones de diseño para cada función clave, del ejemplo caso 2. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.) .....	206
Tabla 6.1: Correspondencia entre los aspectos a validar y los supuestos a aceptar .....	214

---

Tabla 6.2: Comparación de productos existentes y productos conceptualizados .....	224
Tabla 6.3: Sumarización de los resultados según la aplicación del cuadro de validación. ....	228
Tabla 6.4: Encuesta a los participantes en el estudio.....	230
Tabla 6.5: Correspondencia entre los bloques de la encuesta y el método “cuadro de validación” .....	231
Tabla 6.6: Resumen de la encuesta .....	235



## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



### 1.1 PRESENTACIÓN

Existe una larga y prolija lista de casos en la que ingenieros, arquitectos, científicos, artistas y artesanos han basado su inspiración en la naturaleza, desde siempre los seres vivos sus entornos y ecosistemas han sido sorprendentes para sus observadores, desde las formas microscópicas de los radiolarios hasta el comportamiento complejo de individuos, grupos y comunidades. Pero no solo lo bello ha servido de inspiración, también las cualidades de sus estructuras y materiales, la eficiencia de sus procesos, el aprovechamiento de sus recursos o la optimización de sus funciones, todo ello ha sido objeto de análisis para tratar de conseguir su copia y emulación, orientadas precisamente hacia el futuro de nuevas fuentes de energía, sistemas sensible e inteligentes, robótica avanzada y ante todo productos innovadores.

La naturaleza ha sido capaz de evolucionar y resolver de manera acertada, situaciones en las que la eliminación de un individuo da paso a otros de una manera sostenible y efectiva, de un modo incesante durante más de 3.800 millones de años. Esta idea de surgimiento y evolución de nuevos individuos nos lleva al concepto de biodiversidad, por el aprovechamiento para obtener un gran número de soluciones, a mayor cantidad de referentes mayor opción de encontrar soluciones validas. La naturaleza con sus estrategias, de mutación, emergencia, recombinación, deriva, exaptación, simbiosis o mutualismo, propone ideas para transformar los productos de una manera creativa, haciendo en ellos alteraciones y cambios, manifestando nuevas soluciones, combinando y reordenando los ya existentes, alterando su entorno o condiciones de uso o creando alianzas y cooperación.

En biomimética también se ha utilizado el concepto de patentes biológicas (Litenitsky 2005), como referencia a las soluciones propias de la naturaleza. La naturaleza está llena de soluciones, algunas han sido reconocidos ejemplos de diseño e ingeniería, y otras aun siendo conocidas no se han implantado, pero afortunadamente quedan muchas por descubrir que pueden ser las soluciones a las necesidades futuras. La naturaleza es bella por su construcción y además está calculada con precisión e involuntaria racionalidad, en ella encontramos principios, leyes y fundamentos de física, química, matemáticas y otras ciencias que se han determinado por su observación y que el hombre utiliza para la creación de nuevos objetos.

Las capacidades de la naturaleza son superiores en muchos aspectos a las capacidades humanas, y la adaptación de muchos de sus rasgos y características pueden de manera significativa mejorar nuestra tecnología (Bar Cohen 2006-a, Vincent 2001). Los seres vivos de la naturaleza, comparados con los diseños de ingeniería, se definen por sus rasgos característicos en lugar de ser replicas producidas de manera exacta con especificaciones de diseño idénticas.

A diferencia de los diseños hechos por el hombre que requieren una producción exacta, las criaturas son capaces de realizar bien sus funciones, manteniendo una identidad que distingue a un individuo de otro de la misma especie sin ser idénticos. Por contra, nuestros productos comerciales deben ser producidos en serie, con un mismo proceso manteniéndolo estable en la medida de lo posible para asegurar su calidad y rendimiento.

La investigación en diseño, trabajando con los métodos y los procesos que los engloban, pasa actualmente por la necesidad de reflexionar sobre la actividad de diseño, en este sentido se han generado métodos muy específicos para su aplicación en situaciones concretas. Esta Tesis propone una metodología y proceso de diseño alternativo, conociendo que los actuales métodos no son suficientes para el desarrollo de productos innovadores, necesitan la renovación, la combinación y la integración de nuevas de técnicas y métodos para obtener cierta diferenciación.

Se utiliza la biomimética para generar nuevas oportunidades, se relacionan diferentes métodos de diseño como el análisis funcional y técnicas de creatividad para obtener funciones con alto potencial de innovación. La imitación de la naturaleza en los procesos de diseño hace que el producto sea más creativo y diferenciado, con funciones alternativas y nuevas que presentan las analogías extraídas del entorno natural. La propuesta tiene un enfoque prospectivo y exploratorio al definir funciones que pueden satisfacer una situación aun no planteada, encontrando en la naturaleza formas alternativas de desarrollar las funciones actuales o bien porque se definen funciones originales que se integren en los productos.

La propuesta metodológica plantea un proceso que llega hasta la fase de diseño conceptual, no pretende llegar a las fases de detalle y definición técnica, ya que trabajando con biomimética estas fases necesitan un alto nivel de desarrollo técnico, que en ocasiones implica realizar investigaciones específicas sobre los mejores candidatos encontrados entre los seres vivos observados. Sin embargo el planteamiento de esta metodología puede servir de manera concreta para la resolución de problemas técnicos, útil en aquellas fases que precisen la resolución de un determinado conflicto, siempre que este se pueda expresar como una función o grupo de funciones relacionadas.

Este trabajo de investigación puede ser aplicado de manera global como un proceso de diseño o bien por partes, pero ambos casos sirven para llegar a la definición conceptual de un diseño. Para evidenciar esta característica de la metodología se proponen y muestran diferentes casos, se experimentan y analizan sus resultados para confirmar su utilidad.

Los ejercicios y proyectos han sido realizados por dos grupos diferenciados que han aplicado la definición de marcos de trabajo, la relación entre creatividad y análisis funcional, la investigación biomimética por medio de tablas que relacionan el principio biológico con el ingenieril, o el diseño conceptual como un listado de especificaciones que se obtienen de la resolución de funciones por medio de la biomimética.

En la revisión bibliográfica se detecta que no existe un marco general para la biomimética por ello se ha trabajado desde diferentes enfoques en ciencia de materiales, robótica, inteligencia artificial, u otros. Sin embargo, en esta investigación se intenta establecer un marco con métodos que obtienen conocimiento de la literatura biológica resolviendo analogías funcionales, aunque esto es solo parte de la solución y de la estructura requerida para constituir un marco global. El marco de trabajo forma parte de la metodología pues permite ampliar o reducir el espacio de diseño y crear vínculos y relaciones entre diferentes ámbitos de aplicación de las funciones resueltas por analogías.

Conociendo que en diseño e ingeniería el trabajo y los procesos se han simplificado gracias al uso de métodos y teorías, en la biomimética esto no parece posible. En cada nueva situación es necesario iniciar la búsqueda y probar diversos sistemas biológicos como potenciales prototipos y tratar de hacer una versión adaptada de ingeniería del dispositivo biomimético que estamos tratando de crear (Vincent 2006). Sin embargo sí que se pueden establecer procesos que sean guía y referencia en el momento de iniciar un proyecto, se presenta un modelo de trabajo que tiene como meta el diseño conceptual con un enfoque en la resolución de problemas técnicos y funcionales.

Por tanto se han desarrollado metodologías que tratan de hacer más sencilla la traducción de la solución elegida en la naturaleza hacia el artefacto, y en esta Tesis se propone una en la que se prioriza la búsqueda de funciones biológicas interesantes, o inusuales para descubrir los principios generales que explican su funcionamiento y utilizarlo para aplicarlo en el diseño conceptual de productos. Se necesita sistematizar el diseño biomimético, realizando aproximaciones metodológicas que sean respuesta a los problemas tecnológicos planteados en diseño. En este trabajo se presenta un marco que expone algunos patrones subyacentes importantes. Se trata de vincular dos grupos de potencial interés como los exoesqueletos de invertebrados y las carcasas de los productos, ya que si bien no desarrollan un cometido principal, su existencia y funcionalidad está más que justificada, pudiendo tener importantes aportaciones en innovación.

En la naturaleza se desarrollan funciones, entendiendo éstas como la capacidad de actuar, de realizar una acción, y sabiendo que estas capacidades son propias del ser vivo o del órgano que las realiza, tal y como ocurre en nuestras máquinas y artefactos, y es ese el nexo donde la biomimética puede realizar una adecuada transferencia de conocimiento.

Destacando el desarrollo de funciones, en los seres vivos, desde la más sencilla hasta la más compleja, las funciones relacionadas con los sentidos, la regulación, el control y similares son las más interesantes para nuestros nuevos diseños ya que representan sistemas complejos que necesitan de varias funciones o grupos funcionales. En ocasiones interesará conocer el comportamiento de un ser vivo, como el proceso interno de un sistema que tiene como resultado el cumplimiento de un conjunto de funciones, ya que su abstracción nos permitirá mejorar el comportamiento de nuestros diseños.

El proceso biomimético aquí no se plantea como una ciencia interdisciplinaria en la que trabajan conjuntamente biólogos, ingenieros y diseñadores, aunque es conocida la necesidad de especialistas en biología. Por esta razón se incorpora en el proceso una etapa en la que se realiza una fase de investigación biológica, en la que se buscan los referentes de la naturaleza, se desarrolla en la tabla biomimética y se muestran ejemplos de cómo hacer estas búsquedas de información específicamente de seres vivos.

La innovación, que en una de sus más simplificadas formas se puede definir como el proceso para conseguir lo nuevo y lo bueno, se vincula a los procesos de diseño bio-inspirados o biomiméticos por la posibilidad de aportar ingeniosas soluciones que han sido comprobadas como óptimas en la naturaleza. Los productos innovadores deben ser capaces de aportar valor y elementos de diferenciación, que en la actualidad se ha traducido por un frenético aumento de la complejidad de los objetos que nos rodean. Complejidad que se genera por la incorporación de tecnología o por una sobrecarga de funciones dudosamente justificadas en ciertas circunstancias.

La incorporación de tecnologías se relaciona con la aportación de soluciones de un alto nivel tecnológico, y se corresponde con aquellos individuos en la naturaleza que están muy especializados y desarrollan estrategias muy específicas, en este sentido se han traducido algunas de estas con gran éxito. Este alto nivel de especialización y su réplica tecnológica se percibe como un alto grado de analogía entre naturaleza y técnica, y un bajo nivel de abstracción, esta relación entre grado de analogía y abstracción se desarrolla específicamente al explicar la relación entre el argumento o principio biológico con el ingenieril.

## INTRODUCCIÓN

---

Por otra parte se desarrolla el análisis funcional en relación con métodos y procesos creativos para tratar de encontrar funciones con alto potencial de innovación, sin necesidad de hacer una sobrecarga de funciones, por encontrar en la naturaleza algunas nuevas o alternativas formas de realizarse. En la naturaleza existen sistemas complejos bien resueltos que podrían ser solución para productos y sistemas artificiales, sin embargo es difícil hacer una traducción de estos sistemas de manera global y es preferible tomar soluciones parciales, de carácter funcional para su correcta aplicación. La aportación de esta metodología se produce por la integración en las fases intermedias de métodos que vinculan las funciones clave a los referentes naturales que aportan soluciones de éxito.

La creatividad surge si hay vínculos, cuando se establecen conexiones aun no realizadas. Las relaciones y referencias anteriores pueden venir de distintos ámbitos, en el caso de este método se plantea que las referencias se establecen en la naturaleza como fuente de soluciones, y en la organización jerárquica de funciones para la propuesta de nuevas aplicaciones. Como parte de la metodología también se incluye un estudio de la técnica y análisis de mercado para evitar hacer propuestas de soluciones existentes, pero que también sirve para plantear soluciones alternativas.

Una metodología que se beneficia de la biomimética para aplicarla al diseño conceptual tiene grandes ventajas, valorando que en el proceso de diseño no hay una resolución única, sino opciones que pueden abrir nuevos caminos de solución. En la naturaleza se encuentran individuos prácticamente iguales, que dependiendo de los requisitos de su entorno utilizan diferentes estrategias para conseguir una misma función, esta sencilla idea es la que nos indica como conceptualmente se pueden obtener soluciones de la naturaleza que adaptaremos dependiendo de los requisitos de cada situación concreta.

Con este modelo proyectual se explora en la naturaleza, obteniéndose buenos resultados, tomando aquellos referentes biológicos que responden bajo un objetivo específico a nuestra necesidad, proporcionando el argumento que da paso a la solución del problema de diseño. También, utilizando este sencillo método se facilita incorporar una fase biomimética dentro la metodología de proyecto utilizada, independiente de la que sea. Se valora conocer la naturaleza con el interés de beneficiarse de ella, observando las soluciones que los diseños biológicos han dado, llevándolos por medio de analogías, al desarrollo de nuestros proyectos. No copiándola sino tomándola como referente de creación que incorpora a la biomimética en la metodología de proyecto.

## 1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La Tesis se estructura en siete capítulos, en este primer capítulo se realiza una introducción en la que se describe la situación de contexto actual y antecedentes de la biomimética y otros métodos similares, su justificación y aplicación en diseño industrial, la propuesta metodológica y el contenido de la Tesis. En los siguientes capítulos se revisa el estado de la cuestión, se expone la metodología y el método de ensayo, para terminar con los resultados obtenidos su validación y conclusiones extraídas.

En el capítulo 2 se hace una introducción a las metodologías biomiméticas y de diseño bioinspirado, junto con un repaso histórico a definiciones, antecedentes y ejemplos. Se presentan algunas justificaciones y razones para realizar biomimética, métodos utilizados en diseño e ingeniería, sin entrar en temas de arquitectura. Y por último se presentan posibilidades de aplicación en la innovación de productos, expresando inspiraciones biológicas aplicables a sistemas, estructuras, materiales u otros. Es este un capítulo en el que se han seleccionado una serie de métodos, así como ejemplos, para dar una imagen completa de la situación actual de las investigaciones en biomimética, en global se observa que hay algunos campos cubiertos y con mucho desarrollo y otros aun por desarrollar y explotar.

El capítulo 3 aclara los conceptos de diseño industrial y desarrollo de producto, así como los términos proceso, modelo, método y metodología de diseño, dando sentido a su correcta utilización y permitiendo entender su aplicación, cuando se hace de manera total o parcial, y la posibilidad de combinación y alteración. También se hace referencia a la normalización de procesos de diseño para comprender las fases fundamentales que definen un proceso y que serán necesarias para la aplicación a la metodología propuesta. Con la misma intención se estudian los métodos y modelos, su evolución, prestando especial interés en los modelos metodológicos por fases, y repasando algunos de los modelos y herramientas de diseño utilizadas actualmente que puedan ser referencia para su posterior uso. Se destaca el estudio de los modelos que utilizan fases de diseño conceptual de modo que describan el modo en que se realiza y como pueden ser utilizadas en otras metodologías alternativas

Una vez conocidas las metodologías de diseño industrial y las utilizadas en biomimética se presenta la metodología propuesta en el capítulo 4, por medio de una justificación y definición de objetivos, comparación frente a otras metodologías y su descripción. A continuación se describe pormenorizadamente cada uno de los elementos que caracterizan la metodología, el marco de trabajo, el análisis funcional vinculado a técnicas creativas, las tablas de relación biomimética, la relación entre principio biológico e ingenieril y la conceptualización de producto.

Este capítulo 4 representa el núcleo de la Tesis en su base teórica, describe su aportación respecto a otros modelos y metodologías con base a referencias anteriores, y expone paso a paso como se establecen las relaciones entre fases y como se vinculan los resultados de unas a otras. La explicación justificada de cuál es el vínculo entre exoesqueletos y carcasas, y porque esta asociación puede ser interesante. Presenta uno de los apartados más importantes de esta metodología que es el uso de las tablas biomiméticas para la resolución de problemas técnicos o de funciones clave como especificaciones en el diseño conceptual.

El ensayo de la metodología, en el capítulo 5, nos describe los resultados de la experimentación, explicando los antecedentes metodológicos, sus aplicaciones previas y correcciones, para exponer el método de ensayo, los grupos de prueba y modelos utilizados. Esta parte del capítulo nos muestra la importancia de la experimentación con métodos de diseño y como los resultados permiten mejorar métodos y modelos. Se realiza una revisión de los resultados para cada uno de los modelos, detallando cada uno de los aspectos y criterios a evaluar. En este capítulo se explica el sentido de la metodología utilizada de manera parcial o global, sus implicaciones y posibles aplicaciones. Se da pues en este capítulo una muestra empírica de la contribución que se realiza en el capítulo anterior en su base teórica, no solo por los resultados finales sino por la evolución de los métodos gracias a las diferentes experiencias realizadas. Es significativo mostrar las diferentes experiencias en relación a los grupos que las realizan y justificar el motivo por el que se han elegido dichos grupos en cada momento.

En el capítulo 6 se evalúa y valida la metodología a través de dos métodos, se cree firmemente que la validación de cualquier metodología es un factor transcendente en su éxito y posterior aplicación y que no puede ser expresado por un único caso o un único método, máxime cuando se ha trabajado durante largo tiempo la matización de algunos aspectos de fondo importantes como es el proceso global y la utilización de resultados de métodos parciales.

El primero método utilizado, es el cuadro de validación que permite probar métodos de diseño por su estructura y aplicación, de modo teórico y empírico. Se realiza una descripción del método y se utiliza para aceptar los resultados de la metodología propuesta, se hace de manera detallada de modo que posteriormente puedan encontrarse conclusiones que sean contrastadas con el segundo método de evaluación. La elección de este método es debida a que no hay muchos métodos de validación en diseño, entre los existentes permite evaluar aspectos objetivos y de alguna manera otros que pueden ser subjetivos, además se aleja de métodos de base racional y numérica difíciles de aplicar en aspectos relacionados con la conceptualización y la innovación.

Sin embargo para que no se dejen aspectos sin resolver se aplica un segundo método que consiste en una encuesta a los diseñadores que han utilizado el método propuesto, el objetivo es realizar dos evaluaciones para encontrar correlación de los resultados. La encuesta permite evaluar los mismos aspectos del método anterior, la estructura y su comprensión teórica y empírica en dos grupos de diferente configuración, así como el potencial de aplicación y beneficios que aporta.

El séptimo y último capítulo expone una serie de conclusiones generales del trabajo de investigación y un sumario que indica el modo en que los objetivos se han alcanzado, se describe como estos objetivos tienen sentido en la aplicación del método de manera global y parcial. También se realiza una valoración de la metodología respecto a su carácter, posibilidades de aplicación y potenciales usuarios, destacando aquellos aspectos que la diferencian de otras existentes y citando las debilidades detectadas de modo que puedan ser resueltas en futuras aplicaciones. En este sentido se realiza una reflexión sobre su ensayo y resultados obtenidos, así como de la evaluación, analizando las bondades de este proceso de diseño conceptual, su alcance y utilidad. Se citan las contribuciones y aportaciones de la investigación, sus resultados y la divulgación de los mismos en conferencias y publicaciones. Por último se realiza una reflexión final acerca del punto al que se ha llegado y el sentido que adquiere tras la experimentación y la validación indicando las líneas de investigación y vías de desarrollo que la Tesis abre.





**CAPITULO 2. INTRODUCCIÓN A LA BIOMIMÉTICA**

### 2.1 INICIOS DE LA BIOMIMÉTICA

Desde el inicio de los tiempos el hombre siempre ha observado la naturaleza como ejemplo y fuente de inspiración. El término Biónica asociado a copiar, imitar y aprender de la biología fue acuñado por Jack Steele, de la Fuerza Aérea de los EE.UU. en 1960 en una reunión de Wright-Patterson Air Force Base en Dayton, Ohio y Otto H. Schmitt acuñó el término Biomimética en 1969 (Gray 1995). Este campo está cada vez más involucrado con los temas emergentes de la ciencia y la ingeniería y representa el estudio y la imitación de los métodos, diseños y procesos utilizados por la naturaleza.

La naturaleza es superior en muchos aspectos a las capacidades humanas, la adaptación de sus rasgos y características puede mejorar nuestra tecnología (Bar Cohen 2006, Vincent 2001). Los seres vivos generan replicas, los productos industriales requieren una producción y copia exacta. Los seres vivos son capaces de realizar funciones comunes y desarrollarlas de manera óptima aunque no idéntica, tienen su identidad propia diferencia unos individuos de otros de la misma especie. Los productos se producen en serie de forma masiva, según un proceso que debe asegurar su calidad y rendimiento.

La estructura basada en células, presente en la mayoría de los seres vivos exceptuando los unicelulares, ofrece la oportunidad de crecer con tolerancia a fallos, teniendo eventuales características como el auto-ensamblaje y la auto-reparación, garantizadas por los procesos propios de los sistemas biológicos. Si se consigue la fabricación de artefactos imitando a la naturaleza, que consten de varios módulos, también podemos ser capaces de diseñar los dispositivos y mecanismos que actualmente se consideran de ciencia ficción, las nanotecnologías emergentes incrementan cada vez más el potencial de tales capacidades.

Los seres humanos han aprendido mucho de la naturaleza y los resultados han ayudado a sobrevivir y continuar las generaciones para asegurar un futuro sostenible. La naturaleza, ha experimentado y desarrollado soluciones para los cambios y retos a los que se enfrenta, de este modo ha evolucionado, y por ello se caracteriza como incesante. El proceso de cambio, mejora y adaptación es continuo y no tiene fin. Además es casi involuntario, no está sujeto a ninguna especificación. Los diseños y productos cambian y deben adaptarse para sobrevivir en el entorno. Para su adaptación es necesario seguir especificaciones que satisfagan los cambios detectados en el entorno cambiante.

Se detecta en la naturaleza que existen los principios de física, química, mecánica y otros campos, que rigen su devenir, y que son estos los que se pueden observar para aplicarlos a nuestros diseños. Estos principios se manifiestan en diferentes escalas crecientes, desde la

molécula hasta el órgano. Se investiga para ir hacia escalas decrecientes, dirigiéndonos hacia la nano-escala y la miniaturización, buscando la manifestación de estos principios para entenderlos y aplicarlos.

En la naturaleza se registra la información de los cambios y de la evolución en un código propio de cada especie. Los genes son los encargados de registrar esa información para que pase de individuo a individuo, de generación en generación, por su sistema de reproducción basado en la auto-replica, los seres vivos hacen replicas de sí mismos. En el ámbito industrial se utiliza la información para hacer copias tan exactas como es posible, siendo este un indicador de calidad. La información pues, no puede tener fallos, en la naturaleza los fallos y los errores de copia pueden llevar a mejoras involuntarias.

Los materiales naturales tienen capacidades y características que sobrepasan cualquier otro desarrollado por el hombre, de hecho éste los ha tomado para transformarlos y crear sus propios materiales, como los tejidos de fibras vegetales o animales. También es destacable que las estructuras de la naturaleza son más ligeras y resistentes, y usan una menor cantidad de material que las producidas por el hombre. El hombre adapta materiales y recursos naturales, pero en la transformación se pierde parte de la eficacia y eficiencia del material original, por lo que no es posible superar sus características.

## 2.2 DEFINICIONES DE BIONICA Y BIOMIMETICA

Existen múltiples definiciones de los términos biónica y biomimética, muchas de ellas tienen un común denominador y están matizadas según sus aplicaciones o los campos de los que provienen quienes las definen. También hay nuevos términos derivados y relacionados con la biomimética y la biónica, como la biomimesis, bioemulación, biognosis, diseño bio-inspirado, diseño inspirado biológicamente o biodiseño.

A lo largo de la historia se han recogido varias citas, que sin ser definiciones de biónica o biomimética, argumentan que la naturaleza empezó primero y que el ingeniero la utiliza, la copia, la emula y la usa como inspiración, para crear a partir de su conocimiento:

*“Si un camino es mejor que otro, tened por seguro que es el de la naturaleza”*

**Aristóteles, siglo IV a.C.**

*“El ingenio humano puede realizar muchas invenciones, pero nunca logrará invenciones más bellas, más sencillas y más apropiadas que las que hace la naturaleza, en cuyos logros nada queda incompleto ni nada es superfluo”*

**Leonardo da Vinci, siglo XV.**

*“Un manual que todavía no ha quedado anticuado, y seguramente nunca lo quedará, es el de la naturaleza, porque en él, que incluye los sistemas biológicos y bioquímicos, los problemas que tiene ante sí la humanidad ya se han afrontado y resuelto y, a través de otros similares, afrontado y resuelto de manera óptima”*

**Victor Papanek, contemporáneo.**

Algunos términos y definiciones no son estrictamente fieles a la realidad actual y están desfasados en el tiempo, como por ejemplo la definición del Diccionario de la Lengua Española - Vigésima segunda edición que lo define como, Biónica, (De bio- y electrónica) aplicación del estudio de los fenómenos biológicos a la técnica de los sistemas electrónicos. Esta definición no hace una referencia exacta a lo que hoy en día se entiende por biónica o biomimética ya que solo vincula el resultado del estudio de la naturaleza al campo de la electrónica, algo que está más relacionado con la bio-mecatrónica.

Probablemente la primera definición fue establecida por Otto Schmitt (Harkness 2002), cuya Tesis doctoral fue un intento de producir un dispositivo físico que imita la acción eléctrica de un nervio. En 1957, dijo: “la biofísica no es tanto una materia de estudio como un punto de vista. Se trata de una aproximación a los problemas de la ciencia biológica utilizando la teoría y la tecnología de las ciencias físicas. Por el contrario, la biofísica es también una aproximación de un biólogo a los problemas de la ciencia física y la ingeniería, aunque este aspecto ha sido descuidado en gran medida”. En su definición queda patente el carácter de su trabajo más relacionado con la biofísica que con la ingeniería o el diseño de objetos, sin embargo establece el carácter multidisciplinar de la biónica en el sentido de hacer que el biólogo y el ingeniero aproximen sus campos de trabajo e investigación, apuntando que es algo que no se ha tenido en cuenta.

La definición de Jack 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” en su Tesis “Bionic Designs of Intelligent Systems”, un concepto que presentó en el simposio de biónica que se celebró por primera vez en Wright-Patterson Air Force Base en Dayton, Ohio, en el año 1963. Aunque también acuñó otra definición en la que explica de otro modo que “en realidad, la biónica es la aplicación de los principios biológicos que pueden solucionar problemas técnicos. Se trata de encontrar en la biología como se han resuelto los problemas a través de la evolución y ver cómo se pueden solucionar por medios técnicos”. El camuflaje es un buen ejemplo, en definitiva es una explicación de cómo el análisis del funcionamiento real de los sistemas vivos, y una vez descubiertos sus procesos, se puede materializar en los artefactos o productos industriales.

La palabra hizo su primera aparición pública en el Diccionario Webster en 1974 (Webster 2012), acompañada de la siguiente definición: "Biónica es el estudio de la formación, la estructura o función de las sustancias y materiales de origen biológico (como enzimas o seda) y los mecanismos y procesos biológicos (como la síntesis de proteínas o la fotosíntesis), sobre todo con el fin de sintetizar productos similares por mecanismos artificiales que imitan a los naturales", en esta definición el binomio análisis-síntesis, como estudio y aplicación, se describe con claridad frente a otras definiciones que establecen la analogía, la copia o la adaptación como núcleo de la definición.

La definición del francés Gerardin (1968) es apropiada por la idea de utilización de conocimientos de la naturaleza, "La biónica es el arte de aplicar, a la solución de problemas técnicos, el conocimiento que poseemos sobre los sistemas vivientes".

En la Enciclopedia Británica el término BIONICS tiene la siguiente definición, "Es la ciencia de la construcción de sistemas artificiales que tienen algunas de las características de los sistemas vivos. Biónica no es una ciencia especializada, sino una disciplina entre-ciencias, que puede ser comparada con la cibernética. Ambos modelos hacen uso de los sistemas vivos, la biónica, con el fin de encontrar nuevas ideas útiles para las máquinas artificiales y sistemas, la cibernética para buscar la explicación del comportamiento de los seres vivos".

La enciclopedia "Concise Columbia" de la Universidad de Columbia define biónica como "el estudio de los sistemas vivos con la intención de aplicar sus principios al diseño de sistemas de ingeniería". En esta definición, al igual que otras, se destaca el término sistema y principio, dejando las aplicaciones o imitaciones más sencillas como es el caso de inspiraciones funcionales, formales, por estructura, aplicación de materiales o simplemente comunicativas, tan necesarias en el diseño de productos.

Benyus (2002) en su libro "Biomimicry, innovation inspired by nature" hace referencia a un nuevo término que ella define como "echo-inventions" basado en el símil del eco sonoro usado como réplica de la invenciones de la naturaleza, y en su particular definición de biomimética describe como "los hombres y mujeres exploran las obras maestras de la naturaleza y después copian sus diseños y procesos de producción para resolver nuestros propios problemas, esa búsqueda es la biomimética, la consciente emulación de la genialidad de la vida, la innovación inspirada en la naturaleza", su definición hace referencia a la genialidad de la naturaleza casi como una característica creativa, a la gran capacidad de resolver y de solucionar problemas.

Según Vincent (2007) “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”.

Di Bartolo (2000) aclara que en los principios de la biónica se deben evitar las sugerencias formales y apunta a la recogida de datos estructurales, funcionales o formales en el momento de la investigación y su aplicación innovadora en la producción de lo artificial. Propone también que la fluidez de la evolución es una lección metodológica, observar la experimentación de nuevas soluciones de vida a través de nuevas especies, lo que implica una fluidez análoga en la actitud mental del proyectista dispuesto a cambiar las relaciones entre los factores en juego para adaptarse a nuevas situaciones.

El diseñador industrial, profesor e investigador en el mundo de la biónica, Lodato (2000), presenta dos definiciones de biónica, ambas responden a un mismo lema “la naturaleza cómo herramienta de innovación”, en la primera de ellas afirma que “La biónica es la asimilación de principios de ingeniería que se utilizan en sistemas naturales, y la aplicación de estos principios al diseño o mejora de sistemas tecnológicos o materiales”, una definición de aproximación de la naturaleza a lo artificial por observación, comprensión y asimilación. En su segunda afirmación dice: “La biónica trata sobre la transformación técnica y la aplicación de estructuras, métodos y principios evolutivos procedentes de sistemas biológicos; un campo de investigación interdisciplinar que combina la biología con la ingeniería, la arquitectura y las matemáticas”. Conecta la investigación y la búsqueda de soluciones del entorno natural con la evolución y el cambio, en relación a la innovación, y al proceso integrador ligado al bien conocido concepto de diseño industrial como multidisciplinar, donde los investigadores biónicos consideran la biología como la base del diseño industrial.

Sanz (2002) expone la siguiente definición “la biónica es el estudio de prototipos biológicos en el diseño de sistemas creados por el hombre, es decir, se trata de estudiar los principios fundamentales de la naturaleza y llegar a la aplicación de dichos principios y procesos a las necesidades de la humanidad”. Además de su definición se deriva que el trabajo del diseñador biónico tiene una fuerte componente de investigación necesaria, para poder proyectar los nuevos objetos o aplicaciones industriales; Se manifiesta que la biónica se fundamenta en la comprensión de la naturaleza y no en la copia directa, que por otro lado puede llevar al fracaso.

Tateishi (1997), líder del grupo de diseño biónico del Instituto Nacional de Investigación Avanzada Interdisciplinar de Ibaraki en Japón, realizó el prefacio a la revista *Materials Science and Engineering*, en la que a la pregunta ¿Qué es diseño biónico? describe una amplia definición en su respuesta. El objeto de la investigación del diseño biónico es dilucidar la estructura y la función del cuerpo vivo, y reconstruir una parte de ella, y en este campo, es natural que tomemos a los seres vivos como modelo en el desarrollo de nuevos conceptos e ideas. Aunque estamos rodeados de seres vivos en nuestra vida cotidiana, a menudo nos preguntamos cuantas veces nos detenemos a considerar algunas de las características únicas y fascinantes, que les permiten sobrevivir en este mundo. Por ejemplo, las entidades vivientes deben tener algún tipo de integridad estructural y deben llevar a cabo una serie de funciones diferentes de forma fiable. No sólo eso, sino que también deben tener cierta capacidad de adaptarse a los cambios en su entorno; estrechamente relacionada con ésta es la capacidad para crecer y reparar daños. En los organismos vivos, estas habilidades se consiguen mediante un sistema jerárquico en el que los órganos, células y agrupaciones moleculares operan de forma autónoma, cada parte contribuye a la supervivencia de la totalidad. Para nosotros, una de las cosas más fascinantes sobre los sistemas biológicos es lograr todo esto y mucho más, por la auto-organización en condiciones de temperatura y presión normales, y por lo general con el menor trastorno posible al medio ambiente.

Como comenta Litinetski (2005), “La biónica es una ciencia interdisciplinaria, o, como se acostumbra a 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, construcción, etc.”

La biónica es, por tanto, una ciencia que tiende a reunir especialistas y materias de diferentes áreas del conocimiento humano. Las lecciones que se pueden sacar de la naturaleza son numerosas y se relacionan con varias ramas del conocimiento científico y, a un nivel filosófico, también con el campo artístico. Esta será, probablemente como se ha descrito anteriormente, la tendencia multidisciplinaria (Gerardin 1968).

También en el ámbito de la arquitectura encontramos definiciones válidas. El término bioarquitectura fue utilizado por Frei (1985) para aseverar “la aplicación de analogías tomadas de la naturaleza para el desarrollo de sistemas constructivos y estructuras arquitectónicas”. Esto ocurre en Stuttgart donde creó un grupo interdisciplinario de investigación sobre estructuras ligeras, para estudiar las técnicas de construcción que “la naturaleza ofrece al arquitecto”.



La adopción de la expresión “arquitectura biónica” apenas surge en publicaciones a partir de los años 80, pero se ha difundido ampliamente, siendo el estudio de la naturaleza una influencia cada vez más presente en la arquitectura.

Lozano (1994) en su Tesis doctoral “El diseño natural. Aproximación histórica, metodologías, aplicación y consecuencias” define la biónica como la ciencia de los sistemas cuyo funcionamiento se basa en el de las estructuras naturales o que tienen analogía con estas, tanto formal como funcionalmente. En su investigación analiza la “metodología” propuesta por Bombardelli, realizada en el “Centro de Investigación de Estructuras Naturales del Instituto Europeo de Diseño” de Milán. Además expone que el principal objeto de la biónica es el estudio de los principios estructurales y del funcionamiento de los organismos naturales, con el fin de emplear las conclusiones de estas investigaciones en el desarrollo de la técnica para lograr un perfeccionamiento radical de los instrumentos, mecanismos, estructuras, estéticas y procesos de producción y utilización existentes. Para el estudio de modelos biónicos esta ciencia efectúa una modelización del entorno; es decir, reproduce las condiciones en que funciona el sistema natural, y en las que debe trabajar de forma práctica su homólogo artificial. No sólo existe un método de construcción biónica por analogía, consistente en imitar a la naturaleza, sino que también es posible la creación de sistemas biónicos por el llamado método de composición. En estos sistemas el organismo vivo sirve de complemento, se utilizan determinados seres vivos que poseen unas capacidades determinadas, útiles para solucionar necesidades muy concretas, como puede ser el caso de un perro lazarillo.

Marín (1991), investigador de la creatividad en España, afirma que la biónica es un procedimiento utilizado en el campo tecnológico para descubrir nuevos aparatos inspirándose en los seres de la naturaleza y, por lo común, en los seres vivos. La botánica y la zoología son las dos principales fuentes de inspiración para la biónica.

Munari (1979) en su libro de metodología de diseño *¿Cómo nacen los objetos?, apuntes para una metodología proyectual* define, “La biónica estudia los sistemas vivientes, o asimilables a los vivientes, y tiende a descubrir procesos, técnicas y nuevos principios aplicables a la tecnología. Examina los principios, las características y los sistemas con transposición de materia, con extensión de mandos, con transferencia de energía y de información. El análisis de una fruta, de un insecto, de una semilla, de una flor, de la ramificación, del movimiento de un animal, de la flexibilidad de una caña de bambú, de la resistencia de la cascara de un huevo... son efectivamente útiles para el conocimiento y pueden estimular la creatividad”.

En el plan de estudios de la Bauhaus hay una parte que corresponde al estudio de la naturaleza y la teoría de la armonización, en el primer año de estudios, el estilo característico de la Bauhaus es impersonal, geométrico y severo, pero con un refinamiento de líneas y formas que derivaba de una estricta economía de medios y del minucioso estudio de la naturaleza y de los materiales.

No se pretende hacer una definición propia pero sí realizar un análisis de las definiciones anteriores con la intención de aclarar algunos términos y proponer una explicación que dé sentido a la propuesta de trabajo, ver figura 2.1. Se puede afirmar que hay una relación entre biología e ingeniería o diseño, demostrado históricamente, y que esta relación se ha basado en el estudio y análisis de las formas vivas para sintetizar soluciones en la ingeniería, es bidireccional puesto que en ocasiones se inicia con el estudio de un ser vivo y otras por la necesidad de resolver una cuestión técnica. Estos análisis se han fundamentado en varios niveles desde lo micro hasta lo macro, desde el orden celular hasta el ecosistema, y en la ingeniería desde los sistemas o productos complejos hasta la investigación actual en el orden de las nanoescalas. La observación se ha planteado en principios, sistemas, estructuras, materiales, funciones y en ocasiones las formas, colores y texturas, tratando de obtener conocimientos aplicables. En este estudio es necesario que se establezca una relación entre lo vivo y la ingeniería por medio de una aplicación con un uso práctico declarado.

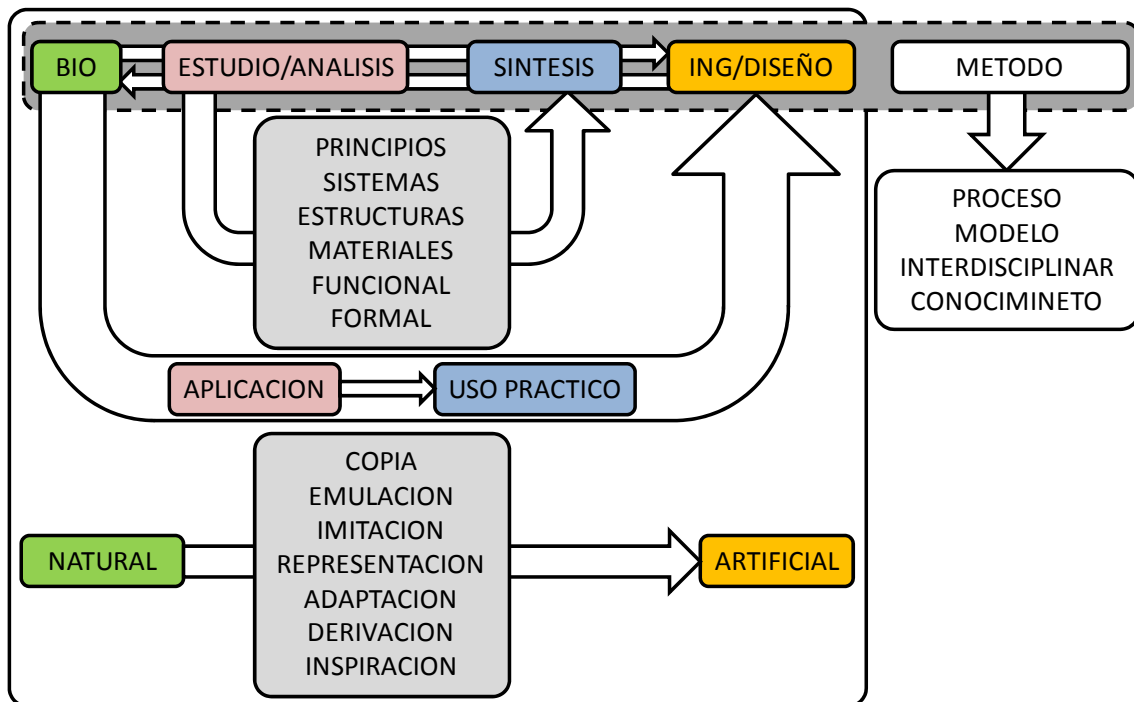


Figura 2.1: Esquema resumido de las definiciones y análisis de métodos inspirados en la naturaleza.

También podemos afirmar que esta relación bidireccional llega a constituir un método, variado como hemos visto en las definiciones anteriores, con el que construir modelos y procesos de diseño. Este método necesita un aporte de conocimiento desde el campo de la biología, por lo que es indicado que el proceso sea interdisciplinar, o al menos que se pueda contar con una fuente fiable y de calidad de información sobre las formas vivas a estudio.

También se puede afirmar, tras considerar numerosas definiciones, métodos y ejemplos, que el paso de lo natural a lo artificial tiene diferentes grados de relación, desde los muy precisos que llegan a copias y replicas casi exactas de la naturaleza, hasta los más sencillos que se quedan en simples inspiraciones como usos gestuales u ornamentales, sin que ninguno de ellos se deba menospreciar si su aplicación y uso práctico está justificado.

### 2.3 ANTECEDENTES DE LA BIOMIMETICA Y EJEMPLOS

La evolución de la naturaleza durante aproximadamente 4000 millones de años ha llevado a la creación de mecanismos biológicos muy eficaces y eficientes. Imitar estos mecanismos o dispositivos biológicos ofrece enorme potencial para la mejora de nuestra vida y las herramientas que utilizamos. Si se trata de hacer innovación, por la mejora de aquello que nos rodea, se puede mencionar la biblia, el libro del Eclesiastés (Iglesia.net 2012) en el que está escrito:

*“¿Hay algo de lo que se pueda decir, mira esto es nuevo? Existe desde mucho tiempo antes que nosotros”*

***Eclesiastés 2:10, Libro del Predicador, autor desconocido***

El diseñador que utiliza la biomimética lo sabe bien. La naturaleza mediante la evolución ha perfeccionado las formas, los procesos y los sistemas por medio de acciones iterativas, gracias al principio de la convergencia evolutiva para mejorar lo que nos rodea, es la primera en experimentar y desarrollar nuevas formas, procesos y sistemas de manera incansable.

El principio de convergencia evolutiva o evolución convergente un fenómeno por el que organismos diferentes, relativamente alejados, tienden, bajo condiciones ambientales equivalentes, a desarrollar en su evolución características morfológicas, fisiológicas, etc. semejantes, es decir, estructuras análogas. La convergencia explica la semejanza entre especies animales sin parentesco como tiburones, delfines e ictiosaurios, todos ellos buenos y rápidos nadadores. En cierto modo explica la teoría de Lamarck, “la función crea al órgano”, sin entrar en polémicas discusiones con la teoría evolutiva de Darwin, podemos concluir diciendo que la necesidad, la función y en ocasiones el azar crean el órgano, la estructura o el material que permite la mejor adaptación.

Cada organismo de acuerdo a sus necesidades, debe desarrollar capacidades para poderse adaptar al entorno, por lo tanto debe crear la herramienta, el órgano, el sistema, etc. a fin de sobrevivir.

Los seres humanos siempre han hecho esfuerzos por imitar a la naturaleza y estamos cada vez más cerca de llegar a los niveles de avance que hacen significativamente más fácil de imitar, copiar y adaptar los métodos biológicos, procesos y sistemas. Los avances en la ciencia y tecnología incrementan los conocimientos y capacidades que se multiplican día a día y nos aproximan a esa realidad.

Los organismos en la naturaleza son capaces de sobrevivir sin necesidad de llegar a un estado óptimo en el modo en que desarrollan sus actividades a lo largo de su vida, todo lo que necesitan hacer es vivir lo suficiente para reproducirse, su único objetivo es perdurar como especie, mejoran y evolucionan para garantizar que tendrán suficientes recursos para cumplir las funciones básicas de cada especie. Los sistemas biológicos se caracterizan por su miniaturización, su sensibilidad, su alto grado de flexibilidad, su capacidad de adaptarse a entornos variables, y su alto grado de fiabilidad. Estas características ofrecen una amplia gama de posibilidades a investigar para poder intentar obtener principios de ingeniería a partir de esos sistemas naturales, y adaptar esos principios a la mejora de los sistemas creados por el hombre. El hombre ha demostrado su capacidad de adaptación.

La idea del primer diseñador biónico nos lleva a la prehistoria en la que la necesidad de encontrar nuevos recursos generó la asimilación de ciertos conceptos que existían en la naturaleza, las garras de las rapaces y los colmillos de las fieras para la caza, escudos y defensas para su protección como armadillos, tortugas o erizos y sistemas de camuflaje para pasar desapercibido en el entorno de caza.

Estos objetos mejorados para obtener más cantidad de recursos, presas más grandes o poder tener una mayor seguridad en su actividad representan innovaciones basadas en la observación de lo que ocurría a su alrededor, y de como quien mejor se adaptaba conseguía sobrevivir o simplemente vivir mejor. El hombre evoluciona primero observando y después creando, un ejemplo, es la bipedestación, el dominio del fuego, la recolección donde analiza y compara, y por último la construcción de herramientas que utiliza y después modifica.

Sin embargo, y a pesar de tener una gran cantidad de ejemplos previos, en muchos textos se considera a Leonardo Da Vinci como el primer investigador o diseñador biónico (figura 2.2), como el precursor de una metodología basada en la imitación y caracterización de la naturaleza.

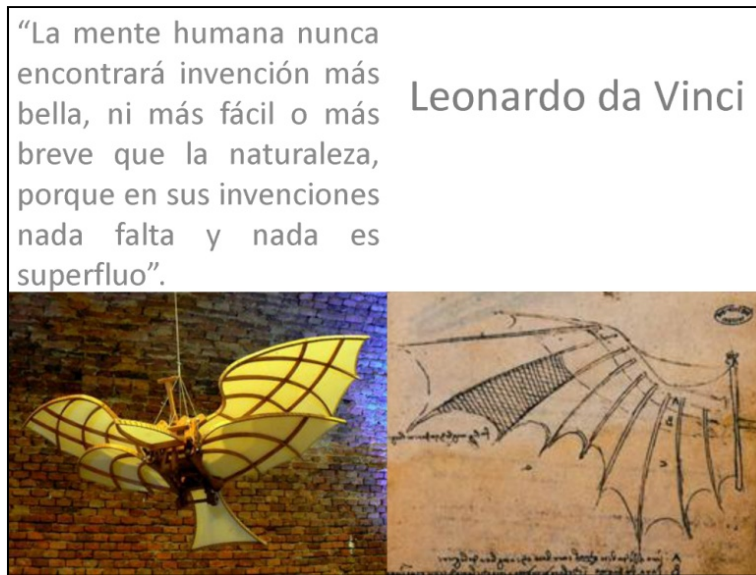


Figura 2.2: Ilustración de una maquina voladora y su boceto original de Leonardo Da Vinci.

Muchos de sus diseños estaban basados en el porqué de las acciones de la naturaleza, en su estudio y conocimiento para después ensayar y cuantificar, siendo los más conocidos las maquinas voladoras, algunas de ellas basadas en la alas de los pájaros o de los murciélagos y su capacidad para armonizar la relación forma-función. Sus maquinas voladores nunca llegaron a desarrollarse y a ponerse en práctica, siendo en el siglo XX cuando se desarrollo una de ellas y se consiguió hacerla volar, para ello fue necesario introducir algunas modificaciones, propias del modo en que las aves vuelan, basadas en la experiencia actual de la aeronáutica, como el timón de cola o los estabilizadores de ala “flaps”.

Otro antecedente de experimentación y observación de la naturaleza que ha sido precursor de este modo de hacer innovación, fue el caso del velcro diseñado (figura 2.3), desarrollado y patentado por George de Mestral (Velcro 2012), ingeniero Suizo que en su tiempo libre le gustaba pasear por la montaña, percibió que las semillas de arctium se enganchaban constantemente a su ropa y al pelo de su perro. Examinando el material a través de un microscopio consiguió distinguir distintos filamentos entrelazados terminados en pequeños ganchos, causando así una gran adherencia a los tejidos. A pesar de la resistencia de la sociedad a esta idea, De Mestral fundó su propia compañía y en 1951 patentó el velcro. Vendiendo 55.000 km por año. La mayor dificultad fue la industrialización de su producto, la capacidad de asimilar el concepto fue inmediata pero replicar el proceso de generación natural, de producir artificialmente, fue difícil. Hoy en día se está desarrollando un velcro metálico con mayor capacidad de resistencia y carga para aplicaciones industriales.

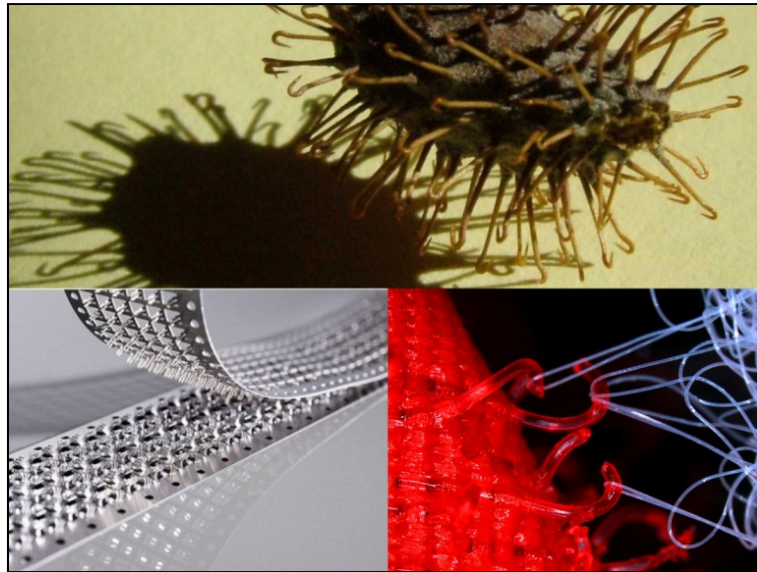


Figura 2.3: Ilustración de una la semilla de arctium y su aplicación como velcro textil y metálico.

Además de estos dos ejemplos tan conocidos por su aplicación biónica, nos encontramos que se han desarrollado otros según la necesidad existente y también caracterizados por la tecnología del momento, como el primer intento de hacer seda artificial, ya hace 3.000 años. En 1904, Ignaz e Igo Etrich observaron las grandes alas de la semilla de *Alsomitra macrocarpa* (figura 2.4), de 15 cm de envergadura, una liana que crece en las islas del Pacífico, cuya semilla con su forma de ala de vuelo, pueden planear distancias considerables y que sirvió de inspiración para sus artefactos voladores.

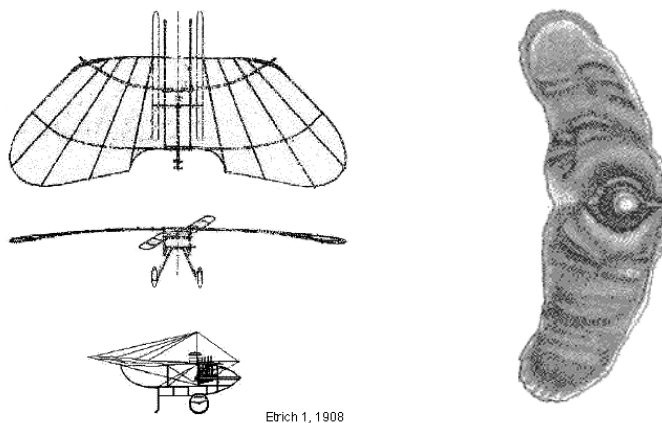


Figura 2.4: Ilustración de la semilla de *Alsomitra macrocarpa* y su aplicación artefactos voladores.

El alambre de espino de Michael Kelly fue diseñado para sustituir al arbusto llamado naranjo de Osage (Mundohistoria.org 2012), utilizado para cercar al ganado en zonas en la que escaseaba la piedra y la madera.

Kelly en su patente que registró en 1868, detallaba en su descripción: “mi invención confiere a los setos de espino un carácter muy parecido a los setos espinosos” (figura 2.5), muy pronto surgieron nuevas patentes que mejoraban su proceso de fabricación y planteaban una mejora económica importante, pero mantenían la idea original de la planta con su función y aplicación característica.



Figura 2.5: Imagen de tallo con espinas y su aplicación al alambre de espinas.

En 1982 el botánico Wilhelm Barthlott, de la Universidad de Bonn (Alemania), descubrió que la hoja del loto era una superficie hidrófoba y autolimpiable, la observación de que las hojas del loto están siempre limpias, condujo a la producción de Lotusan (figura 2.6), una pintura para superficies autolimpiables. Superficies con texturas similares se utilizan para repeler la suciedad o eliminarla fácilmente, esta característica se ha observado en muchas otras plantas y en otros sistemas, tales como las alas del insecto (Koch 2009). El efecto se produce por la superficie rugosa de su superficie, observable solo a nivel microscópico, que cambia la tensión superficial y hace que el ángulo de adhesión sea elevado y que las gotas de agua, lluvia u otros líquidos rueden arrastrando la suciedad.



Figura 2.6: Imagen de hoja de loto y aplicación de Lotusan sobre paredes.



Las superficies antirreflejo se han descubierto en los ojos de los insectos, las alas de los insectos y hojas de las plantas en el sotobosque de los bosques tropicales, gracias a su estudio se ha sido fabricado en lámina de polietileno, que se adhiere a la superficie de vidrio de un panel solar, reduciendo la reflexión y resultando en una mejora del 10% en la captura de la luz. Otras aplicaciones de esta misma tecnología son las laminas que se ponen en dispositivos electrónicos con pantalla, para que la luz solar no sea un impedimento usados en exteriores, además de reducir el consumo por emitir menos cantidad de luz.

Mattheck (Baumgartner 1992, Mattheck 2001) en 1989 desarrolló un modelo de elementos finitos a partir de sus estudios sobre formas para aliviar el estrés en el crecimiento de adaptación de los árboles, llamado Soft Kill Option (figura 2.7), se utilizó para diseñar el chasis del coche biónico de DaimlerChrysler sobre la base de la forma del pez cofre, Ostracion Meleagris, este vehículo tiene la inusual combinación de un gran volumen dentro de una distancia entre ejes pequeña. Es posible que este diseño formal este basado en observaciones de este pez, que tiene la característica de tener una forma muy hidrodinámica con una relación entre desplazamiento y consumo energético muy favorable, pero este hecho formal no ha sido reconocido por DaimlerChrysler en su literatura promocional.

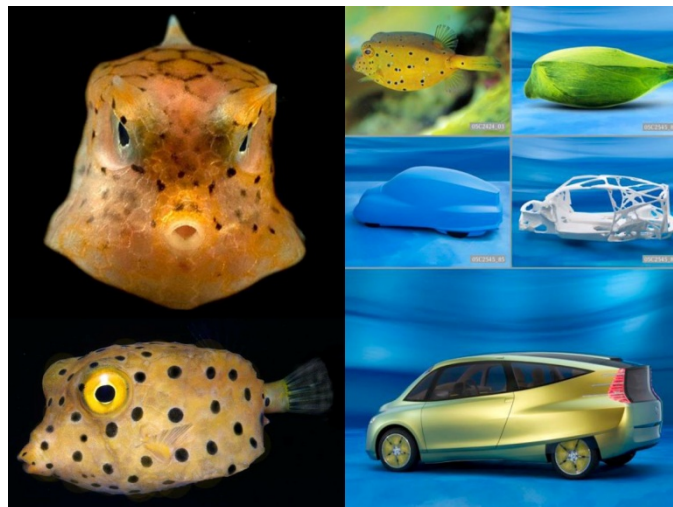


Figura 2.7: Diseño estructural con soft kill option y analogía al pez cofre en el diseño de coche.

Utilizando el mecanismo de adherencia de los pies del Gecko se ha desarrollado una cinta adhesiva en seco (Carlo 2006), un solo pelo del pie del Gecko se adhiere igualmente a las superficies hidrofílicas e hidrofóbicas, generando fuerzas de van der Waals de 10 MPa (figura 2.8), demostrando que las propiedades adhesivas de los pies de este animal son resultado del tamaño y forma de las puntas y que se ajustan a la topografía de la superficie local, y no se ven afectados por el tipo de superficie o composición química.



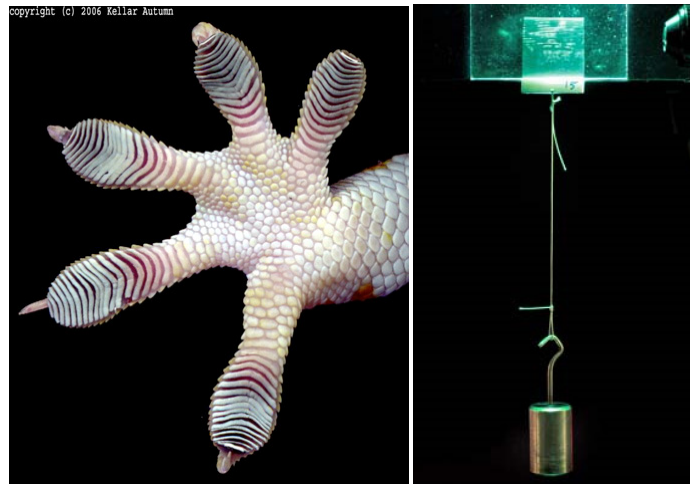


Figura 2.8: Dedos de Gecko y aplicación en cinta de gran adherencia.

Los vórtices inducidos por las crestas en la piel del tiburón (figura 2.9) pueden reducir significativamente la fricción, este fenómeno se utiliza en los cascos de los barcos de vela y en el revestimiento interior de los conductos de fluidos. El mismo sistema se ha utilizado en los aviones, que muestra reducción de la resistencia de 5-10%. También es usado en los trajes de natación para competición, pero no se ha demostrado que tenga un gran efecto y puede que la mejora en las marcas de los nadadores está relacionada con un mejor soporte muscular.

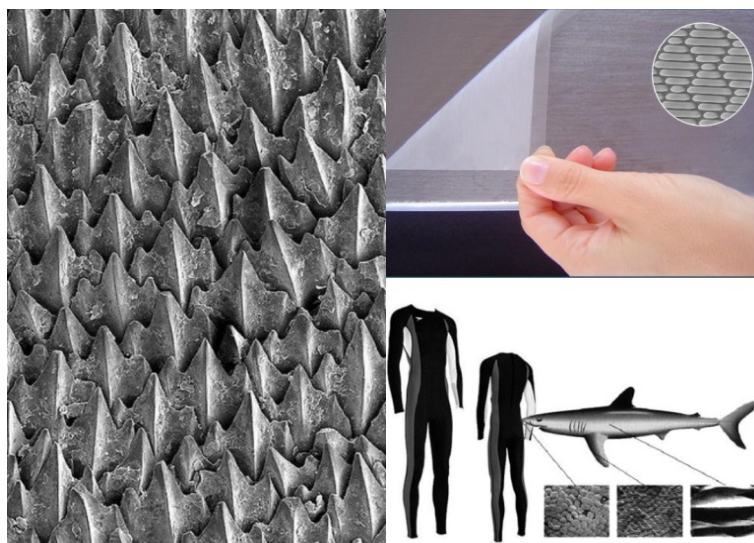


Figura 2.9: Piel de tiburón y sus aplicaciones en varias superficies.

Sin embargo una nueva aplicación extraída del estudio de la piel del tiburón es la aplicación de una geometría específica a un nuevo material plástico de recubrimiento para evitar la floración de bacterias y microorganismos. Este material adhesivo se puede posicionar sobre las superficies que se requiera preservar de microorganismos, por ejemplo material e instrumental quirúrgico, y de este modo se retrasa la floración de bacterias, Sharklet Technologies Inc. (2012), una compañía de bio-tecnología, comercializa estas láminas con

superficie texturizada a micro-escala basada en la investigación patentada por el Dr. Anthony Brennan en la Universidad de Florida.

La forma del cuerpo de un pingüino tiene muy baja fricción y se ha utilizado para diseñar dirigibles con baja resistencia a la penetración en el aire, esta característica se basa en la geometría y la forma, pero otros ejemplos se han tomado de los delfines, por su cuerpo y su piel, o de la manta raya (figura 2.10) que ha servido de inspiración para diseñar un robot submarino con forma de mata y un dirigible que flota en el aire y replica los movimientos de la manta raya para desplazarse como si nadase, este prototipo ya probado ha sido desarrollado por Festo (2012). Esta empresa también ha desarrollado un robot que es una réplica de un pingüino, utilizando un elevado grado de tecnología en los actuadores neumáticos y eléctricos que producen y comercializan.



Figura 2.10: Robot manta, aplicaciones submarina y aérea.

El escarabajo del desierto o escarabajo de Namibia, investigado por Andrew Parker (2001) de la Universidad de Oxford, Reino Unido, toma agua del aire a través de los poros de su caparazón, el aire húmedo del rocío pasa a través de sus protuberancias y hoyos microscópicos que condensan agua del aire y la canalizan hacia la boca del insecto, de esta forma, la criatura puede vivir en el desierto.

Este mecanismo está siendo implementado por QinetiQ (figura 2.11), Reino Unido, ha desarrollado una lámina de plástico para la recolección de agua que imita la espalda del escarabajo, útil para captar el agua en torres de refrigeración y condensadores industriales, zonas agrícolas áridas y edificios en zonas ricas en niebla.

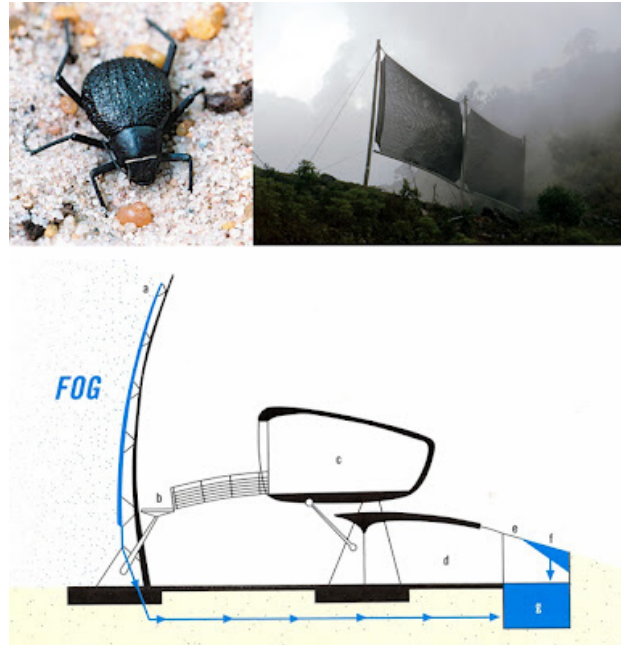


Figura 2.11: Planta recuperación de agua de niebla basado en el escarabajo de Namibia.

Hay gran número de ejemplos de inspiración en la naturaleza para mejorar y crear nuevos productos, sin embargo no todas estas nuevas aplicaciones tienen una justificada copia, inspiración o emulación.

A modo de ejemplo de objetos y creaciones con una posible influencia o relación biomimética pero que no ha sido demostrada se puede mencionar a Paxton que influenciado por las hojas de un lirio de agua gigante, la Victoria Amazónica, desarrolló una nueva estructura ligera. Usó una ilustración de una de las hojas durante una charla en la Royal Society of Arts en Londres, mostrando cómo apoyar una estructura de techo y utilizarla como referencia para el diseño de la estructura del Crystal Palace de la Exposición Universal de Londres en 1850 (Vogel 2000). Hay poca semejanza entre el diseño de la hoja de lirio de agua, que utiliza soportes de las vigas radiales, y el diseño de la cubierta del Crystal Palace que, con sus nervaduras, parece más a otro tipo de hoja como el haya.

Smeaton, el ingeniero civil británico, diseñó en 1759 el faro de Eddystone a unos 23 kilómetros de Plymouth, para guiar a los barcos en travesía por el canal de la Mancha. Según él, eligió un grácil estrechamiento como un “roble grande y frondoso” y definió vagamente la forma de su diseño con relación a la de un roble. Su definición “vaga” dista mucho de las especificaciones

concretas propias de la ingeniería, no siendo un modelo cuantitativo. Por otra parte ningún ingeniero emularía un roble, donde la carga principal es por la resistencia aerodinámica de la hojas, por tanto es como una viga con mas carga de extremo que de área, además la madera trabaja en tensión mientras que la piedra del faro lo hace a compresión, quedando patente que hay más de inspiración que de ciencia.

#### **2.4 RAZON DE LA BIOMIMETICA**

Hacemos biomimética porque el hombre trata de superar todo aquello que tiene hoy, debido a una necesidad natural de descubrir, crear y perfeccionar aquello que le rodea, su entorno, su seguridad, sus herramientas, elementos de ocio, etc., el hombre busca y provoca el cambio, es precursor de la innovación y para ello toma como referencia a la naturaleza, aunque conozca que en ella no existe un artefacto como el que en ese momento está buscando; Por ejemplo, el hombre puede idear elementos de dibujo y escritura para comunicar, perpetuar un mensaje o información, pero en la naturaleza difícilmente se encuentra un símil en el que un mensaje es registrado para perpetuarse, exceptuando la genética y al ADN, sin embargo en la naturaleza hay casos en los que una cierta cantidad de información es registrada de algún modo, por marcas, olores, huellas, u otros.

Otro motivo es que se reconoce que la naturaleza ha creado estructuras, herramientas, materiales, procesos, sentidos, inteligencia, etc. y que su aplicación es muy provechosa para el desarrollo de artefactos, la naturaleza sirve de modelo, medida y mentor (Benyus 2002), haciéndolo al igual que lo hace la naturaleza se obtiene el potencial de cambiar el modo de obtener recursos alimenticios, hacer materiales, aprovechar la energía, aplicar curas, almacenar información y dirigir negocios. Cuanto más se parezca y funcione “nuestro mundo” al mundo natural habrá más posibilidades de ser aceptado en este hogar que es el planeta, que es nuestro pero no nuestro solo.

Lodato menciona, “somos humanos y tratamos de imponer nuestro ego sobre nuestros pensamientos: a menudo suponemos que podemos diseñar sistemas que nos permitirán superar la naturaleza. Como diseñadores debemos replantearnos esta suposición, ya que en la naturaleza encontraremos los procesos, las formas, los mecanismos y las texturas que nos proporcionaran las herramientas para llevar a cabo nuestro futuro”. Su reflexión indica el afán de superación del ser humano y su interés por encontrar las mejores soluciones posibles llegando al punto de tratar de superar a la naturaleza, algo difícil de conseguir si bien todo lo artificial parte de lo natural sujeto a una transformación, donde la eficacia y la eficiencia no dará un producto superior al origen.

Además, indica que muchos de los artefactos que se diseñan deben de plantearse bajo el estudio de la naturaleza y la biónica para crear futuro, esta idea de futuro se debe destacar ya que tiene una fuerte relación con la innovación y la gestión del cambio, en la que debemos crear y descubrir herramientas que lo propicien.

No ha de copiarse la naturaleza, sino que es más provechoso entenderla y aplicar su saber hacer para solucionar nuestras necesidades, Wirkkala (Scandinavian Design 2012) muy inspirado en la naturaleza en su trabajo, “copiar la naturaleza es un acto de habilidad manual que no ayuda a comprender las cosas. Estudiar la estructura y la evolución de los objetos naturales puede incluso ayudar a comprender el propio mundo”, por esta razón es necesario hacer el esfuerzo por comprender la genialidad de la naturaleza y aplicarla por medio de la biomimética.

### **2.5 METODOLOGIAS UTILIZADAS EN DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTO**

Se presentan las metodologías y procesos utilizados en biomimética para generar soluciones de ingeniería y oportunidades de éxito, inspirados en los sistemas biológicos, y cómo estos procesos se puede formalizar para que sean más accesibles para los biólogos e ingenieros.

#### **2.5.1 MARÍN**

Marín (1991), describe que el enfoque biónico en la solución creativa de problemas requiere la intervención de especialistas en varias disciplinas, tanto biológicas como tecnológicas, con objeto de descubrir las soluciones del mundo vivo y ser capaz de trasladarlas a nuevos aparatos. El producto de esta metodología son las ideas, no el propio diseño. Las ideas se deben transformar por medio de principios y modelos naturales en soluciones a un problema de diseño o ingeniería.

La metodología se desarrolla en tres pasos:

- Estudio minucioso del comportamiento de los seres vivientes que interesan, concentrando la atención en sus propiedades particulares.
- Traducción a modelos de las propiedades de los seres vivos: modelos de carácter matemático, lógico, gráfico o simbólico.
- Desarrollo de los modelos, ensayarlos e intentar reproducir al máximo las funciones de los seres vivos.

Observamos en esta metodología, y se evidencia en otras, que se parte de la naturaleza para llegar a una solución aplicable técnicamente, pudiendo efectuarse de maneras distintas y que es verificada por medio de modelos y ensayos. En síntesis es la metodología más simple y fácil de aplicar, no es necesario tener conocimientos científicos o técnicos para poder aplicarla ya que la observación inspira la aplicación. La observación analiza y define los rasgos más

característicos del individuo vivo, permitiendo extraer los principios más básicos y fundamentales que se traducirán en modelos aplicables de un modo más o menos científico, desde un empleo utilizando un referente formal como puede ser el aleta de un delfín como timón de una tabla de surf, hasta series aritméticas que describen el crecimiento de los brotes en una rama; o la espiral de crecimiento en un girasol aplicadas a lucernarios o estructuras de techo. El último paso quizá sea el más indefinido respecto a otras metodologías ya que si bien habla de crear modelos de aplicación para ensayar y verificar la utilidad del modelo, siendo este aspecto muy útil en diseño y desarrollo de producto, también habla de tratar de reproducir el máximo de funciones del ser vivo, donde se entiende que no está definido por pertenecer a un proceso exploratorio, y este aspecto en otras metodologías se define de antemano y viene marcado por unos objetivos de proyecto. Este último aspecto no es erróneo sino que explica y evidencia el carácter creativo de esta metodología, en el cual se utiliza la biomimética como fuente de inspiración, de nuevo es necesario recalcar que es una metodología basada en el vínculo creatividad y proceso exploratorio y que necesita la interrelación de especialistas de ambos campos, biología y científico-técnico.

### 2.5.2 LODATO

Según Lodato hay una primera aproximación a la metodología de diseño por cómo se desarrollan los proyectos biónicos, una observación de como es la aplicación biónica establece la relación entre la naturaleza y el proyecto de diseño. Establece cinco categorías principales, que se enumeran a continuación:

- Imitación completa: un objeto, material o estructura que es idéntico al ser vivo. Por ejemplo las maquinas voladoras de Leonardo.
- Una imitación parcial: la versión modificada de un producto natural. Por ejemplo, la estructura de la escama de la piel de tiburón para reducir la fricción con el agua, o la caña de bambú y las estructuras de hormigón armado.
- Sin parecido biológico: la imitación funcional. Por ejemplo, el perfil del ala de los pájaros y aviones o los “winglets” aletas estabilizadoras en los extremos de las alas.
- Abstracción: la utilización de un mecanismo aislado. Por ejemplo, los refuerzos de fibra de materiales composites y los caparazones de algunos animales que tienen composiciones multicapa.
- Inspiración: el desencadenante de la creatividad. Por ejemplo, estructuras como las del “Crystal Palace” diseñado por Joseph Paxton, basadas en las nervaduras del reverso la hoja del nenúfar que le dan estructura y flotabilidad.

Además de esta clasificación también propone una metodología básica en la que se definen los procesos de diseño biónico, y lo divide en cuatro fases:

- Selección de las características del organismo vivo que superen las posibilidades tecnológicas actuales.

- Detectar y obtener los principios y los procesos que otorgan esa superioridad.
- Elaborar métodos y modelos para describir los sistemas biológicos en términos útiles para los diseñadores.
- Demostrar la viabilidad de traducir este conocimiento en un aparato seguro y eficaz.

Al igual que en la metodología expuesta por Marín, el proceso es exploratorio y de búsqueda de un ser vivo con éxito en alguna característica o función, análisis de los principios que le dan ese éxito y traducción al lenguaje que utilizan los diseñadores para evidenciar su utilidad, sin embargo en el caso de Lodato esta metodología se orienta directamente a la aplicación a un proyecto desde el encargo hasta la entrega (figura 2.12), mostrando la viabilidad de ser aplicable sobre un aparato, no solo es exploratorio para encontrar ideas, sino que esas ideas deben ser válidas y aplicables, por eso es necesario conocer las categorías en las que se enmarca el proyecto de diseño, la clasificación en función de la relación con el ser vivo y las características observadas.

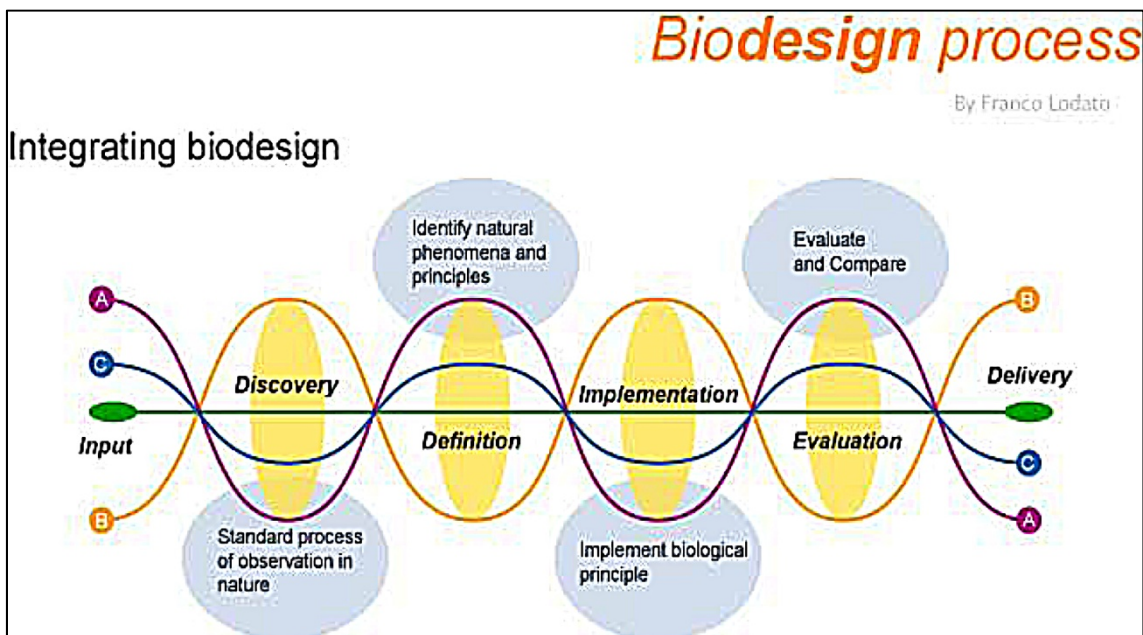


Figura 2.12: Esquema del proceso propuesto por Franco Lodato.

Su metodología va un poco más lejos, exponiendo que el aspecto creativo puede relacionarse con la inspiración, llamándolo el desencadenante de la creatividad, pero define y abarca otras categorías como la imitación parcial o total, es decir, la imitación de una función o la utilización de un mecanismo o sistema aislado. Todas ellas relacionan la necesidad proyectual con algún rasgo de la naturaleza que es exitoso, no solo es una mera inspiración, es necesario un trabajo de elaboración de métodos o modelos que evidencien la utilidad para un diseño.

### 2.5.3 BOMBARDELLI, Di BARTOLO, SONGEL, LOZANO CRESPO

En este apartado de metodología biónica agrupamos a cuatro autores que utilizan una misma formulación, el nexo común es la experiencia de investigación y aplicación realizada en el departamento de Biónica del Instituto Europeo de Diseño de Milán, por sus teorías proyectuales, consideradas analíticamente muy acertadas, y por estar de acuerdo con las mismas por parte de los otros dos investigadores. Las aportaciones realizadas en el estudio de los métodos y casos aplicativos experimentados en el Centro de Investigaciones de Estructuras Naturales constituyen un primer paso valioso para la comprensión de las posibles formas de acceder a la biónica con relación al proyecto.

Tanto Lozano (1994) como Songel (1991) en sus Tesis doctorales, evalúan y comentan los diferentes procesos metodológicos argumentados por los trabajos de Bombardelli, también se expone la metodología de diseño de producto propuesta por Songel a partir de estos trabajos.

Existen varias modalidades de investigación biónica y su consiguiente aplicación a los fines proyectuales. En un análisis preliminar de los métodos más significativos verificados se podrán aclarar mejor los motivos que han determinado algunas de las elecciones para encontrar un equilibrio en la relación Biónica, proyecto y producción.

#### 2.5.3.1 Primera metodología.

El análisis biónico podría aplicarse a un solo sujeto o bien a un grupo observando cómo puede desarrollarse el diseño y tener distintas soluciones. A continuación hay una síntesis de la información obtenida por medio de ilustraciones, fotografías, modelos, etc., que comienza a esbozar las posibles analogías y a soluciones aplicables al diseño. A partir de esa información se comienza con una selección definida por los requisitos concretos del argumento proyectual.

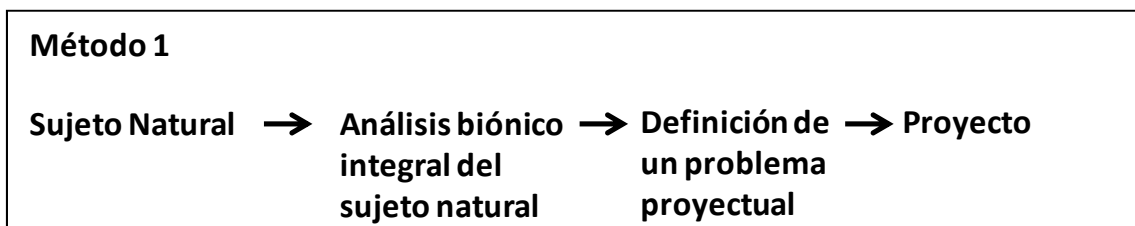


Figura 2.13: Esquema del proceso correspondiente al método 1, Instituto Europeo de Diseño de Milán.

Con la elección de las soluciones se continúa con la definición de un problema proyectual y/o al desarrollo de un proyecto concreto. Este método (figura 2.13) no puede ser aplicado en un caso proyectual de encargo industrial real, pues se trataría de un proceso completamente opuesto. No existe ninguna garantía a priori de la presencia de objetivos útiles en el ser vivo sometido a examen, para la posterior aplicación a un determinado problema proyectual.



Es también cierto, sin embargo, que este tipo de aproximación nace con el propósito de construir un almacén de información para el enriquecimiento de un archivo de datos, instrumento necesario en la gestión de la biónica aplicada al diseño. Esta metodología parece apropiada para ser aplicada en un departamento de investigación biónica, pero la mayoría de las veces esta progresión no tiene sentido para un diseñador aislado en un proyecto concreto.

### 2.5.3.2 Segunda metodología.

Partiendo de la base de un problema proyectual, comienza la investigación biónica específica para individualizar los posibles principios de trabajo (figura 2.14), por ejemplo analizando los elementos que en la naturaleza resuelven problemas similares, un problema de tenso-estructuras puede ser examinado en la tela de araña.



Figura 2.14: Esquema del proceso correspondiente al método 2, Instituto Europeo de Diseño de Milán.

La condición aleatoria en la investigación del elemento natural hace a este método demasiado selectivo en la fase inicial posibilitando la pérdida de valiosa información presente en otros seres vivos que no son investigados. Un análisis completo que no excluya modelos naturales de particular significado, necesita un gran esfuerzo de energía y de tiempo en la investigación, lo que resulta extremadamente poco económica y escasamente aplicable en un contexto proyectual productivo, pero aun así esta metodología resulta mucho más práctica e interesante que la anterior, por partir de un problema proyectual que puede tener relación a un encargo real.

### 2.5.3.3 Tercera metodología.

La intuición proyectual derivada de la observación de un sujeto natural puede ser considerada como un caso fortuito, no controlable. No se puede hablar de un método de trabajo verdadero, estaría caracterizado por la toma anecdótica de algunos de los aspectos con que se manifiesta la naturaleza, sin tener en cuenta que éstos son consecuencia de un proceso evolutivo-funcional. El diseñador que se enfrenta a un modelo natural puede intuir los principios de su problema proyectual (figura 2.15). Si tuviese los datos biónicos ya seleccionados y organizados este caso sería más frecuente y productivo, por lo que se evidencia la necesidad de colaborar con biólogos, médicos, veterinarios, físicos, etc., que le puedan facilitar la información.



Figura 2.15: Esquema del proceso correspondiente al método 3, Instituto Europeo de Diseño de Milán.

#### 2.5.3.4 Cuarta metodología

La definición de un argumento proyectual, por ejemplo: “carcasas funcionales para productos” puede llevarnos a la realización de una investigación biónica de notables dimensiones por ejemplo: “los exoesqueletos en los invertebrados”. La amplia cantidad de información recopilada garantiza la definición de múltiples problemas proyectuales (figura 2.16).

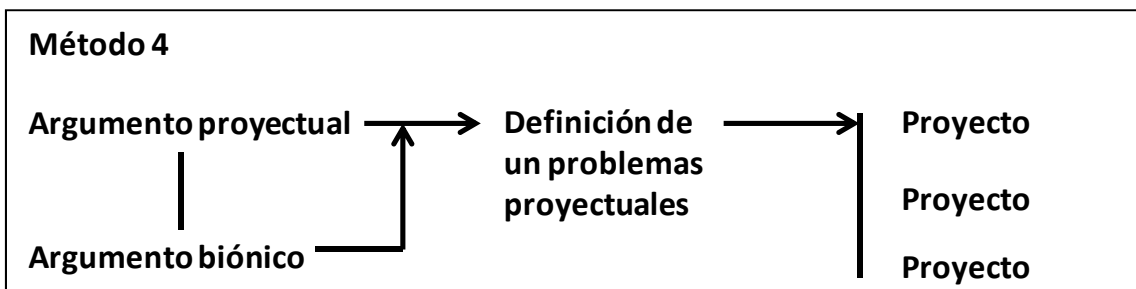


Figura 2.16: Esquema del proceso correspondiente al método 4, Instituto Europeo de Diseño de Milán.

Sin embargo existen dificultades de tipo operativo, no es posible tener información suficiente para hacer frente a cada tipo de problema proyectual. Si el objetivo es la formación de material documental biónico para posteriores utilidades, este método puede resultar interesante, un argumento biónico es el tema central de la recolección de datos, por ejemplo: el estudio de los bivalvos marinos, por su función protectora, estructura, resistencia mecánica, uso eficiente del material y del espacio, sistemas y mecanismos de apertura, cierre y seguridad, pueden ser base documental para futuros trabajos relacionados con carcasas.

La principal característica de esta metodología es, en primer lugar, el establecimiento de una analogía desde el planteamiento de la necesidad que se convierte casi directamente en un argumento biónico. En segundo término, este hecho condiciona al resto del proceso, que se convierte en la suma de casos del método 1, requiriendo el estudio de varios sujetos naturales y multiplicandos como resultado las propuestas proyectuales.

#### 2.5.3.5 Quinta metodología

Este método plantea un proceso de diseño convencional en el que se van integrando resultados de la investigación biónica en las distintas fases de desarrollo, estos resultados pueden ser ya conocidos de investigaciones anteriores o bien ser parte del trabajo de ese proyecto en concreto (figura 2.17).

En la parte de investigación biónica observamos que la mejor condición de trabajo puede estar garantizada en la unión de dos tipos de investigadores: los biónicos analistas y los biónicos proyectistas, investigadores de biónica analítica y aplicada. El objeto de los primeros es recoger los resultados de la investigación analítica de temas naturales y sistemáticamente comunicarlos mediante textos, modelos y elaborados gráficos y fotografías. En el momento de presentarse un problema proyectual de cualquier naturaleza, el diseñador tendrá de esta forma el material biónico necesario que posteriormente individualizara, accediendo a él en este contacto directo con la literatura biónica.

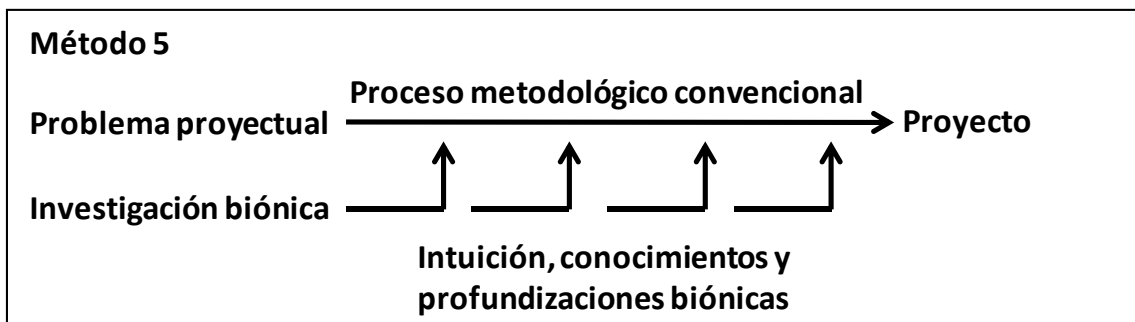


Figura 2.17: Esquema del proceso correspondiente al método 5, Instituto Europeo de Diseño de Milán.

Esta metodología une la conceptualización y la aplicabilidad de la biónica dentro de la metodología de diseño, como elemento de apoyo en un proceso convencional y parte del método creativo de la sinestesia en cuanto a analogías directas se refiere, o como método específico dentro de la teoría de los niveles metodológicos.

### 2.5.4 BIOMIMICRY INSTITUTE

El Instituto de biomimética (Biomimicry Institute 2012), fundado por Janine Benyus, promueve el aprendizaje de biomimetismo emulando las formas naturales, los procesos y los ecosistemas para crear diseños y tecnologías más sanas y sostenibles.

Utilizando su lema, la biomimética una herramienta para la innovación, ayuda a los innovadores de todos los ámbitos de la vida, ingenieros, diseñadores, arquitectos, líderes de negocios, entre otros, a utilizar la biomimética como una herramienta para crear diseños más sostenibles. El proceso de la biomimética, de la consulta al genio de la vida, se describe en la espiral de diseño (figura 2.18); puede servir como guía para ayudar a los innovadores para superar un reto por medio de la naturaleza, consultar al mundo natural en busca de inspiración, para evaluar y garantizar que el diseño final imita a la naturaleza en todos los niveles, forma, el proceso y los ecosistemas. La metodología que describe no extrae sabiduría de la naturaleza únicamente para el diseño, sino también aplicable al proceso de fabricación,

envasado, y todo el recorrido de un producto hasta el envío, distribución, y las decisiones de recuperación.

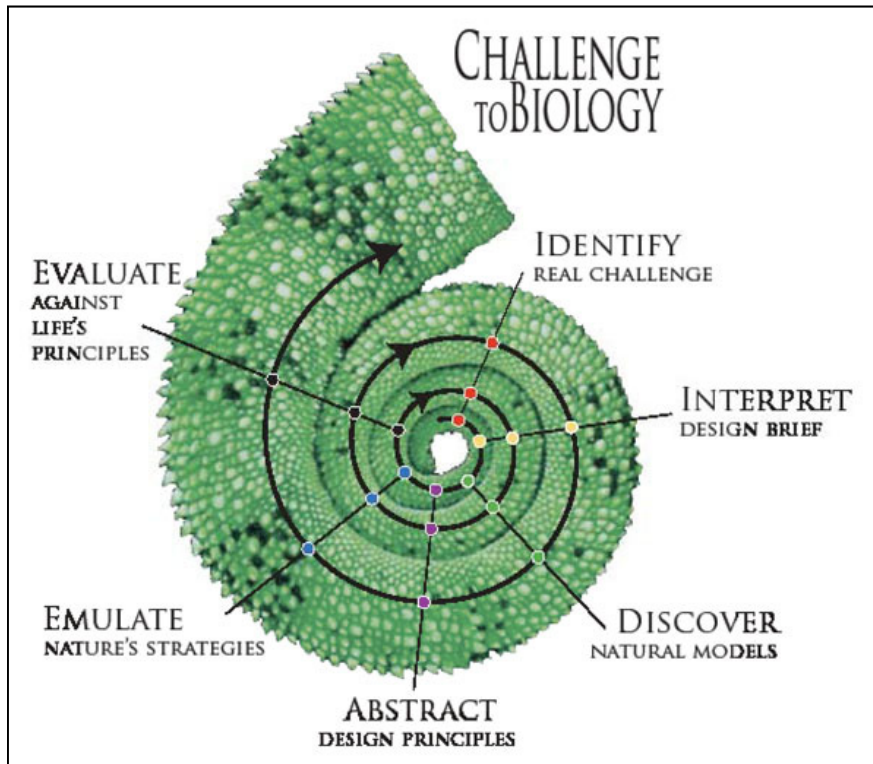


Figura 2.18: Esquema del proceso propuesto por el Biomimicry Institute.

Gráficamente, para explicar la metodología, se utiliza una espiral para remarcar el carácter iterativo del proceso, es decir, después de resolver un desafío se evalúa la satisfacción en el cumplimiento con los principios del referente vivo, entonces se plantea otro reto y el proceso de diseño comienza de nuevo. Por ejemplo, primero se diseña el objeto o artefacto que imita los principios de la vida, para luego preguntar ¿cómo se fabrica? ¿Qué uso de energía y procesos químicos puede imitar de la naturaleza?

Los pasos de la metodología son los siguientes:

- IDENTIFICAR. Elaborar un objetivo documentado de diseño de la necesidad humana:
  - Elaborar un brief de diseño con detalles sobre el problema a resolver.
  - Descomponer el brief de diseño para determinar las competencias de los problemas y las especificaciones de diseño.
  - Identificar la función que se desea llevar a cabo el diseño: preguntar ¿Qué quieres que haga tu diseño? En vez de ¿qué quieres diseñar? Continuar haciendo esa misma pregunta hasta que llegar al fondo del problema.
  - Definir las características específicas del problema:
  - Objetivo que esté involucrado en el problema y que va a participar con la solución
  - Localización: ¿dónde está el problema, donde se aplica la solución?

- INTERPRETAR. Biologizar la cuestión; pedir al objetivo documentado de diseño desde la perspectiva Natural:
  - Traducir las funciones desempeñadas en la naturaleza en la función de diseño. Preguntar: ¿Cómo hace la Naturaleza de esta función? ¿De qué manera no la hace?
  - Reformular las preguntas con las palabras clave adicionales.
  - Definir el Hábitat / Ubicación
  - Condiciones climáticas
  - Condiciones de nutrientes
  - Condicionantes sociales
  - Condicionantes temporales
- DESCUBRIR. Buscar en la naturaleza quien tiene éxito y que pueda dar respuesta o resolver los retos establecidos.
  - Encontrar los mejores modelos en la naturaleza para responder a las cuestiones realizadas.
  - Considerar lo literal y lo metafórico.
  - Buscar casos de éxito en la pregunta ¿Qué supervivientes dependen de ello?
  - Encontrar los organismos que son que mejor resuelven el problema que está tratando de resolver por sus capacidades.
  - Observar las situaciones extremas del hábitat.
  - Convertir el problema, ponerlo del revés, darle vueltas.
  - Charlar con biólogos y especialistas en el campo.
- ABSTRAER. Encontrar los patrones que se repiten dentro de la naturaleza y los procesos que permitan alcanzar el éxito
  - Crear la taxonomía de las estrategias de vida.
  - Seleccionar los candidatos con más éxito, con las estrategias más relevantes para resolver el reto particular de diseño.
  - Resumen de la lista repetir los éxitos y los principios que permitan alcanzar este éxito.
- EMULAR. Desarrollar ideas y soluciones basadas en los modelos naturales.
  - Desarrollar conceptos e ideas que aplican las lecciones de los maestros Naturales.
  - Tratar de aplicar de estas lecciones, tan intensamente como sea posible, en el diseño:
    - Imitación formal:
      - Conocer los detalles de la morfología.
      - Comprender los efectos de la escala.
      - Considerar los factores que influyen en la eficacia de la forma para el organismo.
      - Considerar formas en las que puede profundizar en la conversación para imitar también procesan y / o el ecosistema.

- Imitación de la función:
  - Averiguar los detalles del proceso biológico.
  - Comprender los efectos de escala.
  - Considerar los factores que influyen en la eficacia del proceso para el organismo.
  - Considerar modos de profundizar en la conversación ambiental o incluso imitar el ecosistema.
- Imitación de los ecosistemas:
  - Conocer los detalles del proceso biológico.
  - Comprender los efectos de escala.
  - Considerar los factores que influyen en la eficacia del proceso para el organismo.
- EVALUAR. Comparar las ideas generadas con los principios exitosos en la naturaleza.
  - Evaluar la solución de diseño respecto a los principios de la vida.
  - Desarrollar preguntas adecuadas respecto a los principios de vida y cuestionar la solución planteada.
  - Identificar nuevas formas de mejorar el diseño y desarrollo de nuevas preguntas exploratorias. Las preguntas deben apuntar al perfeccionamiento del concepto:
    - Embalaje.
    - Fabricación
    - Comercialización
    - Transporte
    - Nuevos productos
    - Otros...
- INICIO DEL CICLO DE NUEVO. Identificar. Desarrollar y perfeccionar el brief de diseño basado en las lecciones aprendidas de la evaluación de los principios de la vida. La naturaleza trabaja con pequeños bucles de retroalimentación, en constante aprendizaje, adaptación y evolución. El proceso también puede beneficiarse de este pensamiento, evolucionando nuestros diseños en repetidos pasos de observación y desarrollo, descubriendo nuevas lecciones y aplicándolas constantemente a lo largo de la exploración del diseño.

Esta metodología es muy similar a la segunda propuesta de Bombardelli, aunque en una versión extendida y más detallada. Partiendo de un argumento proyectual se identifican las verdaderas necesidades y se define un brief de diseño o definición de proyecto en el que se argumentan estas necesidades, después se plantea el argumento o argumentos biónicos y se hace una investigación para conocer a fondo al individuo natural y definir en detalle sus principios, sistemas, estructuras, etc., que lo diferencian y lo hacen interesante para su estudio. Con esos resultados se pasa a la fase de asimilación y traducción de esos principios y cualidades diferenciales, y posteriormente a su aplicación para poder evaluar su conveniencia, o no, respecto de la necesidad inicial planteada, ante esta situación se inicia un proceso cíclico de perfeccionamiento en el que con las soluciones planteadas se puede redefinir el brief de diseño, y tratar de extraer resultados mejores y más validos.

Las diferencias clave en esta metodología son, en primer lugar, la utilización de bases de datos y resultados de estudios de biología, que sirven para hacer las primeras aproximaciones en la fase de descubrir los modelos naturales más idóneos, y la abstracción de los principios que mejor resuelven el problema planteado, con estos datos se clarifica la fase de investigación biónica ya que se trazan líneas de investigación que tiene más garantía de dar resultados. Y en segundo lugar, encontramos la diferencia en la definición del proyecto, en la metodología de Bombardelli se plantean uno o más proyectos en función de los resultados de la investigación biónica, y en esta metodología se plantea el proyecto en la fase inicial pudiendo desarrollar una o más soluciones en función de los resultados, y dependiendo de que el ciclo se repita y se haga un proceso iterativo.

En esta metodología se evidencia la necesidad de una base de conocimiento sobre biología muy importante, ya sea por la colaboración de biólogos y expertos o por medio de las bases de datos antes mencionadas como la existente y de libre consulta en su web (ASK Nature 2012), en la que existe una taxonomía de resultados biológicos donde se organizan y clasifican estrategias por grupos, subgrupos y funciones en el ámbito natural, tal y como vemos en el gráfico (figura 2.19).







### 2.5.5 UNIVERSIDAD DE FRIBURGO

Gester en “Integrando la biomimética en el desarrollo de producto” de la publicación *Biomimetics: strategies for product design inspired by nature* (Vincent 2007), explica la metodología desarrollada en la Universidad de Friburgo por Milwich, Speck y otros (Milwich 2006).

El enfoque adoptado en Friburgo al hacer biomimética es llevar a cabo la investigación biológica básica en biomecánica y morfología funcional, para después tomar los nuevos conocimientos que son preparados y puestos a disposición de la tecnología para su procesamiento (de abajo hacia arriba). Además, también siguen una estrategia alternativa, es decir, la búsqueda de posibles soluciones modelo biológico para problemas técnicos específicos (de arriba hacia abajo). Desde nuestro punto de vista, este último enfoque permite el desarrollo de productos biológicamente inspirados en menor tiempo, mientras que el primer enfoque tiene el potencial de producir mayores logros en innovación.

#### 2.5.5.1 Proceso de arriba hacia abajo (TOP-DOWN)

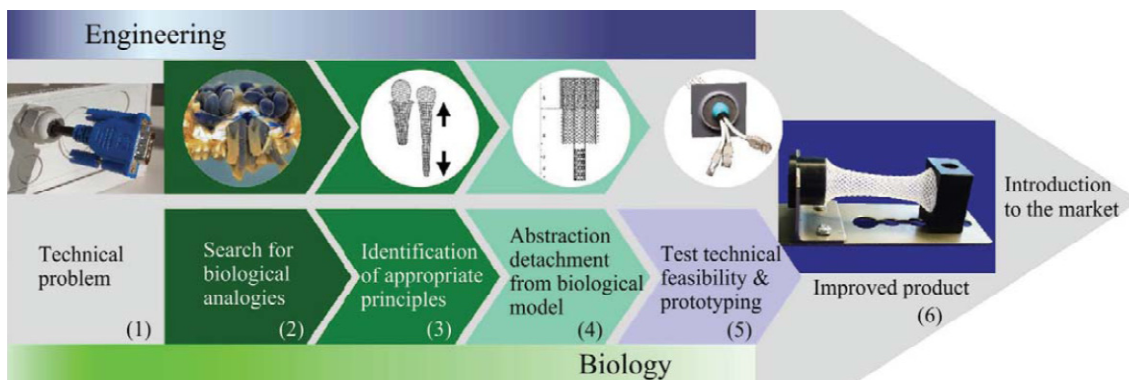


Figura 2.20: Esquema del proceso TOP-DOWN, Universidad de Friburgo.

El proceso de arriba abajo (figura 2.20), se inicia con la detección de un problema técnico que puede ser resuelto por medio de la aplicación de un proceso de diseño basado en la biomimética y comprende las siguientes etapas:

- Formulación del problema técnico
- Búsqueda de las analogías en la biología
- Identificación de los correspondientes principios
- Abstracción del modelo biológico
- Aplicación de la tecnología a través de prototipos y pruebas

### 2.5.5.2 Proceso de abajo hacia arriba (BOTTOM-UP)

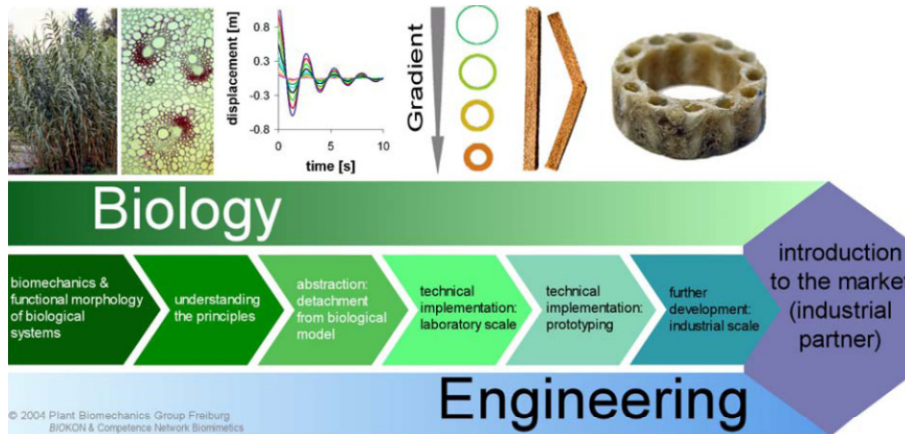


Figura 2.21: Esquema del proceso BOTTOM-UP, Universidad de Friburgo.

Este proceso (figura 2.21) se inicia con la identificación de un sistema biológico que ofrece una oportunidad de desarrollar un principio, función, material, etc., que plantea innovación o mejoras sobre lo ya existente, comprende las siguientes etapas:

- Identificación de un sistema biológico
- Analizar la biomecánica, morfología funcional y la anatomía
- Comprender los principios
- Abstracción del modelo biológico
- Aplicar la tecnología a través de prototipos y pruebas

Ambos procesos son válidos y tienen en común que para ser desarrollados es necesaria una colaboración interdisciplinaria entre tecnología y biología, y esto es algo difícil de conseguir tanto para el experto biólogo como para el ingeniero, no es sencillo encontrar un especialista capaz de aplicar los resultados de ambos procesos, es difícil encontrar la información adecuada en el formato adecuado.

Para tratar de solventar estas dificultades se desarrollan herramientas y mecanismos por parte de los investigadores, la primera de ellas es el uso de sistemas basados en TRIZ en los que se considera a la naturaleza como una gran base de datos de patentes naturales, existen bases de datos de principios de biología que permiten extraer funciones, materiales, estructuras o mecanismos que pueden ser solución a los problemas técnicos planteados en ingeniería. Desarrollado por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Bath en el Reino Unido, han sido pioneros en la creación de una base de datos del binomio problema-solución en la naturaleza, planteando la metodología TRIZ para encontrar soluciones análogas a problemas análogos, problemas técnicos o de ingeniería con similares características a los encontrados en la naturaleza pueden tener soluciones válidas y análogas a las dadas en la naturaleza.

Esta herramienta se ha implementado en una matriz de búsqueda en la que definiendo una serie de restricciones y necesidades para el problema técnico proporciona una serie de posibles respuestas, para que este sistema funcione como una herramienta valida es necesario que la base de datos sea amplia y abarque tantos campos en biología como sea posible, y esto se consigue por medio de investigación.

Una segunda herramienta está siendo desarrollada por el Centro de Tribología para Superficies Biológicas o Bio-inspiradas, en el Instituto Max-Planck para la Investigación de Metales, basada en el sistema Selector de Materiales de Cambridge con una base de datos de unos mil materiales biológicos con sus características y definiciones para su adecuada utilización en aplicaciones concretas.

Y una tercera herramienta, que utiliza un sistema léxico de búsqueda, que se basa en la búsqueda de palabras clave en textos de biología que se corresponden con los términos en los que se puede definir un problema técnico en ingeniería. Este es un método sencillo, fácil de aplicar y rápido pero es necesario hacer una correcta definición de los términos ingenieriles, también depende de la disponibilidad y calidad de los textos de biología encontrados.

Estas herramientas son métodos para la búsqueda de ideas y soluciones dentro de alguna de las dos metodologías descritas, “bottom-up” y “top-down”, pero de manera general tanto las herramientas como las propias metodologías están basadas en los métodos creativos descritos como analogías.

Otro aspecto a tener en cuenta es la similitud con otras metodologías de biomimética o biónica, donde nos encontramos con dos vías para dar comienzo al proyecto biomimético, primero en el que el punto de partida es un ser vivo que destaca por tener una característica de excelencia funcional, estructural, material, etc.... del que se puede aprender y obtener resultados aplicables a nuestro proyecto para el diseño de un artefacto y un segundo en el que una necesidad técnica debe ser resuelta y se busca la abstracción de una solución natural que sea extrapolable a nuestro diseño.

En el caso del estudio de la biología y la naturaleza se enriquece el conocimiento y esas bases de datos o de referencia se incrementan y dan la posibilidad de generar nuevos conceptos de producto, teniendo mayor innovación. En el caso de partir de un problema técnico se utilizan las bases de datos como fuente de conocimiento, en el caso de no obtener respuesta se plantea una investigación biónica y se vuelve al primer caso.

### 2.5.6 BIOTRIZ

BioTriz es una metodología desarrollada por Vincent (2007), en la Universidad de Bath, Reino Unido, en la que se conjuga el conocimiento de la biología con la técnica del TRIZ, teoría para la resolución de problemas inventivos. BioTriz se plantea como una herramienta de uso sistemático para la resolución de problemas técnicos basando las soluciones en soluciones análogas encontradas en la naturaleza, en la base de patentes naturales como describen sus creadores.

TRIZ es bien conocido por su éxito en la transferencia de invenciones y soluciones de un campo de la ingeniería a otro. Dado que el objetivo principal de la biomimética es también la transferencia de funciones, mecanismos y principios de un campo a otro, TRIZ parece el punto de partida ideal.

TRIZ es una colección de herramientas y técnicas, desarrolladas por Genrich Altshuller y Rafik Shapiro, que garantiza la correcta definición de un problema a nivel funcional y proporciona indicadores para conseguir exitosas y en ocasiones innovadoras soluciones.

En la etapa de definición, se utilizan una serie de técnicas para asegurar que el problema está dentro de su correcto contexto, un simple cambio de contexto puede solucionar el problema, después se enumeran los recursos disponibles. El problema es caracterizado por un par de características opuestas o contradictorias, por lo general “que es lo que quiero” y “que me impide conseguirlo, este se puede comparar con pares de características derivadas de otros problemas ya resueltos, hallados en la exploración y análisis de más de tres millones de patentes. Por lo tanto, TRIZ se convierte en un vehículo adecuado para la identificación de funciones y transferirlas de la naturaleza a la técnica.

En el siguiente gráfico (figura 2.22) se ve esquemáticamente como se plantea el método TRIZ, una vez definido y detallado nuestro problema se relaciona con una serie de problemas análogos con una serie de características en común, no iguales necesariamente, estos problemas estándar tienen una solución estándar, dichas soluciones son posibles soluciones para nuestro problema que tendrán que ser transformadas y adaptadas a nuestro caso concreto, todos los problemas y soluciones estándar provienen de patentes que se caracterizan por contener principios inventivos que se pueden traducir y extrapolar a otros campos de aplicación para generar nuevas soluciones e innovaciones.



Figura 2.22: Esquema simplificado del proceso TRIZ.

TRIZ ha evolucionado y se basa en una matriz de 40x40, a modo de tabla de doble entrada, en la que los 40 principios inventivos son los elementos que acercan la analogía. En BioTriz esta matriz se ha simplificado para poder aislar los campos que afectan a la biología, estos campos son la información, la energía, el tiempo, el espacio, la estructura y la sustancia o material.

En la metodología BioTriz es necesario demostrar que la introducción de la biología en TRIZ no comprometa su capacidad para resolver problemas de ingeniería, y sin embargo lo haga compatible con las soluciones naturales a los problemas diversos de la biología. Para ello se define el siguiente proceso:

- Definir el problema de manera general, pero precisa. Es esencial evitar que se establezcan direcciones específicas del pensamiento o de solución del problema de manera prematura. También se debe evitar la terminología especial, ya que inevitablemente limita el espacio de pensamiento a lo próximo y conocido.
- Analizar y comprender el problema para descubrir los principales conflictos o contradicciones. Los conflictos técnicos se identifican y enumeran en la matriz TRIZ. Después se busca la analogía funcional en la biología en la matriz de conflictos biológicos.
- Se comparan las soluciones propuestas por la biología y TRIZ. Las soluciones comunes para los campos de ingeniería y biología, entonces se hace un listado de los principios técnicos y biológicos recomendados.
- Basándose en estos principios y soluciones comunes se construye un puente de lo natural al diseño técnico.
- Para crear una tecnología completamente nueva, añadir a los principios básicos del TRIZ algunos puramente técnicos o puramente biológicos.

Este proceso combina los resultados de la solución puramente técnica usando la matriz TRIZ de 40 principios con los resultados coincidentes en la matriz reducida de los campos de la biología, como en otras técnicas y metodologías es necesario hacer una traducción y adaptación del resultado natural al técnico.

Es una metodología que no resulta fácil de aplicar, por la necesidad de la base de datos biológica, por la necesidad de hacer definiciones iterativas de listados de funciones o principios para la matriz TRIZ o la matriz biológica y por último por la necesidad de hacer una

transformación de los resultados al propio diseño. Sin embargo, conceptualmente es una buena respuesta a la utilización de las soluciones naturales en el mundo de la tecnología.

Esta metodología se basa en el conocimiento de la biología, es decir, sin una base de datos de resultados y soluciones de la naturaleza no es posible aplicarla, ya que solo no permitiría obtener principios y resultados estrictamente técnicos. Este hecho es conflictivo ya que condiciona las búsquedas, aquellas que ya tienen resultados son fáciles de aplicar, en caso contrario necesita de una investigación biónica como en otras metodologías. Por otra parte los resultados de estas investigaciones biónicas o biológicas enriquecen la base de datos e incrementan el conocimiento para futuras aplicaciones y proyectos.

### **2.5.7 HELMS, CENTRE FOR BIOLOGICALLY INSPIRED DESIGN**

Un estudio llevado a cabo en el Instituto Tecnológico de Georgia, en Atlanta EE.UU, entre Design Intelligence Lab, School of interactive Computing y el Center for Biologically Inspired Design (Helms 2009), ha establecido una nueva metodología para el desarrollo de proyectos de diseño biológicamente inspirados, proporcionando resultados que plantean mejoras en el proceso de diseño, las técnicas empleadas e incrementan el conocimiento en diseño. Como ya se ha expuesto en el apartado de definiciones, se puede hablar de diseño biológicamente inspirado o de biomimética como un tema único y común, solo existen diferencias en el tipo de denominación según los investigadores que escriben sobre el tema.

En este estudio se establece un marco en el que se han determinado unas características que hacen que el estudio del diseño inspirado biológicamente o biomimética tenga un mayor interés, estas características muestran la realidad y las dificultades de este tipo de proyectos, los requisitos y las restricciones para conseguir éxito y definir una metodología aplicable. Estas características también definen una metodología más descriptiva y orientada a la aplicación de inspiración biológica en el diseño, exponiendo qué hay que hacer en vez de cómo hay que hacerlo, más típico de los modelos normativos expuestos en otras metodologías.

Son cinco características que responden a diferentes aspectos como la interdisciplinariedad de las personas involucradas en el proyecto, ya que es necesario tener especialistas en el campo de la biología y de la ingeniería. Este carácter interdisciplinar implica un reto en la comunicación, dado que son dos disciplinas muy distintas, el uso de lenguajes distintos obliga a establecer una correcta comunicación, incluso el empleo de un nuevo código común a ambas. La tercera característica hace referencia los métodos de investigación, en ambas disciplinas se buscan cosas distintas, el biólogo investiga como la naturaleza desarrolla sus diseños, y el ingeniero busca nuevos problemas y retos para solucionarlos a través del diseño.

Otra característica es que los diseños de la naturaleza son más multifuncionales e interdependientes que los típicos de ingeniería, por muy pequeño que sea el ser vivo, incluso en las plantas, es capaz de desarrollar funciones más complejas y complicadas, además de utilizar relaciones o vínculos entre los diferentes sistemas que los componen. La última característica diferencia entre los recursos y procesos que son necesarios en el diseño de un individuo o elemento en uno y otro ámbito, esta es una razón por la que se estudia frecuentemente el desarrollo de nuevos materiales basados en materiales o compuestos de la naturaleza, y sus procesos más eficientes y eficaces.

La metodología define el proceso de diseño biológicamente inspirado desde dos enfoques o puntos de partida, cuando el proceso es iniciado por la definición de un determinado problema o bien cuando el proceso es dirigido por una solución encontrada en la naturaleza. Observando estos puntos de partida se puede decir que la metodología es análoga a las vistas anteriormente, pero en su desarrollo y aplicación tiene algunas diferencias en el modo de trabajo y ante todo en la definición tanto del problema como de la solución para poder encontrar una solución o aplicación inspirada biológicamente.

### **2.5.7.1 Proceso de diseño bio-inspirado dirigido por un problema dado**

Este tipo de proceso es no lineal y dinámico en el sentido de que los resultados de las fases posteriores con frecuencia influyen en las fases anteriores, proporcionando una retroalimentación iterativa y bucles refinamiento. Las fases del proceso son las siguientes:

- Fase 1: definición del problema
- Fase 2: replantear el problema
- Fase 3: buscar la solución biológica
- Fase 4: definir la solución biológica
- Fase 5: extracción del principio de la solución biológica
- Fase 6: aplicación del principio para la solución del problema

Este proceso es muy similar a los procesos creativos de generación de ideas y resolución de problemas, la diferencia se encuentra en la búsqueda de ideas y soluciones en el entorno natural. Los proyectos de diseño y desarrollo de producto se caracterizan por ser procesos creativos de resolución de problemas o búsqueda de mejoras en el producto, estos procesos creativos se inician con el reconocimiento de un problema y su replanteamiento. Esta primera fase, en el proceso arriba descrito, se basa en la definición del problema por medio de dos técnicas, la descomposición funcional y la optimización funcional.

La descomposición funcional permite descomponer una función compleja. Esta función o grupo funcional se consigue gracias a varias funciones o sub-funciones, que en diseño llamamos funciones secundarias o auxiliares. Los sistemas biológicos son complejos, multifuncionales e interconectados por lo que es difícil obtener una función sencilla, es necesario estudiar el conjunto para obtener la función deseada, tal y como ocurre en productos complejos que tienen grandes grupos funcionales y necesitan interrelacionar sistemas.

La optimización funcional define una función o grupo de ellas como una ecuación para optimizar el problema, el diseñador analiza las posibles soluciones según un criterio que evalúa el cumplimiento de la función respecto a su optimización. En biología también es posible definir ecuaciones para encontrar el óptimo del desarrollo de una función, determinando los factores que afectan positiva o negativamente a la consecución de esa función, por ejemplo en el crecimiento de una planta la cantidad y calidad de los nutrientes, cantidad y tipo de radiación solar son factores que equilibrándolos darán un óptimo.

En la fase de redefinición se plantea como una “biologización” del problema, en la que éste se reescribe como una pregunta, ¿cómo consigue la naturaleza dar solución a una determinada función?

En la búsqueda de la solución biológica se aplican cuatro técnicas, el cambio de restricciones o limitaciones, la adaptación del “campeón”, la variación dentro de una familia de soluciones, y la multifuncionalidad. Todas estas técnicas son por observación de la naturaleza, donde podemos ampliar el campo y generalizar la definición del problema, encontrar un caso extremo de adaptación a las peores condiciones, elegir entre un grupo de soluciones que varían ligeramente entre ellas, o descubrir seres vivos que son capaces de con una única solución resolver múltiples problemas simultáneamente.

El resto de las fases son comunes a otras metodologías, una vez encontrada la solución en la naturaleza se redefine para poder extraer el principio en forma de solución neutra aplicable al problema para, por último, adaptarlo a nuestro problema inicial por medio de una interpretación del principio, y traducción al nuevo dominio con sus restricciones y limitaciones de modo que podemos diseñar nuestro objeto con una serie de soluciones validas, es frecuente que en la fase de diseño se puedan aplicar varias soluciones, seleccionando las mejores, lo que se denomina analogías compuestas, este termino de analogías compuestas no es muy frecuente en otras metodologías.



### 2.5.7.2 Proceso de diseño bio-inspirado dirigido por una solución encontrada

Este tipo de proceso comienza con una solución biológica, de la que se extrae un principio, estudiado en profundidad, para después encontrar problemas a los que el principio podría ser aplicado. En general, el proceso de diseño de la solución impulsada por inspiración biológica sigue los pasos que se indican a continuación:

- Fase 1: Identificación de la solución biológica. Aquí, los diseñadores comienzan con una solución particular biológica en mente, es un proceso intuitivo.
- Fase 2: Definir la solución biológica. Análoga al proceso anterior.
- Fase 3: Extracción del principio. Análoga al proceso anterior.
- Fase 4: Replantear la solución. Análoga al proceso anterior, pero en este caso, replantear fuerza a los diseñadores a pensar en términos de cómo los humanos podrían hacer útil la función biológica replantead.
- Fase 5: Búsqueda de un problema concreto al cual aplicar la solución. En la búsqueda del problema se puede incluir la definición de problemas completamente nuevos. Es decir nuevos conceptos de producto.
- Fase 6: Definición del problema. Análoga al proceso anterior.
- Fase 7: Aplicación del principio. Análoga al proceso anterior.

Ambos procesos tienen puntos comunes, la diferencia radica en la secuencia y orden de aplicación, siendo el punto de partida diferente, el proceso se ve condicionado. Una observación clara es que en este segundo proceso la solución detectada y utilizada como directriz de proyecto, condiciona y marca las restricciones para el resto de los pasos, a diferencia del primer proceso en que la definición de un problema permite la búsqueda de varias soluciones en la naturaleza y es la elegida la que fija el resto del proceso. A modo de conclusión se puede decir que una vez se llega a la fase de determinar la solución el proyecto se fija y se establece una única vía de trabajo.

La mala definición de problemas, para ambos procesos, implica que la aplicación del principio natural en la última fase pueda no ser adecuada, también una mala interpretación y redefinición del principio encontrado en la naturaleza. Este tipo de procesos tienen un problema muy común en diseño y creatividad, la reducción de la incertidumbre, en la toma de decisiones queda aún cierta incertidumbre que hace que el paso de una fase a otra no esté completamente definido. La incertidumbre se genera por problemas con mala definición o interpretación. Esta es una de las razones por lo que este tipo de procesos, relacionados con biomimética, no son utilizados intensivamente, son procesos exploratorios y no normativos, es decir, el resultado final no es garantía de éxito. Por el contrario, son procesos que proporcionan soluciones más innovadoras y que pueden resultar en la obtención de soluciones originales que aplicadas planteen mejoras respecto a otros procesos como el normativo.

## 2.6 POSIBILIDADES DE APLICACIÓN EN LA INNOVACION DE PRODUCTOS

El diseño industrial es una herramienta de innovación de producto, la actividad de diseño se entiende como una forma de conseguir objetivos de mejora de productos por medio de su funcionalidad, estética, ergonomía, uso adecuado de los materiales, procesos de fabricación alternativos y más eficientes, reducción de costes en toda la cadena de valor del producto, entre otros muchos factores. La biónica y biomimética permiten aproximar nuevas soluciones al campo del diseño industrial, estas soluciones encaminadas a conseguir productos más creativos y diferenciados pueden generar innovación. La biomimética es un recurso útil y de éxito en la búsqueda de inspiración para la resolución de problemas de ingeniería, desde los más simples como unas aletas natatorias hasta los más complicados como la imitación de materiales compuestos para aplicaciones con solicitaciones mecánicas muy severas.

Se han creado tablas, base de datos, listas de principios, etc., que establecen las analogías, similitudes, o relaciones entre las características de la naturaleza y aquello que el hombre puede aplicar a sus artefactos, todas estas tablas tienen en común la búsqueda de la superación del estado de la técnica actual. Habitualmente las analogías o inspiraciones se plantean tomando la biología y la naturaleza como un modelo, que se puede analizar y del que extraer sus principios para transformar las capacidades de lo natural en las capacidades técnicas o ingenieriles.

La biomimética es aplicable a la innovación en general y al diseño de productos en particular, por cualquiera de sus características como el cuerpo, los huesos, los esqueletos y exoesqueletos, el cerebro y la inteligencia, los sentidos, los músculos y sistemas para generar energía, o sistemas de eliminación y excreción que se corresponden con sistemas o productos multifuncionales, estructuras y elementos de soporte, el ordenador y la inteligencia artificial, sensores, actuadores y acumuladores de energía y eliminación de materiales y reciclado. Además es necesario hacer hincapié en la factibilidad de hacer innovación por los elementos clásicos del diseño, la función, la forma y el uso de los materiales, donde es posible encontrar muchos ejemplos de aplicaciones formales y de materiales pero menos casos de funciones teniendo un gran campo de desarrollo.

La innovación es posible y aplicable por la integración de biomimética en el proceso de diseño, formando parte de una metodología, a todos los niveles desde los más básicos, por asimilación de una forma o geometría, hasta los más complejos y sofisticados como sistemas de detección y decisión por medio de inteligencia artificial.

La investigación abre camino a la innovación, la posibilidad de asimilar resultados eficaces y óptimos de la naturaleza genera conocimiento y avance tecnológico, permite crear aplicaciones nuevas y sobre todo la opción de desarrollo, en gran número de casos el estudio exhaustivo de un individuo vivo permite conocer a fondo un principio básico que puede ser aplicado en múltiples productos gracias a los diferentes desarrollos llevados a cabo, un buen ejemplo es el estudio de la piel del tiburón que ha generado múltiples aplicaciones en diferentes entornos, por sus características de crear una capa seca, no proliferación de bacterias y microorganismos, reducción de fricción, para crear bañadores y tejidos impermeables bajo el agua o film plástico con una micro-estructura que se caracteriza por ser antibacteriana y poder proteger instrumental y carcasas de equipamiento médico para quirófanos y salas blancas.

En la gran diversidad temática de las investigaciones biónicas actuales se destacan las siguientes direcciones: neurobiología, sistemas analizadores e inteligencia artificial, orientación y defensa, biomecánica y bioenergía, arquitectura y diseño, que es nuestro campo.

### 2.6.1 Mecanismos inspirados biológicamente

Existen conocidos resultados en mecanismos inspirados biológicamente como los motores lineales, actuados por dos frenos en los extremos y un elemento de elongación o extensión imitando el movimiento de larvas y gusanos (figura 2.23), con una precisión nano-métrica se utilizan en instrumentación médica y aparatos de resonancia magnética (Bar-Cohen 2006-b).

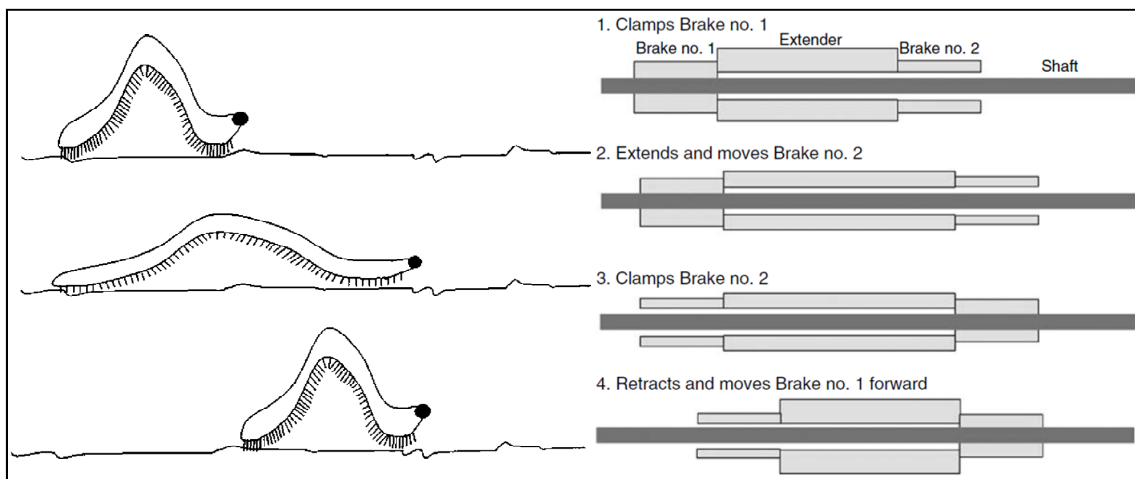


Figura 2.23: Motores lineales basados en el movimiento de gusanos y miriápodos (Bar-Cohen 2006-b).

Los mecanismos de bombeo en la naturaleza también son un buen modelo para dispositivos de bombeo de fluidos, como los movimientos peristálticos de los intestinos que mueven fluidos en una determinada dirección (figura 2.24), que han dado como fruto la bomba peristáltica utilizada en diálisis o dosificadores industriales.

También el corazón como órgano que es capaz de bombear a través de cámaras y válvulas dando paso a vasos donde la presión es menor siendo aplicación para las válvulas anti-retorno, muy interesante en aquellos casos extremos como en las jirafas, donde el bombeo, circulación y retorno implican un sistema muy complejo y sofisticado (Vogel 2003).

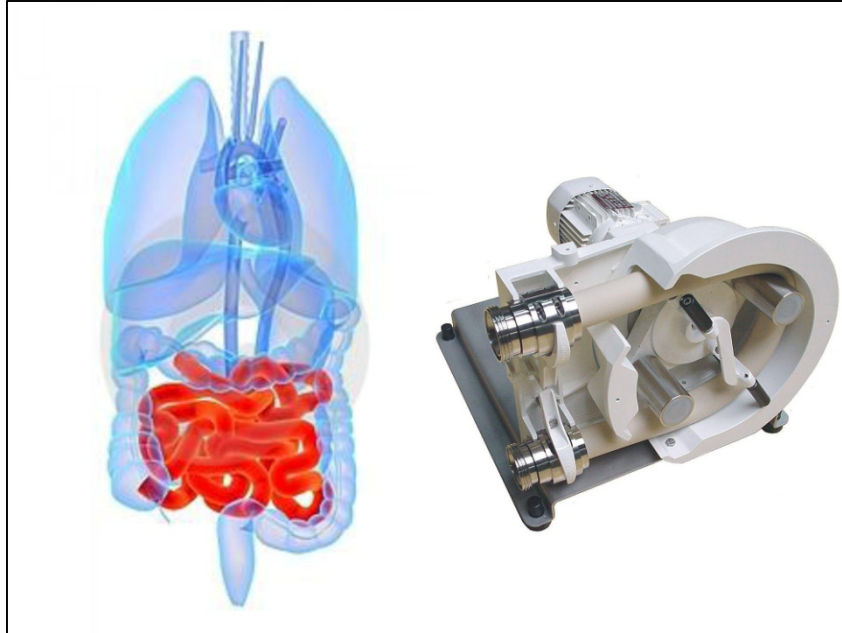


Figura 2.24: Bomba peristáltica basada en los movimientos del intestino.

La adhesión voluntaria, seca o húmeda, es conseguida por muchos organismos por medio de diferentes mecanismos, por interacción capilar como hacen algunos escarabajos que utilizan aceites como adhesivo además de cerdas o pelillos que los mantienen adheridos a la superficie, es el caso del escarabajo tortuga *Hemisphaerota Cyanea* que esconde sus patas bajo el escudo protector y se adhiere a la superficie aguantando fuerzas 60 veces superiores al peso de su cuerpo evitando así el ataque a las partes blandas por parte de sus depredadores.

El Gecko es el ejemplo más típico de adhesión seca, utiliza las fuerzas de Van der Waals que a pesar de no desarrollar mucha energía estando bien localizadas pueden ser muy efectivas como en el caso de una cinta adhesiva que puede soportar ligeras cargas en superficies verticales y horizontales invertidas rugosas o pulidas, incluso bajo el agua o en el vacío.

### 2.6.2 Estructuras inspiradas biológicamente

Los seres vivos pueden desarrollar estructuras o construcciones usando materiales que encuentran a su alrededor, como es el caso de los pájaros que construyen sus nidos, las abejas que producen cera para hacer panales o las arañas que tejen sus telas y ovillos con su muy resistente seda.

Las abejas construyen celdas hexagonales con una optimización del espacio y del uso del material, para conseguir una estructura altamente resistente siendo muy ligera, estas características muy deseables en el campo del transporte y la automoción han sido imitadas en paneles, alas de avión, pavimentos y muchos otros en los que se necesita cubrir una gran superficie manteniendo un peso ligero.

El hilo de seda de las arañas es aproximadamente siete veces más resistente que un hilo de acero del mismo calibre o cinco veces para un mismo peso, esto hace que se haya estudiado su seda y sus aplicaciones, una aplicación o símil de la tela de araña ha sido la red de pesca, observando cómo la tela de araña es una trampa para capturar presas que tratan de pasar a través se han tejido redes de distintos tipos y aplicaciones, aunque el principal objetivo hoy en día es investigar en la síntesis de la proteína que permite generar ese hilo de araña y las posibilidades que esto ofrece.

Para crear estructuras más resistentes se desarrollan materiales compuestos, del mismo modo que ocurre en la naturaleza, donde se puede encontrar fibras y mallas que hacen de refuerzo mecánico que están unidas o pegadas. Estas estructuras se caracterizan por ser resistentes, flexibles y ligeras, siendo muy interesante para aplicaciones deportivas, de transporte o soportes estructurales.

### **2.6.3 Materiales inspirados biológicamente**

El hombre ha utilizado tradicionalmente todo tipo de materiales naturales, como alimento, vestimenta, herramientas, dedicados a la construcción, etc. Más allá, busca la obtención de características y prestaciones de los materiales naturales para su aplicación a los materiales artificiales producidos industrialmente, para conseguir cantidades que satisfacen en número lo que los materiales naturales no pueden. Además el hombre busca la posibilidad de diferenciación, dotar de acabados, combinaciones y compuestos que permiten mejorar las aplicaciones, mientras la naturaleza utiliza tan solo unos pocos materiales el hombre genera nuevos compuestos con aplicaciones específicas.

Algunas de las prestaciones de los materiales naturales que podrían generar materiales muy innovadores son la capacidad de auto-reparación, auto-replica, reconfigurabilidad, equilibrio y resistencia química y la posibilidad de ser multifuncionales.

En el campo artificial se busca utilizar eficazmente sus recursos, además de la utilización de la energía de manera eficiente, incluyendo su reciclaje, al igual que en la naturaleza, con el objetivo de ser multifuncional en materiales y estructuras. El uso de materiales en la naturaleza que tienen capacidad de realizar múltiples tareas permite la existencia de seres

vivos con un peso corporal inferior. Los conceptos de materiales y estructuras multifuncionales están siendo estudiados por muchos investigadores e ingenieros. Cada vez más, se están haciendo esfuerzos para emular esta característica cuando se utilizan varias disciplinas incluyendo ciencias de los materiales, mecánica aplicada, electrónica, la fotónica y la fabricación.

#### 2.6.4 Funciones inspiradas biológicamente

Como se ha comentado anteriormente un campo de generación de nuevos conceptos de producto está en las nuevas aplicaciones funcionales, un ser vivo gracias a la evolución es capaz de desarrollar nuevas funciones, incluso crear órganos, sistemas y estructuras dedicadas a ese fin, del mismo modo los diseñadores deben tener la capacidad de encontrar nuevos productos, que gracias a su funcionalidad sean capaces de destacar y liderar su entorno, el análisis y detección de nuevas y mejoradas funciones es un punto de partida para lograr innovación.

Como ejemplo podríamos citar la función camuflaje, que en la naturaleza es aplicada por muchos seres vivos como el pulpo, la sepia, el camaleón e insectos entre otros y en campo artificial es desarrollado por productos militares y de defensa.

Pero también con aplicaciones en el ámbito de la generación de imágenes y cambios súbitos de mensaje por el cambio de la piel o la superficie exterior, o bien para tratar de crear superficies transparentes o recreación de la invisibilidad, como en el laboratorio Tachi de realidad virtual y telexistencia, de la Keio University. En su trabajo, más cercano a la ciencia ficción como en la película “Predator”, trabajan el camuflaje o una invisibilidad parcial como un efecto aplicable a superficies, esto nos hace reflexionar sobre cuál será la próxima aplicación (figura 2.25).



Figura 2.25: Experiencias de invisibilidad, mimetismo y camuflaje, Universidad de Keio.

Una función desarrollada en la naturaleza con un fin determinado puede tener una aplicación distinta en nuestros artefactos, y esa es precisamente la aplicación tan valiosa de la biomimética, la capacidad de extraer una función de un entorno y aplicación determinado y extrapolarlo a lo artificial.

El análisis funcional de los objetos permite la búsqueda de nuevos conceptos de producto, la naturaleza puede ser respuesta directa, o un elemento de influencia en el desarrollo de una nueva aplicación, es aquí donde se unen creatividad, funcionalidad y naturaleza, para crear nuevas ideas de producto. En los procesos en los que se buscan soluciones basadas en la naturaleza, la definición de funciones responde a una necesidad del producto a diseñar, por otro lado es posible determinar otras funciones que son clave en la naturaleza y que pueden constituir nuevas aplicaciones de producto, y éstas son la que potencialmente pueden generar innovación.

### 2.6.5 Formas inspiradas biológicamente

La inspiración formal ha sido un recurso efectivo tanto en diseño como en arquitectura, como referente volumétrico y ornamental, que ha evolucionado en el tiempo pasando del concepto de evocación de la forma al concepto de sostenibilidad. Hoy en día se adaptan las formas naturales a los productos y edificios para hacer mejoras en la utilización de los recursos materiales y energéticos, ser más eficientes por ofrecer menor resistencia, ser más ergonómicos y óptimos en la adaptación al usuario y entorno o como una cuestión estética.



Figura 2.26: Formas orgánicas con influencias de radiolarios en productos, (Ross Lovegrove 2006, 2005).

Una tendencia actual hacia el eco-diseño define una serie de rasgos en los productos en los que la forma se empieza a caracterizar cada vez más, un ejemplo es el trabajo del diseñador inglés Ross Lovegrove, que integra la forma orgánica en todos sus elementos, tanto de



mobiliario como de iluminación o productos de consumo, además de impregnar de un mensaje de ecológico (figura 2.26).

### 2.6.6 Otras inspiraciones biológicas

Además de mecanismos, estructuras, materiales, funciones y formas, aspectos fundamentales en el diseño de producto existen otros temas que basados en la inspiración biológica o en la biomimética, tales como la inteligencia artificial, los bio-sensores, la robótica, mecanismos de defensa y ataque, el interfaz hombre-máquina o la investigación espacial que son campo de estudio para la innovación.



Figura 2.27: Stickybot basado en el gecko y sus habilidades, Universidad de Stanford.



Estos temas involucran un alto grado de especialización y si bien detrás de todos ellos hay prototipos, artefactos, sistemas, productos u otros que necesitan del diseño industrial para su resolución y fabricación este no es el objetivo primordial sino una consecuencia, el diseño será un factor de definición final, de detalle, como se ha visto de ejemplo en muchos trabajos de investigación de universidades e institutos.

Un ejemplo representativo es el “StickyBot” o “gecko robot” basado en la salamandera y desarrollado en las Universidades de Berkeley y Stanford, EE.UU, por el biólogo Robert Full (figura 2.27), capaz de subir por superficies verticales, lisas o rugosas, con la intención de desarrollar la distribución de pies o soportes de los robots con capacidad de andar en todo tipo de terreno para el futuro, pies que podrán estar dotados de sensores y sistemas artificiales para poder desarrollar nuevas funciones.

Es por este motivo por lo que el tema de esta Tesis es la investigación en metodología de diseño y su relación con la biomimética para hacer innovación, sin necesidad de hacer investigación biológica, la biología se utiliza como una herramienta y se aplica al diseño por el conocimiento actual.

Otros trabajos podrían orientarse a la investigación en temas concretos de biología para su aplicación en diseño de productos lo que implica una metodología de trabajo distinta, es importante aclarar que existen tres ámbitos distintos de trabajo en biomimética, la investigación biológica, la investigación ingenieril o de diseño y el industrial, los dos primeros se realizan en universidades e institutos de investigación y el ámbito industrial que se desarrolla en las empresas, en todos ellos es necesaria la innovación bien para la transferencia de conocimiento o por el desarrollo de nuevos y mejorados productos.

**CAPITULO 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO INDUSTRIAL**

### 3.1 DEFINICIÓN DE DISEÑO INDUSTRIAL Y DESARROLLO DE PRODUCTO

Existen diferentes definiciones del término diseño y cada una de ellas tiene un significado propio dependiendo del ámbito de utilización, veremos pues que existen definiciones más validas y cercanas al objeto de esta Tesis pero que se incluyen otras que matizan y dan sentido a algunos aspectos particulares que posteriormente se desarrollaran.

La definición de diseño en el diccionario de la Real Academia de la Lengua (RAE 2001), entre otras acepciones, dice:

**Diseño.** (del it. *disegno*).

- m. Traza o delineación de un edificio o de una figura.
- m. Proyecto, plan. Diseño urbanístico.
- m. Concepción original de un objeto u obra destinados a la producción en serie. Diseño gráfico, de modas, industrial.
- m. **Forma de cada uno de estos objetos.** El diseño de esta silla es de inspiración modernista.
- m. Descripción o bosquejo verbal de algo.
- m. Disposición de manchas, colores o dibujos que caracterizan exteriormente a diversos animales y plantas.

La definición de diseño en el diccionario María Moliner (2007), dice:

**Diseño.** (del it. *disegno*).

- m. Dibujo previo a la realización de una cosa que se hace para tener una idea aproximada de cómo será en la realidad.

**Apunte, boceto, bosquejo, croquis, esbozo, esquema.**

Forma o aspecto exterior del objeto que ha sido previamente diseñado.

Acción o actividad de diseñar.

- Descripción de una cosa hecha con palabras a la ligera.

Se han destacado algunas de ellas, inicialmente con objeto de marcar el carácter industrial, la producción seriada que lo diferencia de la artesanía y que implica un método y forma de trabajo. También se denota la definición formal del diseño, la estética y el hecho de ser un factor sociocultural de reconocido valor que aporta diferenciación a los objetos, en este sentido se verá más adelante que la relación forma-función y el significado geométrico de las formas en la naturaleza es fuente de inspiración y generación de ideas en el proceso de innovación. Por último destacamos la referencia al diseño en la naturaleza, que en tantas ocasiones ha sido copia o fuente de inspiración ornamental, pero que en este trabajo se utiliza

como referente funcional, ya que cada diseño en la naturaleza atiende a una necesidad que ha sido perfeccionada a lo largo de los años de evolución.

Según la Real Academia Española de la Lengua 19 edición Ed.1970 (RAE 1970), la palabra Diseño proviene de la palabra latina designare que se identifica con señalar o destinar una persona o cosa para determinado fin. Como veremos en otras definiciones se plantea el fin o la meta como objetivo que forma parte de un progreso, concepto este que se definirá en detalle al hablar de los términos método, metodología y proceso de diseño.

Montaña (2003) concreta el concepto de diseño industrial cuando afirma que diseñar es “definir las características estructurales, fisonómicas y funcionales necesarias para que un producto pueda materializarse y cumplir su cometido con la máxima eficacia y calidad”.

Mañá (1974) sintetiza varias definiciones cuando afirma que el acto de diseñar “es una acción destinada a identificar alguna necesidad, deformación, omisión o defecto entre los objetos tal como quisieran las personas que fueran”. En esta definición se observa la referencia clara a la diferencia entre la necesidad y el deseo, que en ocasiones se confunde, y como los deseos del usuario deben convertirse en especificaciones de diseño, aspecto este que se desarrollara al definir algunos métodos y herramientas de diseño como por ejemplo el análisis funcional.

Existe una diferencia en la definición y uso del término diseño, en función de la lengua utilizada y su evolución histórica. En castellano el término hacía referencia a lo formal, llegando a utilizarse como adjetivo, pero se ha comenzado un cambio en el que ya no se describe la apariencia del objeto sino el objeto en su conjunto. En la definición anglosajona se define como la actividad de desarrollo de un producto desde su origen hasta su realización, teniendo más sentido y estando más próximo del término proyecto por la planificación, el desarrollo y la ejecución del mismo. Veremos entonces algunas definiciones de autores anglosajones.

La definición adoptada por el ICSID, International Council of Societies of Industrial Design, presentada y aceptada en el Congreso Internacional de 1961 celebrado en Venecia es la siguiente (ICSID 2012-b), “se entiende por diseño industrial la proyectación de objetos fabricados industrialmente, es decir fabricados por medio de máquinas y en serie”. En esta definición no se consigue determinar claramente la diferencia que existe entre la actividad de diseñador industrial y la tradicionalmente desarrollada por el ingeniero. Dicho de otra manera no indica donde empieza y dónde finaliza la tarea proyectual de uno y de otro, en el desarrollo de un producto fabricado industrialmente.

Es decir, que por esas fechas de manera subliminal podía apreciarse que no estaba resuelta la dicotomía entre formalismo y funcionalismo, identificándose todavía formalismo con diseño industrial y funcionalismo con ingeniería. Lo que si quedaba claro en la definición es que los productos no fabricados industrialmente no estaban en el campo de actuación del diseño industrial, es decir apartaba el arte y la artesanía.

A día de hoy la definición dada por ICSID es más acertada y cubre un mayor rango de actividades de diseño siendo más realista acerca de cómo es la profesión actualmente, (ICSID 2012-a) define el diseño como “Una actividad creativa cuyo objetivo es establecer las cualidades polifacéticas de objetos, procesos, servicios y sus sistemas en todo su ciclo de vida. Por lo tanto, el diseño es el factor central de la humanización innovadora de las tecnologías y el factor crucial del intercambio cultural y económico”. Esta definición incide en la actividad creativa e innovadora como factor de cambio y mejora en aspectos como la sostenibilidad y la ética ambiental, la ética social y cultural, la semiología y la estética.

También existen definiciones de diseño industrial como ciencia (Cross 2007, Hubka 1996), la actividad de diseñar como la reflexión y descripción de una estructura que potencialmente incorpora unas características deseadas. Pugh (1991) lo define bajo el término “diseño total” como la actividad sistemática desarrollada para satisfacer una necesidad, que cubre todas las etapas desde la identificación de la necesidad hasta la venta del producto. Pahl y Beitz (1995) lo definen como una actividad que afecta a casi todas las áreas de la vida humana, utiliza leyes de la ciencia, se basa en una experiencia especial y define los requisitos para la realización física de la solución.

Para Tomas Maldonado (1997), director de la escuela de diseño de Ulm, el diseño es una actividad cuyo fin es determinar cualidades formales de los objetos que producirá la industria. Estas cualidades formales no son solamente los aspectos externos, sino principalmente aquellas relaciones estructurales y funcionales que convierten un sistema en unidad coherente, tanto desde el punto de vista del fabricante como del usuario. El diseño industrial se extiende hasta abarcar todos aquellos aspectos del ambiente humano que se hallan condicionados por la producción industrial.

Exponiendo una definición más personal, generalmente se entiende por diseño una actividad multidisciplinar de investigación, análisis y desarrollo, estructurada y planificada con el fin de concretar y alcanzar unos objetivos previamente establecidos satisfaciendo una necesidad.

Esta definición es aplicable a multitud de proyectos desarrollados en los ámbitos de la fabricación de productos industriales y de consumo, de las industrias gráficas y publicitarias, la

escenografía, la moda, etc. Por esta razón debemos precisar algo más: nuestro campo de interés se va a centrar exclusivamente en el conocido como Diseño Industrial, esto es, de objetos destinados a ser producidos en serie para satisfacer necesidades de mercado, en este campo podemos diferenciar los productos de consumo, aquellos que van destinados al consumidor final, y los productos industriales, que son aquellos que forman parte de otros productos finales o van destinados a su incorporación en industrias o instalaciones.

Por otra parte nuestro interés también se centra en la definición de una metodología de trabajo en la que la innovación es clave para el diseño industrial, por dos aspectos, “lo nuevo”, todo aquello que aun no existe y puede ser posible y “lo bueno”, todo aquello que satisface una necesidad ya sea de demanda o generada.

La labor del Diseño Industrial es integrar en el proceso multidisciplinar de la planificación y desarrollo de los productos, funciones e informaciones de las ciencias, la técnica, la economía, la cultura, la sociología, la psicología, la ergonomía y la estética.

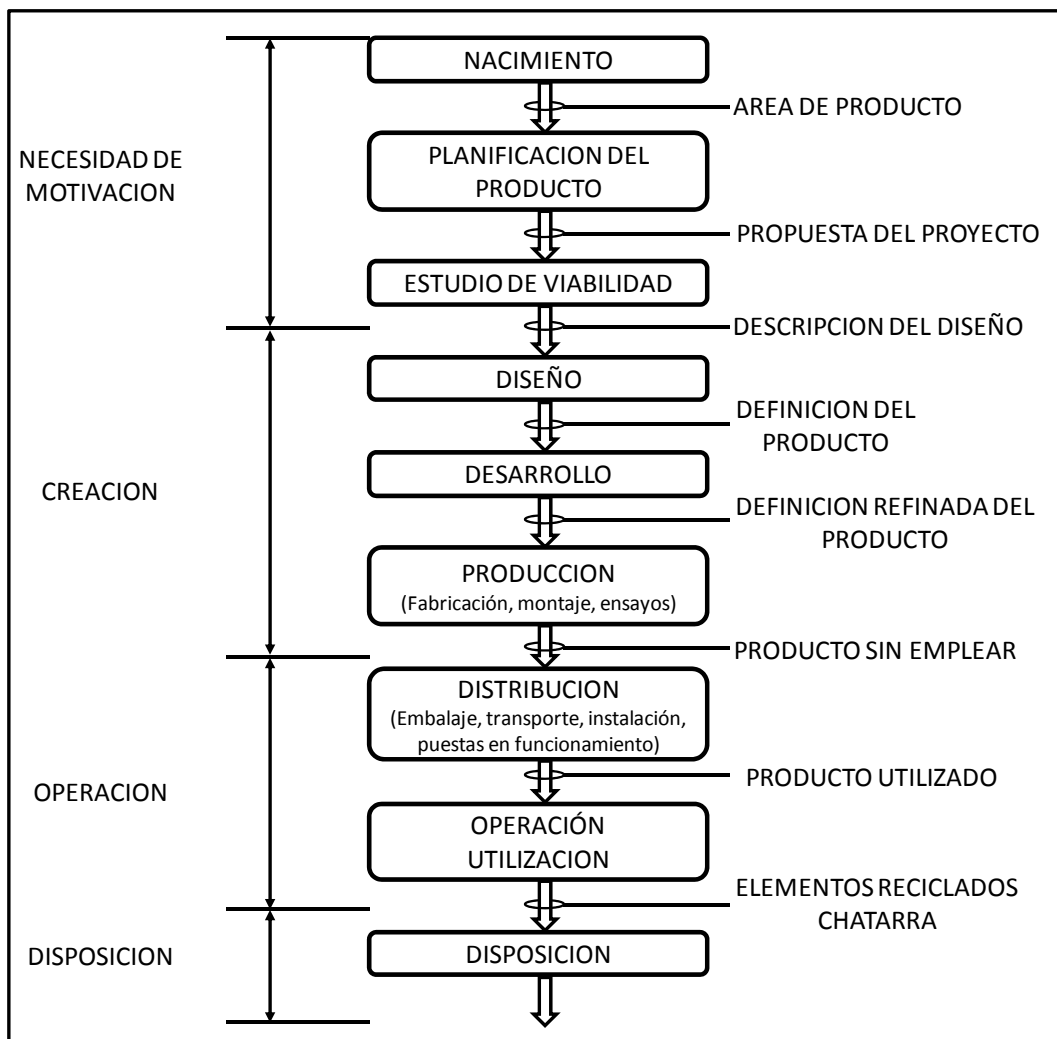


Figura 3.1: Evolución idealizada de un producto, UNE 66920-1:2000

Cabe hacer una puntualización sobre la diferencia entre los términos “diseño de producto” y “desarrollo de producto”, la principal diferencia está en el momento en que se llevan a cabo estas dos disciplinas, se inicia con el diseño para la definición del producto y después se hace el desarrollo para la formalización y ejecución del primero, como se aprecia en la figura 3.1. Tienen fines comunes con objetivos distintos y están temporalmente separados, aunque pueden solaparse sus tareas gracias a la ingeniería concurrente. Ambos tienen como finalidad la consecución del mejor producto posible, aunque los objetivos del diseño, entre otros, son la conceptualización y definición funcional, estética y dimensional del producto, así como la selección de materiales, procesos de fabricación, mientras que en el desarrollo de producto son la ejecución de esa definición teniendo en cuenta, realización de moldes, utillajes y similares para su correcta fabricación.

### **3.2 DEFINICIÓN DE PROCESO, MODELO, MÉTODO Y METODOLOGÍA**

Es necesario hacer la aclaración en la definición de estos términos, ya que pareciendo muy obvia su diferencia, en ocasiones, se malinterpretan y se utilizan erróneamente. Además existen términos como procedimiento, técnica o herramienta que pueden, en el uso coloquial, aparecer en un mismo contexto con poca diferencia de significado, creando confusión acerca de los términos y utilizando unos en lugar de otros.

Quizá la mejor diferenciación de todos estos términos, respecto al proceso de diseño, es la descrita por Martí (1999) donde define el diseño como una actividad que se desarrolla en el tiempo y debe contemplarse desde el punto de vista de su proceso, teniendo en cuenta que cada proceso es distinto y que tratar de definir todos y cada uno de ellos es una tarea que no serviría de gran cosa.

Define el proceso de diseño como el desarrollo temporal unidireccional desde un momento inicial en el que alguien tiene una idea hasta el momento final que nos muestra un resultado sin existencia previa, un artefacto - hecho con arte.

Su descripción de proceso en el diseño implica una confirmación del carácter procesual, camino recorrido a lo largo de un determinado tiempo, que sea aplicable a los casos pasados, presentes y futuros sin que sea algo trivial, que identifique aquellos momentos determinantes evidenciando no solo el flujo del propio proceso sino también las discontinuidades y conflictos. Resumidamente lo define como el paso de la idea al producto (figura 3.2), entendiendo producto como aquello que está hecho.

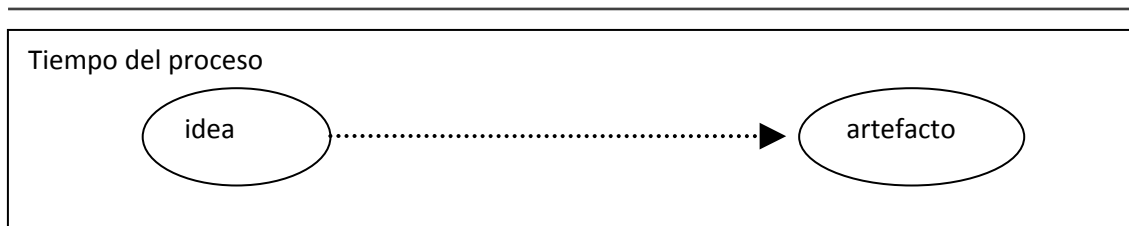


Figura 3.2: Representación del proceso de diseño desde la idea hasta la materialización.

(Fuente: Martí i Font 1999)

La capacidad de proyectar una idea y hacerla tangible ha hecho que el modelo sea una herramienta indispensable de planificación (Erholff 2008), por otra parte, su valor didáctico y comunicativo hace que sea un medio muy efectivo de enseñanza y explicación de conceptos. El término modelo no solo se utiliza para describir la estructura tridimensional, sino que se aplican de manera general para describir una extensa variedad de objetos, sistemas y procesos.

Podríamos definir modelo en diseño industrial como la representación construida de manera explícita o implícita de una unidad a la que el modelo sustituye para facilitar su explicación y reproducción (Martí 1999), y en ocasiones como la aplicación de un protocolo o pauta de actuación. Modelo de diseño es la representación del proceso que desarrolla el diseñador en su actividad. Los modelos de diseño se pueden enmarcar dentro del campo de la «investigación en diseño», cuyo objetivo es establecer nuevas formas o recomendaciones que potencien la eficiencia en el diseño.

La definición de método en el diccionario de filosofía de Ferrater Mora (2010), dice que se tiene un método cuando se dispone, o se sigue, un cierto camino para llegar a un fin determinado y propuesto de manera previa. El método se opone al azar y la suerte, ya que el método es un orden manifestado dentro de un conjunto de reglas. Si se puede llegar al mismo fin por suerte o por azar ya no es necesario el método, pero se ha evidenciado que ni la suerte ni el azar suelen llevar al fin propuesto, que el método es un camino que puede abrir otros de modo que, o bien, se consigue el fin de manera más plena que por medio del azar, o bien, puede incluir otros fines que no se habían precisado, además el método tiene o puede tener valor en sí mismo.

La metodología según Martí (1999) 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 particular. La metodología se puede entender como el metalenguaje de los métodos, la descripción general o específica de estos, su validación, el análisis de sus usos, el estudio y desarrollo de otros nuevos son los objetivos de sus investigaciones.



La capacidad de proyectar una idea y hacerla tangible ha hecho que el modelo sea una herramienta indispensable de planificación (Erholff 2008), por otra parte, su valor didáctico y comunicativo hace que sea un medio muy efectivo de enseñanza y explicación de conceptos. El término modelo no solo se utiliza para describir la estructura tridimensional, sino que se aplican de manera general para describir una extensa variedad de objetos, sistemas y procesos. Podríamos definir modelo en diseño industrial como la representación construida de manera explícita o implícita de una unidad a la que el modelo sustituye para facilitar su explicación y reproducción (Martí 1999), y en ocasiones como la aplicación de un protocolo o pauta de actuación.

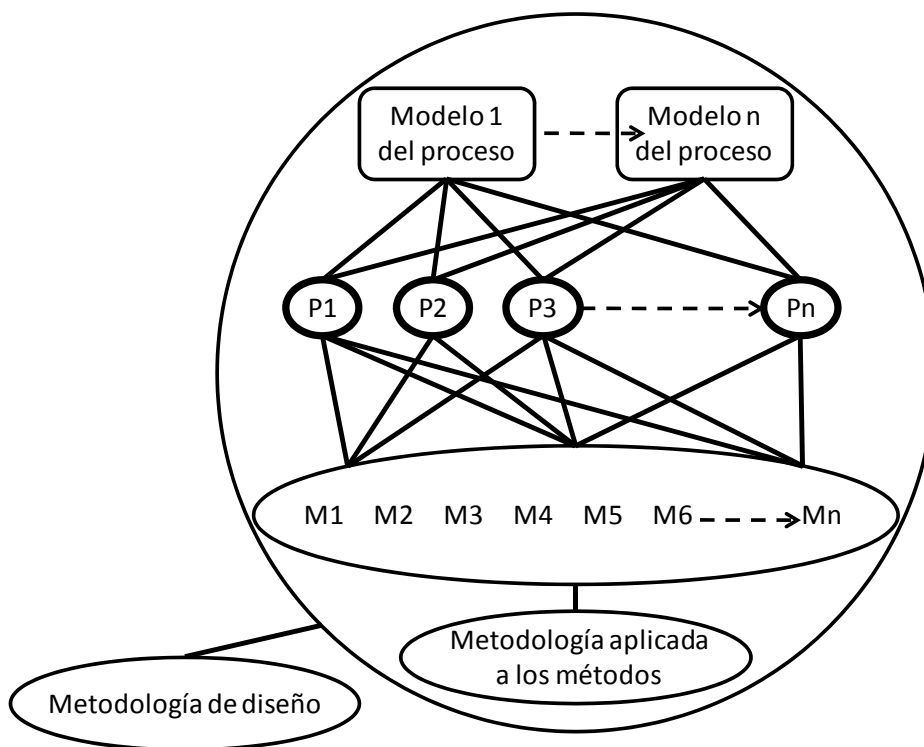


Figura 3.3: Esquema de relación entre los conceptos de modelo, proceso, método y metodología.  
(Fuente: Martí i Font 1999)

En la figura 3.3 se observa que los procesos pueden corresponder a varios modelos, como veremos más adelante en la definición de los diferentes modelos y su evolución histórica, con cada uno de estos modelos se pueden aplicar a diferentes procesos reales dependiendo del proyecto concreto que se esté desarrollando y para cada uno de estos procesos podemos utilizar los diferentes métodos conocidos, la aplicación concreta y uso de estos métodos a lo largo del proceso de diseño es lo que denominamos como metodología.

El termino encargo lo debemos entender de manera genérica como la solicitud de llevar a cabo un proyecto para conseguir satisfacer unos objetivos. Si esta solicitud parte de un tercero, un cliente independiente, se trata de un encargo. Si la solicitud es personal, para uno mismo

siendo su propio cliente, entonces se trata de un auto-encargo. En este trabajo de investigación se plantean proyectos como auto-encargos, en los que los objetivos llegan a la definición de unos resultados hasta el nivel conceptual del diseño. Sin embargo en los encargos los objetivos llegan hasta una solución de diseño y en ocasiones hasta el desarrollo final de producto.

El proyecto de diseño y desarrollo de producto comienza con el encargo inicial, que surge de una necesidad o deseo detectado, en este encargo inicial pueden existir múltiples hipótesis de cómo terminara siendo el proyecto, por esta razón es necesario comenzar por documentar y analizar lo ya existente.

El control del diseño y control del contexto nos permite realizar la selección de hipótesis en varias etapas por medio de procesos divergentes y convergentes que amplían el campo de posibilidades, los procesos divergentes-convergentes son similares a los desarrollados en técnicas de creatividad. Una vez llegado al punto final se puede concretar en una hipótesis final de la cual se pueden obtener infinitas soluciones de desarrollo.

A medida que el proyecto se desarrolla en el tiempo el número de hipótesis se multiplica hasta un número muy elevado, situación de máxima abstracción, momento en el cual se necesita comenzar con la toma de decisiones para la concreción de una solución que se desarrolle hasta el punto final en qué terminara siendo un producto en el mercado (figura 3.4).

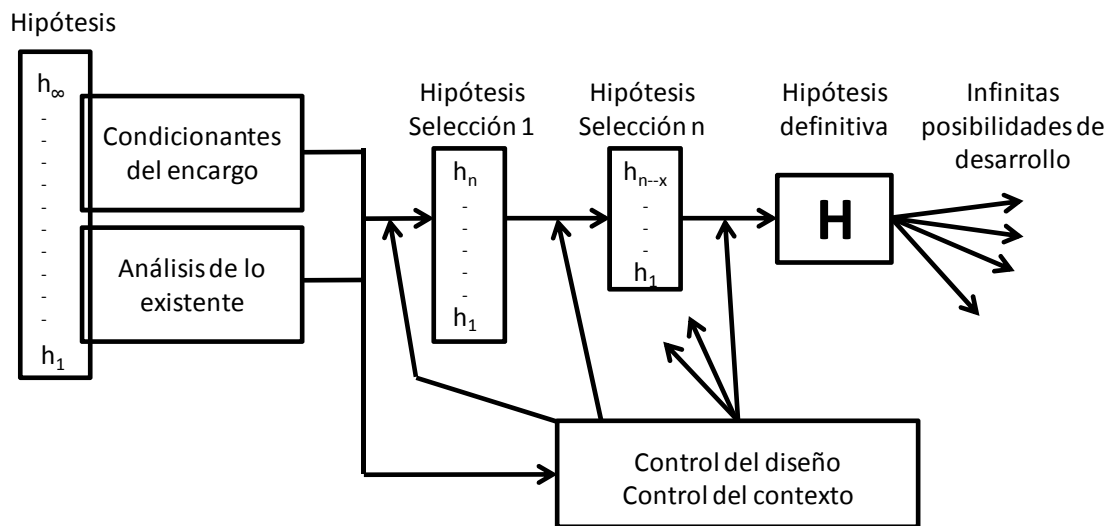


Figura 3.4: Esquema de proceso de diseño, control de diseño y del contexto. (Fuente: Martí i Font 1999)

En toda esta metodología se establecen diversos métodos como estudios, análisis, búsqueda y detección, evaluación y selección en las primeras fases hasta llegar al momento de la toma de decisiones en que se utilizan maneras de concreción, valoración y síntesis de las hipótesis.

### 3.3 NORMALIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO

Se exponen, a modo normativo, los procesos más comúnmente utilizados en la actualidad. La primera norma sobre proceso de diseño está basada en la norma VDI 2221 -Verein Deutscher Ingenieure, también la UNE 66920-1:2000 y por último en la guía para la gestión del diseño de producto del estándar británico BS 7000-2:2008 (British Standards Institution 2008).

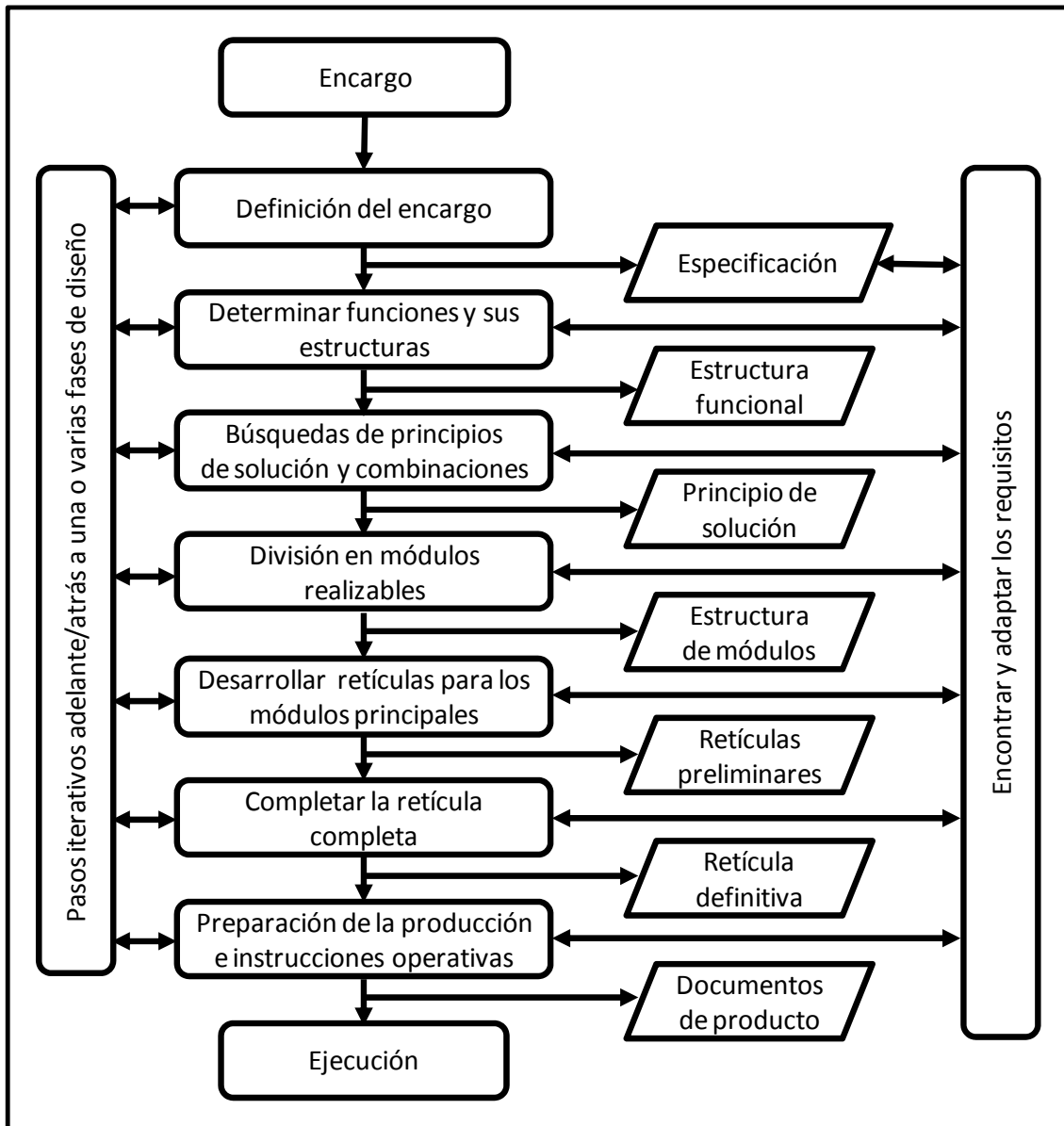


Figura 3.5: Esquema de proceso de diseño de producto según VDI 2221.

Todas estas normas tienen en común la fase inicial de definición de proyecto, donde se establece el brief de diseño, que da lugar a las fases de diseño conceptual, de desarrollo y de detalle, para terminar con la generación de la documentación técnica que sirva para la preparación de la industrialización del producto. Ninguna de estas normas se aplica o sigue de forma exacta y estricta, se adaptan para la mejor obtención de los objetivos descritos.

En el caso de la VDI 2221 alemana, se inicia el proceso con una definición funcional, clasificada y estructurada jerárquicamente, de la que se obtienen principios de solución (Tomiyaama 2009). Estos principios de solución serán con los que crear una estructura modular en la que se plantean las retículas preliminares que serán desarrolladas para producir la documentación técnica del producto diseñado. Esta norma se basa en la definición de conceptos por medio de módulos funcionales que cumplan con los requisitos definidos inicialmente (figura 3.5).

Esta es la mayor diferencia con respecto a las otras dos normas analizadas en las que la definición de funciones viene establecida en el pliego de especificaciones o en la especificación de diseño de producto (EDP).

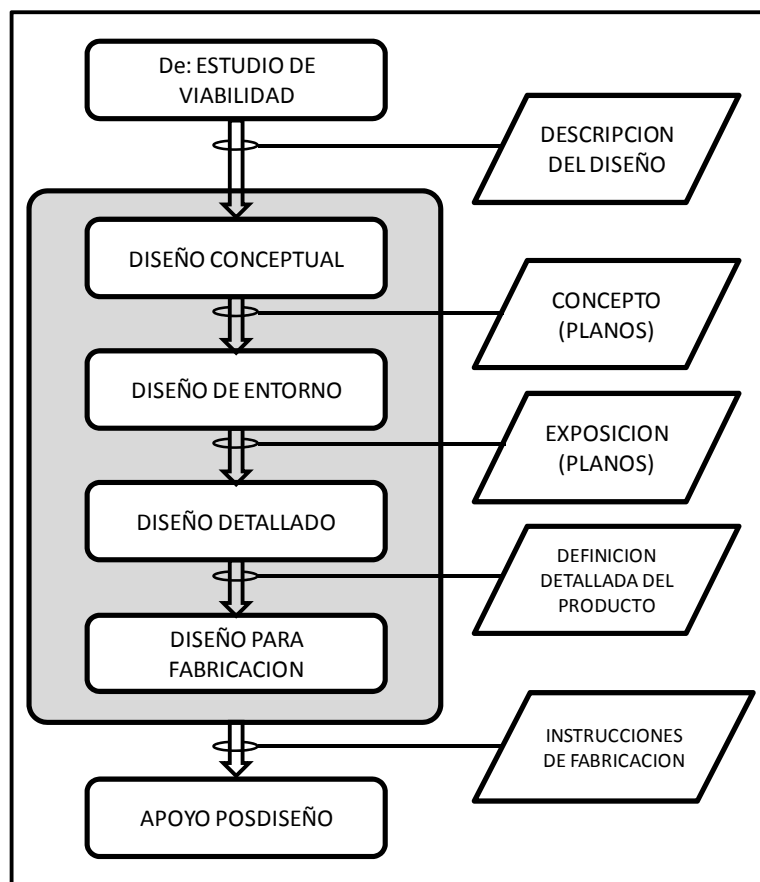


Figura 3.6: Esquema de proceso de diseño de producto según UNE 66920-1:2000.

En la figura 3.6 observamos un desarrollo de la fase de diseño vista en la figura 3.1, en la que se diferencian diseño y desarrollo. El diseño de producto se inicia con la descripción del diseño, con una especificación de diseño que permite realizar el diseño conceptual, este diseño conceptual toma forma en una fase preliminar y es desarrollado hasta tener el diseño de detalle en el que se toman decisiones de índole técnico que dan pie a la fase de diseño para fabricación en la que se especifican concretamente las necesidades para su correcta producción.

Es una representación más sencilla del modelo anterior, pero esencialmente tiene las mismas fases, donde la fase de diseño está enmarcada en un recuadro gris (figura: 3.6).

El modelo BS7000-2:2008 muestra el proyecto dividido en cinco fases, cada fase tiene una verificación y validación para retroalimentar la siguiente asegurando la mejora continua. La primera fase es el impulso de una idea, la investigación, la viabilidad comercial y la viabilidad del proyecto propuesto (figura 3.7). La segunda establece los requisitos generales del producto, selecciona el concepto preferido y genera el pliego de condiciones.

En la tercera la especificación se transforma en un diseño detallado, se evalúan los riesgos derivados de las ideas innovadoras o de la tecnología. En la cuarta se aplica el diseño para la fabricación, y se inicia la comercialización del producto. En la quinta fase se realizan las actualizaciones del producto, su mantenimiento y finalmente se considera su retirada y eliminación.

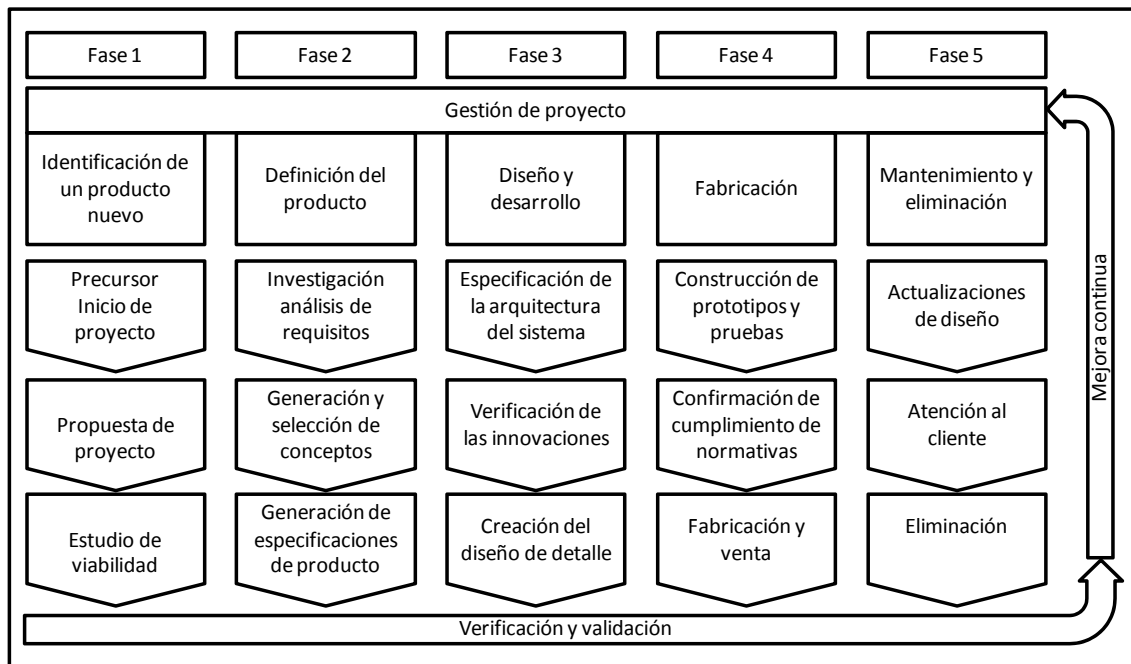


Figura 3.7: Esquema de fases para la gestión de proyectos de diseño y desarrollo de producto según BS7000-2:2008

El proyecto de diseño de producto es suficientemente complejo como para no confiar el éxito de su realización a la intuición, la suerte o la casualidad. No es posible diseñar sin método; es necesario hacerlo siguiendo algún planteamiento preestablecido. Es necesario tener el mayor conocimiento posible acerca del entorno en que se va a desarrollar y aplicar el proyecto, controlar el proceso para su ejecución, y más aún, considerando la necesidad del trabajo en equipo, realizar todo ello con un planteamiento coordinado y definido de antemano.

La utilización de métodos contrastados y experimentados no significa tampoco necesariamente ajustarse totalmente a un arquetipo prefijado, sin posibilidad de interpretar o salirse puntualmente del planteamiento inicial. La creatividad está también en el modo de plantear y controlar el proceso de diseño, de adaptarlo a cada caso, y de utilizarlo en cada proyecto de un modo flexible pero claro y organizado.

### **3.4 MÉTODOS Y MODELOS DE DISEÑO, EVOLUCIÓN**

La investigación en diseño (Cross 2007, Temes de Disseny 25 2008) como disciplina emerge en los años 60, el principal precursor es Jones (Jones 1984) que presento su comunicación "A Method of Systematic Design" a la primera conferencia de métodos de diseño realizada en el año 62 en el Imperial Collage de Londres. Se consideró como el inicio del movimiento de los métodos de diseño (Cross 2007) y ha marcado varias generaciones en la que el diseño se consideró un método científico, una ciencia o una disciplina como es reconocida a día de hoy.

De esta conferencia surge la institución Design Research Society (DRS) fundada en 1966. John Chris Jones, promotor de la conferencia, funda el Laboratorio de Investigación en Diseño en la University of Manchester, Institute of Science and Technology, y posteriormente Bruce Archer funda el Departamento de Investigación en Diseño en el Royal College of Art, pasando a ser el primer profesor de investigación en diseño. Según la Design Research Society, el objetivo de la investigación en diseño es "promover el estudio y la investigación sobre el proceso de diseño en sus diferentes campos". Se quiere reflexionar desde un punto de vista académico e independiente sobre el proceso mismo de diseño y su interrelación con otras disciplinas.

Los nuevos métodos en la década de 1960 surgen gracias a la investigación operativa, a la gestión de toma de decisiones técnicas así como del desarrollo de técnicas de creatividad en la década de 1950. Aparecen los primeros libros de metodología de Asimow (1962), Alexander (1964), Archer (1965) y Jones (1970) y los primeros libros de la creatividad (Gordon 1961, Osborn 1963).

Herbert Simon (1969) estableció las bases para "una ciencia del diseño" tratando de hacer un método científico donde el proceso de diseño es en parte intelectual, analítico, empírico y además se puede formalizar y enseñar como una doctrina.

Más tarde esta forma de crear una ciencia y un método científico, unido al inicio de la utilización ordenadores y el lenguaje máquina, es criticado por sus propios fundadores por la falta de éxito en la aplicación en diseño industrial, y dio paso a una segunda generación que se apartó de los intentos de optimizar y de la omnipotencia del diseñador, tendiendo al reconocimiento de soluciones satisfactorias o adecuadas.

Herbert Simon introdujo el concepto de «satisfactorio». Una nueva serie de libros sobre los métodos de diseño comenzaron a aparecer, que incluían Hubka (1982), Pahl y Beitz (1984), French (1985), Cross (1989) y Pugh (1991).

En la década de 1980 vimos la creación del diseño como una disciplina coherente, donde el diseño tiene sus propios aspectos a conocer y sus propias maneras de conocerlos. Bruce Archer lanza una serie de artículos en la nueva revista “Desing Studies” sobre “el diseño como disciplina”, explicando que existe una manera de pensar y comunicar propia del diseñador que difiere de los métodos científicos y académicos, y que es tan potente como los propios métodos científicos y académicos de investigación cuando se aplican a su propio tipo de problemas (Archer 1979).

Donald Schön (1983) promovió la nueva visión del diseño como disciplina que significa el diseño estudiado en sus propios términos, dentro de su propia rigurosa cultura, basada en una práctica reflexiva de diseñar.

La última década ha sido una época de expansión de los métodos de diseño en la que han aparecido nuevas publicaciones y revistas así como conferencias a nivel internacional y la fundación de nuevas asociaciones. Esta expansión de métodos ha resultado en nuevas técnicas y herramientas de análisis, síntesis y verificación tales como el QFD, ingeniería concurrente, análisis de valor, análisis modal de fallos y efectos, total design, diseño adaptable, TRIZ y otras técnicas de creatividad, DfX diseñar para alguna actividad concreta del proceso, Design Thinking, diseño colaborativo, ecodiseño, entre otras muchas.

La investigación y el desarrollo del proceso de diseño desde sus principios en la década de los años sesenta ha convergido a lo que podríamos llamar un modelo de consenso. Ejemplos típicos de este modelo son el modelo de Pahl y Beith y el modelo de la VDI normativa alemana mencionada anteriormente.

Estos modelos se llaman también modelos por fases o modelos de procedimiento. El desarrollo de estos modelos surge como respuesta a la complejidad del desarrollo de productos y la necesidad de estructurar los proyectos.

Del mismo modo en los procesos se analizan productos que son vistos como sistemas técnicos (Hubka, Eder 1988), el comportamiento funcional de un sistema técnico está totalmente determinado por los principios físicos y puede ser descrito por las leyes físicas.

El problema de los modelos de diseño es encontrar y definir la geometría, materiales y fabricación del sistema de tal manera que el comportamiento se ajuste a los requisitos preestablecidos y que se realiza de la manera más eficaz y eficiente.

### 3.5 MODELOS METODOLÓGICOS

Aristóteles fue el primero en aplicar el análisis sistemático a los métodos de la ciencia. En su lógica formal demostró que el pensamiento utiliza siempre tres elementos simples, que aún hoy siguen siendo los elementos más importantes de la lógica: el concepto, el juicio y la conclusión. Su principal logro en el estudio de la lógica fue el desarrollo de los métodos de deducción inferencia de lo general a lo particular, y la inducción inferencia de lo particular a lo general.

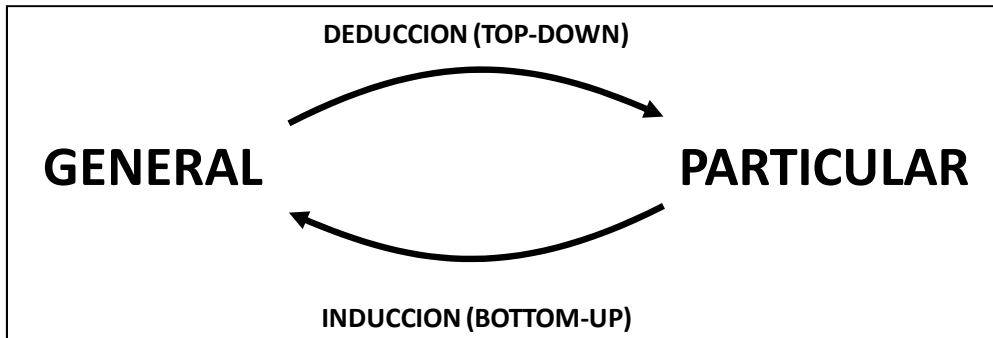


Figura 3.8: Métodos de inducción y deducción en relación a Bottom-Up y Top-Down.

Existen métodos de diseño e ingeniería que todavía utilizan estos sencillos planteamientos (figura 3.8), como el top-down que se corresponde con la deducción y el bottom-up con la inducción. Top-down comienza con el más alto nivel de abstracción o conceptualización y se desarrolla hasta el detalle, Bottom-up comienza con detalles y se desarrolla hasta llegar al mayor nivel de abstracción o conceptualización.

Incluso en el planteamiento del diseño de producto se habla en ocasiones de diseño de “adentro hacia afuera” y viceversa que se corresponden con la deducción e inducción correspondientemente. Siendo los procesos de “adentro hacia afuera” aquellos que parten de las necesidades funcionales y requisitos del producto que definen los componentes para terminar en los aspectos formales y estéticos finalmente; Y los procesos de “afuera hacia adentro” aquellos que se parte de una característica estética o formal y termina en la definición de componentes y funciones, estos casos son típicos de rediseños en los cuales las especificaciones técnicas se corresponden con la de un producto anterior.

Existen simplificaciones metodológicas aplicadas al proceso de diseño y desarrollo de productos, todas ellas se basan esencialmente en tres acciones básicas Planificación, Desarrollo y Realización (ejecución), esta secuencia es repetida tanto a nivel global dentro del proyecto como en detalle para la resolución de detalles finales. Jones (1970) y Asimow (1962) coinciden en que estas tres fases repetidas llevan a que cada ciclo sea más detallado que el anterior y que la reutilización de esta sea satisfactoria.



Esta metodología es muy similar al círculo de Deming (1989), con las acciones Planificar, Hacer, Verificar y Actuar, variando únicamente la fase de control que en los procesos de diseño se hacen de forma automática, como retroalimentación, al finalizar cada fase a través de reuniones con presentaciones ante los responsables de proyecto o clientes (figura 3.9). El círculo de Deming es característico por su proceso cíclico, típico de los procesos descritos anteriormente en las diferentes normativas.

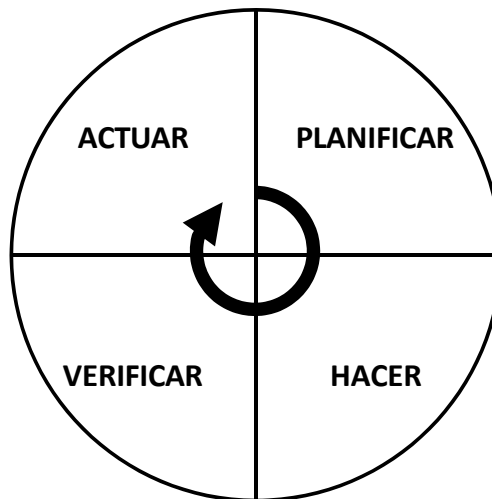


Figura 3.9: Círculo de Deming (1989)

Otra metodología incluso más genérica y con mayor carga lógica y analítica es el Método Cartesiano, basado en cuatro axiomas. René Descartes planteó su método en 1637. En resumen se trata de comprender que es necesaria la descomposición de la situación de partida para poder estructurar el trabajo que se nos plantea, comprendiendo las pequeñas particularidades y dándoles solución de forma que nos permitan encontrar la solución óptima y más adecuada tras realizar las pertinentes acciones de control por medio de revisiones contrastadas.

La Bauhaus y la Escuela Superior de Diseño de Ulm, basan su metodología en el racionalismo, el cual se origina en el método cartesiano. Desde el punto de vista del diseño, el objetivo de la Bauhaus fue conseguir la utilidad y el bienestar social sin olvidar la belleza. Así, en un folleto publicitario, del año 1927, señalaba que los objetos debían servir correctamente a sus fines, ser baratos y bellos (Hochman 2002).

La metodología desarrollada por esta Escuela se basaba en la búsqueda de soluciones prácticas utilizando tecnología industrial y superando las preocupaciones formales y convencionales vinculadas con las enseñanzas de las Bellas Artes o de los oficios artísticos (figura 3.10). El resultado fue la adaptación de la forma, los materiales y las estructuras de los bienes de consumo a los procesos industriales.

Para ello, buscaron la solución formal más simple que mejor cumpliera la función, fomentaron el conocimiento de los materiales industriales para utilizar aquellos que mejor cumplieran con las condiciones impuestas por la producción industrial y promovieron el trabajo en equipo de manera que la solución correcta a un problema de diseño no era la idea más original sino la síntesis de una búsqueda colectiva. Esta reorientación de la enseñanza del diseño dio como resultado objetos simplificados, estandarizados y baratos.

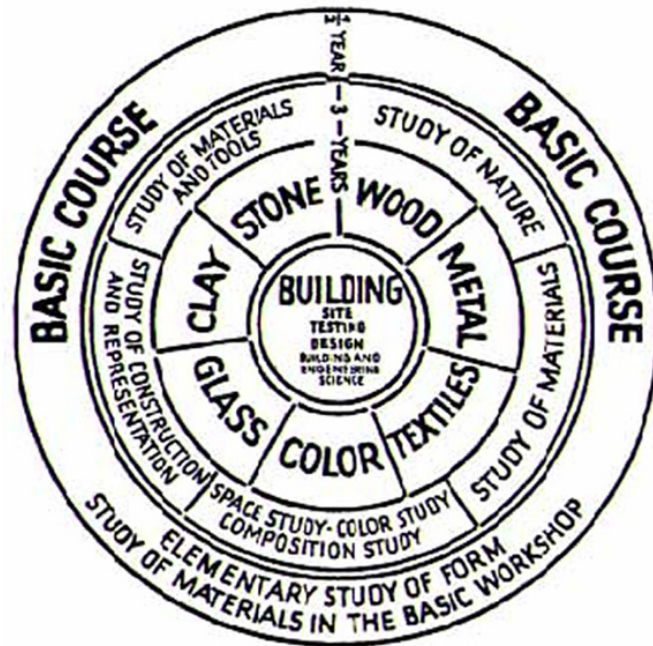


Figura 3.10: Plan de estudios de la Bauhaus (1927).

Según Cross (2000) los modelos se pueden clasificar en descriptivos y prescriptivos, si bien hay otros modelos como los cognitivos y computacionales descritos por Finger y Dixon (Finger 1989). El modelo descriptivo que explica cómo el diseño se lleva a cabo (figura 3.11), el modelo cognitivo que explica la conducta del diseñador, un modelo prescriptivo que muestra cómo se debe hacer el diseño, y un modelo computacional que expresa un método por el cual un ordenador puede realizar una determinada tarea (Takeda 1990).

De todos los modelos descritos por los diferentes autores elegiremos aquellos en que la fase conceptual sea un elemento diferencial para la generación de nuevas ideas e innovación. También se tendrá en cuenta la posibilidad de encontrar modelos que permitan la interacción de varios métodos dado que en la descripción de la metodología propuesta se implementan varios métodos interrelacionados como son la biomimética, el análisis funcional y la creatividad por medio de mapas mentales.

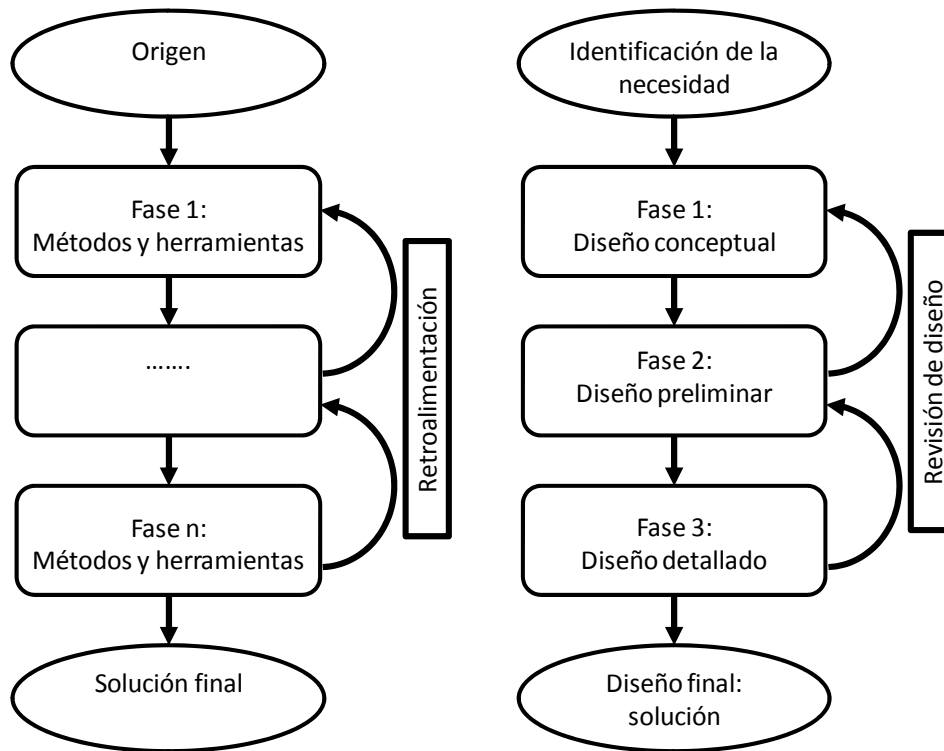


Figura 3.11: Modelo teórico y básico de diseño descriptivo.

Existen numerosos modelos, con mayor o menor detalle en cada una de las fases que desarrollan (Fagnoli 2009), pero sin entrar en detalles se puede establecer que las principales características son:

- La flexibilidad, de modo que sea posible aplicar alguno de los modelos a cualquier tipo de diseño de producto, pudiendo adaptarlo y transformarlo, siendo independiente de la complejidad del modelo.
- La continua retroalimentación que permite a los diseñadores hacer un análisis y mantener un control de cómo se desarrolla cada fase.
- La importancia de la fase de diseño conceptual, que facilita el desarrollo de numerosas soluciones alternativas, mejora la posibilidad de desarrollar nuevas soluciones, en lugar de soluciones mejoradas de los sistemas ya existentes.

### 3.6 MODELOS METODOLÓGICOS POR FASES

Como se ha comentado anteriormente existen diversos modelos, nuestro interés se centra en los modelos descriptivos y prescriptivos, los que nos dicen “cómo” y “qué” se hace, además nos centramos en aquellos cuya estructura es de fases y contiene una fase conceptual y de generación de soluciones.

Los modelos a estudiar son los de Asimow, Archer, Jones, French, Pugh, Roozenburg y Eekels y por último Palh y Beitz.

**3.6.1 ASIMOW 1962**

Asimow (1962) describe cómo los diseñadores industriales observan y asimilan los métodos de la ingeniería. Considera que existen dos grandes fases en el desarrollo de un método de diseño y que éstas se interrelacionan entre sí (figura 3.12). La primera llamada fase de planeación y morfología, es una fase más conceptual y en la que se establecen los objetivos, el diseño preliminar es el diseño conceptual en el que se definen los rasgos y características del diseño definitivo. La segunda hace referencia al diseño detallado, desarrollando el análisis y síntesis, evaluación y decisión de las mejores alternativas, la realización de prototipos, la optimización y la revisión de diseño.

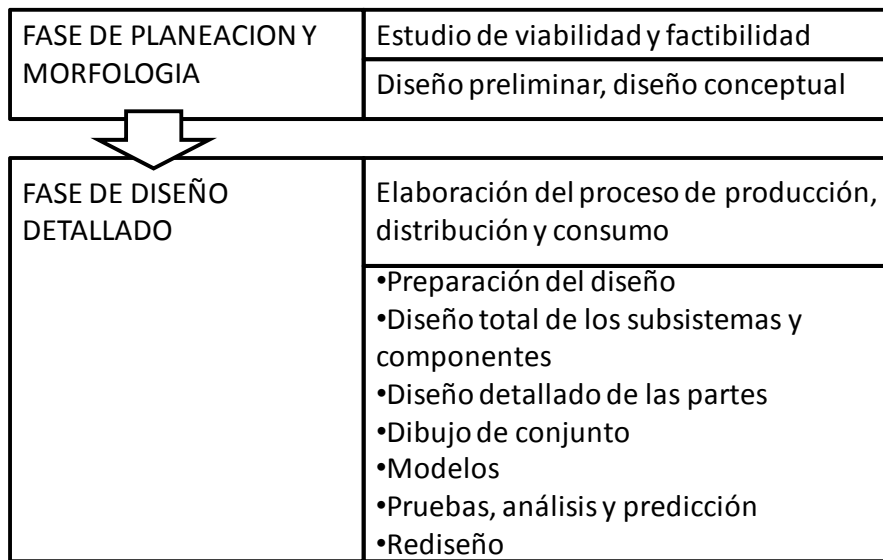


Figura 3.12: Modelo de Morris Asimow 1962.

**3.6.2 ARCHER 1963**

El método de Archer (1963) consta de listas de comprobación que determinan el proceso de diseño, pero apenas serán aprovechables por su excesiva formalización. "El método sistemático para diseñadores", desarrollado por Bruce Archer, fue publicado durante 1963 y 1964 por la revista inglesa Design (figura 3.13).

En este método Archer propone como definición de diseño: "...seleccionar los materiales correctos y darles forma para satisfacer las necesidades de función y estéticas dentro de las limitaciones de los medios de producción disponibles", lo que implica reconciliar un amplio rango de factores.

El proceso de diseño por lo tanto, debe contener fundamentalmente las etapas analítica, creativa y de ejecución. A su vez estas etapas se subdividen en las siguientes fases, ver figura 3.13.

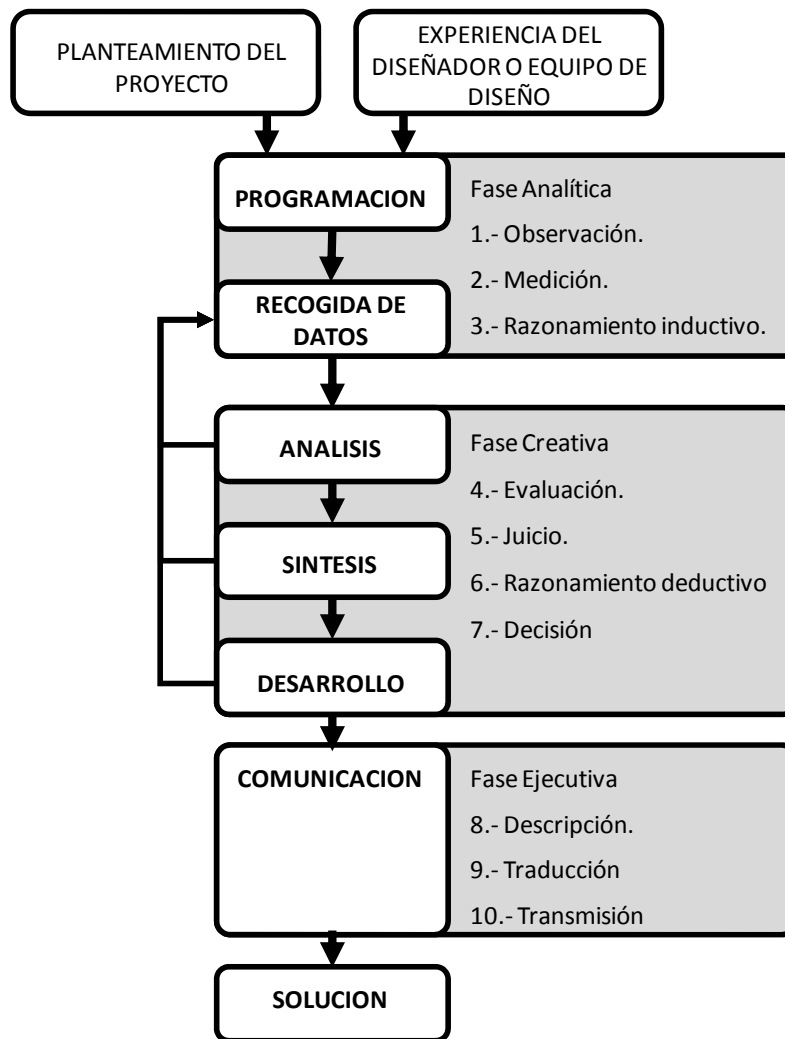


Figura 3.13: Modelo de Archer 1963.

### 3.6.3 JONES 1976

Christopher Jones en 1976 inició las ideas sobre la necesidad de un método, así como los conceptos de caja negra y caja transparente. En el primero se considera que el diseñador es capaz de producir resultados en los que confía y que a menudo tiene éxito, mas no es capaz de explicar cómo llegó ahí. Se explica claramente con la expresión “el diseñador como mago” y se basa en la aplicación de un proceso creativo relacionado con el brainstorming y la sinestesia, en el que los resultados del proceso son utilizados como elementos de retroalimentación por medio de analogías para generar nuevos resultados. Sus características son:

- El diseño final está conformado por experiencias anteriores.
- Su producción se ve acelerada mediante el relajamiento de las inhibiciones a la creatividad.
- La capacidad de producir resultados depende de la disponibilidad de tiempo.
- Repentinamente se percibe una nueva manera de estructurar el problema.
- Control consciente de las maneras en que se estructura el problema.

La caja hace referencia al diseñador como un computador que recibe información e instrucciones y las procesa encontrando un óptimo, gracias a ciclos de análisis, síntesis y evaluación. Las características de la caja transparente son:

- Objetivos, variables y criterios fijados de antemano.
- Análisis del problema completado antes de iniciar las soluciones.
- La evaluación es verbal y lógica.
- Las estrategias se establecen antes.
- Las estrategias son lineales y con retroalimentación.

En este proceso no existe una fase de conceptualización del diseño, al contrario que en la caja negra, ya que todo el proceso está orientado a obtención de “una solución” optima siendo convergente, en la caja negra se generan muchas alternativas de solución es un proceso más divergente.

Jones propone un modelo en el que se pueden combinar los dos modelos anteriores de caja negra y caja transparente, que se estructura en las siguientes fases:

- análisis (divergencia)
- síntesis (transformación)
- evaluación (convergencia)

Estas tres fases del modelo se tratan como un proceso de diseño desintegrado, que se puede trabajar como bloques estancos e independientes cuyos resultados dan pie a la siguiente fase, y en cada una de ellas se pueden aplicar diferentes métodos. La divergencia es una ampliación del espacio de diseño donde se pueden encontrar soluciones que de otro modo no se habrían explorado, se aumenta la incertidumbre y se eliminan las ideas preconcebidas. La transformación es la fase conceptual en la que se elabora el primer diseño, hay un alto nivel creativo y se sugieren muchos cambios, intuiciones e inspiraciones; No existe un juicio o crítica, por lo que no es posible valorar la validez, no se obtienen soluciones óptimas sino una investigación optima. La convergencia es la etapa de reducción de la incertidumbre en la que se trata de encontrar la solución de entre las múltiples alternativas generadas para desarrollarla detalladamente.

#### **3.6.4 FRENCH 1985**

El modelo de French (figura 3.14) se caracteriza por no tener una fase concreta de evaluación ya que se realiza a lo largo de todo el proceso. Se inicia con la detección de una necesidad planteada como un problema a resolver.

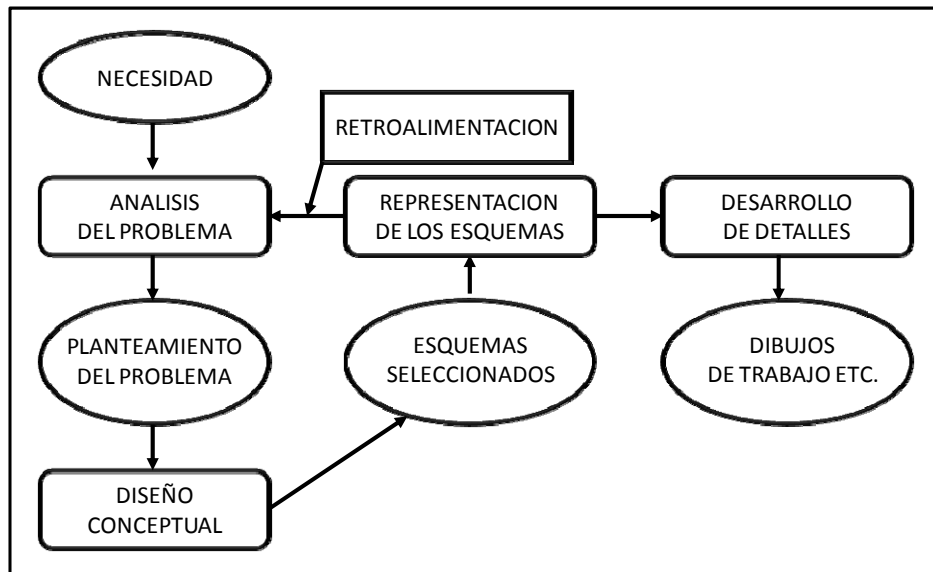


Figura 3.14: Modelo de French 1985.

El enunciado inicial de este problema hace referencia a determinados aspectos del producto, al no existir un nivel de concreción suficiente para iniciar el trabajo de diseño se genera un documento de especificaciones que es utilizado a lo largo del proyecto. Sin embargo, es posible que las actividades que se realicen en etapas posteriores modifiquen la percepción sobre el problema y como consecuencia de ello se hagan revisiones sobre la especificación inicial, de ahí que exista una línea de retroalimentación.

Las especificaciones enmarcan el diseño a nivel conceptual. Se originan diversas alternativas de solución, las cuales después de ser evaluadas, conducen a la selección de la más conveniente. Esta etapa es a nivel general la más innovadora y sus soluciones suelen llevar el germen de todo desarrollo posterior, debe fomentarse un sentido crítico y riguroso en la evaluación de las soluciones debido a que cualquier omisión, olvido o error de concepto ocasiona dificultades. El diseño de desarrollo es la formalización de las alternativas, establece la materialización del producto por medio de un conjunto organizado de componentes, sus relaciones, sus materiales, formas, dimensiones y acabados. Se desarrolla en dos fases:

- a) Diseños preliminares que son refinados en su forma, materiales y ensamble hasta encontrar la combinación óptima. Vía retroalimentación.
- b) Selección del mejor diseño preliminar tras pruebas de funcionalidad, uso, apariencia, percepción del usuario potencial, durabilidad y facilidad de elaboración, manufactura.

El diseño de detalle es la última fase del proceso que, partiendo de una definición proporcionada por los planos de conjunto y la memoria anexa, tiene como objeto el despliegue de todos los documentos necesarios para la fabricación del producto.

### 3.6.5 PUGH. DISEÑO TOTAL 1991

Diseño total se define como una actividad sistemática, desde la identificación de la necesidad de mercado o de usuario hasta la venta del producto que satisface esa necesidad. Una actividad que abarca productos, procesos, personas y organización (Pugh 1991).

El proceso de diseño previo a la metodología de diseño total era lo que Pugh describió como "diseño parcial". Los ingenieros y los diseñadores se centraron en su papel en el diseño de un producto, en raras ocasiones se realizaba un proceso de desarrollo de productos de manera completa. Debido a la falta de consideración de factores no tecnológicos como el mercado, las necesidades de los usuarios y los recursos de la organización, los productos tenían fracaso en el mercado.

El diseño total puede ser interpretado como un núcleo central de actividades (figura 3.15), las cuales son imprescindibles para cualquier diseño, con independencia del dominio. El núcleo de diseño consta de mercado (necesidades de los usuarios), la especificación de diseño de producto, diseño conceptual, diseño de detalle, fabricación y venta. Todo el diseño se inicia o debería iniciarse con una necesidad que encaja en un mercado ya existente o un mercado propio creado para tal fin. (Pugh 1991).

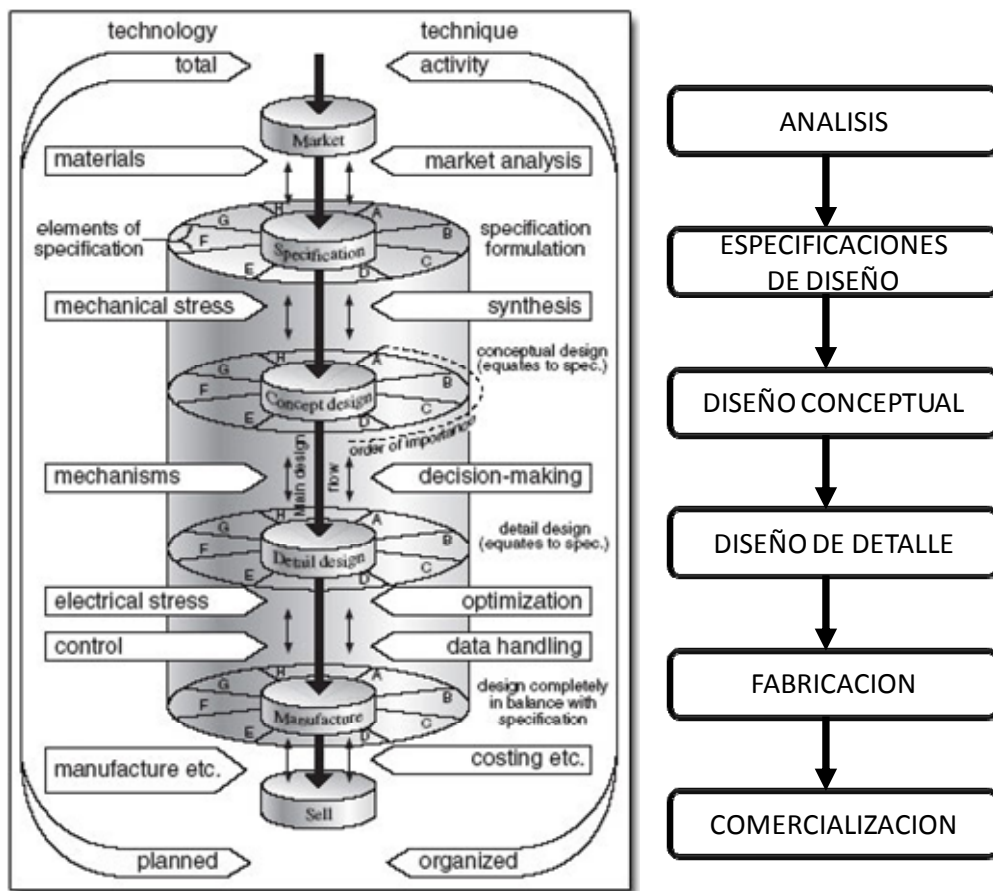


Figura 3.15: Modelo de Pugh 1991, gráfico original del autor y adaptación.



Pugh define las especificaciones de diseño de producto como se conocen hoy en día como un documento que reúne las necesidades que el producto debe satisfacer y sirve además como control a las actividades de diseño. Pugh fue reconocido por su trabajo pionero de Total Design. La metodología de Total Design proporciona un marco de diseño de un modelo de diseño del proceso estructurado para la aplicación de la metodología de diseño en la práctica del diseño por los profesionales de la industria.

Otra contribución de su modelo se llama “Proceso de Selección Conceptos”. Para seleccionar iterativamente el mejor concepto de un número de candidatos basados en algunos criterios usando la matriz de selección. Este proceso se puede utilizar no sólo en la etapa de diseño conceptual, sino también para la selección de la estructura de producto, definición del sistema, los subsistemas y los componentes individuales. En comparación con otros métodos, la metodología Pugh es simple y fácil de utilizar por los equipos de diseño. Aunque su trabajo se desarrolló con independencia de “Quality Function Deployment” despliegue de la función de calidad QFD, el trabajo Pugh se puede integrar en el QFD.

### **3.6.6 ROOZENBURG AND EEKELS 1995**

Roozenburg y Eekels (Delft University of Technology 2012) afirman que su propuesta de “ciclo de diseño básico” es el modelo más fundamental, ya que este ciclo se puede encontrar en todas las fases del proceso de diseño y es aplicable a todos los problemas de diseño, independientemente de su naturaleza (figura 3.16).

El punto de partida es la función del nuevo producto, es decir, el comportamiento previsto en el más amplio sentido de la palabra. No sólo se incluye la función técnica, sino también las funciones psicológicas, sociales, económicas y culturales que un producto debe cumplir.

En la fase de análisis el diseñador establece una idea del nuevo producto, el enunciado del problema, y formula los criterios que la solución debe satisfacer, en primer lugar en términos generales y en las iteraciones posteriores con mayor precisión y forma completa. La lista de criterios se llama “especificaciones de diseño de producto” o “pliego de especificaciones”.

El siguiente paso es la generación de una propuesta de diseño provisional. La síntesis es la menos tangible de todas las fases del ciclo. La etapa de síntesis es el momento de expresar y describir una idea, en cualquiera de sus formas verbal, boceto, dibujo, modelo, etc. El resultado de la fase de síntesis es el diseño provisional, solo es una posibilidad.

La simulación es la materialización de una idea para verificar y probar el diseño, previo a la fabricación y el uso real del producto. Muchas simulaciones se basan simplemente en las

generalizaciones de experiencias. La simulación revela las expectativas acerca de las propiedades reales del nuevo producto, en forma de predicciones condicionales.

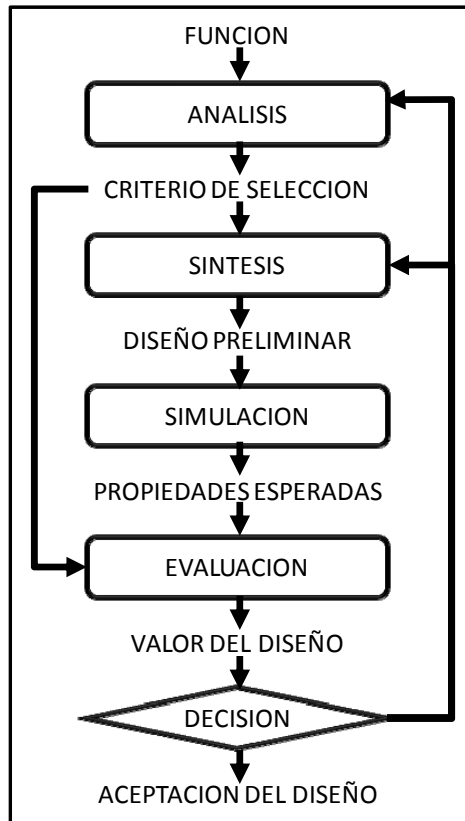


Figura 3.16: Modelo de Roozenburg y Eekels 1995.

La evaluación establece el "valor" o "calidad" del diseño provisional. Para ello, las propiedades esperadas se comparan con las propiedades deseadas en las especificaciones de diseño. De existir diferencias entre los dos, se tendrá que juzgar si esas diferencias son aceptables o no.

Por último en la decisión se opta por continuar y elaborar la propuesta de diseño o volver a generar una propuesta de diseño mejor. En ocasiones el primer diseño provisional no es aceptado y el diseñador debe que volver a la etapa de síntesis, para mejorar en sucesivas iteraciones, pero también se puede volver a la formulación del problema y la lista de requisitos.

La exploración de soluciones puede ser de ayuda para comprender mejor la verdadera naturaleza de un problema, por lo tanto se pretende ajustar, ampliar o afinar la formulación inicial del problema. El diseño y las especificaciones de diseño evolucionan en ciclos sucesivos y surge una fuerte interacción hasta que encajan entre sí. Este desarrollo iterativo, comprende una secuencia de pasos intuitivos y pasos deductivos, entre ambos siempre hay una comparación de los resultados alcanzados y los resultados deseados.

3.6.7 PAHL & BEITZ 1996

El modelo de Pahl & Beitz posiblemente sea el más extendido y reconocido hoy en día, tanto en el ámbito educativo como en el profesional, y tiene cierto paralelismo y similitud con el modelo normativo de la VDI 2221. Es un modelo que define y explica claramente las fases del proceso de diseño (figura 3.17).

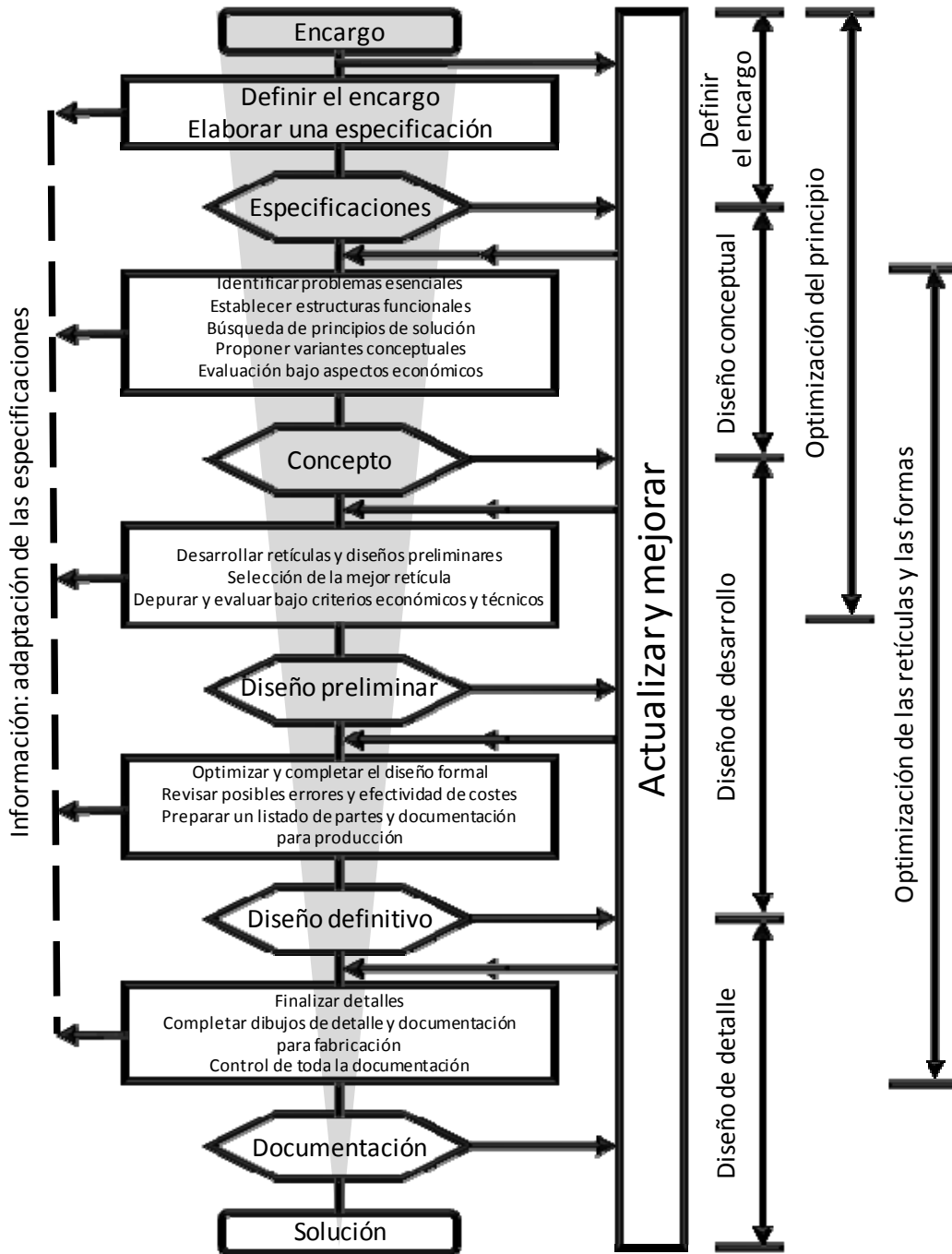


Figura 3.17: Modelo de Pahl & Beitz 1996.

El proceso de inicia con el reconocimiento de las tareas a desarrollar, es una fase en la que diseñador analiza la información sobre el problema planteado, se establecen las

especificaciones, se definen las funciones y propiedades que se requieren para el nuevo producto, así como las limitaciones impuestas a la solución y el propio proceso de diseño.

En el diseño conceptual se representan ideas generales, documentadas por dibujos y esquemas. En esta fase se determinan la función global y las funciones de orden inferior que se deben cumplir y se establecen sus interrelaciones (estructura funcional), con esta estructura se realiza una combinación de posibles opciones que definen una solución que contiene las principales características físicas y técnicas de un producto, que son esenciales para su funcionamiento. Esta solución no solo se basa en criterios técnicos sino que debe tener en cuenta otros como los relativos a la utilización, la estética, la producción, costos y otros. La fase conceptual es importante pues las decisiones tomadas marcan el futuro éxito del diseño.

Le sigue la fase de diseño preliminar, evolución de la fase conceptual, donde el concepto se trabaja para establecer la retícula, la estructura de producto, los componentes necesarios y se inicia la toma de decisiones respecto a materiales y procesos. Es una fase en la que se realiza una optimización y formalización del concepto elegido además de un estudio de efectividad económica. Se definen la geometría y la forma y se validan.

En la última fase se realiza el diseño de detalle en el que se terminan los detalles y representaciones de los mismos, se generan los documentos para la producción y se comprueban por medio de revisiones todos estos documentos. Las primeras fases son para la optimización del principio del producto, es decir, la idea de producto y su esencia, sin que exista una formalización definitiva, comprende la planificación o definición de proyecto, la conceptualización y los primeros pasos en la estructura, retícula y forma del producto. Las fases finales son para refinar y optimizar el diseño formal, la retícula final y los detalles de funcionamiento.

Como resumen a los modelos por fases se puede concluir con la idea de que las fases marcan etapas, aunque realmente no hay una división tan rotunda entre fases; La actividad de diseño no es rígida y se pasa de una fase a otra incluso de manera iterativa volviendo así a las fases anteriores, con la mencionada retroalimentación, obteniéndose la optimización de cada fase. Las fases no son un proceso de resolución de problemas, no acaban con una solución, las soluciones, en plural, se generan y refinan, de modo que el diseñador repite el proceso de diseño básico más de una vez. Además en cada fase las soluciones se plantean como alternativas y esto genera un número muy elevado de opciones de solución, por lo que es necesario hacer procesos divergentes-convergentes para explorar todas las opciones y seleccionar las más adecuadas.

El final de cada fase converge en un punto en el que se toma una decisión, el resultado puede llevar a un paso adelante (aceptación), dar un paso atrás (revisión) o incluso abandonar el concepto o idea elegida (rechazo).

Se presta mucha atención a la fase conceptual, sobre las de diseño de desarrollo y de detalle, ya que en la práctica es posible diseñar sin tener que inventar nuevos principios o desarrollos técnicos, partiendo de los ya conocidos y probados, es decir, creando conceptos nuevos pero utilizando soluciones conocidas.

### **3.7 METODOS Y HERRAMIENTAS ACTUALES**

Actualmente los métodos y herramientas de diseño se orientan a la innovación, a la búsqueda de nuevos productos, procesos, servicios y mercados, trabajando las áreas de economía, de gestión, de ingeniería y sociedad. Esta búsqueda de innovación fundamentada en productos y procesos puede ser incremental con pequeñas variaciones y mejoras sobre lo ya existente o radical con la generación de nuevos conceptos de producto, es esta innovación conceptual la más deseada por su carácter diferenciador que genera ventaja competitiva sostenible a sus creadores.

Es necesario puntualizar sobre el origen de los trabajos de investigación en diseño, originalmente y ya comentado se realizaba en universidades, conferencias y publicaciones académicas, hoy en día y cada vez más son las empresas y grandes corporaciones las que establecen sus propios métodos de diseño y herramientas para lograr innovación, cabe destacar las redes y centros tecnológicos que estrechamente trabajan junto a estas empresas.

Desde estos dos puntos de vista, académico y empresarial, se puede decir que los modelos y métodos han pasado de generalistas y abstractos, basados en teoría del diseño, a otros, que aunque generalistas, son de carácter más específico y con una aplicación concreta, aquellos con lo que es posible conquistar una meta. Los basados en la teoría siguen siendo la base de la formación de los futuros diseñadores pero cada vez con menos aplicación en la industria, donde son sustituidos por métodos de base matemática o computacional.

Revisiones actuales (Seliger 2001, Tomiyama 2009) han llevado a nuevas clasificaciones de métodos surgidos últimamente (tabla 3.1), podemos citar a Finger y Dixon (1989) o a Horváth (2004) que categorizan los métodos y herramientas.

Para Finger y Dixon (1989) existen seis categorías que amplían las ya vistas con métodos basados en la representación y el lenguaje, el análisis y la toma de decisiones y herramientas para metas específicas.

Para Horváth (2004) hay dos clasificaciones una más filosófica que trata de cubrir todo el espectro de la investigación en diseño, no demasiado útil, y una segunda en la que establece siete categorías clasificadas por temática y aplicación.

Modelos descriptivos	Estudios de protocolo, modelos cognitivos, estudios de casos y métodos de diseño llamados de la escuela alemana.
Modelos prescriptivos	Análisis morfológico, diseño Axiomático, método Taguchi.
Modelos computacionales	Diseño paramétrico, diseño conceptual basado en inteligencia artificial.
Modelos basados en el lenguaje y la representación	Diseño geométrico, gramática de la forma, modelo de función y comportamiento, modelo basado en características, modelado de producto o diseño integrado para entornos.
Modelos para análisis y apoyo a las decisiones de diseño	Métodos de optimización, análisis de elementos finitos o apoyo a la toma de decisiones.
Diseño para una meta específica (DfX), del grupo "Design for X"	Diseño para la producción, análisis del ciclo de vida y fiabilidad, diseño para el medio ambiente (ecodiseño), ingeniería concurrente, sistemas de anticipación basado en ayuda por ordenador y en general todos los del grupo DfX.

Tabla 3.1: Clasificación de Finger y Dixon (1989). (Fuente: Tomiyama 2009).

Nos interesan para esta Tesis los modelos descriptivos y prescriptivos, así como los basados en el lenguaje y la representación.

A continuación en la tabla 3.2 se describen los métodos y herramientas más utilizados actualmente y que pueden tener relación y aplicación a métodos basados en diseño bio-inspirado, se establece una clasificación alternativa a las anteriores pero utilizando su base, las categorías se relacionan con la fase de diseño y su momento dentro del proceso de diseño.

Definición de especificaciones	Adaptable Design (Gu 2004) y Modular Design (Gu 1997). Characteristic-Properties Modeling (Weber 2005). Integrated product development (Andreasen 1987)
Generación de conceptos, Ideación y resolución de problemas.	Integrated Synthesis. TRIZ. Collaborative design, Cooperative design co-design. Design Thinking (Brown 2008, 2009). Técnicas de generación, evaluación y selección de ideas. Técnicas de redefinición de problemas.
Definición estructural y de componentes	Axiomatic design. Análisis morfológico. QFD. Modelo de Roth. Segmented total product model.
Evaluación y toma de decisiones	DfX. Taguchi Method. Decision-Making Process (Simon 1969)
Representación, visualización y prototipado	Integrated product modeling. CAD/Rapid Prototyping

Tabla 3.2: Clasificación de de métodos y herramientas de diseño actuales.

Nos interesan para esta Tesis, y nos centraremos en ellos, los modelos de definición de especificaciones y los de ideación, generación de conceptos y resolución de problemas. Las otras no son de interés particular en esta Tesis y no se desarrollan ni explican.

### 3.7.1 Métodos y herramientas para la definición de especificaciones

En este primer grupo se analizan aquellos métodos que se centran en la definición de especificaciones, de requisitos de diseño. Diseño adaptable o “Adaptable Design” (Gu 2004) es un enfoque cuyo objetivo es crear diseños y productos que fácilmente pueden ser adaptados a necesidades diferentes y cambiantes. Cuando los requisitos de diseño se modifican debido a cambios en los deseos del cliente, el entorno operativo o los avances tecnológicos el diseño existente se debe adaptar a un nuevo diseño o producto; Capacidad de adaptación es la capacidad de un diseño ya existente para adaptarse a crear un diseño nuevo o modificado sobre la base de los requisitos modificados. El productor puede beneficiarse de la capacidad de adaptación por medio de la reutilización de la mayor parte de las soluciones de diseño existentes y los procesos de producción reduciendo el tiempo de lanzamiento al mercado y mejorando la calidad del producto. La adaptabilidad del producto se consigue normalmente mediante la adición de nuevos componentes y / o módulos, el reemplazo o la actualización de los componentes existentes y la reconfiguración de los componentes existentes. El diseño modular o “Integrated Modular Design Methodology” de Gu es un método similar, por medio de la modularización de los componentes se pueden mejorar considerablemente las características del ciclo de vida del producto. La metodología integrada de diseño modular tiene como objetivo el desarrollo rápido del producto, la facilidad de montaje, el servicio, la reutilización y el reciclado (GU 1997). Distintas formas de modularización tienen impactos diferentes en las características del ciclo de vida del producto. Las especificaciones iniciales del producto permiten ampliar la integración modular.

Otro método, definido por Weber (2005), es el CPM “Characteristics-Properties Modeling” que pretende establecer un marco de trabajo en el que encajar y usar varios métodos y herramientas de diseño, incluidos aquellos que hasta ahora no se utilizaban en combinación con otros, por parecer incompatibles, como el diseño axiomático, o de uso individualizado, como el DfX. También pretende dar una explicación a como es el control del proceso y desarrollo de diseño.

El CPM se basa principalmente en la distinción entre las características y propiedades de un producto; Las características describen la estructura, forma, dimensiones, materiales y superficies de un producto. Estas pueden estar directamente influidas o determinadas por el diseñador. Las propiedades describen el comportamiento del producto, por ejemplo su función, peso, seguridad y fiabilidad, características estéticas, de fabricación, ensamblabilidad, respeto al medio ambiente, costo, etc. Estas no pueden estar directamente influenciadas por el diseñador.

Las características son muy similares a las denominadas por otros autores "propiedades internas" o "parámetros de diseño". Las propiedades se relacionan con las "propiedades exteriores" o "requisitos de funcionamiento".

Hay dos principales relaciones entre las características y propiedades:

- **Análisis:** basado en las características conocidas de las que consta un producto se determinan sus propiedades, se analiza su comportamiento, o se predice si el producto aún no existe.
- **Síntesis:** Basada en un grupo de propiedades se establecen las características del producto. La síntesis es la principal actividad en el diseño y desarrollo de producto.

La lista de necesidades se ve principalmente como una lista de propiedades requeridas y la tarea del diseñador es encontrar las soluciones adecuadas, es decir, un conjunto apropiado de características para cumplir con los requisitos. En este contexto el diseño es visto como una actividad que consiste en ciclos de análisis-síntesis-evaluación que es controlado por las propiedades.

Andreasen (1987) desarrolla el "Integrated Product Development", hace una distinción entre la transición de las fases en el desarrollo de productos y los procesos que se requieren. En el modelo integrado de desarrollo de productos, los procesos están relacionados con tres aspectos diferentes: mercado, producto y producción (figura 3.18).

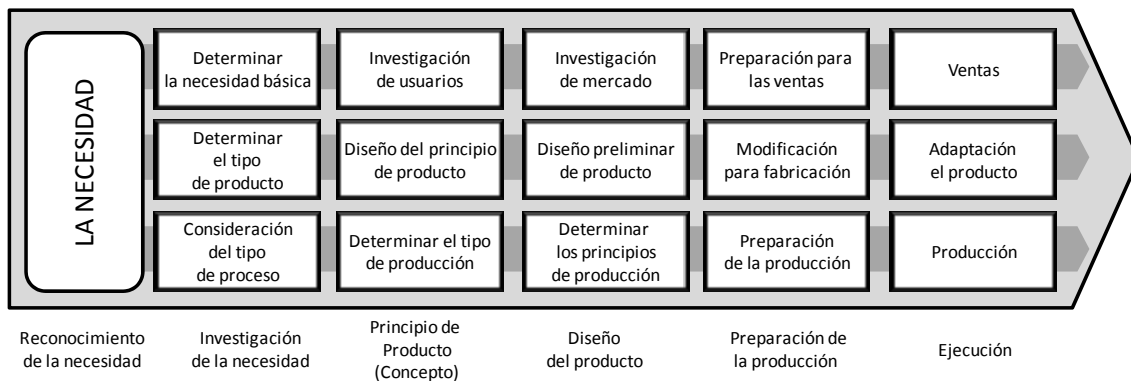


Figura 3.18: Modelo de desarrollo integrado de producto, Andreasen 1987.

El ciclo de desarrollo se inicia con el reconocimiento de la necesidad, su investigación que define la necesidad percibida establecida por un tipo de producto y tipo de proceso.

Después se define el uso y principios generales del producto, con los posibles procesos de producción y la relación con los productos de la competencia, esta definición que podríamos considera conceptual y de especificaciones continua con la fase de diseño y formalización que termina en las fase de preparación para la producción donde se interconectan producto, producción y mercado y la ejecución como prueba definitiva antes del lanzamiento.



### **3.7.2 Métodos y herramientas para la generación de conceptos, ideación y resolución de problemas.**

Además de las conocidas técnicas de creatividad, individuales o grupales, que son utilizadas en las fases creativas del diseño, han surgido métodos y herramientas específicas que se integran en el proceso de diseño e incluso algunas de ellas son un proceso en sí mismas.

La síntesis emergente de Ueda (2001 a,b) establece una visión sobre la gestión de sistemas complejos, donde los elementos propios del sistema tienen interacciones que conforman el comportamiento global para alcanzar el objetivo de todo el sistema. El conjunto se entiende como subsistemas que interactúan, de lo particular a lo general, modelo bottom-up, mientras que el orden de la estructura del sistema se entiende y representa de manera global descomponiéndose sucesivamente en subsistemas, de lo general a lo concreto, modelo, top-down. Este enfoque en ambas direcciones permite la emergencia ofreciendo soluciones eficientes, robustas y adaptables al problema de la síntesis. Teniendo en cuenta los objetivos globales y locales, los artefactos tienen que construir su comportamiento emergente que da como resultado el orden global del sistema, similar al comportamiento de emergencia de sistemas biológicos. El comportamiento de los artefactos que surgen depende de las especificaciones del diseño y la creatividad. La síntesis emergente a menudo utiliza métodos de software como los algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales, y varios algoritmos de aprendizaje.

La emergencia como solución a problemas se consigue dependiendo del grado de definición de la descripción del entorno y de las especificaciones a cumplir por el sistema. Se puede dar la situación en que los problemas están completamente definidos en ambos aspectos, el número de soluciones posibles es muy elevado debido a la explosión combinatoria, en este caso se utilizan métodos de computación evolutiva, como los algoritmos genéticos, programación genética, estrategias evolutivas o programación evolutiva.

Si la especificación está completamente definida pero la descripción del entorno no, entonces el problema es hacer frente a las propiedades dinámicas del entorno desconocido, se requiere determinar la información por medio de la interacción con el entorno, se utilizan el aprendizaje y enfoques basados en la adaptación, tales como la conducta adaptativa. Por último hay problemas en que la descripción del entorno y la especificación no están completamente definidas, es necesario aplicar la interactividad, la auto-coordinación, co-evolución, y auto-referencia para poder conocer las restricciones del entorno dinámico y determinar correctamente la estructura del sistema.

TRIZ, el acrónimo ruso de la Teoría de la Inventiva de Resolución de Problemas, abarca una serie de herramientas y una metodología para la generación de soluciones innovadoras para la resolución de problemas (Barry 2012). Se basa en la observación de la evolución de los objetos técnicos y el análisis de patentes de innovación, cuyas soluciones inventivas aplicadas conforman un pequeño número de principios inventivos de aplicación general a través del razonamiento inductivo. La presencia de ciertas pautas inventivas repetidas en distintos sectores, el acceso al conocimiento externo al problema y la evolución de las tecnologías, sentaron las bases para la metodología.

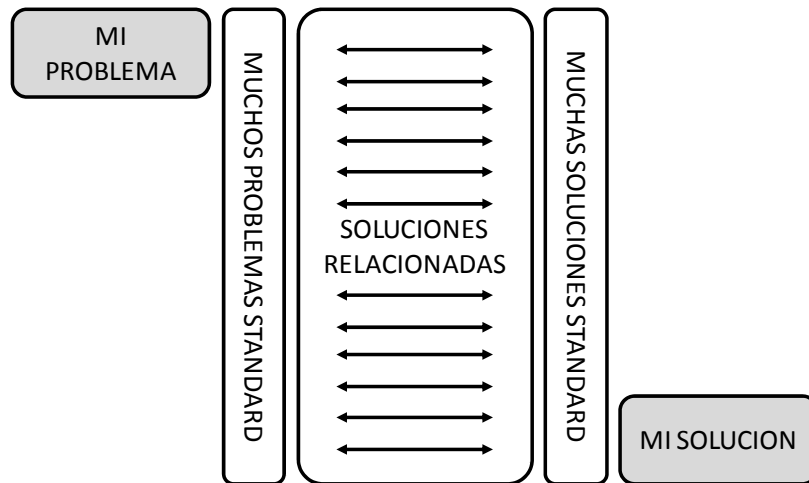


Figura 3.19: Modelo simplificado de TRIZ.

TRIZ tiende a crear un enfoque algorítmico y acceder al conocimiento para la invención de nuevos sistemas y el refinamiento de los viejos. Este algoritmo sigue los siguientes pasos (figura 3.19), primero, ante un problema determinado denominado "MI PROBLEMA" hay que reconocer sus elementos y su modelo, relacionándolo a nivel conceptual con un "PROBLEMA MODELO" constituido por muchos problemas estándar; Segundo, TRIZ tiene herramientas que a partir de un modelo de problema, se pueda identificar un "MODELO DE SOLUCIÓN" que son las soluciones a los problemas estándar. Y tercero y último, TRIZ permite pasar de la solución conceptual y abstracta a una aplicación concreta "MI SOLUCIÓN".

TRIZ ayuda a resolver los conflictos técnicos, aplicando principios de invención normalizados o estandarizados. Así mismo estos principios sencillos, con potencial, pueden resolver problemas y conducen hacia el conocimiento científico y técnico, necesario para resolver el problema. En ocasiones la dificultad del problema estriba en que la solución está fuera del campo de especialidad del técnico, de la empresa, del sector, o incluso de la industria en general, por ello TRIZ permite ampliar la visión tanto de la tecnología como de su posible evolución.

Los resultados tecnológicos obtenidos son patentables, basados en principios ya patentados, la propia metodología ayuda a conseguir una mejor calidad de las patentes.

Design Thinking (DT) (Brown 2009) es una metodología para la resolución creativa y práctica de los problemas o cuestiones que busca como resultado un futuro mejor. En esencia es la capacidad de combinar la empatía, la creatividad y la racionalidad para satisfacer las necesidades del usuario y el éxito empresarial. A diferencia de pensamiento analítico, DT es un proceso creativo en torno a la "construcción" de las ideas.

No hay juicios a priori en DT, esto elimina el miedo al fracaso y alienta la participación en las fases de ideación y prototipo. El "pensar fuera de la caja" se recomienda en estos procesos iniciales ya que a menudo puede conducir a soluciones creativas. El proceso del DT tiene siete etapas: definir, investigación, idear, prototipar, elegir, implementar y aprender. En estos siete pasos se enmarcan los problemas, se realizan las preguntas correctas, pueden crear más ideas y se pueden elegir las mejores respuestas. Los pasos no son lineales sino que pueden ocurrir simultáneamente y puede repetirse.

Según Brown (2009) el DT "es una orientación a la innovación, potente, eficaz, y ampliamente accesible, que puede ser integrado en todos los aspectos de los negocios y la sociedad, y que los individuos y los equipos pueden utilizar para generar ideas innovadoras que se implementan y que por lo tanto tienen un impacto". Por otra parte se ha relacionado el DT con la Inteligencia Colectiva (IC), que se basa en mejorar los resultados por medio de la motivación de las personas. Los objetivos principales de la motivación son la captación, la acogida, la intriga, el desafío, fomentar y premiar la participación. Motivaciones extrínsecas son el reconocimiento, las oportunidades sociales, la carrera y las recompensas materiales, sin embargo, la IC también puede estar influida por motivaciones intrínsecas, como la ideología, el desafío, o la diversión. Entre DT e IC hay relación por la acción de "Pensar fuera de la caja", por pensar de forma diferente, no convencional o desde una nueva perspectiva. A veces se denomina un proceso de pensamiento lateral, pensamiento alternativo.

Co-Design está en la línea de co-creación, la creación colectiva, cooperativa o de comunidad como filosofía que sostiene que todas las personas tienen ideales y perspectivas diferentes y que cualquier proceso de diseño tiene que lidiar con esto. Co-Design es un conjunto de herramientas utilizadas por los diseñadores donde invitan a participar a "no diseñadores" preguntando, escuchando, aprendiendo, comunicando y creando soluciones junto con ellos. Las personas dentro de la comunidad plantean los problemas y los diseñadores atienden esos problemas involucrando a la comunidad. En ocasiones se le llama "diseño democrático".

## **CAPITULO 4.      MODELO METODOLÓGICO PROPUESTO**

### 4.1 INTRODUCCIÓN

La metodología propuesta aplica la biomimética como método de diseño, genera nuevas oportunidades y relaciona diferentes herramientas de diseño como el análisis funcional y técnicas de creatividad. La biomimética permite que el diseño de producto sea más creativo y diferenciado, implementando funciones innovadoras que presentan las analogías extraídas del entorno natural. El enfoque es prospectivo, en busca de funciones clave, y utiliza un método que relaciona dichas funciones con soluciones biológicas.

La mejora se produce por la integración en las fases intermedias de los métodos que determinan las funciones clave y los referentes naturales que aportan soluciones. Se obtienen conceptos de producto basados en especificaciones de diseño, definidas por las funciones y soluciones alternativas encontradas en el proceso.

La diversidad de soluciones en la naturaleza plantea alternativas de desarrollo conceptual. El método descrito se diferencia por la búsqueda de las prestaciones funcionales, y por su carácter exploratorio cuyos resultados plantean soluciones más novedosas.

Los escenarios futuros para generar innovación van a demandar nuevos modos de trabajo, y casi siempre como combinación de varios métodos o herramientas. Los métodos convencionales de diseño y desarrollo de producto a menudo no son suficientes frente a las demandas de innovación de los escenarios futuros. La naturaleza puede ser un modelo para la tecnología y por lo tanto puede ser fundamental para sentar las bases para el desarrollo de nuevos productos (Drachsler 2003).

La biomimética, en esta metodología, se usa para mejorar el proceso de diseño como un método complementario, sumar en vez de sustituir. Se usa como fuente creativa y por el potencial demostrado en combinación con otras metodologías de diseño (Viñolas i Marlet, 2005). Hay un pensamiento crítico acerca de cómo se desarrollan los proyectos industriales, a espaldas de la naturaleza, sin la observación de sus soluciones inteligentes ya desarrollados (Benyus 2002).

La figura 4.1 representa dos métodos habituales en biomimética. Los procesos indirectos, la biología influye sobre el diseño, que parten de soluciones naturales para resolver un problema de diseño. También se puede dar la situación en la que soluciones de la naturaleza sean soluciones de diseño a problemas aun no detectados o conceptos que puedan generar innovación. Por otra parte, los procesos directos dónde el diseño se inspira en la biología, ante un problema de diseño emplean referentes de la naturaleza para dar una solución. (Pedersen 2007, Roshko 2010)

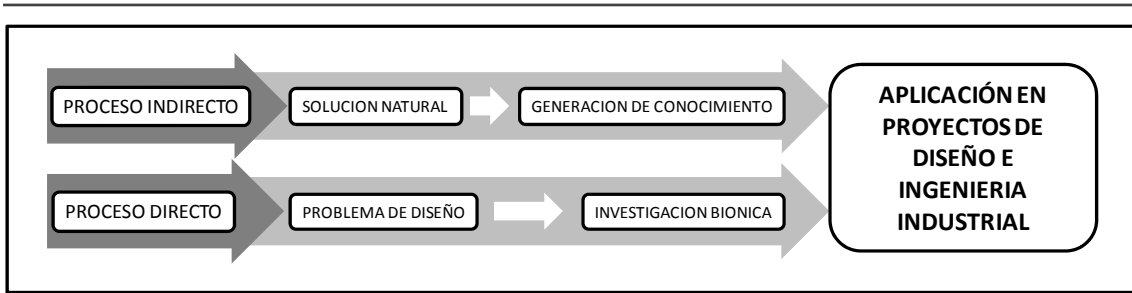


Figura 4.1: Procesos de diseño que involucran a la naturaleza.

Los procesos indirectos producen conocimiento científico con valor añadido, gracias a la investigación biológica, permiten desarrollarlo y traducirlo a soluciones aplicables en el ámbito artificial. Estos métodos se aplican al diseño, mostrando soluciones viables de un sistema técnico. Son exploratorios, en busca de ideas válidas y aplicables, por eso es necesario conocer dónde se enmarca el proyecto de diseño, la relación con el ser vivo y las características observadas en este.

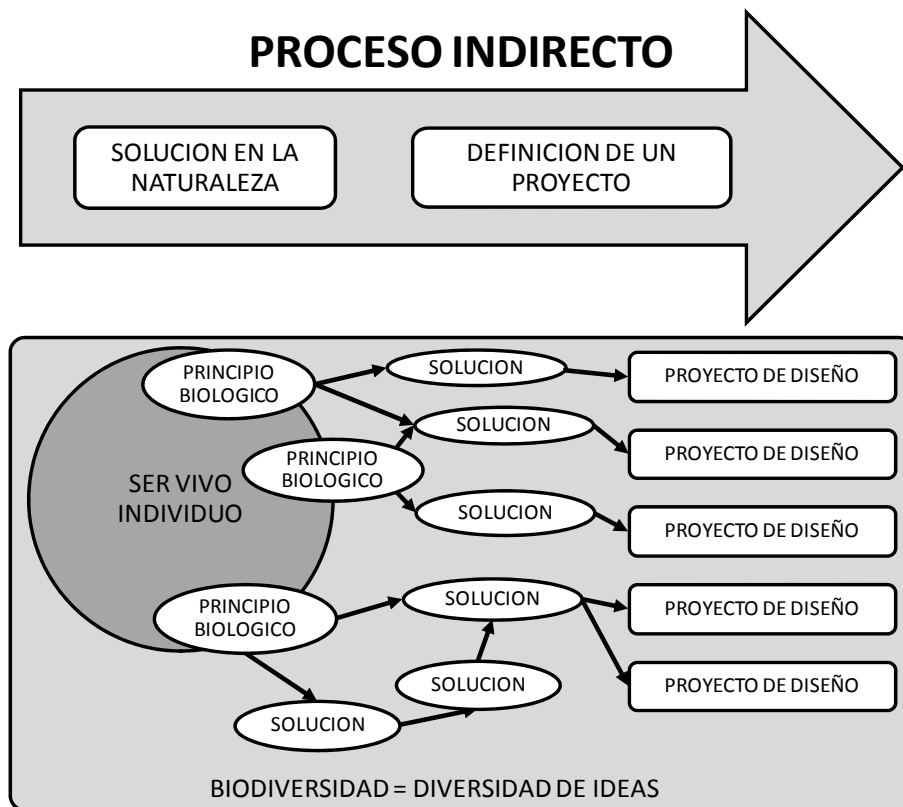


Figura 4.2: Esquema básico de proceso biomimético indirecto.

El estudio detallado de un individuo proporciona resultados en forma de principios básicos o de funcionamiento que son traducidos como soluciones técnicas y aplicables a diversos proyectos de diseño. La diversidad de soluciones permite encontrar aplicaciones en diferentes proyectos de diseño, además algunas soluciones pueden ser validas para distintos productos, como el ejemplo del tiburón por el estudio exhaustivo de la piel y sus aplicaciones (figura 4.2).

En la figura 4.2 se representa que un ser vivo puede tener varios principios biológicos, alguno puede ser solución para un determinado proyecto, algunas soluciones se consiguen por medio de más de un principio biológico, en ocasiones una solución puede ser aplicable a varios proyectos y en otras son parte de soluciones que combinadas pueden ser la resolución de un proyecto.

La biodiversidad hace que el número de soluciones se multiplique, además hay estrategias que son comunes a varios individuos de diferentes especies, pero la forma de conseguir la solución no es exactamente la misma, por lo que puede generar más soluciones, por ejemplo, recoger la humedad ambiental como lo hace el escarabajo de Namibia o como ocurre con la tela de araña.

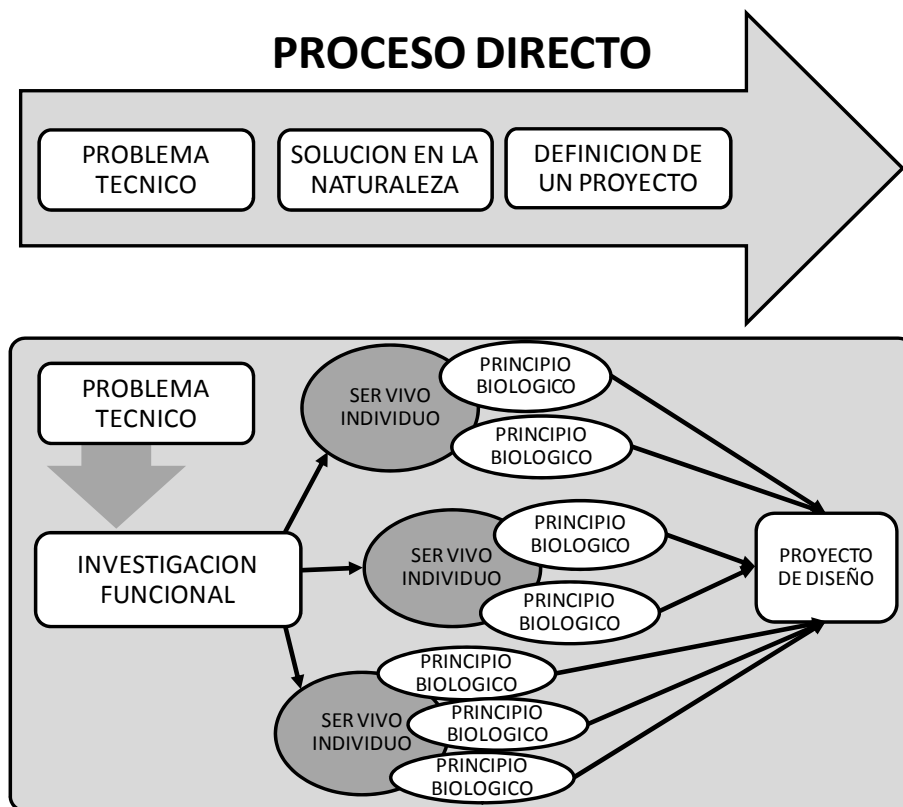


Figura 4.3: Esquema básico de proceso biomimético directo

El proceso directo utiliza los resultados de la investigación en el ámbito de la naturaleza para encontrar principios que puedan ser extrapolados al ámbito del diseño, siendo solución al problema de partida, ver figura 4.3. Lo habitual es encontrar casos que integran también el proceso indirecto. Hay referencias de metodologías que combinan ambos procesos, como los trabajos de Bombardelli y Di Bartolo (Songel 1991, Lozano 1996).

Ambos procesos son válidos y para ser desarrollados es necesaria la colaboración interdisciplinar entre tecnología y biología.

No es sencillo encontrar un especialista capaz de aplicar los resultados de cada uno de los procesos, y es difícil obtener la información precisa en el formato y lenguaje adecuado.

La biomimética permite aproximar nuevas soluciones al campo del diseño industrial encaminadas a conseguir productos más creativos y diferenciados (López-Forniés 2010). Se han creado tablas (Bogatyreva 2003), bases de datos (Vincent 2005), listas de principios, etc., que establecen las analogías, similitudes, o relaciones entre las características de la naturaleza, y aquello que el hombre puede aplicar a sus artefactos. Todas tienen en común la búsqueda de la superación del estado de la técnica actual.

Existen varias metodologías de diseño que utilizan la imitación, la copia o la emulación de la naturaleza para encontrar soluciones más adecuadas a los problemas planteados en la sociedad actual, ya sean de carácter funcional, estructural, por la necesidad de nuevos materiales y en ocasiones por la forma o una estética determinada.

También debemos considerar aquellos métodos que se basan en la inspiración, la abstracción y la intuición, aunque no tengan el mismo rigor científico, son aquellos casos en los que, por evocación, la naturaleza puede haber tenido alguna influencia (Vogel 2000).

El diseño biomimético no se aplica habitualmente porque no hay una metodología clara, una nueva metodología que puede ser utilizada en proyectos de diseño y desarrollo de productos puede tener grandes ventajas.

### 4.2 OBJETIVOS DE LA METODOLOGÍA

La metodología tiene como objetivo principal el encontrar un proceso de diseño conceptual alternativo que consiga mejoras funcionales de producto incorporando la biomimética como fuente de soluciones. Para conseguir este objetivo se plantean una serie de objetivos parciales:

- Definir marcos de trabajo en los que sea posible aplicar el proceso para generar las mejoras funcionales.
- Establecer un método creativo en la exploración de nuevas funciones de producto.
- Analizar y aplicar las metodologías existentes en biomimética y relacionarlas con otros métodos utilizados en el diseño de productos, como el análisis funcional, la generación de ideas, la especificación de diseño de producto y la conceptualización.
- Generación de nuevos conceptos de producto con mejoras funcionales conseguidas de modo alternativo por medio de la biomimética
- Establecer analogías entre carcasas de producto y exoesqueletos desde el punto de vista funcional, como una forma de representar y evidenciar la metodología.
- Establecer fuentes válidas de información que contribuyan al conocimiento, gracias a los distintos análisis realizados en el proceso de diseño.



Para alcanzar el objetivo principal se propone desarrollar un proceso de diseño que integre en sus fases los objetivos parciales, y que se mostrará más adelante con ejemplos de proyectos que aplican esta metodología para la incorporación de mejoras funcionales en carcasas de productos.

### 4.3 ESQUEMA BÁSICO. FASES DEL PROCESO

Se necesita sistematizar el diseño biomimético. Una metodología basada en la biomimética y aplicable al diseño conceptual puede tener grandes ventajas, teniendo en cuenta que en el proceso de diseño no hay una resolución única, sino soluciones que pueden abrir nuevos caminos de solución.

En la metodología propuesta se relacionan las soluciones funcionales de la naturaleza con aplicaciones novedosas en productos. La innovación funcional diferencia al producto gracias a la exploración de funciones alternativas y a los referentes naturales que desarrollan esas funciones. El resultado es la definición conceptual de productos, fase de diseño crucial para conseguir innovación.

#### 4.3.1 Comparación con metodologías de diseño por fases

La meta principal de esta investigación supone establecer una nueva forma de trabajo, partiendo de un proceso de diseño tradicional en el que se estructuran fases de análisis y de síntesis.

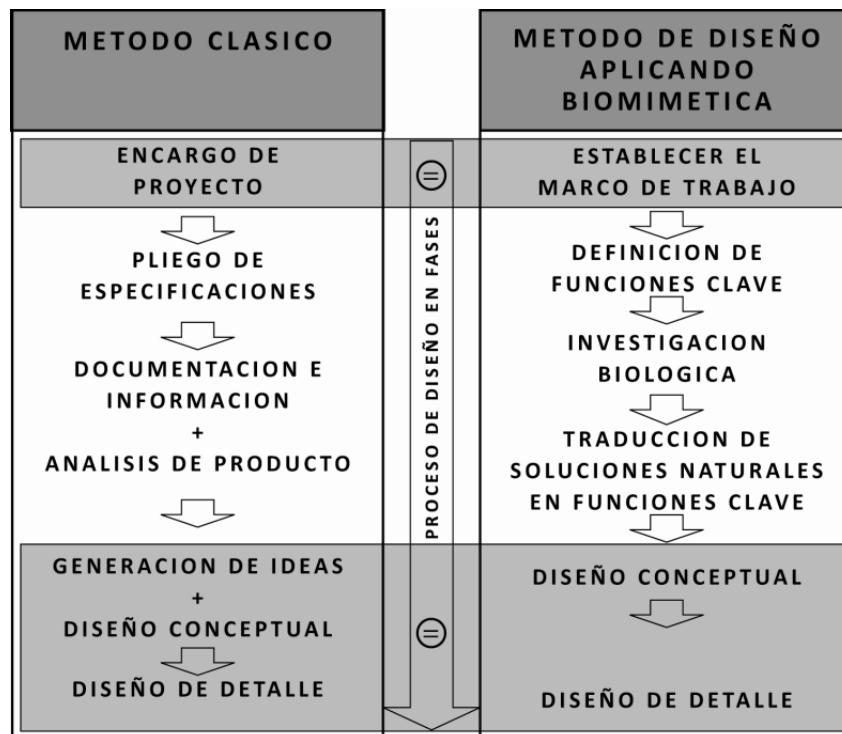


Figura 4.4: Coincidencias y diferencias entre metodología clásica y la nueva propuesta.

Como se ha descrito en el tercer capítulo las metodologías de diseño actuales se estructuran por fases siendo las más comunes las representadas en la columna izquierda de la figura 4.4. En esta misma figura se pueden observar las coincidencias, en gris claro, y diferencias, en blanco, entre una metodología clásica y la nueva metodología propuesta.

La figura 4.4 describe la metodología y el proceso de diseño, siendo los métodos aplicados cada una de las fases del mismo, establecer el marco de trabajo, definición de las funciones clave, investigación y traducción de las soluciones de la naturaleza y la definición conceptual de producto.

#### **4.3.2 Descripción de la metodología.**

La fase inicial del encargo de proyecto es similar a establecer el marco de trabajo, se trata de definir el proyecto, los objetivos, las limitaciones y los condicionantes. En el encargo real hay un pliego de especificaciones de diseño, después comienza una fase de información y documentación, se analiza el producto a diseñar y el estado de la técnica. Estos análisis (funcional, formal, uso, materiales y procesos, etc.,) permiten definir conclusiones que serán fuente de generación de ideas en una fase conceptual, para después pasar a una fase de diseño preliminar y de detalle.

En la metodología propuesta no existe un pliego de especificaciones ya que no hay un encargo real, no hay un cliente con una necesidad específica, pero sí que puede haber un cliente con la necesidad de generar innovación y nuevos conceptos de producto. Esta necesidad, que es futura, se define como exploratoria o prospectiva, y tiene como objetivo la generación de nuevos o mejorados conceptos de producto. Un ejemplo son los centros de investigación en diseño o los proyectos como “vision of the future” de la empresa Philips.

Al no existir un pliego de especificaciones es necesario definir un marco de trabajo en el que se identifican productos que pueden ser mejorados gracias a la incorporación de funciones clave, estas funciones son resueltas por traducciones de soluciones existentes en la naturaleza, detectadas por una investigación biológica, y forman el conjunto de especificaciones que definen el diseño conceptual y que más tarde se desarrolla en la fase de diseño de detalle.

Las funciones clave son detectadas en un análisis funcional realizado con la técnica de mapas mentales, aquellas funciones tengan un interés especial se seleccionan para ser posteriormente desarrolladas.

Mediante la tabla 4.1 se relacionan las funciones clave con las soluciones a dichas funciones en la naturaleza, es necesario hacer un paso intermedio de traducción de la función clave a la solución natural utilizando la columna central.

## MODELO METODOLÓGICO PROPUESTO

La investigación biomimética es la búsqueda de individuos en la naturaleza que sean candidatos a solucionar la función clave que se ha relacionado. Después la tabla se utiliza en sentido inverso y se realiza la traducción de los casos de éxito de la naturaleza para la aplicación a las funciones clave. Una vez que están resueltas las funciones clave se realiza el diseño conceptual, se exponen las especificaciones de diseño a nivel conceptual para posteriormente realizar el diseño de detalle. Esta última fase final es análoga a otras metodologías y atiende a la formalización del producto.

En este trabajo de investigación se desarrolla la metodología desde la delimitación del marco de trabajo hasta la definición conceptual del producto, sin entrar en el diseño de detalle. Se desarrolla hasta la fase conceptual ya que la meta de la metodología propuesta es la exploración de funciones cuya resolución puede estar basada en la naturaleza, para que estas soluciones definan requisitos de diseño en la conceptualización, en el ejemplo desarrollado aplicado a mejoras funcionales para carcasas de producto.

Es cierto que la biomimética puede aplicarse también como método de trabajo para el desarrollo de nuevos materiales o procesos de fabricación y en ocasiones para la resolución de detalles concretos de un producto, y son muchos los ejemplos que lo confirman.

<b>FUNCION CLAVE (OBJETIVOS DE PROYECTO)</b>	<b>LINEAS DE INVESTIGACION (COMO CONSEGUIR LAS FUNCIONES CLAVE)</b>	<b>REFERENCIA NATURAL ( RELACION BIOMIMETICA)</b>
FUNCION CLAVE 1	COMOSE PODRIA...?	SER VIVO 1
	QUIEN PODRIA...?	SER VIVO 2
	PORQUE SE DEBERIA...?	SER VIVO 3
	QUE TIPO DE ESTRUCTURA PODRIA...?	SER VIVO 4
	QUE MATERIAL PODRIA....?	SER VIVO 5
	QUE ES NECESARIO PARA ....?	
	DONDE SE PODRIA .....?	
FUNCION CLAVE i	CUESTIONES PARA LA FUNCION CLAVE i	SER VIVO x

Tabla 4.1: Tabla de relación biomimética. Búsqueda de la referencias biomiméticas para las funciones clave.

En la tabla 4.1 la primera de las columnas tiene las funciones clave definidas previamente, la segunda con las líneas de investigación que relacionan la función clave con la manera de lograr los objetivos, y la tercera en la que cada una de estas líneas se refiere a uno o varios seres vivos y el modo en que pueden hacerlo de una manera particular. La tabla muestra cómo se actúa para encontrar los referentes biomiméticos. Se presentan en un proceso de dos direcciones, las cuestiones de cómo conseguir las funciones clave y como la naturaleza responde a nuestra necesidad, se muestra por la línea de izquierda a derecha marcada con el número 1.

Una vez que se encuentran una serie de referentes naturales, se eligen los más idóneos para poner en práctica su solución funcional para nuestra función clave, que se muestra por la línea de retorno marcada con el número 2. Las líneas de investigación se desarrollan formulando preguntas respecto a la función clave, que se definen en términos biológicos para convertir una cuestión técnica en una búsqueda en el campo de la biología.

Aquellos referentes naturales que son candidatos a dar solución a las funciones clave se estudian en detalle para poder extraer las analogías con las que establecer las especificaciones funcionales que permitan definir conceptos de producto.

#### **4.4 EL MARCO DE TRABAJO**

La biomimética puede proporcionar diversidad proyectual y soluciones a los problemas propuestos (López-Forniés 2010), por lo que en la etapa previa se establecen los requisitos funcionales para obtener la mejora y la innovación en el producto, estableciendo un marco de proyecto. En la metodología propuesta no hay, inicialmente, un proyecto con objetivos específicos, el marco de trabajo establece criterios para seleccionar el grupo de objetos a diseñar.

##### **4.4.1.1 Definición del marco de trabajo**

El marco de trabajo no pretende definir un objeto o producto concreto, su finalidad es establecer una serie de rasgos o características comunes a un grupo suficientemente amplio de modo que las mejoras encontradas sean aplicables a esos productos, es decir, que las innovaciones funcionales conseguidas no sean exclusivas de un solo objeto sino que por adaptación o transformación sean aplicables a dicho grupo. Por ejemplo si se desea desarrollar la característica de hermético en una carcasa, y es aplicable a envases o contenedores para alimentos, también podrá ser aplicada a otros contenedores, para electrónica, sumergibles, etc., en los cuales dicha característica sea necesaria o beneficiosa.

Por otra parte es necesario comentar que el marco de trabajo se puede ampliar o reducir previamente a investigar sobre las funciones que se pretenden mejorar.

Una vez definido el grupo o sector industrial de los productos se puede tomar como conjunto completo o por partes, ya que no tienen la misma aplicación. Por ejemplo, si el grupo completo es el de contenedores, la aplicación de la función de hermético puede ser distinta para un dispositivo electrónico que debe soportar la intemperie, un envase de alimentos o dispositivos subacuáticos, ver figura 4.5.

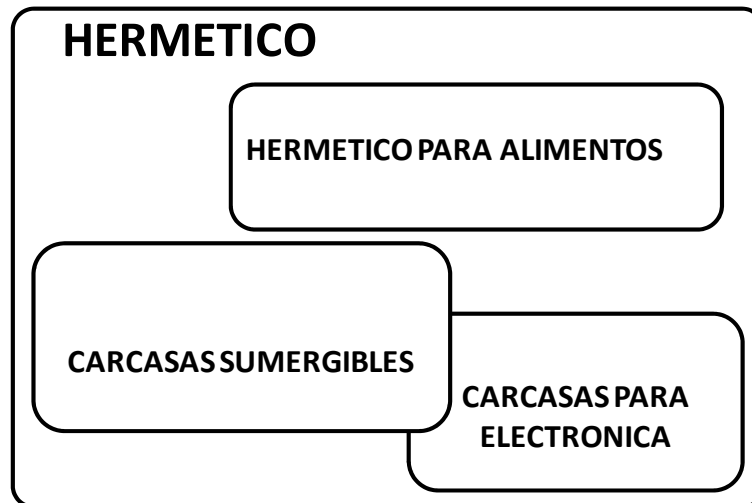


Figura 4.5: El marco de trabajo y sus límites.

Algunos de los objetos clasificados dentro del marco pueden pertenecer a varios grupos, en el ejemplo podemos decir que una carcasa sumergible puede contener una electrónica y viceversa. Esto quiere decir que, estudiando un grupo reducido de productos podemos encontrar soluciones a una función determinada, y esta función puede ser reutilizada en otro grupo distinto.

Podemos ilustrar este solapamiento con un caso de evolución funcional e innovación de producto, este es el caso de las cámaras fotográficas submarinas. Inicialmente se disponían en carcasas herméticas diseñadas específicamente para cada cámara, lo mismo ocurría con otros dispositivos como flash o videocámaras, existían desde las más básicas que simplemente se podían sumergir o mojar, hasta las profesionales que se utilizaban en profundidades medias y bajo altas presiones. Sin embargo hoy en día hay cámaras cuyas carcasas son sumergibles, resisten las inmersiones en baja y media profundidad, e incluso se diseñan para que sean parte del equipo de submarinismo como una adaptación a las gafas. La zona de intersección de la figura 4.5 muestra como un dispositivo electrónico necesitaba de una carcasa sumergible, mientras que actualmente la electrónica puede incorporar la característica de hermético o sumergible como una función de su carcasa.

#### 4.4.2 Justificación de la elección del marco de trabajo

Como caso de estudio, se eligen las carcasas de productos de consumo por encontrarse en prácticamente todos los artefactos. En algunos casos tienen poca funcionalidad pero su presencia es absolutamente necesaria, se pueden ampliar o mejorar las funciones que realiza. Sin embargo hay productos cuya carcasa tiene todas las funciones, y podrían proponerse mejoras, innovaciones o alternativas para conseguir dichas funciones.

También es posible encontrar nuevos conceptos, o productos inexistentes. Las carcasas son frontera entre el componente funcional del producto y el entorno exterior, como en el organismo vivo la membrana, la piel o el exoesqueleto es la superficie que lo aísla del exterior.

Los exoesqueletos son las carcasas de animales, en las plantas también se dan casos de carcasas o recubrimientos de protección. Los invertebrados representan el mayor grupo de animales en la Tierra, con aproximadamente 1 millón de especies caracterizado hasta la fecha (Zachariah 2009, Brusca 2005) y representan más del 90% de las formas de vida del planeta. La diversidad de los invertebrados es enorme, con más de 30 filos diferentes y miles de taxones posteriores. Las diferencias entre los grupos son tan grandes que la única característica común entre ellos es que, como su nombre lo indica, no poseen una verdadera columna vertebral. Por este motivo sus exoesqueletos incluyen un gran número de funciones, algunas de ellas son básicas y fundamentales, mientras que otras son específicas y tienen una fuerte diferenciación que les hacen especial para nuestro estudio.

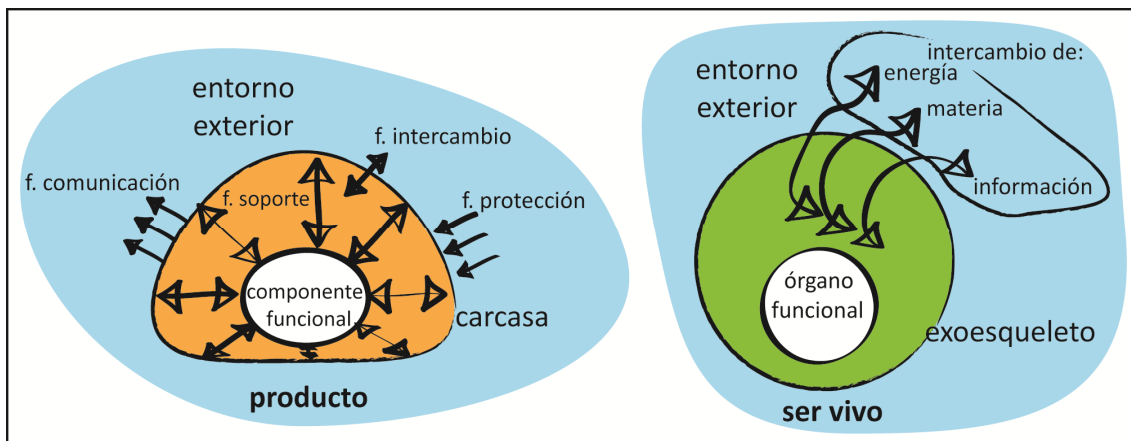


Figura 4.6: Relación de producto y organismo vivo con su entorno a través de carcasa y exoesqueleto.

En la figura 4.6 se muestra cómo ser vivo y producto están relacionados interna y externamente con su entorno, y cómo se interrelacionan exoesqueleto y carcasa. El ser vivo se caracteriza por el intercambio de energía, materia e información. La carcasa del producto se caracteriza por sus funciones, de protección y soporte, permitiendo el intercambio de materia y energía y la comunicación. En ambos casos se trata de funciones básicas, de primer nivel y un alto grado de necesidad de existencia.

Las carcasas son frontera entre el componente funcional del producto y el entorno exterior, como en el organismo vivo la piel o exoesqueleto es la superficie que lo aísla del exterior, del mismo modo que se han encontrado analogías entre la piel y las fachadas de los edificios (Gruber 2010).

Se establece el marco de posibles productos cuyas carcasas tienen cierta importancia debido a una función o característica sobresaliente. En el caso de objetos cuya funcionalidad se integra en la carcasa, su presencia es absolutamente necesaria y es difícil de encontrar alternativas que la eliminen o sustituyan. Por ejemplo una papelera de una sola pieza, tanto la función principal como las funciones secundarias están incluidas en un componente único, por lo que encontrar nuevas funciones o mejoras de las existentes puede ser de interés.

En el caso de productos cuya carcasa no realiza la función principal, o su funcionalidad no es muy alta pero su presencia es necesaria, se pueden integrar nuevas funciones o definir funciones de un modo alternativo. Es el caso de productos cuya carcasa tiene una función únicamente de protección, como por ejemplo carcasas para productos electrónicos, y además por peso, dimensiones o forma tiene poca importancia pero su presencia es fundamental.

#### 4.4.3 Relación entre el Brief de diseño y el marco de trabajo

Para definir el marco de trabajo se establece una lista de posibles productos cuyas carcasas tienen cierta importancia debido a su función o una característica sobresaliente, inicialmente se eligen independientemente del usuario final o entorno de uso, sin existir ninguna limitación para este tipo de especificación. La figura 4.7 presenta una breve lista de productos seleccionados a modo de ejemplo.

<b>CATEGORIA DE PRODUCTO</b>	Dispositivos electrónicos con carcasas funcionales, táctiles, etc.	Papeleras, contenedores de reciclaje, etc.	Envases alimentarios, envase un solo uso, etc.	Elementos para protección personal, cuerpo o cabeza. Cascos, guantes, mascarar, armaduras, etc.	Maletas, mochilas, bolsas de viaje, etc.
<b>IMAGEN</b>					

Figura 4.7: Lista de productos seleccionados y ejemplos.

Una vez que el marco se ha definido se puede ampliar o reducir según lo que se pretenda, además se puede discriminar si se quiere mejorar el objeto como conjunto completo de funciones o solo algunas de ellas, como se ha explicado en el caso anterior se puede mejorar

un hermético para alimentos en su globalidad o en una función concreta, la capacidad de transpiración como ejemplo.

Se buscan funciones que puedan ser innovadoras y ofrecer diferenciación y valor añadido. La lista nos permite clasificar y establecer criterios de selección para después identificar las funciones clave, que son aquellas que cumplen los requisitos funcionales del producto.

La idea de brief de diseño o pliego de especificaciones se entiende como el hecho de que un cliente identifica una necesidad, prepara una propuesta de solución en forma de brief y lo entrega al diseñador, quien decide cómo esta idea se realiza mejor (Erlhoff 2008).

Hoy en día, un brief describe en detalle la situación inicial, el usuario potencial, los objetivos, los resultados de los estudios cuantitativos y cualitativos de mercado, los aspectos de servicio requerido, así como los recursos disponibles. El brief resume la reunión informativa en la cual el cliente y el diseñador analizan y se ponen de acuerdo sobre el objetivo, el alcance del proyecto y el presupuesto.

El brief es un documento en el que se define el tipo de proyecto a desarrollar, si se trata de un nuevo diseño, un rediseño o una adaptación por ampliación de gama o línea de producto. Este mismo documento nos referencia a un mercado existente, a productos comercializados que pueden ser estudiados y analizados.

En el marco de trabajo conocemos los productos pero no se busca su análisis, lo que se pretende es conocer los rasgos y características que los hacen comunes y pertenecientes a ese determinado grupo, como lo hace la taxonomía en biología. El marco de trabajo nos agrupa conceptualmente los objetos sobre los que investigar en busca de nuevas y perfeccionadas funciones.

Esto implica que para garantizar control sobre el proyecto se deben establecer unos límites por medio de un marco de trabajo. Del mismo modo que el brief define a grandes rasgos los requisitos que debe cumplir el futuro diseño, el marco debe listar las características que se pretenden mejorar a nivel funcional.



### 4.5 ANÁLISIS FUNCIONAL

La innovación se puede generar por la búsqueda de nuevas funciones de producto aun no definidas, aquellas que no surgen de manera intuitiva, sino que son fruto de un proceso creativo orientado a generar novedosos y originales conceptos de producto (Tassinari 1994). Esto representa la mejora funcional de productos, que se traduce en innovación incremental cuando las funciones mejoran las actuales prestaciones del producto, o de ruptura cuando las funciones generan un nuevo concepto de producto inexistente en el mercado.

Una función desarrollada en la naturaleza con un fin determinado puede tener una aplicación distinta en nuestros artefactos, y esa es precisamente la característica tan valiosa de la biomimética, la capacidad de extraer una función de un entorno determinado y extrapolarlo a lo artificial. Asimilando el concepto de exaptación, que describe como un organismo evoluciona originalmente para adaptarse a determinadas condiciones y, ya consolidada esa adaptación, comienza a ser usada y perfeccionada para una finalidad distinta. En la naturaleza el resultado de este nuevo uso permite al organismo conquistar otros nichos ecológicos; En los productos, facilita la conquista de nuevas posibilidades de negocio.

Los productos son la suma de sus funciones, están diseñados para cubrir una necesidad objetiva, una función principal. Existen otras funciones que complementan o mejoran el desarrollo de aquella. Todos los artefactos, pueden beneficiarse del análisis funcional para estar mejor concebidos y de esta manera mejorar su calidad (Tassinari 1994). Un análisis funcional metódico otorga al producto un nivel de calidad funcional que lo coloca por delante de sus competidores.

#### 4.5.1 Antecedentes. Análisis funcional, métodos actuales.

En la definición del sistema técnico de Hubka y Eder (1988), se estudia el objeto en relación al propósito para el cual se ha diseñado, existen diferentes niveles cada uno con su representación, desde un simple diagrama de bloques que describe el sistema de manera abstracta y conceptual hasta la estructura de componentes, que es la representación más concreta y detallada, pasando por la estructura funcional y orgánica.

La estructura funcional del sistema técnico define el propósito del objeto en términos de funciones, por lo que esta estructura se genera por una colección e interrelación de funciones, ver la figura 4.8. En este sentido se define la función de un sistema técnico, objeto o producto como la capacidad de cumplir con un propósito, o de transformar una situación inicial en la situación final deseada en unas determinadas condiciones.

En este tipo de representación se encuentra cierta analogía con los seres vivos, ya que se entiende el sistema técnico como aquél que transforma e intercambia ciertas entradas o cantidades de energía, materia e información para obtener un resultado deseado, similar al ser vivo como ya se ha citado anteriormente y visto en la figura 4.6.

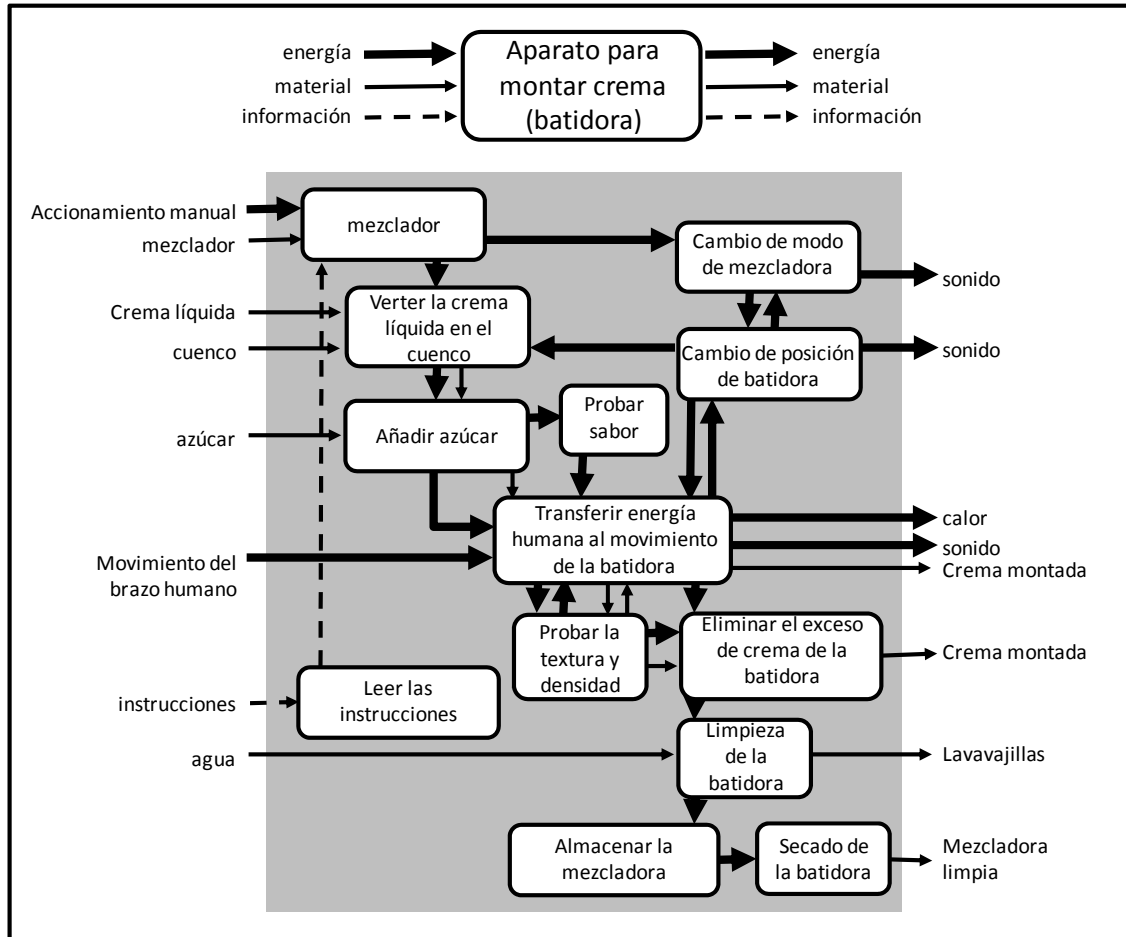


Figura 4.8: Esquema de la estructura funcional. (Hubka y Eder 1988)

La idea de fondo es que la estructura de funciones se construye a partir de un número limitado funciones genéricas de un alto nivel de abstracción. Esta estructura de funciones debe de una manera abstracta estimular la creatividad y evitar apresurarse en encontrar soluciones. El fundamento del análisis funcional requiere especificar primero lo que el producto debe hacer, definir su propósito, y luego deducir lo que las partes, que aún no se han definido, deben hacer. El análisis funcional ayuda a conocer en detalle el producto, pero también fuerza al diseñador a tomar distancia respecto de los productos y componentes conocidos, planteando cuestiones sobre qué está destinado a hacer el nuevo producto y cómo podría hacerlo. El método es útil para lograr un nivel alto de abstracción y alejarse de las soluciones convencionales.

En el análisis funcional el producto es considerado como un sistema técnico y físico, ya que se trata de una serie de piezas y componentes que cumplen con las funciones parciales y el funcionamiento general. El análisis funcional precede a menudo al método de cuadro morfológico. Las funciones y sub-funciones que se identifican en el análisis funcional sirven como parámetros en el cuadro o matriz morfológica.

El cuadro morfológico tiene como objetivo mostrar las diferentes soluciones para cada una de las funciones o grupos funcionales que debe cumplir el producto, de modo que las diferentes combinaciones pueden generara distintos conceptos o soluciones conceptuales.

En el análisis funcional clásico por medio del árbol de funciones y gráficos funcionales (Hubka 1988) o por métodos más evolucionados como el Functional Analysis System Technique FAST (Bytheway 1975), Structured Analysis and Design Technique SADT (Lambert 1999) o Design Function Deployment DFD (Sivaloganathan 2001) entre otros, se estudian los productos ya diseñados. Para la generación de nuevos conceptos es necesario aplicar la creatividad y proponer métodos alternativos. Por esta razón se relacionan el análisis de funciones con técnicas de creatividad. Normalmente estos métodos tienen como objetivo el conocer en detalle las funciones del objeto analizado, y su aplicación termina en diseños muy similares a los existentes o rediseños, esto no quiere decir que estas técnicas no sean válidas para aplicar sus resultados posteriormente en fases creativas, en las que se plantean mejoras funcionales.

Se analiza la técnica de FAST porque aunque tiene un enfoque de análisis de producto se basa en una clara representación de la descomposición de funciones, la organización jerárquica y los niveles de abstracción y complejidad.

Es una representación gráfica de las relaciones lógicas de las funciones de un producto. Las funciones se muestran horizontalmente en forma de diagrama con las siguientes reglas; Las funciones de orden superior aparecen a la izquierda al contestar por qué se produce una función. Las funciones de orden inferior aparecen a la derecha al responder cómo se produce una función. Las funciones que ocurren al mismo tiempo aparecen verticalmente. Las líneas verticales en ambos extremos indican el alcance del estudio. Y la función básica del producto se define justo a la izquierda de la línea de alcance izquierda.

Para conseguir dicha función de mayor rango y propósito general, se pueden abrir varias líneas que se corresponden con especificaciones u objetivos del producto, son las funciones básicas. A partir de una función básica, se cuestiona cómo se lleva a cabo y se desarrolla de un modo más específico, van surgiendo funciones en niveles de rango inferior llamadas dependientes o sub-funciones, esta línea de preguntas y de pensamiento se lee de izquierda a derecha.

Para abstraer una sub-función a un nivel superior, nos preguntamos por qué se realiza dicha función. Esta línea lógica, que se lee de derecha a izquierda, comienza en el nivel más bajo y las funciones están asociadas a actividades concretas o aplicaciones técnicas, estas funciones son independientes del objetivo final, ver figura 4.9.

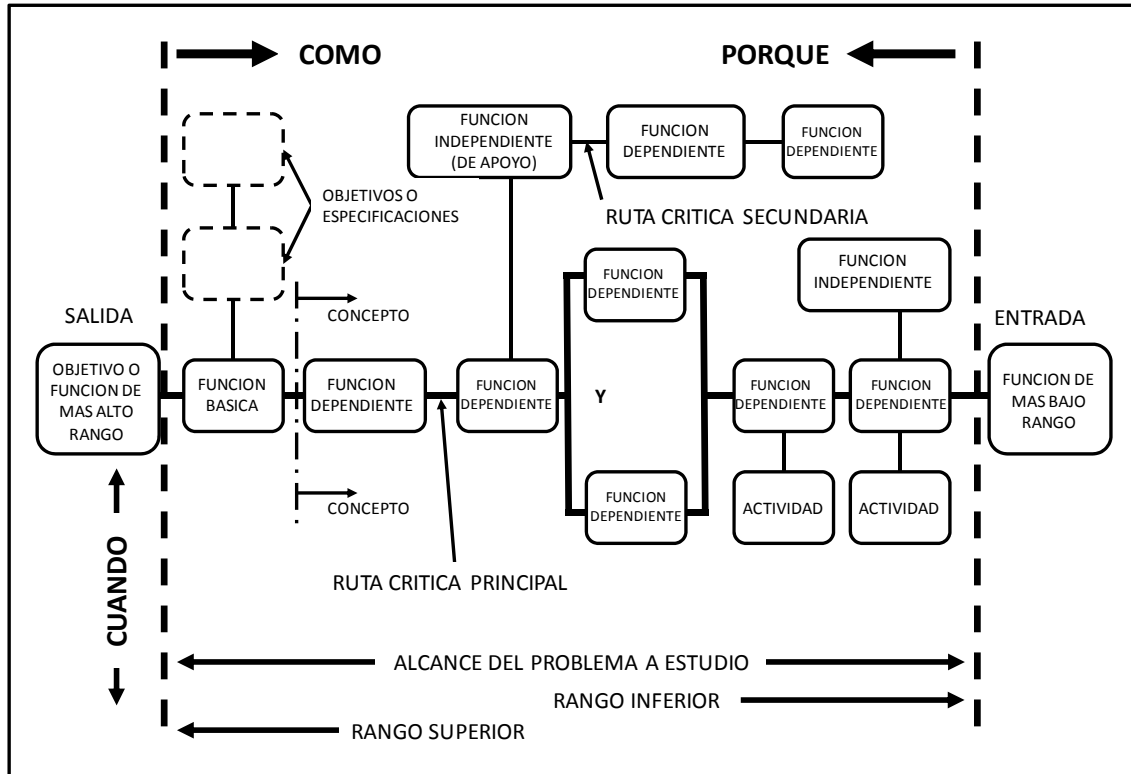


Figura 4.9: Descomposición y análisis funcional usando FAST (Wixson 1999)

Esta técnica también resulta útil y a tener en cuenta en la aplicación de la metodología propuesta por mostrar un carácter bidireccional, del cómo al por qué y del por qué al cómo.

#### 4.5.2 Análisis funcional en relación a las funciones biológicas

Como ya se ha citado, la descomposición funcional permite desagregar una función compleja, que se consigue gracias a varias sub-funciones, que llamamos funciones secundarias o auxiliares. En la naturaleza también ocurre del mismo modo, los seres vivos tienen una función básica que es perpetuar la especie por lo que necesita cumplir las funciones de supervivencia y reproducción, para ello debe realizar otras muchas funciones que le permitan desarrollar estas de orden superior de una manera eficaz y eficiente. Helms (2009) define los sistemas biológicos como complejos, multifuncionales e interconectados, haciéndose difícil aislar una función sencilla, es decir, existe cierto nivel de complicación en comprender por qué un individuo desarrolla funciones tan específicas, y para comprenderlas es necesario entender la interrelación con otras funciones.

Es necesario estudiar el sistema en su conjunto para obtener la función deseada, tal y como ocurre en productos complejos que tienen grandes grupos funcionales y necesitan interrelacionar no solo funciones sino también sistemas. Además deben interrelacionar en un entorno en el que existen otros productos y usuarios.

La optimización funcional (Helms 2009) define una ecuación para optimizar el problema, el diseñador analiza las posibles soluciones según un criterio que evalúa el cumplimiento de la función respecto a su optimización. En biología también es posible definir ecuaciones para encontrar el óptimo de una función, determinando los factores que afectan positiva o negativamente a la consecución de esa función, por ejemplo en el crecimiento de una planta, la cantidad y calidad de los nutrientes, y la radiación solar, son factores que equilibrándose proporcionan un óptimo.

### **4.5.3 Tipos de funciones. Clasificaciones.**

Existen diversas clasificaciones de funciones, para nuestra investigación son de interés la clasificación de funciones por su complejidad, el grado abstracción y la categoría de su propósito.

Al clasificar las funciones por su complejidad, a cada función se le puede asignar jerárquicamente un cierto grado de complejidad, el nivel más bajo se asigna a las funciones elementales que son aquellas que no se pueden descomponer en otras aun más limitadas. Las de más alto nivel son aquellas que son más genéricas, mientras que las de más bajo nivel son muy específicas y especializadas.

La clasificación según el grado de abstracción proporciona a cada función un grado desde lo más concreto a lo más abstracto. Una función abstracta se puede descomponer en otras más concretas, y el propósito genérico se consigue gracias a conseguir el propósito de cada una de esas otras funciones, a su vez éstas se pueden descomponer en otras aun más concretas. Los niveles de abstracción y de complejidad se pueden relacionar, de modo que las funciones de menor nivel de complejidad son más concretas, mientras que las más complejas son más abstractas.

También se dispone la clasificación según su importancia, las funciones principales o fundamentales, son las que aportan la funcionalidad esperada por usuario del producto. Las funciones secundarias o auxiliares, son las que complementan o perfeccionan el desarrollo de la función principal y coinciden con las vistas en la clasificación por la categoría de su propósito. Y las funciones innecesarias y/o perjudiciales, son aquellas que no aportan utilidad ni al productor ni al consumidor y de ninguna manera mejora la función principal.

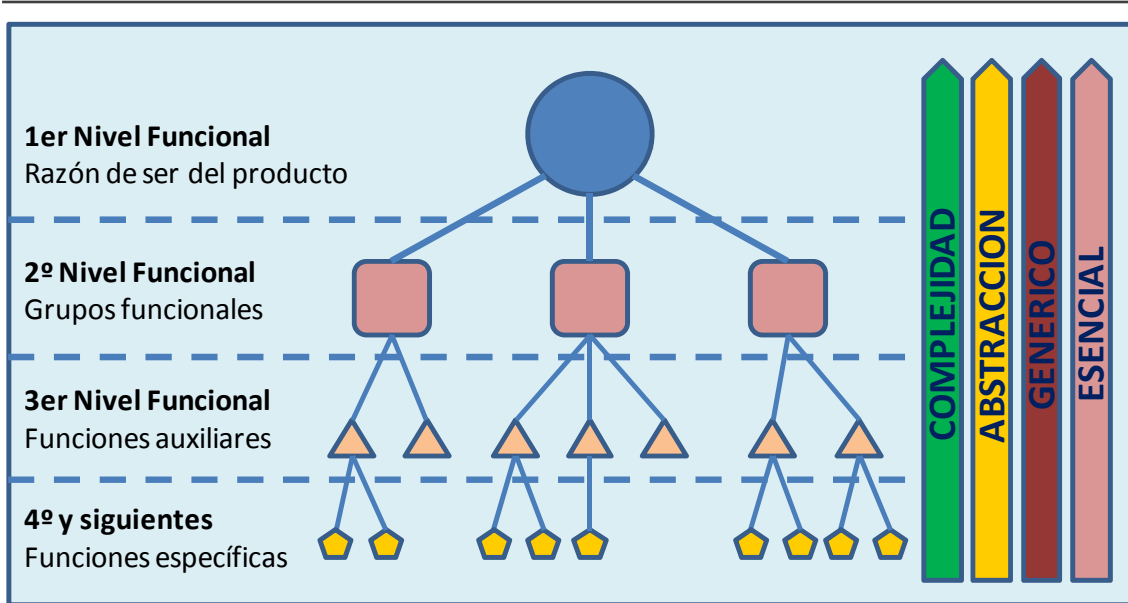


Figura 4.10: Gráfico de niveles funcionales. Índice de complejidad, abstracción y necesidad de existir.

La figura 4.10 muestra que el primer nivel funcional representa la razón de ser del producto donde hay un alto grado de complejidad, abstracción y necesidad de existir, este nivel es difícil de resolver siendo necesario descomponer en otros niveles donde la complejidad se reduce y se llega a funciones muy concretas que son resueltas de varias maneras y no son tan esenciales.

Otra clasificación de funciones se basa en la categoría del propósito de la función. Para conseguir el propósito genérico de un producto necesariamente se tienen que conseguir una serie de funciones, algunas de estas son esenciales y sirven para asegurar que la operación y comportamiento del objeto sea el deseado. Estas funciones son las auxiliares, las de regulación y control, las encargadas de transportar y dirigir la energía, así como las que aseguran que el objeto es una unidad por unir y dar soporte a otras partes que tienen sus funciones concretas.

#### 4.5.4 Definición de funciones

En el diseño de producto al aplicar análisis funcional es necesario desarrollar cierta capacidad de abstracción, en lugar de pensar y hablar en términos de objetos y productos se debe cambiar el proceso de pensamiento y pensar en términos de funciones.

La funcionalidad se considera un concepto intuitivo y depende de la intención del diseñador. Hay tres enfoques en la definición de funciones en diseño. Una función se representa en forma de pares verbo-nombre (Miles 1972), un ejemplo sería la función de un eje que sirve para "Transmitir-Par". También se puede definir como una entrada y salida de flujo en un sistema que realiza ciertas transformaciones, donde las entradas y salidas pueden ser de energía, materiales o información (Rodenaker 1971), como los sistemas vivos ya mencionados.

Y por último, como la transformación entre las situaciones de entrada-salida y los estados intermedios (Goel 1996, Hubka 1988).

La función principal, como hemos visto puede definirse por el par, verbo-sustantivo, para después matizar y definir más específicamente por medio de preguntas sencillas, respecto a cómo, dónde, cuándo, por quién, para quién, etc. debe realizarse esta función principal. Por ejemplo, en el caso de una linterna, se puede decir que su función principal es dar luz y la definición de la situación respecto a cómo, dónde, cuándo, etc. debe dar luz es la que matiza esta función, en las respuestas a estas preguntas se describe la situación de funcionamiento y su uso, bajo el agua, en entornos peligrosos, uso por profesionales, etc. La definición de varias formas de hacer una misma función, la respuesta a cómo lo hace, nos puede dar ideas para obtener la misma función de modos alternativos. Esta definición de funciones también especifica cómo debe ser el producto y forma parte de la descripción de producto que hemos visto en modelos como el de Pugh (1991), Roozenburg y Eekels (1995) o Pahl & Beitz (1995).

Se definen las funciones como lo que un producto debe hacer para que satisfaga una necesidad o aporte un beneficio. Miles (1961) explicitó: "Si bien la definición de funciones puede parecer simple, no lo es. De hecho, la definición es difícil y requiere de precisión en el pensamiento, por lo que se debe tener cuidado para evitar el abandono de la tarea que se realiza". Para lograr esto tenemos que encontrar combinaciones de verbo-sustantivo que sean abstractos y de naturaleza genérica. Los verbos activos describen la acción, y los sustantivos describen para qué o sobre qué se realiza la acción. Una vez definida la función se deben hacer tres preguntas simples para comprobar que la función está correctamente definida. ¿Es lo que el usuario necesita? ¿Es lo que el usuario espera del objeto? Y por último, ¿Está satisfecho el usuario por el precio pagado?

El análisis de funciones es importante ya que altera la forma de pensamiento del diseñador. Cuando se intenta cambiar la forma de pensamiento, nos referimos a que el análisis de la función en realidad altera la forma en que el usuario percibe el producto y lo que debe satisfacer. El diseñador piensa en que hace el producto y qué otras formas de hacerlo tiene.

### **4.5.5 Relación entre las funciones técnicas y las biológicas**

Se buscan funciones presentes en la naturaleza, pero aún inexistentes en los objetos, que generen nuevos conceptos de producto con un interés comercial (Bhushan 2009). La comprensión de las funciones que se encuentran en la naturaleza sugiere su imitación.

Antes de diseñar o crear un objeto hay que considerar qué sería si se tratara de un ser vivo, cómo la naturaleza llevaría a cabo una función específica, qué existe en la naturaleza que se puede comparar o quién cumple funciones similares.

La innovación surge por la detección de nuevas funciones, deseables en los productos y que son similares a las de la naturaleza. Existe una gran cantidad de funciones en los exoesqueletos que pueden ser aplicadas de manera innovadora en las carcasas de los productos, teniendo en cuenta la analogía funcional entre carcasas y exoesqueletos (Vincent 2006). La función del sistema biológico se puede definir como la acción necesaria para lograr la condición futura deseada (Bogatyreva 2003). En el sistema artificial el objetivo sigue siendo el estado del sistema en el futuro. Así, su función es la acción necesaria para lograr los útiles o condición futura deseada con la ayuda de un dispositivo técnico.

FUNCIONES GENERICAS PROGRAM FUNCTIONS	FUNCIONES OBJETIVO GOAL FUNCTIONS	FUNCIONES ESPECIFICAS SPECIFIC FUNCTIONS
Crear	Reproducir	Multiplicar, Imitar, copiar, etc
	Producir	Aumentar, emitir, producir, etc
	Crecer	Aumentar, ensamblar, acumular, etc
	Depositar	Aumentar, almacenar, guardar, etc
	Fabricar herramientas	Usar la naturaleza, modificar la naturaleza, el diseño, etc

Tabla 4.2: Clasificación jerárquica de funciones biológicas aplicables mediante BioTRIZ.

(Bogatyreva 2002)

En la tabla 4.2, se presenta como ejemplo la función crear, la organización de forma jerárquica y ordenada en diferentes niveles, desde el más genérico al más específico. Bogatyreva (2002) define las “Program functions” como funciones genéricas, que definen aunque no resuelven el objetivo final del producto. Las “goal functions”, funciones objetivo, son necesarias para que se cumpla dicho objetivo y las “specific functions”, funciones específicas, son aquellas que permiten que se cumplan las funciones objetivo.

Se establecen criterios para identificar funciones clave, el objetivo es encontrar los criterios de aplicación que se correspondan con las funciones del medio natural.

En la tabla 4.3, se muestra la búsqueda de funciones específicas de un objeto y su relación con la solución natural, se representa mediante una tabla espejo o simétrica en la que se organizan niveles jerárquicos. Su reorganización llevó a una representación de las funciones en forma de mapa mental. El objetivo es la determinación de funciones específicas de las carcasas de los productos, y así relacionarlo con otros niveles funcionales más específicos de las soluciones en la naturaleza, en el ejemplo se explicita la función protección de la carcasa de producto.



## MODELO METODOLÓGICO PROPUESTO

REQUISITOS (FUNCIONES DE LAS CARCASAS)			SOLUCIONES (ANALOGIA CON FUNCIONES DE LOS EXOESQUELETOS)		
1er NIVEL (GENÉRICO)	2º NIVEL	3er NIVEL	FUNCIONES	EJEMPLO EN LA NATURALEZA	
FUNCIÓN BÁSICA DEL PRODUCTO O GRUPO FUNCIONAL	FUNCIÓN DETALLADA DE COMPONENTES O PARTES	FUNCIÓN ESPECÍFICA QUE REALIZA UN OBJETIVO CONCRETO	FUNCIÓN DESARROLLADA POR EL EXOESQUELETO	EJEMPLO DE SER VIVO QUE DESARROLLA LA FUNCIÓN	IMAGEN
PROTECCIÓN (MANTENER LA INTEGRIDAD FÍSICA)	RESISTIR IMPACTOS	DISIPACIÓN DE ENERGÍA	RESISTIR IMPACTOS/ DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE CHOQUE	La estructura del tejido de las patas amortigua el choque por su exoesqueleto de cutícula flexible y fibras densas.	

Tabla 4.3: Tabla que muestra los diferentes niveles de funciones y la relación carcasa-exoesqueleto.

Se pueden ver en la tabla 4.4 de manera esquemática (Gruber 2010, Gosztanyi 2010) representaciones jerárquicas de funciones en busca de aplicaciones biomiméticas en arquitectura, donde se relaciona la piel del edificio con la envoltura exterior de los seres vivos.

El objetivo se centra en resolver una función por medio de soluciones en la naturaleza estableciendo preguntas, y definiendo referencias a los principios biológicos que mejor se puedan trasladar a los objetivos predeterminados.

Ambas tablas tienen una separación entre la función buscada en la naturaleza y el objetivo pretendido en el ámbito artificial.

	Natural			Artificial
	función principal	funcionalidad de la piel en los seres vivos	quién / qué / cómo	analogía arquitectónica
Gruber (2010)	función que existe en un ser vivo y es deseada como solución para un problema técnico	listas de funciones realizadas por la piel en los seres vivos	quien está haciendo la función y cómo se logra la función	analogías en el campo de la arquitectura
	función	preguntas biologizadas		metas técnicas
Gosztanyi /Gruber (2010)	función deseada para la innovación	preguntas sobre la naturaleza en busca de los principios más prometedores		requisitos y el estado de la técnica
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">                     transmisión de lo natural a lo artificial                 </div>				

Tabla 4.4: Síntesis de tablas utilizadas en las metodologías de Gruber y Gosztanyi (2010).

#### 4.6 MAPAS MENTALES Y ANALOGIAS

Los mapas mentales son una representación gráfica de un tema, idea o concepto, empleando palabras clave, dibujos, colores, códigos, líneas y flechas, de tal manera que el motivo principal quede al centro del diagrama y el resto de conexiones fluyen desde el centro como las ramas de un árbol. Las conexiones son de carácter radial, no lineal, estimulan el ejercicio reflexivo en la organización de datos, eliminando el estímulo inicial.

Es un diagrama de representación semántica de las conexiones entre porciones de información. Los mapas mentales sirven para gestionar flujos de información, ideas o pensamientos facilitando la organización de esta información en un esquema sencillo, permitiendo obtener una visión clara y global. El uso de este método facilita y potencia la concentración, la lógica, la creatividad, la imaginación, la asociación de ideas y la memoria.

Un mapa mental es similar a una red semántica o modelo cognoscitivo pero sin restricciones formales en las clases de enlaces usados. Los elementos se arreglan intuitivamente según la importancia de los conceptos y se organizan en las agrupaciones, las ramas, o las áreas.

Tony Buzan (2002), científico inglés, creador de éste método dice, "El mapa mental es la expresión del pensamiento irradiante y, por tanto, una función natural de la mente. Es una técnica gráfica que nos ofrece una llave maestra para acceder al potencial de nuestro cerebro. Se puede aplicar a todos los aspectos de la vida, de modo que una mejoría en el aprendizaje y una mayor claridad de pensamiento pueden reforzar el trabajo del hombre".

Los mapas mentales son un método efectivo para la generación y organización de ideas por asociación o analogía. Se establece un motivo central, con la idea principal, y se trabaja hacia el exterior en todas las direcciones, produciendo una estructura creciente y organizada compuesta de palabras clave, en este caso funciones. Existe un vínculo entre estas dos herramientas, ya que ambas utilizan organizaciones jerárquicas y ramificadas, que establecen niveles de relevancia y en determinados casos de abstracción.

En un proceso creativo utilizando el mapa mental para hacer análisis funcional, la búsqueda de nuevas funciones termina en niveles alejados del motivo central. Las funciones denominadas clave son aquellas cuyo objetivo o característica diferencian al producto, y lo definen más específicamente. Le permiten hacer cosas que otros productos no hacen y que aun no se han desarrollado, son el germen de una posible innovación (Bogatyreva 2003).

El pensamiento por analogía involucra la transferencia de información de un ámbito de origen, que contiene el fenómeno análogo, a un ámbito de destino, que contiene el problema a resolver por analogía (Vosniadou 1989).

Hay diferentes tipos de similitud según sea la relación de los elementos análogos entre ambos ámbitos. La analogía superficial normalmente se refiere a los atributos superficiales del objeto, aquellos que hacen referencia a su presencia e imagen, por ejemplo los colores, las texturas y las formas. La analogía profunda se basa en conectar características relacionadas con la actuación del objeto, por ejemplo conectar estructuras internas o funciones entre los dos ámbitos (Gentner 1989).

Las analogías también se pueden dividir en dos tipos, en función de la relación entre los ámbitos de origen y de destino. Las analogías restringidas a un mismo ámbito o conceptualmente próximos, por ejemplo analogías entre productos electromecánicos. Por otro lado existen analogías en las que el ámbito de origen y de destino son distintos y no están relacionados, por ejemplo usar analogías que se presentan en el ámbito de los fenómenos biológicos y pasar al ámbito de los productos electromecánicos (Shu 2007).

Benami y Jin (2002) concluyen que las entidades ambiguas estimulan más ideas que las entidades no ambiguas, que tienden al efecto de fijación. La fijación en diseño es el fenómeno por el que en un proceso creativo las ideas no pueden ser evolucionadas. Por otra parte, las analogías entre distintos ámbitos dan como resultado ideas más creativas y originales que las analogías en un mismo ámbito, y se traduce en una mayor cantidad de ideas.

McAdams y Wood (2002) desarrollaron una métrica cuantitativa para el diseño por analogía, se basa en la analogía funcional de los productos dentro de un mismo ámbito. Uno de los objetivos de la métrica es la de encontrar analogías entre los requisitos funcionales del producto a diseñar, y productos que son conceptualmente similares y que utilizan los requisitos funcionales conocidos, siendo útil para la generación de nuevos conceptos.

La sinéctica es una técnica de pensamiento creativo que utiliza cuatro tipos de analogías: directa, simbólica, personal, y la fantasía (Gordon 1961). Las analogías biológicas se pueden englobar en el grupo de las analogías directas, y muchos libros de texto de diseño describen los sistemas biológicos como una fuente de analogías (Ulrich y Eppinger 2000, Otto & Wood 2001, Dym y Little 2004). Sin embargo, aun no están disponibles para los diseñadores las herramientas que apoyen la identificación y uso de analogías biológicas válidas para el diseño.

En conclusión se pueden relacionar las analogías con el análisis funcional para mejorar el diseño conceptual de los productos en un mismo ámbito, si a esa relación se le adiciona la particularidad de encontrar estructuras o funciones en un ámbito distinto, como por ejemplo la naturaleza, nos llevara a un mayor número de ideas, nuevas, más originales y creativas para la generación de conceptos.

**4.7 RELACIÓN ENTRE ANÁLISIS FUNCIONAL Y MAPAS MENTALES, JUSTIFICACIÓN.**

Tanto los mapas mentales como el análisis funcional, esquema o árbol, son estructuras ramificadas que establecen niveles, desde el más esencial al más específico.

En la figura 4.11 se presenta el esquema básico en árbol de funciones y la aplicación en un mapa mental para la búsqueda de nuevas funciones. Ambos esquemas tienen una estructura ramificada, ordenada por niveles de importancia, que se desarrolla hasta llegar a una función en un último nivel, cuando se analiza un producto existente, o que termina en una función clave si se utiliza el análisis funcional como un mapa mental, en un proceso creativo en búsqueda de nuevas funciones denominadas clave.

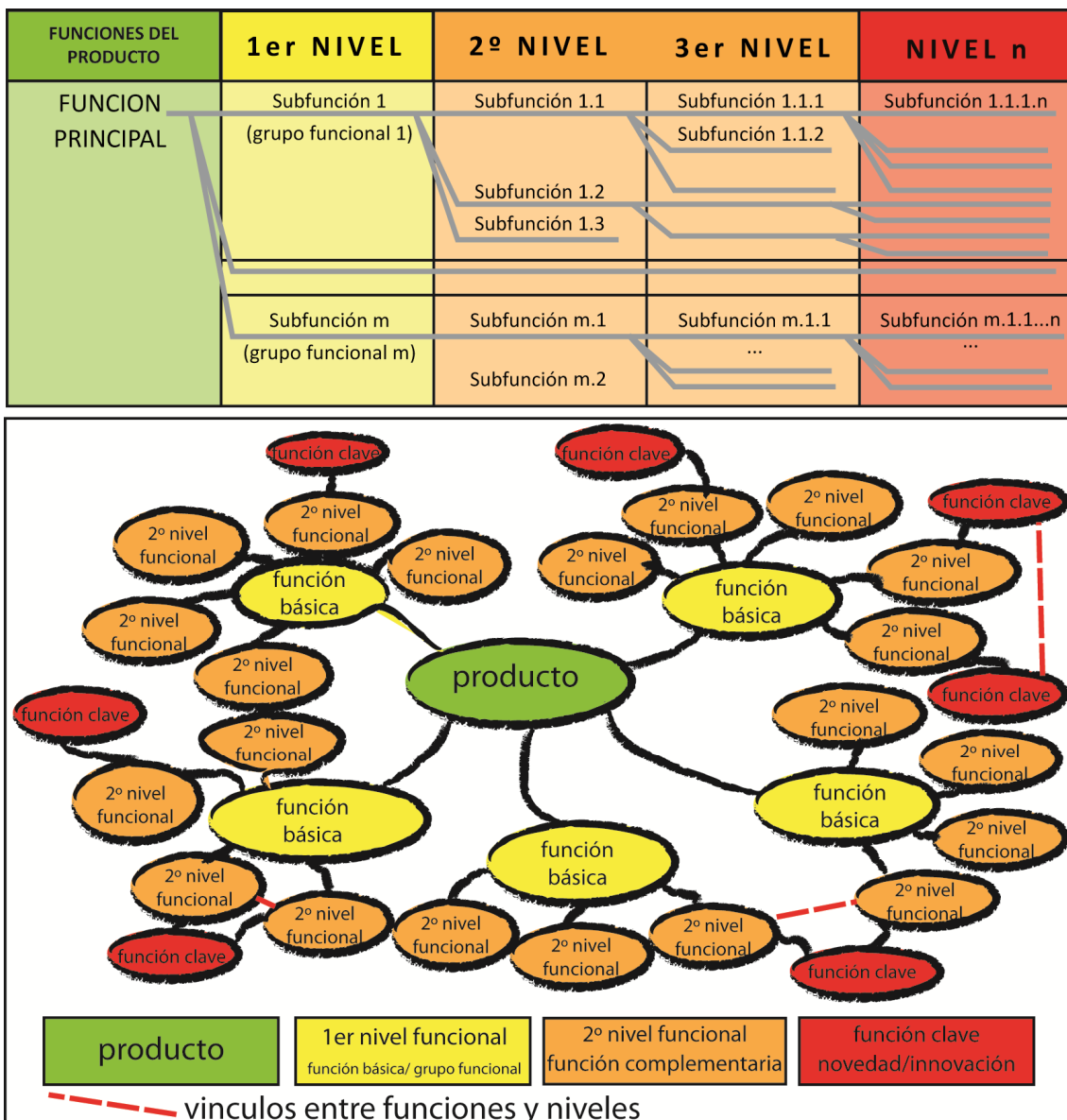


Figura 4.11: Relación entre análisis funcional y mapa mental.

Algunas funciones están relacionadas entre diferentes niveles y entre diferentes grupos funcionales, se muestran con líneas discontinuas las relaciones que pueden tener un interés mayor. Estas relaciones corresponden en el análisis funcional a elementos compartidos, es decir, componentes o piezas que realizan una función que se corresponde con más de una en su mismo nivel o en un nivel superior, en ocasiones estos componentes pueden llegar a ser un grupo funcional, por ejemplo la fuente de alimentación en un sistema electrónico que provee de energía a varios sistemas.

Los niveles crecen de las funciones más genéricas, funciones básicas, hasta las más específicas, funciones clave. Las básicas dan lugar a otras cuyo objetivo o característica diferencian el producto y está más específicamente definido, llevando a las funciones que son clave y que aun no se han desarrollado, que son el germen de una posible innovación, según Bogatyreva (2003). El primer nivel se denomina grupo funcional, ya que agrupa funciones y tiene un alto grado de necesidad de existencia.

La descomposición funcional permite comprender una función compleja. Las funciones complejas o grupos funcionales se consiguen gracias a varias funciones o subfunciones llamadas funciones secundarias o auxiliares.

Al avanzar en siguientes niveles las funciones son más básicas y menos esenciales pero definen el modo en que los grupos anteriores desarrollaran su funcionamiento, ver figura 4.12 como ejemplo de aplicación de esta técnica.

En el análisis funcional por medio de árbol funcional podríamos hacer corresponder un último nivel funcional con un componente o pieza que realiza dicha función, al encontrar un modo alternativo de conseguir la función el componente se puede cambiar. Si observamos un mapa mental que representa descomposición funcional, en los últimos niveles que se corresponden con las funciones clave podemos establecer qué es necesario conseguir sin atribuir un componente sino una necesidad o requisito de diseño.

Las funciones clave aportan innovación a los requisitos funcionales del producto, en sus características principales, secundarias o complementarias, el objetivo es encontrar la analogía con las funciones en el medio natural.

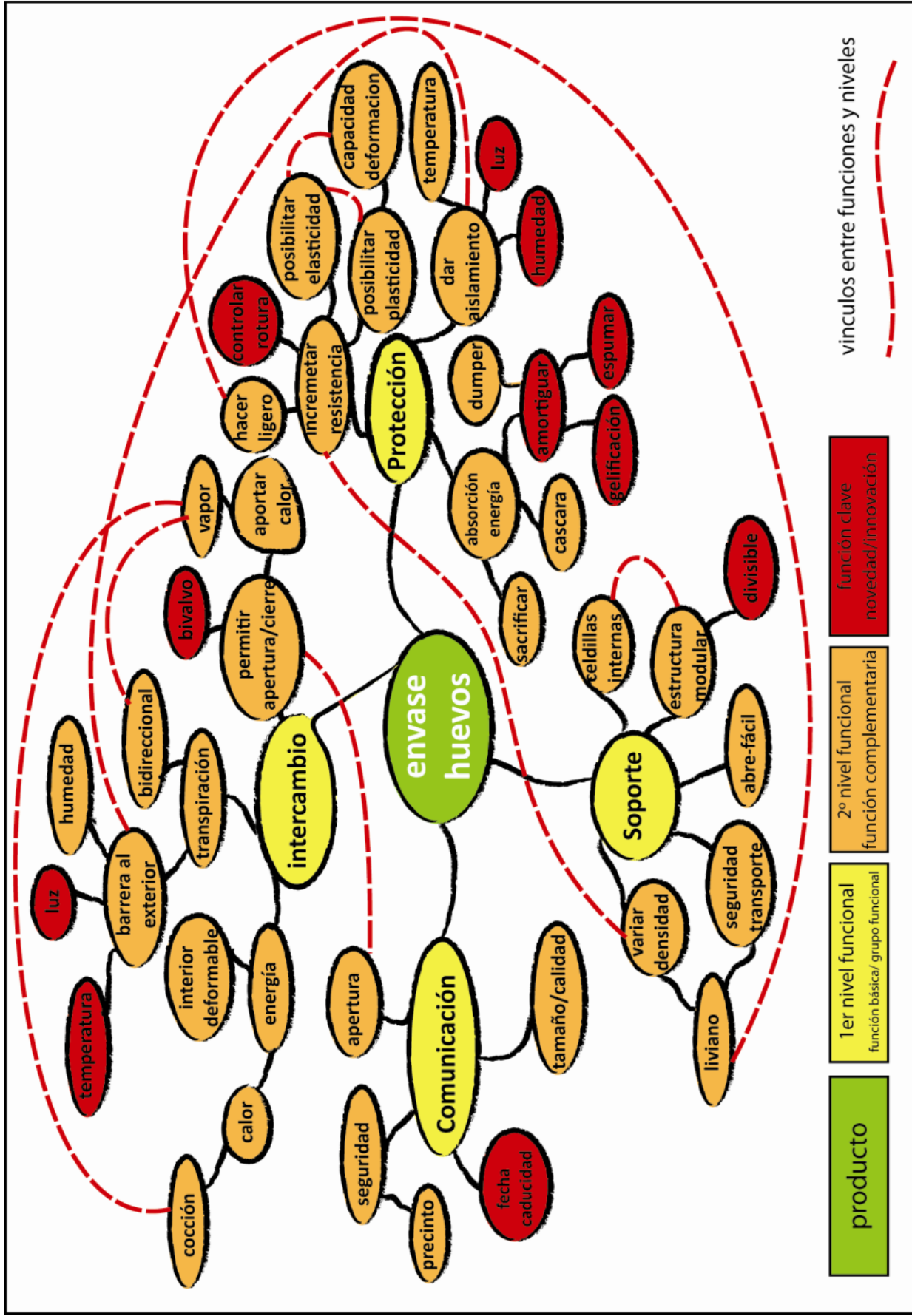


Figura 4.12: Ejemplo de relación entre análisis funcional y mapa mental para un envase

#### 4.8 TABLAS DE RELACIÓN BIOMIMÉTICA

Las tablas de relación biomimética permiten conectar las funciones clave detectadas en los mapas mentales con individuos en la naturaleza que ya han resuelto esa necesidad funcional. Lo que se pretende es encontrar alternativas a las soluciones ya existentes o nuevas soluciones aun no existentes.

La utilidad práctica de la tabla es hacer una traducción de la función clave en el ámbito de la técnica, y asociarla a un fenómeno o individuo en el ámbito de la naturaleza; Esta traducción se realiza por medio de una serie de cuestiones que permiten entender la función de una manera más abstracta, y trata de encontrar algún tipo de rasgo o característica que defina dicho individuo. En caso de no encontrar estos individuos siempre se pueden utilizar estos rasgos para hacer las búsquedas en la investigación biomimética.

La tabla tiene tres columnas, la primera hace referencia a las funciones clave y representa los objetivos del proyecto, las posibles innovaciones funcionales que generaran conceptos. La segunda columna es para las líneas de investigación, estas líneas se desarrollan por medio de las preguntas que nos ayudan a entender cómo conseguir las funciones clave.

Estas cuestiones se pueden plantear como preguntas o simplemente como vínculos o conexiones a la función buscada, pueden ser referencias a características o prestaciones, estructuras, materiales, etc.

Y por último, la tercera columna incluye los referentes biomiméticos, donde se sitúan los individuos que responden a las diferentes preguntas de la columna anterior, esta columna puede tener respuesta o no, y en ocasiones las respuestas pueden ser múltiples.

La tercera columna puede tener individuos o fenómenos naturales, en ocasiones es interesante observar un fenómeno natural y como se produce para entender como puede ser utilizado para desarrollar una función en un producto. En la tabla 4.5 se observa un extracto de una tabla.

Como se ha comentado en un apartado anterior, la tabla tiene un carácter bidireccional, de izquierda a derecha nos permite encontrar soluciones en la naturaleza y de derecha a izquierda nos permite hacer la traducción, es decir, los individuos deben responder a las preguntas realizadas y deben definir el principio ingenieril.

FUNCIONES CLAVE (OBJETIVOS DEL PROYECTO )	LINEAS DE INVESTIGACION (COMO CONSEGUIR LAS FUNCIONES CLAVE)	REFERENTE NATURAL (RELACION BIOMIMETICA )
Protección/ dar aislamiento	preservar de la temperatura exterior	Al caracol del desierto su exoesqueleto le protege del calor. Su concha les ayuda a soportarlo por la reflexión de la luz y la estructura de capas, dando aislamiento de aire. La termobiosis no es exclusiva de faunas hidrotermales, también ocurre en especies terrestres. El Sphicterochila boisseri puede sobrevivir en el desierto a temperaturas de hasta 50 °C. (Schmidt-Nielsen 1971)
	preservar de la luz / humedad exterior	La cutícula de las cucarachas permite una variación de temperatura controlada y pérdida de humedad a través de una capa cerosa. (Wigglesworth 1941)
		El material y estructura de algunos exoesqueletos hacen de barrera ante la luz y la humedad. La quitina en determinado espesor es opaca e impermeable, permaneciendo flexible. (Alberts 2004)
		En los cercopoideos una espuma proporciona control térmico y de humedad. Dicha cubierta aísla de variaciones térmicas bruscas, permite la termorregulación y evita su desecación. (Ball 2007)
		Los exoesqueletos de carbonato de calcio de los corales pueden ayudar a proteger sus simbioses fotosintéticos mediante la absorción de los rayos UV. (Reef 2009)

Tabla 4.5: Tabla tipo para la relación biomimética.

#### 4.9 INVESTIGACIÓN BIOMIMÉTICA

Es difícil encontrar información adecuada en el formato y el idioma apropiado, tanto para el biólogo experto como para el ingeniero o diseñador, no es fácil encontrar un especialista que conozca y pueda aplicar los resultados de estas investigaciones, es necesaria la colaboración interdisciplinaria entre la tecnología y la biología. Definidas las funciones clave comienza la fase de investigación biomimética en busca de la forma en que la naturaleza realiza dichas funciones. Las búsquedas se realizan mediante la identificación de las fuentes de información válida, el establecimiento de criterios, y la organización de la información (Wilson 2004).

La primera aproximación es hacer una lista de posibles candidatos a solucionar una determinada función de una manera intuitiva, con esta lista se pueden elegir algunos de ellos y hacer una búsqueda de información más detallada de cómo resuelve la función. Esta primera búsqueda nos indica el principio o fundamento biológico, explica cual es el funcionamiento básico de una función en la naturaleza, por ejemplo si se investiga sobre un posible mecanismo de seguridad “fusible mecánico” para tener una rotura programada, se aprecia en los corales que tienen esta característica como forma de supervivencia, en zonas de fuertes corrientes permiten la rotura de sus ramas extremas para evitar ser arrancados de base, además les sirve para diseminarse como función añadida.



Esta búsqueda intuitiva es fácil de aplicar por personas no experimentadas, pero tiene el inconveniente de consumir mucho tiempo y esfuerzo, siendo los resultados genéricos y con poca profundidad. La utilización de la segunda columna es fundamental para dirigir las búsquedas, las propias preguntas definen la búsqueda y determinan palabras clave y rasgos o características de interés. Estas palabras clave se utilizan en motores de búsqueda, en bases de datos y textos especializados.

Las fuentes son a menudo la documentación específica de los especialistas, biólogos, científicos e investigadores de los museos de ciencia, bases de datos, o referencias como ASK-Nature.org entre otros. La organización ASK Nature tiene dos bases de datos, una de ellas está estructurada por estrategias de la naturaleza, y se ha creado con las aportaciones de biólogos que describen dichas estrategias con ejemplos y aplicaciones, la segunda base de datos es más completa ya que incluye a la anterior y contiene otros registros contando además con un motor de búsqueda más avanzado y específico que facilita la búsqueda.

También son habituales las bases de datos de revistas y publicaciones científicas de biología donde se pueden encontrar textos específicos. Otra fuente similar y que tiene un mismo modo de búsqueda son los libros de biología, existen muchos y aportan gran valor. Alternativamente existen páginas web especializadas en zoología y botánica, así como otras que contienen la taxonomía del mundo vivo en general o para grupos concretos. También existen páginas web con documentación gráfica y audiovisual que representa una documentación complementaria a los textos científicos y técnicos.

Para tratar de superar las dificultades de búsqueda en la investigación, se han creado herramientas de gestión de la información y mecanismos desarrollados por varios investigadores (Gester 2007). Un primer ejemplo está siendo desarrollado por el Centro de Tribología de superficies biológicas, Max-Planck Institute (Wegst 2012), se basa en el sistema de Cambridge Material Selector (CMS 2012) con una base de datos de materiales biológicos, con características y definiciones adecuadas para su uso en aplicaciones específicas.

Una segunda herramienta está basada en TRIZ, ya comentada en un capítulo anterior. Se interpreta la naturaleza como una gran base de datos natural de patentes (Vincent 2005), existen bases de datos de los principios biológicos que permiten extraer las funciones, materiales, estructuras y mecanismos que pueden ser una solución para los problemas técnicos en ingeniería.

Una tercera herramienta, que utiliza una búsqueda léxica basado en la localización de palabras clave en los libros de biología que se corresponden con los términos en que se puede definir un problema técnico en ingeniería. Esta es sencilla, de fácil aplicación y rápida pero es necesario definir correctamente los términos de ingeniería y su correspondiente en biología, depende de la disponibilidad y la calidad de los textos encontrados.

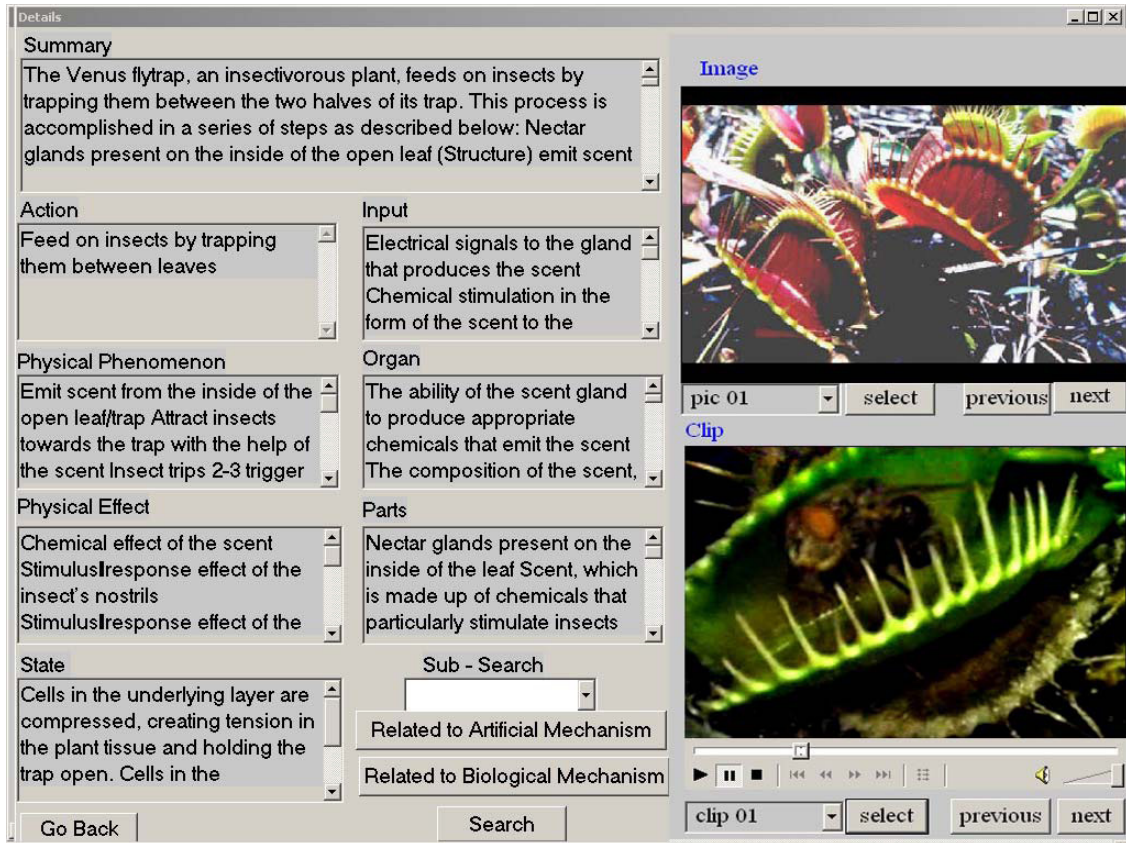


Figura 4.13: Software “idea-inspire” del modelo SAPPPhIRE” (Srinivasan 2009).

Una herramienta alternativa que relaciona la investigación biomimética con la fase creativa es el modelo SAPPPhIRE junto con el software “idea inspire” (Srinivasan 2009). Esta herramienta integra una serie de actividades como generación de ideas, evaluación, modificación y selección por medio de unos resultados que forman parte de la base de datos.

Los datos se refieren a acciones, fenómenos y efectos físicos, cambios de estado, inputs o entradas, órganos y componentes o partes, cada registro tiene una ficha con todos esos datos que además están relacionados con otros mecanismos artificiales o naturales y tienen información adicional como videos o imágenes, ver figura 4.13. La aplicación de este software se orienta a conseguir definir requisitos y soluciones a un problema previamente definido.

**4.10 PRINCIPIO DE INGENIERIA**

Los referentes biomiméticos más válidos se transforman y adaptan para ser solución de las funciones clave, agregando valor, diferenciación e innovación. Se realiza una traducción del ámbito natural al artificial, siendo necesario abstraer el principio natural para poder implementarlo en la función desarrollada, esta es la fase más conceptual por la definición del producto y la forma en que se desarrolla. Por ejemplo se estudia la estructura y material de la cáscara del pomelo para determinar su capacidad de absorción de energía sin dañar el interior, o sus propiedades para preservar del calor y la humedad.

Llamamos principio de ingeniería 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 sea del carácter que sea, por su función (tipo orgánico), estructura o material.

La traducción en un fundamento ingenieril puede tener distintos niveles de analogía. En la figura 4.14 se observa los diferentes grados de analogía y la relación con el nivel de abstracción, grado de resolución técnica y número de soluciones o aplicaciones posibles.

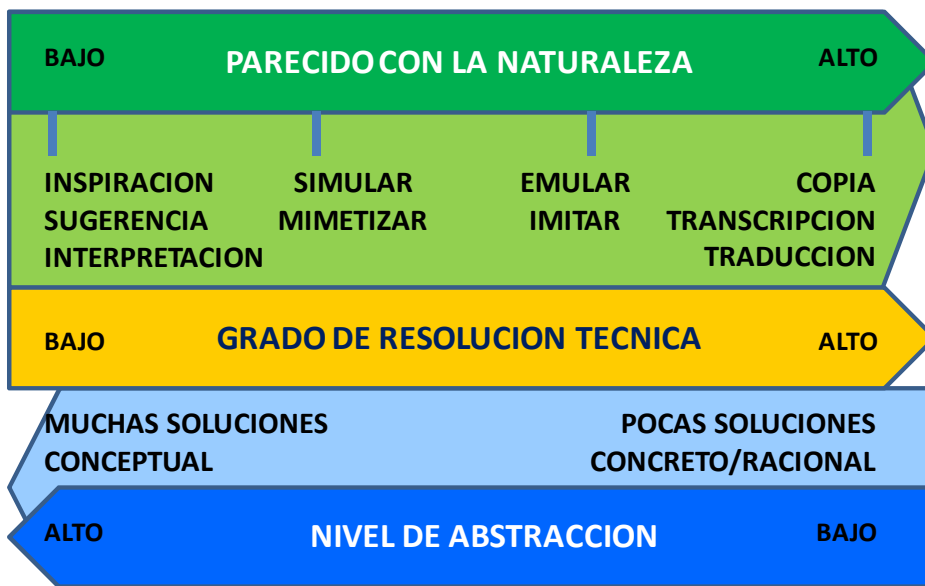


Figura 4.14: Grados de analogía en el principio ingenieril

Cuando el principio de ingeniería 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 y poco sofisticado, se corresponde con niveles de abstracción elevados que generan un gran número de soluciones y aplicaciones distintas, aunque solo a nivel conceptual.

Por el contrario, cuando el parecido con la naturaleza es muy alto nos acercamos a soluciones próximas a la copia, la transcripción o la traducción literal, donde la resolución técnica es alta y sofisticada, tratando de reproducir exactamente lo que la naturaleza ha creado. Sin embargo en este segundo supuesto el número de soluciones es muy reducido y concreto, llegando el caso de ser una solución única.

Existen grados intermedios como la emulación o la imitación donde se trata de ser fiel al principio biológico ser caer en la copia o la réplica, se trata de situaciones en que el principio ingenieril toma la base biológica y trata de superarla de algún modo.

También existe la simulación como un ejemplo de representación artificial del funcionamiento o comportamiento real de un ser o sistema vivo, los mecanismos y forma de conseguir el objetivo no tienen por qué ser los mismos, pero sí que existe un parecido alto en su expresión y representación.

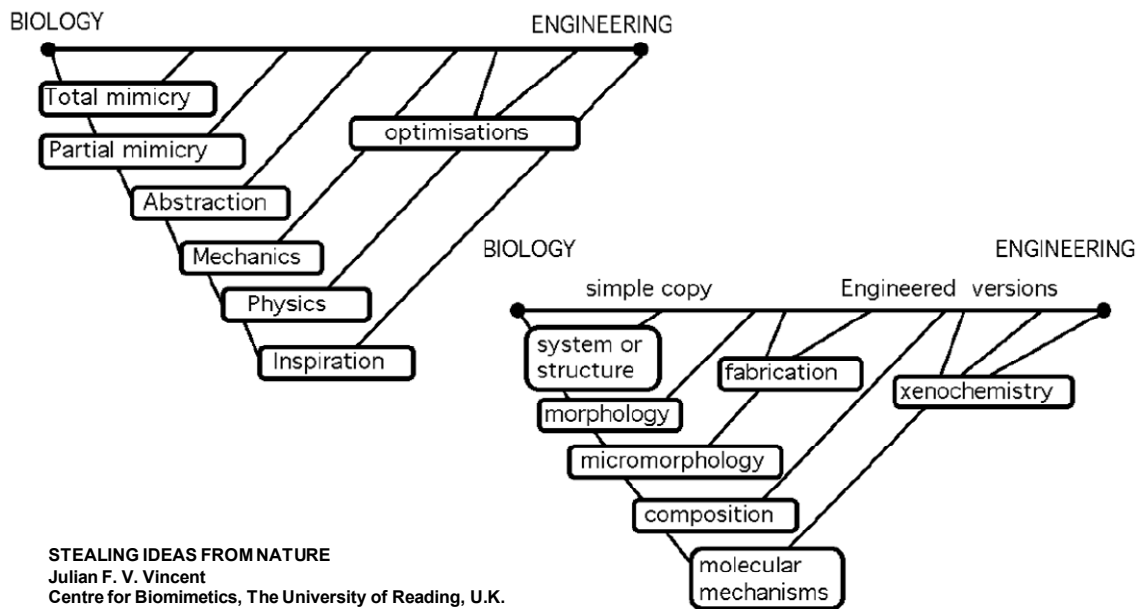


Figura 4.15: Grados de analogía entre biología e ingeniería, según Vincent (2005)

En la figura 4.15 se observan los mapas biomiméticos descritos por Vincent (2005), donde afirma que cuanto más abstracto es un concepto más adaptable es a otras disciplinas, mostrando que existen niveles desde la copia es literal (alto grado de dificultad) a la inspiración (bajo grado de dificultad).

Sin embargo puede ser muy genérico, cuanto más sencilla es una propiedad más fácil es extrapolar su función a otro área.

#### 4.11 CONCEPTUALIZACIÓN DE PRODUCTO

Todos los procesos de diseño tienen una fase conceptual que define y caracteriza el producto, las decisiones tomadas tienen un impacto sobre su éxito final (Pahl & Beitz 1996). El objetivo final de la metodología propuesta es la conceptualización. Los conceptos son descritos como un grupo de especificaciones de producto, y pueden ser creados por una sola referencia natural o como la combinación de varias.

En el enfoque basado en diseño bio-inspirado el diseñador puede seguir un método de diseño sistemático y utilizar estrategias biológicas en la búsqueda de soluciones, como se ve en la adaptación del diseño conceptual de la figura 4.16. Partiendo del método de Pahl y Beitz, la fase conceptual es de especial interés en esta investigación ya que el diseñador determina el principio de solución, o el concepto. El diseñador define la especificación de los objetos a diseñar y desarrolla el concepto a través de varias etapas. La abstracción marca las especificaciones y los requisitos críticos del artefacto. Se establece la estructura funcional, que se crea para identificar las relaciones funcionales entre los diferentes grupos funcionales de la solución, que darán el principio de funcionamiento como combinación de posibles alternativas.

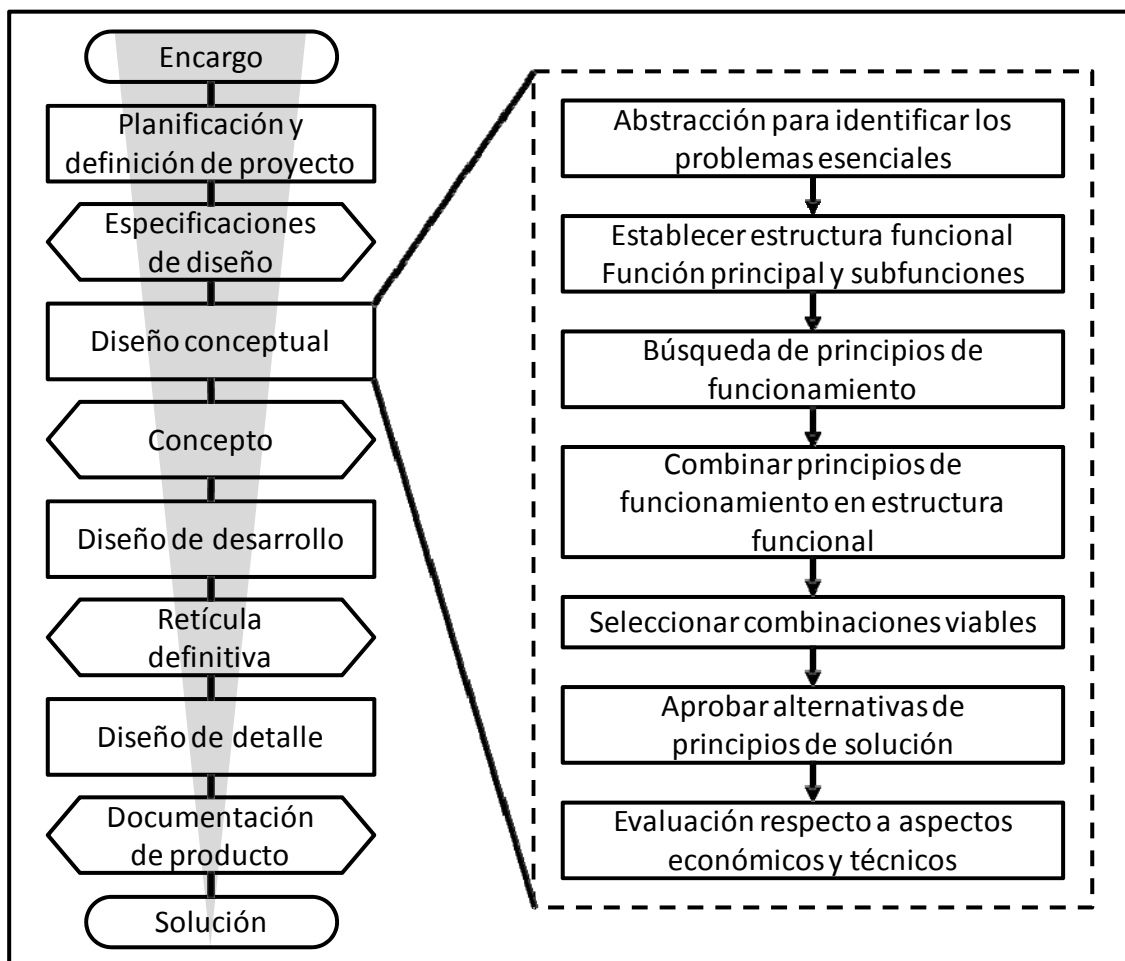


Figura 4.16: Metodología de diseño sistemático, desarrollo de diseño conceptual. Pahl & Beitz, 1996.

Las soluciones extraídas de la naturaleza se plantean aquí como principios de funcionamiento, siendo en esta metodología un factor de diversidad ya que se establecen varios candidatos para poder desarrollar una función, generando combinaciones de solución. Las combinaciones más viables se evalúan según los requisitos y criterios, en estas propuestas se pueden identificar requisitos técnicos o económicos.

Definir un concepto, una idea, es sencillamente establecer los límites en los que estén incluidas todas las realidades que puedan designarse por él. Se trata de plasmar los rasgos mínimos coincidentes, de todo cuanto pueda ser designado por ese concepto. Según Stuart Pugh (Alcaide 2001) "Diseño conceptual puede definirse como aquel que representa la totalidad del objeto proyectado". Se considera el concepto de diseño como la representación de todos los subsistemas que integran el producto completo, aunque el concepto de producto pertenece al campo de las ideas.

El diseño conceptual es un proceso creativo multifacético, que deriva de varias raíces, desde las básicas de uso hasta otras más abstractas como los aspectos socio-culturales. Sin embargo puede ser orientado y basado en estructuras funcionales donde las soluciones a funciones son la base conceptual. El diseño conceptual de productos ofrece soluciones abstractas, en ocasiones incompletas, de las que se espera satisfacer las necesidades de los consumidores y usuarios.

El resultado del diseño conceptual son nuevos conceptos de diseño que se pueden utilizar como base en las fases de desarrollo y diseño de detalle para finalizar en el diseño productos concretos y acabados aunque todos se engloben en un mismo diseño conceptual, también llamado concepto de producto.

Es importante diferenciar los diferentes niveles, el primero corresponde a esa definición básica que engloba a todos los conceptos de segundo nivel, este primer nivel podría ser la telefonía móvil diferenciada de la fija o de satélite. En un segundo tenemos esos mínimos rasgos que generan una imagen mental del producto sin existir una materialización del mismo, ejemplificando aquí esos dispositivos de telefonía móvil que tienen pantalla táctil diferenciados de aquellos que tienen teclados, vistos u ocultos. Y por último el nivel que está representado por los productos y que existen como una realidad.

Estos productos pueden pertenecer a un solo concepto, o estar compuestos por varios de ellos, incluso por algunos que pertenecen a otro diseño conceptual porque integran alguna función, servicio, componente, etc. de estos. En la figura 4.17 se pueden apreciar estos niveles.

En la metodología propuesta se pretende trabajar el primer nivel de diseño conceptual desde el punto de vista funcional, con la intención de que los principios ingenieriles permitan generar conceptos y definir los mínimos rasgos y las soluciones técnicas obtenidas. Los resultados de la investigación obtenidos mediante el análisis funcional y el desarrollo biomimético se aplican a un diseño, o un nuevo concepto de producto, establecimiento las mejoras funcionales pretendidas. Se proponen posibles soluciones en el diseño conceptual, la adaptación se hará mediante el desarrollo de ideas para el nuevo producto por medio de bocetos, dibujos, textos que explican el concepto y otras técnicas.

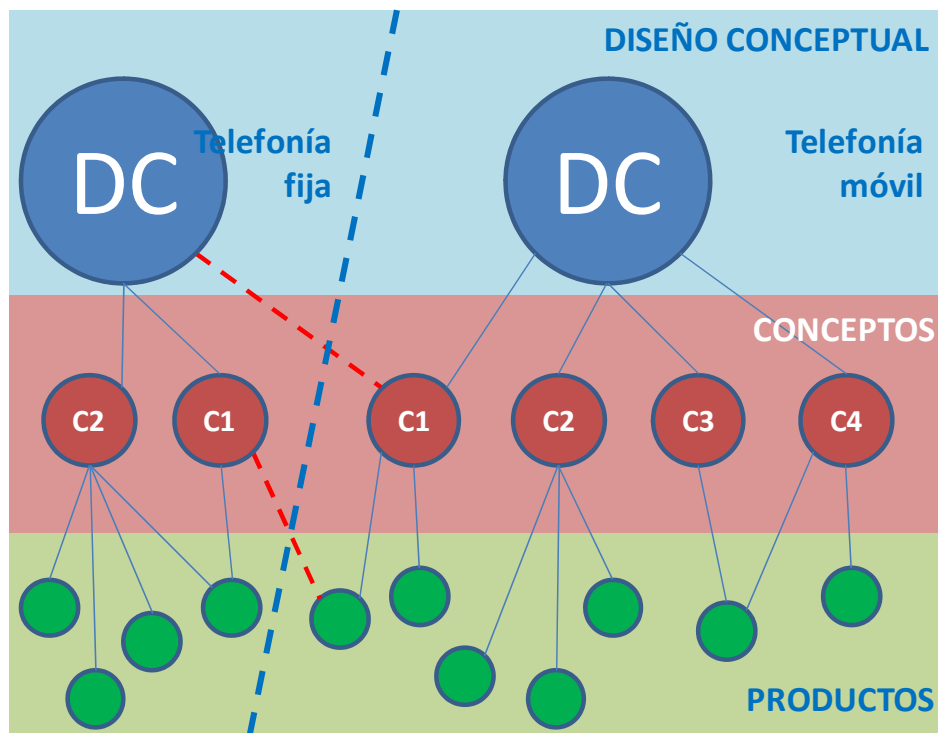


Figura 4.17: Niveles entre diseño conceptual, conceptos de diseño y productos concretos

La teoría de diseño industrial ha evolucionado desde los métodos descriptivos, los basados en representaciones del proceso, pasando por los prescriptivos hasta los modelos computacionales, según Tomiyama (2009). Pero los métodos necesitan crear nuevos caminos hacia la innovación relacionando disciplinas (Seliger 2001). Existen nuevos métodos automatizados para la generación de conceptos (Shu 2007), ofrecen una oportunidad única para ampliar el diseño biomimético e integrarlo plenamente en la práctica de diseño (Bryant 2005, Kurtoglu 2005, Chakrabarti 1996). Las representaciones conceptuales de productos a través de esquemas de datos estructurados han permitido la creación de repositorios de diseño, que permiten a los diseñadores acceder a principios de solución que están fuera de su conocimiento personal o experiencia (Greer 2003, Hirtz 2002, Bohm 2004, Bohm 2005-a,b). Un ejemplo ya comentado son los repositorios para diseñar por analogía utilizados en BioTRIZ.

En este sentido la generación automatizada de conceptos se lleva a cabo desde dos enfoques muy diferentes; La búsqueda y recuperación de soluciones análogas por medio de un descriptor funcional estructurado, o por el procesamiento de expresiones de lenguaje. Inherente al enfoque basado en funciones es el reconocimiento de que los dispositivos están diseñados para resolver las funciones específicas, por lo que, la especificación y modelado de la función deseada de un producto o sistema es fundamental en el proceso de diseño conceptual. La representación funcional permite al diseñador acceso a la información del repositorio, de este modo se crea una fortaleza clave al incluir el diseño biomimético en el modelo de modelado funcional. Así se explica la necesidad de construcción de conceptos basados en estructuras o composiciones funcionales que pueden tomar las soluciones de la naturaleza, bien de repositorios o de otras fuentes validas.

También existe la opción de automatizar los procesos por mecanismos de búsqueda y recuperación de literatura/textos biológica por medio del procesamiento de estructuras de lenguaje, como en trabajos de Shu (2010).

Recientemente, se han formulado técnicas automatizadas de generación de conceptos que dependen de una estructura de descriptores funcionales (Bryant 2005, Kurtoglu 2005). Se ha desarrollado un conjunto de herramientas de diseño computacional capaz de generar variantes conceptuales a partir de una descripción funcional de producto. Este generador de conceptos consiste en un archivador de información de productos en repositorios de diseño para sintetizar posteriormente los nuevos conceptos. El interés de esta técnica se expresa por la relación funcionalidad-componente y la compatibilidad componente-componente, por ejemplo, si dos componentes pueden ser conectados entre sí, sobre la base de las observaciones en el conjunto de datos del repositorio para dar una determinada funcionalidad (Bryant 2006-a,b).

El diseño conceptual aquí propuesto lo podemos vincular a la definición de funciones y como satisfacerlas, haciendo una simplificación expresamos el objetivo o función como un QUÉ y el modo de conseguirlo como un CÓMO, ver figura 4.18.

Si un concepto lo podemos definir por una estructura funcional, un grupo de funciones para conseguir un objetivo concreto, quiere decir que lo podemos lograr de varias formas. Existen alternativas para obtener una función concreta de las que podemos elegir la más optima en función de un determinado criterio.



La naturaleza nos ofrece varias posibles soluciones, varios CÓMOs, para un mismo QUÉ, se trata pues de definir conceptos eligiendo los más adecuados, es un proceso similar al análisis morfológico pero se obtienen soluciones por traducción de soluciones de la naturaleza en vez de tomar las alternativas existentes en la técnica.

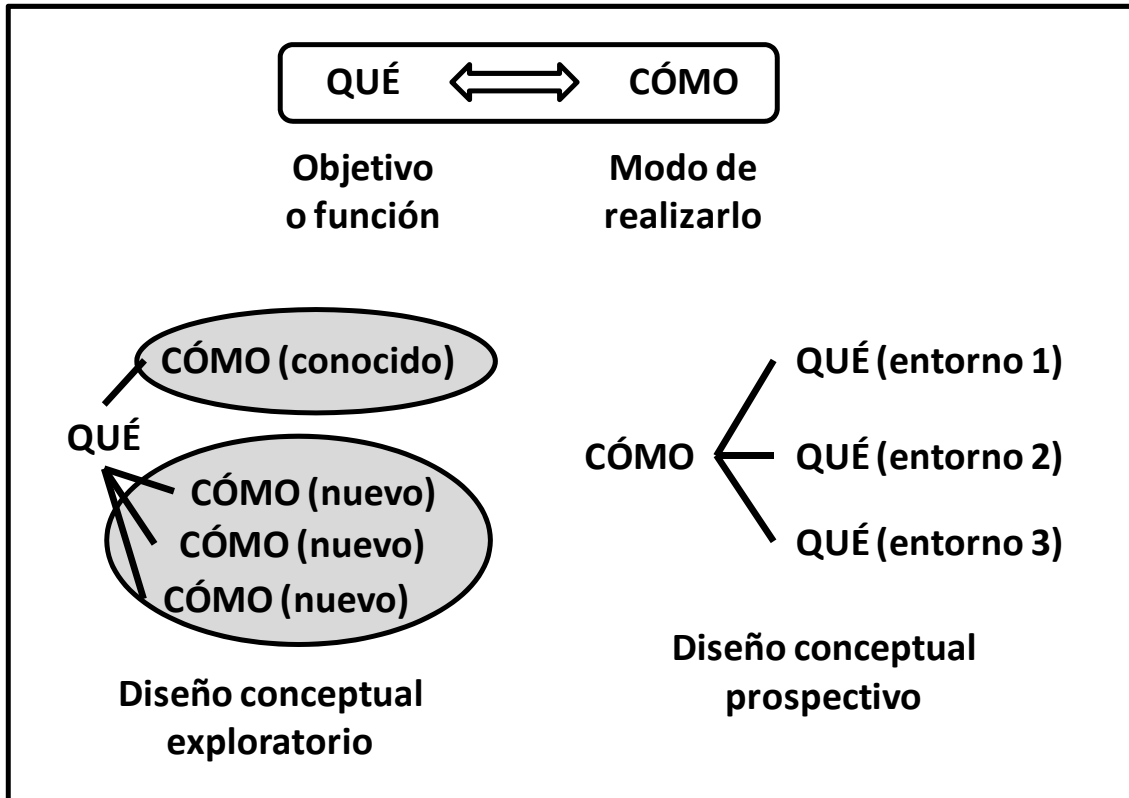


Figura 4.18: Grados de analogía en el principio ingenieril

Entonces en este contexto definimos el diseño conceptual como exploratorio cuando para un mismo QUÉ se plantean varios CÓMO en los que existen los conocidos y los nuevos que obtenemos con las tablas biomiméticas. Y por otra parte, definimos el diseño conceptual prospectivo cuando ante un determinado CÓMO entendemos que es aplicable a diferentes QUÉ, dependiendo del entorno de aplicación y que este es una situación particular dentro del mismo marco de trabajo, ver figura 4.18.

**CAPITULO 5. ENSAYO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA**

### 5.1 ANTECEDENTES

Con el desarrollo de esta investigación se han realizado proyectos académicamente dirigidos de modo experimental en los que se ha ensayado con procesos similares, que han servido de base para llegar a establecer las premisas de esta Tesis. Algunos de estos proyectos propios han servido para mostrar los resultados en comunicaciones a congresos y publicaciones científicas, siendo discutidas y argumentadas con otros especialistas en el campo de la biomimética.

La metodología propuesta se corresponde con los modelos de diseño por fases, y facilita el modo de encontrar nuevas soluciones en la naturaleza. Cada una de estas fases tiene una finalidad clara, delimitar el marco de trabajo, establecer los objetivos funcionales por medio de las funciones clave, realizar la investigación biomimética y su traducción por medio del argumento ingenieril, y por último la conceptualización.

Si bien la metodología completa supone un trabajo muy amplio, cada una de estos métodos se puede utilizar por separado, esto ha sido probado en ejercicios y proyectos realizados con alumnos de la asignatura de Biónica en el grado de Diseño Industrial y Desarrollo de Producto de la Universidad de Zaragoza y un grupo de alumnos del curso “Biomimética, la naturaleza como fuente de soluciones” organizado por Universa y la Universidad de Zaragoza.

Los ejercicios y proyectos desarrollados tienen una dificultad progresiva, muestran y justifican el vínculo entre los mismos, de modo que se puede comprender el valor de esta metodología y su provecho de forma parcial o global.

Otro de los aspectos que determinan llevar a cabo esta investigación es la posibilidad de integración de métodos de diseño, con potencial para encontrar un proceso en el que se puedan relacionar varios métodos de manera alternativa a como se hace actualmente, y que permita adecuar el enfoque a determinados proyectos.

Ya se ha descrito en el capítulo de metodología propuesta, que en diseño industrial y desarrollo de producto no existe una solución única, sino que es necesario hacer la adaptación concreta para cada necesidad proyectual que viene marcada por los requisitos de diseño establecidos. Un método puede ser válido para diferentes propósitos, y en ocasiones para un mismo propósito se pueden utilizar varios métodos, el problema se plantea por la cuestión, de qué método utilizamos para un determinado propósito entre los posibles.

Por este motivo es necesario probar y validar los diferentes métodos utilizados en el modelo propuesto bajo la premisa de utilidad, como se han venido desarrollando en la toma de decisiones como sub-disciplina de las matemáticas, la economía y otras ciencias donde la

validación del método ha de ser rigurosa para su aplicación posterior (Hazelrigg 2003). El ensayo del método muestra los aspectos de validez del modelo, y en cuales ha de ser corregido o sustituido.

## 5.2 MÉTODO DE ENSAYO

En este capítulo se expone el método de ensayo, su justificación y desarrollo, así como los grupos de muestra que han aplicado la metodología. En este apartado se presenta el modo en que se han realizado los proyectos, cuáles han sido los objetivos y resultados que posteriormente se aprobaran.

Si bien el propósito inicial es probar la metodología de manera global y el modelo de proceso de diseño propuesto, también es de interés hacerlo parcialmente para observar y analizar como los métodos parciales son útiles en la consecución de los objetivos de dicho modelo.

El método de ensayo consiste en realizar un proyecto para dar solución a un problema técnico utilizando el modelo propuesto. Para ello se realizan dos ejercicios previos que sirven para experimentar con dos elementos clave en la metodología, el primero es la abstracción de un principio de funcionamiento en la naturaleza, y su traducción a un principio ingenieril o técnico, que sea solución a una función clave buscada. Y el segundo es la capacidad de conceptualización partiendo de uno o varios principios ingenieriles abstraídos como ya se ha definido. Por tanto se tienen tres apartados claramente diferenciados, el estudio de un caso real basado en biomimética, la generación de conceptos por medio de una solución natural, y la resolución de un problema técnico por medio de soluciones en la naturaleza que permiten generar conceptos innovadores.

El método se ha ensayado de esta manera dado que los grupos a estudio pueden no estar familiarizados con esta metodología, y que llegan a resolver un problema técnico por la resolución de ejercicios de dificultad incremental, también porque es más sencillo y seguro hacer la aproximación al diseño conceptual.

El método se ha desarrollado a varios niveles, aquí se presentan todos y se muestran los dos últimos. El primer nivel de experimentación con este modelo fue a nivel personal, poniendo en práctica algunas herramientas y modelos que podrían ser interesantes en combinación con la biomimética. Tras las primeras experiencias se ha desarrollado el modelo propuesto, realizando cambios en la definición del marco de trabajo y en la búsqueda de funciones clave, y se han realizado varios proyectos para ver la idoneidad de los cambios, desarrollándose alguna experiencia personal. Se han observado dificultades con la tabla biomimética, y se han simplificado y aclarado.

Por último se ha trabajado con dos grupos y el mismo modelo final tras los últimos cambios. En la tabla 5.1 se puede ver la evolución de la metodología y los cambios propuestos en diferentes momentos.

Pasos	Probado por	Método propuesto	Mejoras propuestas
1	Investigación personal	Modelo inicial básico con tablas espejo	Aplicar marco de trabajo y definición de funciones clave
2	Investigación en proyectos con alumnos	Modelo incluyendo marco de trabajo, funciones clave y tabla espejo de referentes naturales	Cambiar tabla espejo de referentes naturales por tabla de referentes biomiméticas que incluye las funciones clave
3	Alumnos de la asignatura Biónica	Modelo actual puesto a prueba en esta Tesis	Evaluado en esta Tesis, mejoras propuestas en las conclusiones
4	Alumnos curso Biomimética		

Tabla 5.1: Evolución de la metodología en el tiempo y cambios propuestos.

En este capítulo se presentan los grupos que han experimentado con el modelo, la descripción de los ejercicios y proyecto, la exposición de los resultados y tablas resumen de los mismos, y se muestran dos ejemplos o casos representativos del modelo en los que se aplica la metodología completa.

### 5.2.1 Grupos de prueba y participantes

Como ya se ha descrito las primeras aproximaciones al modelo de realizaron a nivel personal y sin intervenir ningún grupo de diseñadores. Se han utilizado los conocimientos de múltiples métodos de diseño y modelos, la transformación y combinación de estos, y un proceso intuitivo en el que se realiza una discusión sobre la relación entre exoesqueletos y carcasas, en proyectos relacionados con envases herméticos para alimentos. Con un primer modelo, más básico y poco experimentado, se han realizado proyectos con alumnos que llevaban a cabo su trabajo fin de carrera de ingeniería de diseño industrial, cuyo perfil evidencia su experiencia en proyectos por fases, conocimiento de metodologías de diseño, y de biónica o biomimética. Los resultados sirvieron para mejorar el método y plantear un modelo más completo a grupos mayores para contrastar los resultados y evaluar el modelo. Algunos de los proyectos desarrollados están relacionados con maletas y mochilas, papeleras o cubos de la basura, protecciones personales para deportes de riesgo y similares.

Se han utilizado dos grupos de prueba para ensayar y poner en práctica la metodología. La utilización de dos grupos diferentes permite contrastar los resultados de los proyectos y la evaluación y valoración personal de todos los integrantes. También se ha tratado de utilizar dos grupos distintos y constituidos por sujetos con diferentes perfiles. Un grupo muy homogéneo y con formación en diseño, y otro muy heterogéneo y con formación muy variada.

El primer grupo está formado por alumnos de la titulación de Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto que cursan la asignatura de Biónica como optativa. El grupo tiene 36 componentes de los que se formaron 9 grupos de 4 componentes cada uno. Todos los integrantes del grupo cursan tercer año, y tienen experiencia en aplicación de métodos de diseño y están familiarizados con metodologías de diseño por fases. Han realizado ejercicios y proyectos en los que realizan fases según el proceso tradicional, de información y análisis, creativa, de desarrollo y de definición o detalle.

Para el primer grupo no se deben plantear 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. Además estos nuevos métodos son la base de estudios que han elegido voluntariamente, por su interés. Configurando un grupo de alumnos destacados que está motivado por la recompensa de superar sus estudios.

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 hubo tres grupos con un diseñador, los ingenieros y arquitecto tenían experiencia en proyectos pero no de este tipo, para alguno de los componentes este modo de trabajo era completamente nuevo y sin 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 algo menor, más tutelados y con un mayor refuerzo en el seguimiento de cada uno de sus trabajos. Hay que destacar que en este grupo todos los individuos eran más expertos y responsables, y con interés en la biomimética, por lo que su actitud era positiva y participativa. Su madurez les ha ayudado a superar la falta de hábito a la metodología, asimilando los conocimientos de manera rápida, y a tomar decisiones de una manera eficaz.

### **5.2.2 Modelo aplicado. Problema propuesto**

Inicialmente se experimenta en dos ejercicios con el método indirecto basado en una solución natural, variando el inicio de cada ejercicio se realiza la traducción del principio natural a un principio ingenieril. Finalmente, se experimenta con el método directo en un proyecto completo en el que se desarrollan todas las fases del modelo propuesto para la metodología de esta Tesis.

En la figura 5.1 se observa la metodología propuesta y sus fases así como la acciones a desarrollar y como se aplican en cada uno de los ejercicios y proyecto.

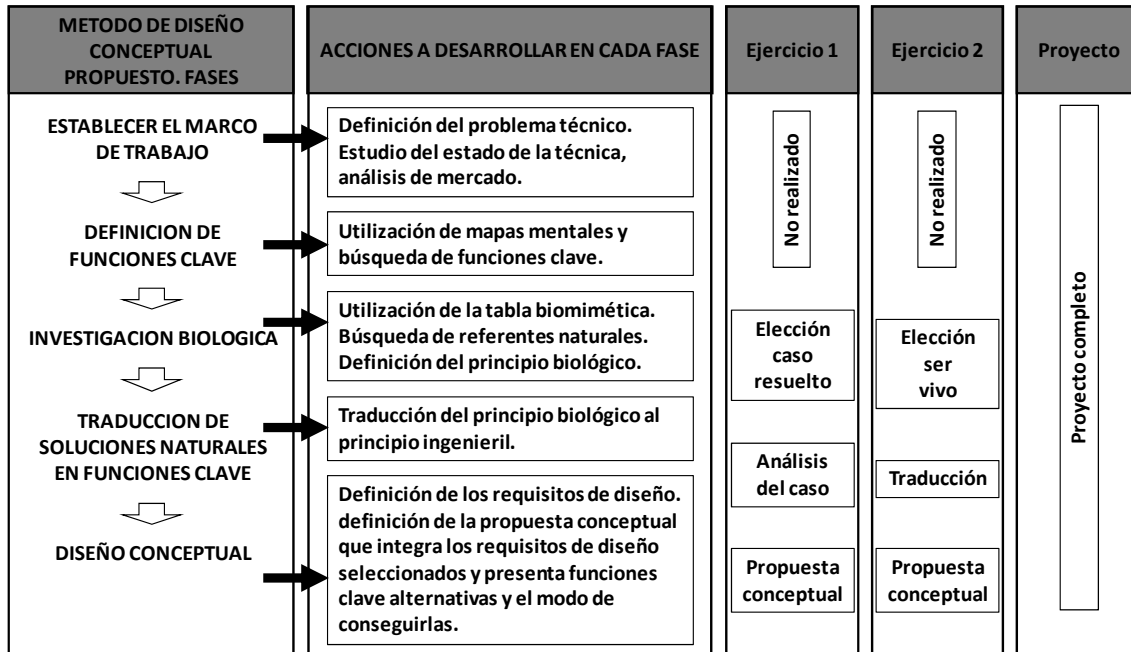


Figura 5.1: Esquema del modelo aplicado y acciones realizadas en cada test.

**5.2.2.1 Ejercicio 1. Análisis de un caso real**

En un primer test, se ha trabajado la observación de casos reales de biomimética para la comprensión del principio natural y el argumento ingenieril descrito y su aplicación en la generación de nuevos conceptos y soluciones. Se trata de un ejercicio individual de investigación documental, en el que se ha buscado la información que describe un caso de biomimética o diseño bio-inspirado, el conocimiento adquirido se utiliza en el diseño de un objeto distinto al de referencia. Se explica el ejercicio y se hace un ejemplo para el grupo, desde la búsqueda hasta la conceptualización.

Los casos se encuentran en varias fuentes, principalmente ASK Nature, revistas científicas, búsquedas en google, o google academics, y libros o publicaciones recomendadas por el profesor. Todos ellos están bien documentados y tienen una clara explicación de su fundamento biológico e ingenieril, sin embargo los trabajos se han completado con búsquedas específicas sobre el individuo natural, y sobre los productos o aplicaciones propios del caso.

Se deben definir los rasgos que caracterizan el principio o fundamento de la naturaleza y relacionar esos rasgos por medio de características ingenieriles, mecánicas, físicas, químicas, etc., se describen y esquematizan dichas características. También se define si se trata de una copia, imitación, emulación, inspiración, etc. definiendo el término, su significado, alcance y justificándolo adecuadamente. Utilizando la información anterior y el conocimiento adquirido

se plantea el diseño, a nivel conceptual, de un objeto distinto al del caso. Este trabajo de conceptualización es fundamental y tiene como objetivo una búsqueda de alternativas.

Se ha comprobado que las soluciones naturales encontradas y documentadas, tienen aplicaciones alternativas. El principio de la naturaleza se traduce en varias aplicaciones como principio técnico o ingenieril. La investigación en profundidad sobre el principio biológico deriva en nuevo conocimiento, se llega a definir con mucho detalle el principio y favorece la traducción al principio ingenieril y su aplicación a soluciones técnicas.

### **5.2.2.2 Ejercicio 2. Solución natural aplicable a un proyecto de diseño**

En un segundo test se han estudiado casos de éxito en la naturaleza para definir mejoras funcionales aplicables a una carcasa articulada. La funcionalidad buscada está definida previamente. Se trata de un proyecto conceptual en el que partiendo de una solución de la naturaleza se aplica al diseño de un objeto. En este caso se busca el estudio de algún individuo o grupo de individuos, que se caracterice por tener alguna característica, principio o facultad destacable en sus articulaciones conseguidas gracias a su exoesqueleto, una vez obtenida dicha característica o principio se aplicará al diseño de un objeto en su carcasa.

En el test realizado no importa o interesa el uso u aplicación de dicho objeto sino la posibilidad de utilización de ese tipo de carcasa en diferentes objetos, es decir, la diversidad de opciones de aplicación. Se pretende conseguir la conceptualización de una carcasa de un producto partiendo de la analogía determinada, con el exoesqueleto de un ser vivo que sea destacable por su articulación, ya sea por su estructura, uso del material, funcionalidad, grado de libertad, etc. Para ello se hace una pequeña investigación y se determinan de las razones por las que dicha articulación es destacable, tratando de conseguir criterios medibles o cuantificables para su posterior extrapolación.

En el proceso se estudian, analizan y razonan los principios y procesos de la naturaleza para establecer la analogía ingenieril. Se entiende por analogía ingenieril 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. Con esta analogía se plantean las soluciones conceptuales de producto tratando superar lo ya existente. Estas soluciones se aplican al diseño del objeto por medio de la representación de una carcasa que tenga como función característica la de ser articulada. La función definida por medio de la biomimética no necesariamente ha de ser la principal, además la función no debe depender del objeto diseñado.



### 5.2.2.3 Proyecto completo. Problema técnico y resolución por medio de biomimética

Finalmente, se ha trabajado con la metodología de manera global, con el modelo propuesto y todas sus fases. Se trata de un proyecto en el que se pretende dar solución a un problema técnico existente en un grupo de productos. En este proyecto el problema es el diseño de un cierre hermético en una carcasa, de modo que la solución técnica inspirada en la naturaleza se pueda aplicar al diseño de alguno de estos objetos; Un hermético doméstico para guardar alimentos o similar, una carcasa sumergible capaz de soportar de 0 a 250 m. de profundidad, o un tipo de carcasa para dispositivo electrónico que deba trabajar en ambientes agresivos de viento, polvo, lluvia, etc.

Dado que en la naturaleza se encontraran diferentes seres, con diversidad de características funcionales específicas relacionadas con la función de hermético, también se plantean diversos tipos de carcasas con sus aplicaciones concretas.

Se establece el marco de trabajo, que se ha definido por los tres objetos citados anteriormente, que pueden necesitar la característica de hermético. También es necesario definirlo por medio de una búsqueda de referencias existentes en el mercado. Ya se describió en el capítulo de metodología propuesta que el marco de trabajo se puede ampliar o reducir dependiendo del objetivo concreto que se busque, por tanto un análisis de mercado y de patentes relacionadas en el que se describa el estado actual de la técnica resulta de interés para determinar que funciones clave se pueden plantear.

La característica de hermético se puede encontrar en la naturaleza en gran variedad de clases, por ejemplo los bivalvos, del grupo de los que poseen exoesqueleto, es muy común pero no se le concede la importancia que tiene por ser algo básico y fundamental para su existencia. Sin embargo muchos de los objetos cotidianos necesitan de esta característica, y nuestros diseños están condicionados por las soluciones técnicas existentes, siendo necesario encontrar mejores soluciones e innovaciones.

Con este proyecto se pretende alcanzar oportunidades de innovación por medio de la conceptualización de una función de un producto partiendo de analogías en la naturaleza, aplicando los conocimientos adquiridos, para dar una solución al problema técnico.

Se buscan las funciones clave que proporcionen oportunidades de innovación, para ello se hace un listado de funciones clave, que sirvan como objetivo para plantear soluciones, también es posible buscar oportunidades de innovación, o alternativas a la función de hermético.

Una vez que las funciones clave están seleccionadas, se realiza un estudio del estado del arte, tanto en lo biológico como en lo industrial. La definición del 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 u otras que nos definan plenamente el estado del arte. Para la investigación en la naturaleza es necesario utilizar la tabla de referentes naturales, previamente descrita en el capítulo de metodología.

Por último se realiza la traducción de las soluciones naturales a funciones clave, empleando la tabla de referentes en sentido inverso, aislamos los mejores candidatos para dar solución a las funciones clave, utilizando la característica de hermético de los exoesqueletos y su aplicación en carcasas. También es necesario un proceso de definición del principio natural que los define y su traducción ingenieril, por medio de analogías que describen como se consigue la característica de hermético: por su forma o geometría, su estructura, uso de los materiales, etc.

Con estas funciones se puede definir conceptualmente el producto, los referentes y la forma en que solucionan cada una de las funciones clave definirán especificaciones de diseño que se utilizaran para la conceptualización del producto.

En otros proyectos se desarrollaría el diseño de detalle, teniendo en cuenta que algunas de las decisiones tomadas tienen condicionantes del principio natural tomado, y pueden necesitar adaptación. Sin embargo en este modelo no se contempla la fase de diseño de detalle ya que, si bien en algunos casos su aplicación es directa, en otros es necesaria una fase de investigación y desarrollo. Esta fase de investigación puede realizarse por el estudio pormenorizado del individuo natural y esto podría solventarse con una consulta a un especialista, búsqueda en revistas científicas especializadas o similar. Sin embargo en ocasiones esto no es posible, ya que el diseñador no es experto o ese conocimiento es aun inexistente.

También puede ser necesario el desarrollo de prototipos, experimentos y pruebas que evidencien la correcta traducción del principio biológico en el ingenieril, que en ocasiones puede ser realizado con modelos virtuales con la ayuda de herramientas de diseño asistido por ordenador y módulos de cálculo, simulación o animación. En otras necesita de inversión real en prototipos, a nivel económico, personal y de tiempo. Por estas razones no se ha incluido esta fase y el diseño se queda en el nivel conceptual como propuesta a desarrollar.

**5.3 Resultados obtenidos.**


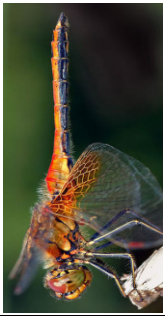


Se describen los resultados obtenidos desde el inicio, por las experiencias preliminares que se han realizado, hasta los más recientes conseguidos con los proyectos. En la tabla 5.2 se presentan los distintos resultados y los criterios utilizados para evaluarlos, estos criterios y resultados se explican detalladamente en los siguientes apartados.

RESULTADOS OBTENIDOS	PROBADO MEDIANTE	CRITERIOS
RESULTADOS PREVIOS	Proyecto propios	Aplicabilidad del método y adaptabilidad de las tablas iniciales.
		Validez de las especificaciones funcionales para el diseño conceptual.
RESULTADOS DEL EJERCICIO 1	Análisis de un caso real	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.
RESULTADOS DEL EJERCICIO 2	Solución natural aplicable a un proyecto de diseño	Individuo natural y característica propia.
		Análisis del principio biológico.
		Análisis del principio ingenieril. Grado de relación entre el principio biológico y el ingenieril.
		Propuesta de aplicación conceptual.
		Aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.
RESULTADOS DEL PROYECTO	Problema técnico y resolución biomimética	Definición del marco de trabajo
		Definición de las funciones clave
		Tabla biomimética, búsqueda de los referentes naturales
		Grado de relación. Analogía entre principio biónico y principio ingenieril
		Propuesta conceptual
		Aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.

Tabla 5.2: Modelo aplicado y acciones realizadas en cada prueba.

**5.3.1 Resultados previos. Antecedentes.**

Los primeros resultados de la relación exoesqueleto-carcasa se obtuvieron por un método de relación funcional basado en una tabla espejo, que conecta las funciones buscadas con los individuos en la naturaleza, como se puede observar en la tabla 5.3. En esta tabla se observa que la aplicación de funciones en el objeto tiene varios niveles, desde los más genéricos a los más específicos y son éstos los que se vinculan a individuos en la naturaleza que presentan dicha función específica.

REQUISITOS (FUNCIONES DE LAS CARCASAS)			SOLUCIONES (ANALOGIA CON FUNCIONES DE LOS EXOSQUELETOS)		
1er NIVEL (GENÉRICO)	2º NIVEL	3er NIVEL	FUNCIONES	EJEMPLO EN LA NATURALEZA	IMAGEN
FUNCION BASICA DEL PRODUCTO O GRUPO FUNCIONAL	FUNCION DETALLADA DE ALGUNOS DE SUS COMPONENTES O PARTES	FUNCION ESPECIFICA, FUNCION QUE REALIZA UN OBJETIVO CONCRETO	FUNCION DESARROLLADA POR EL EXOSQUELETO	EJEMPLO DE SER VIVO QUE DESARROLLA LA FUNCION	
PROTECCION (MANTENER LA INTEGRIDAD FISICA)	RESISTIR IMPACTOS	DISIPACION DE ENERGIA	RESISTIR IMPACTOS/ DISIPACION DE ENERGIA DE CHOQUE	La estructura del tejido de las patas del grillo amortigua el choque del salto debido a un exoesqueleto de cutícula flexible y fibras densas (Perez-Goodwyn 2006) .	
		ABSORCION DE ENERGIA	RESISTIR IMPACTOS/ DISIPACION DE ENERGIA DE CHOQUE	El exoesqueleto de la libélula le protege durante las colisiones con la presa al ser duro pero lo suficientemente flexible como para absorber los golpes (Yahya 2002).	
	PROTECCION ANTE AGRESIONES EXTERNAS	PROTECCION ANTE LA HUMEDAD	PROTECCION ANTE FACTORES ABIOTICOS / PERDIDA DE HUMEDAD	En las pulgas el recubrimiento de su exoesqueleto las protege durante los impactos (Yahya 2002).	
				Una espuma proporciona un control térmico y de humedad. Las larvas están protegidas de las fluctuaciones de la temperatura y la humedad gracias a la cobertura de savia de la planta (Yodel 2008).	



		PROTECCION ANTE LA LUZ	PROTECCION ANTE FACTORES ABIOTICOS / FILTRADO DE LUZ	<p>La cutícula de las cucarachas permite una variación de temperatura controlada y pérdida de humedad a través de una capa cerosa. (Wigglesworth 1986).</p> <p>Los exoesqueletos de carbonato de calcio de los corales podrían ayudar a proteger sus simbiontes fotosintéticos mediante la absorción de los rayos UV (Reef 2009).</p>	 

Tabla 5.3: Tabla que muestra los diferentes niveles de funciones y la relación carcasa-exoesqueleto.

Estas tablas representan dos aspectos del modelo final, el primero la estructura jerárquica de funciones y su división en niveles, y el segundo la especialización del individuo en una función concreta. Se caracteriza por no existir una relación común léxica entre la función específica del objeto y el modo en que un individuo realiza la función en la naturaleza. Las búsquedas se hacen complicadas y existen funciones que requieren una investigación específica y profunda para llegar a encontrarlas.

También se observa en esta tabla que la estructura jerárquica de funciones necesita de varios niveles hasta llegar a las más concretas. No hay una relación directa de izquierda a derecha y tampoco entre niveles. Además atiende a funciones concretas ya conocidas, no son clave o diferenciadas, y tiene como resultado nuevas formas de obtener funciones existentes, algo que se ha utilizado de forma extensa en biomimética, aspecto muy positivo pero con poca novedad. Este hecho hizo que uno de los objetivos de la metodología fuera la definición de nuevas funciones y que puedan realizarse de modos alternativos.

Sin embargo de este tipo de tabla se ha evolucionado a otras en las que las funciones buscadas ya han sido jerarquizadas y están diferenciadas, se ha determinado que son clave y que pueden aportar innovación. Estas funciones se obtienen por medio de métodos creativos, como por ejemplo los mapas mentales y su relación con el análisis funcional.

También se ha transformado el modo de hacer la traducción de la función técnica a la solución biológica por medio de las preguntas o cuestiones que especializan la relación, ya que se ha determinado que existe una dificultad en la definición léxica, corroborando las afirmaciones de otros investigadores (Shu 2010, Lozano 1994).

Estas primeras experiencias llevaron a definir objetivos para siguientes trabajos como la de establecer analogías entre carcasas de productos y exoesqueletos naturales desde el punto de vista funcional, encontrar lo que hace el exoesqueleto y como lo consigue. Relacionar metodologías existentes y algunos análisis utilizados en el diseño de productos, tales como los análisis funcionales, de materiales, formales, estructurales, uso con la biomimética. Establecer fuentes válidas de información que contribuyan al conocimiento biológico, gracias a los análisis realizados en el proceso de diseño, así como las palabras clave para hacer más efectivas las búsquedas. También se ha establecido un modelo de fases más completo como se observa en la tabla 5.4, este es muy próximo al que finalmente se ha utilizado.

## ENSAYO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Fase	Pre-inicial	1	2	3	4	5
Actividad	Establecer el marco de trabajo	Analizar la funciones clave	Investigación biomimética	Aplicar biomimética a las funciones clave	Diseño conceptual	Diseño de desarrollo y detalle

Tabla 5.4: Proceso de diseño y propuesta preliminar

En las siguientes experiencias con este modelo se ha buscado evaluar los resultados y comprobar la utilidad de la metodología establecida. Los criterios para evaluar el estudio han sido:

1. Establecer funciones clave novedosas.
2. Posibilidad de encontrar referentes biomiméticos.
3. Aplicar la solución natural a la función clave de una manera innovadora.

Se ha observado que los resultados variaban en gran medida por el grado de definición, la validez de la información recopilada y la complejidad del tema. Algunos de los proyectos tuvieron dificultades en el proceso de recuperación de información relevante para resolver las principales funciones, de nuevo se ha evidenciado la necesidad de un especialista como un biólogo.

De este modo no se cumplían los criterios 2 y 3. Para el criterio 2 fue necesario mejorar el trabajo con la tabla de referentes biomiméticos, y para el criterio 3 fue necesario tener más experiencia en la abstracción del principio biológico al ingenieril, la alternativa tomada fue hacer algunos ejercicios previos, análisis y discusión de casos. Con estas conclusiones se han propuesto cambios en la metodología para llegar al modelo probado ahora.

### 5.3.2 Resultados del ejercicio 1. Análisis de un caso real

En este ejercicio analizan los resultados por medio de varios criterios con el fin de determinar la validez de la metodología. Los criterios son:

- Selección del caso, su referente natural y el principio biológico utilizado.
- Principio ingenieril del caso y su relación con el principio biológico comparando si lo iguala o lo supera.
- Principio ingenieril propuesto y su relación con el principio biológico.
- Diferencias entre el principio ingenieril del caso y el principio ingenieril de la propuesta.
- Las fuentes de información utilizadas y su validez.

La tabla anexa "Análisis del ejercicio 1" incluye un extracto de todos los resultados para cada uno de los diferentes casos. En este resumen se pueden consultar los resultados de los ejercicios para cada criterio, la tabla se encuentra en el Anexo I - Tablas.

### 5.3.2.1 Selección del caso, su referente natural y el principio biológico utilizado.

El primer criterio a tener en cuenta es la selección del caso e interesa valorar su relevancia para la aplicación al diseño conceptual, previamente se ha explicado paso a paso cómo se realiza el ejercicio de modo que se muestra como hacer una búsqueda, análisis y selección del caso. El alumno elige el caso libremente, según un criterio personal. Puede ser por la cantidad de información que recupere, la calidad de la misma, una preferencia por el individuo natural, el principio ingenieril utilizado, la aplicación concreta o producto industrializado, entre otras. Algunos casos están descritos por el resultado de la investigación llevada a cabo de los que solo existe un artículo en una revista científica, por el desarrollo tecnológico en el que se encuentran como posible aplicación futura, o por la innovación sobre un producto desarrollado ya existente en el mercado, esto define la secuencia básica del I+D+I.

Pueden existir repeticiones de un mismo caso, y en ocasiones de repeticiones de mismos individuos o principios biológicos con diferentes aplicaciones. Esto evidencia que algunos estudios destacan por alguna característica particular, y también que de un mismo individuo o principio biológico se pueden extraer varias soluciones y aplicaciones que llegan a ser industrializadas, lo cual ya representa una conclusión de validez de esta parte de la metodología por la diversidad de soluciones que un individuo puede dar. Un objetivo del ejercicio es proporcionar un paso más allá respecto a la aplicación existente, y hacer nuevas propuestas o alternativas para un mismo individuo.

El principio biológico más elegido es el ojo compuesto de los insectos que se han estudiado en cuatro casos, pero con individuos distintos, la característica más interesante es la propiedad antirreflejo. Otros dos casos basados en propiedades ópticas tienen su base en las escamas de las alas de las mariposas, y su iridiscencia que le permite reducir los reflejos en superficies con aplicación en dispositivos electrónicos. El caso de Ornilux, con la telaraña y su reflexión de los rayos ultravioletas para evitar muertes accidentales de pájaros, ha sido utilizado en tres ocasiones.

Destacamos también aquellos casos que se han utilizado en dos ocasiones; El Shinkasen, tren bala japonés, basado en el pico del Martín pescador y en el borde serrado de las plumas del búho. El caso de QuinetiQ que se fundamenta en el escarabajo de Namibia, que puede recoger humedad del ambiente por medio de superficies hidrófobas e hidrófilas. El Groasis es un caso especial por su orientación al ecodiseño. Las semillas de la Samara y de Arce se han utilizado del mismo modo en dos casos distintos, sacando partido a su función de vuelo y dispersión por el aire. El caso de SuperSkin, un casco de protección para motoristas, ha sido utilizado basándose en la protección de la capa elástica de la dermis existente en la piel.



La propia repetición al seleccionar un caso o individuo o principio biológico ya muestra relevancia y potencial aplicación al diseño conceptual. El resto de los casos se han utilizado de manera individual, sin repetición.

**5.3.2.2 Principio ingenieril del caso y su relación con el principio biológico.**

En este apartado, la importancia de criterio utilizado se basa en la relación del principio ingenieril con el principio biológico, cuál es su grado de parecido con la naturaleza. Haciendo referencia a la figura 4.14 del capítulo 4, metodología propuesta, se establece un grado de relación como muy alto, cuando se trata de copias, traducciones o replicas de la naturaleza en una aplicación de ingeniería. Se asigna un grado alto cuando trata de emulaciones o imitaciones. En grado medio sería el caso de simulaciones o mimetismo. Grado bajo trataría de casos en los que sólo hay inspiración, sugerencia o interpretación (Figura 5.2).



Figura 5.2: Grados de analogía. Clasificación del argumento ingenieril.

Dado que es difícil establecer una relación objetiva de parecido con la naturaleza, se utiliza también el grado de resolución técnica, definiendo como alto aquellos cuya resolución técnica se aproxima en gran medida a la resolución de la naturaleza. Definimos como bajo aquellas soluciones técnicas que no tienen una base ligada a la solución natural.

En la tabla anexa "Análisis del ejercicio 1" se puede ver el principio biológico y un resumen del principio de ingeniería, aquí se citan aquellos que tienen una relación muy alta y que por ello destacan y tienen más valor.

En la tabla 5.5 se presenta la distribución de los casos para los diferentes grados de relación. Se analizan diecinueve casos de los presentados, solo veremos algunos ejemplos, destacados por su parecido al principio natural o por su alto grado de resolución técnica basado en el individuo vivo.

Hay dieciséis casos clasificados como alto, tres como medio y tres como bajo, esta distribución hace pensar en que los casos han sido elegidos por su calidad, por la fidelidad del principio ingenieril respecto al biológico o por su resolución técnica. Decir que los seis casos, media y baja relación, están basados en inspiraciones, imitaciones parciales o simulaciones (tabla 5.5).

Grado de relación PB-PI	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Total 42 casos	19	16	3	3	-

Tabla 5.5: Grados de relación entre principios biológico e ingenieril para el ejercicio 1.

Clasificando los casos por el tipo de relación, ciencia de los materiales, funcional, aspectos de geometría o aplicaciones robóticas, vemos que el grupo más numeroso es la aplicación a la ciencia de los materiales con dieciséis casos, esta es una conclusión que se obtuvo en anteriores trabajos (López-Forniés 2010), y que muestra que la biomimética es una buena fuente de inspiración para este campo. Sin embargo hay que destacar que encontramos trece casos de aplicación funcional, y cinco de inspiración en características geométricas o formales, siendo función y forma dos elementos básicos del diseño.

Se dan casos donde no se obtiene solo una característica sino una combinación de varias, por ejemplo funcionalidad y robótica en los músculos neumáticos (Festo 2012), funcionalidad y material como en el mejillón azul y el adhesivo bioinspirado (Lee 2007) o funcionalidad y geometría como en el Lunacet una mono-aleta para submarinistas y nadadores que replica la cola del delfín y sus características de potencia y eficiencia (Smith 2009).

Otro dato de interés es que del total hay diez casos que están basados o tienen aplicación en robótica, algunos de ellos realizan imitaciones funcionales utilizando las características del ser vivo para obtener funciones similares, de partes de un individuo o una copia del individuo por completo.

Las películas de silicio cristalino que imitan la estructura de los ojos de las polillas aumentan la eficiencia y la eficacia de las células fotovoltaicas (figura 5.3). Según Yamada (2011), la película de silicio refleja menos luz cuanto mayor es la altura de los pilares que la forman con una altura de pilares de 250nm el comportamiento es similar a una doble capa de superficie anti-reflectante normal "Double Layer Anti Reflective (DLAR) coatings". Sin embargo si se incrementa la altura de los pilares a 500nm el resultado es un 5,4% menos de luz reflejada al día. Cuando se comparan los paneles solares habituales que usan una sola capa de anti-reflectante "Single Layer Anti Reflective (SLAR) coating" con paneles solares que utilicen este nuevo material basado en los ojos de las polillas, se observa en estos últimos una reducción del 70% de luz reflejada en la superficie, lo que lleva a un aumento del 12% en la energía producida por una célula solar en un día.

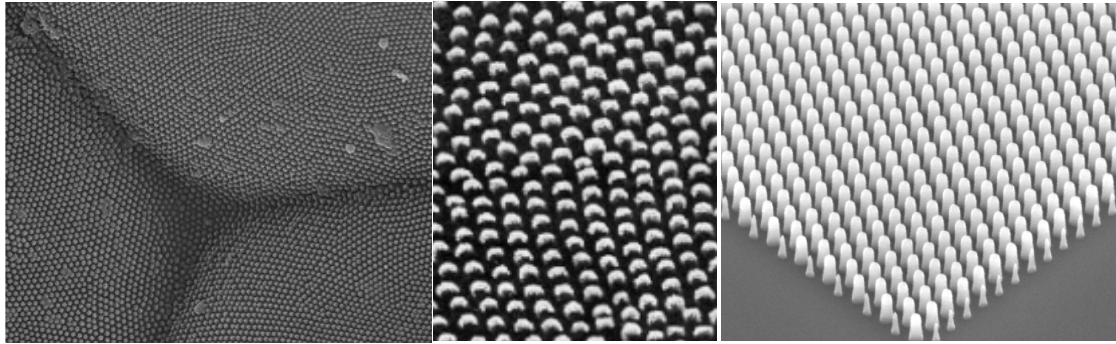


Figura 5.3: Superficie del ojo de la polilla, varios aumentos y película de silicio cristalino. (Imágenes: Peng Jiang)

El caso Ornilux, se basa en una característica de las telas de araña, que por su composición son capaces de reflejar la luz ultravioleta visible de modo que algunos pájaros pueden evitarla, este mismo efecto aplicado sobre los vidrios de los edificios permiten evitar el elevado número de muertes que pájaros en accidentes por colisión (Bruce 2005, Eisner 1983). El fabricante de vidrios Arnold Glass ha creado un vidrio con grabado de un patrón de líneas con esta misma característica, de modo que apenas es perceptible por ojo humano pero sirve a los pájaros para evitar el impacto. Esta sencilla réplica ha sido probada en túnel de viento con un número elevado de pájaros, más del 70% de los pájaros evitó el impacto, en principio ingenieril ha servido para crear una patente poder explotar industrialmente esta idea (Figura 5.4).



Figura 5.4: Telaraña como referente para evitar los impactos de los pájaros con los cristales de los edificios. (Imágenes: Ornilux)

En el caso del mejillón azul se obtiene un adhesivo que trabaja en ambientes húmedos e incluso bajo agua (Lee 2007), la Dihidroxifenilalanina es un adhesivo natural que se encuentra en un aminoácido producido por el mejillón azul y que le sirve para adherirse fuertemente a la roca por medio de sus vellosidades. El principio ingenieril, fundamentado en la química, ha permitido obtener una fórmula similar de un derivado de la proteína de soja, PureBond Columbia® es un adhesivo que se utiliza en la construcción de productos de contrachapado de madera, está libre de formaldehído de modo que no contiene tóxicos (Columbia 2012).

El caso del Shinkansen, tren bala japonés, está basado en dos referentes biológicos distintos, el primero es la copia del pico del martín pescador que se utiliza como morro del tren (Mashimo 1997), permitiendo que la onda generada al entrar en los túneles debido al cambio de presiones reduzca su energía al igual que ocurre cuando el ave pasa de un medio gaseoso a un medio líquido que no reduce su velocidad no provoca salpicaduras, ver figura 5.5.

El segundo referente es el borde serrado de las plumas del búho (Bachmann 2011), no causan turbulencia y le permiten tener un vuelo silencioso para no alertar a sus presas, este mismo detalle se reproduce en el pantógrafo, soporte de la catenaria, evitando vibraciones y ruidos a las elevadas velocidades desarrolladas. Este efecto de diente serrado de las plumas tiene un símil con el aleta de las ballenas jorobadas y sus protuberancias que ha sido adaptado en la aspas de los aerogeneradores.



Figura 5.5: Imagen de Martín pescador, detalle de la entrada en el agua y del frontal del tren. (Imágenes: The Biomimicry Institute)

### 5.3.2.3 Principio ingenieril y su relación con el principio biológico

En este apartado, la importancia de criterio utilizado es como se relaciona el principio ingenieril de la propuesta con el principio biológico, cuál es su grado de parecido con la naturaleza. Lo interesante es ver cómo se genera un nuevo principio ingenieril y como se plantea su aplicación en un concepto alternativo. También interesa ver si existe relación entre el principio del caso y el propuesto, si se replica, se parte de él como base o se propone uno nuevo. Al igual que en el apartado anterior se define la relación como baja, media, alta y muy alta. Hay catorce casos de nivel muy alto, trece de nivel alto, once de nivel medio y tres de nivel bajo. Comparando con los casos elegidos se detecta que el grado de relación, su parecido con la naturaleza, es menor.

Esto indica que si bien han podido generar alternativas, estas tienen menos definición o parecido con el principio biológico que el del caso de referencia.

De entre los casos que se valoran como muy alto el grado de relación entre biología e ingeniería, destacaremos dos casos que tienen una nueva aportación diferenciada del principio ingenieril descrito en el caso. El primero de ellos se basa en la semilla de la Samara y del Arce y su propiedad de dispersión y vuelo (Yasuda 1997), en este caso plantean varias soluciones conceptuales de las que mencionamos cuatro de ellas por su originalidad y diferencia con el caso elegido del monoptero (ver figura 5.6), una de ellas es un ventilador de techo monopala similar a un novedoso concepto de aerogenerador eólico, otro concepto es una hélice para embarcaciones que aproveche el vórtice de sustentación que le da elevación a la semilla para mejorar el empuje de la hélice, un sistema para mantener las bengalas de emergencia más tiempo en el aire y por último un aspa para un mezclador que podría aplicarse para diferentes aplicaciones tanto domésticas como industriales.



Figura 5.6: Semilla de Samara y prototipo de monoptero. (Imágenes: Evan Ulrich/A. James Clark School of Engineering, Universidad de Maryland).

El segundo se basa en la cola del delfín por la eficiencia de la propulsión muscular gracias a la geometría, punto de giro y flexibilidad de los tejidos, es el caso Lunacet de una mono-aleta para natación (Smith 2009). En la propuesta se presentan tres soluciones de aplicación del mismo principio biológico, un minisubmarino con una propulsión similar a la del delfín, o un sistema de propulsión para embarcaciones de recreo que aprovecha las zonas de depresión que surgen a ambos lados de la aleta para ser más eficiente, y por último una válvula de sobrepresión que tiene un funcionamiento antagónico al principio natural, ya que si bien

utiliza la combinación de material rígido y flexible para hacer el cierre la válvula, no pretende guardar y aprovechar la energía sino eliminar el exceso y perder energía en la zona de sobrepresión.

Un ejemplo en el que se utiliza el mismo principio biológico e ingenieril al del caso de la piña de los pinos, la aplicación industrial son textiles que regulan la humedad por medio de zonas que se abren y permiten la ventilación (Reyssat 2009). En la propuesta se toma como base ese mismo principio, un material con dos capas que tienen diferente comportamiento higroscópico, para aplicarlo a zonas o áreas del edificio que necesiten ventilación y regulación de humedad o bien a envases para conservación de alimentos de modo que no acumulen excesos de humedad que se pueda condensar y formar agua o en alcantarillas o rejillas de modo que estas se abran cuando llueve y permanecen cerradas cuando el ambiente es seco, en este último concepto la apertura y cierre funciona de manera antagónica.

El último caso que destacamos es la tecnología anti-biofilm basada en el descubrimiento de una alga marina llamada *Delisea Pulcra* (alga roja), que produce furanonas naturales que inhiben la habilidad de las bacterias para colonizar y crear el biofilm y tiene aplicaciones en campos médicos y sanitarios, sin embargo la propuesta se orienta a una misma aplicación pero en otro tipo de entornos como son las zonas húmedas donde la proliferación de bacterias es alta y su reducción podría ser respuesta a tratamientos antibióticos. Algunas de las ideas alternativas a las aplicaciones existentes utilizan las dos características del alga roja, antibiofilm y reducción de la corrosión por los que es idóneo para aplicaciones en piscinas, instalaciones deportivas o de recreo, tuberías, zonas infantiles y en general en recubrimientos de elementos sumergidos que deban ser protegidos contra la corrosión.

En varios casos se plantea el utilizar el principio biológico de manera antagónica o contraria a como de manera natural se desarrolla, este hecho se da en creatividad donde se utiliza el pensamiento inverso o mirar las cosas al revés, tratando de convertir el problema en solución (Iglesias 1999).

#### **5.3.2.4 Diferencias entre el principio ingenieril del caso y de la propuesta.**

Con este criterio se compara la propuesta respecto al principio visto en el caso, observando las diferencias que lo mejoran o empeoran, suben o bajan el nivel de la aplicación. Interesa analizar cómo se ha tratado el conocimiento adquirido en el propio caso para generar su propuesta, y si ha conseguido establecer alternativas a dicho caso, como se marca en el objetivo del ejercicio.

Por lo general se mantiene el nivel, veintisiete casos de cuarentaiuno, la mayoría de ellos reutiliza el principio ingenieril del caso, o presenta una aplicación alternativa igual de válida. Se presentan ocasiones de cambio de entorno, aplicación o uso, sin variar el principio ingenieril del caso con lo que se generan nuevas propuestas, haciendo un uso creativo del conocimiento existente. Estos veintisiete casos contemplan todos los niveles, y no se percibe que haya influencia entre los grados de relación y el hecho de que se mantenga.

En once casos se presentan propuestas con un grado de relación menor, es decir que el uso del conocimiento del caso no se ha utilizado adecuadamente y el grado de parecido entre el principio biológico e ingenieril de la propuesta se reduce. De estos once, seis han bajado de un nivel muy alto y cinco lo han hecho de alto a niveles inferiores.

Podemos decir que los niveles altos parecen más difíciles de mantener, una posible causa es la definición técnica. Para los casos en los que la definición técnica es muy alta es más difícil encontrar una alternativa de principio ingenieril muy alta. Esto también se ve influido por el nivel de conocimientos que tienen, en el caso Lunacet, una monoaleta para submarinistas, es muy fácil comprender los principios que caracterizan al individuo natural y como se han utilizado en la ingeniería, por lo que hacer propuestas es razonablemente sencillo.

Sin embargo en el caso del Shinkansen, uno de los ejercicios mantiene el nivel como muy alto, propone una aplicación de un objeto que tiene los mismos problemas, vibración, ruido y turbulencia de una turbina o ventilador y plantea un símil al ejemplo. El otro baja a un nivel medio por no encontrar una aplicación correcta, o no resolver adecuadamente. La solución propuesta es una bota de pesca que reduce las turbulencias de la corriente del río.

Hay tres casos en los que la propuesta mejora al de referencia, pasando todos ellos a un nivel superior. Los platos flexibles para servir comida basados en la hoja de palma y su propiedad hidrófoba, pasan de nivel bajo a medio, planteando soluciones más evolucionadas y con un mejor aprovechamiento de estas características. El Groasis, recipiente para recuperar, conservar y dosificar agua en plántones de árbol para repoblación de zonas deforestadas, pasa de un nivel medio a uno alto. Utiliza el principio biológico de recuperar agua por condensación, dar protección y nutrientes para plantear varias alternativas de cocción de alimentos en microondas, tapa para cazuela o un alimento con una carcasa de protección que aporta condimentos. Por último el caso del robot colibrí, que se presenta como una copia de vuelo en el caso, pero la propuesta recupera una característica propia del colibrí necesaria para su vuelo, la "joroba" de néctar sirve de contrapeso al batir las alas y dota de estabilidad a la cabeza a la hora de chupar la sustancia.



Se plantea en productos que produzcan vibraciones o movimientos, herramientas u otros objetos, el elemento amortiguador está sincronizado pero en la fase contraria con el elemento que causa dichas incomodidades. Este amortiguador podría estar relleno de líquido ya que los fluidos absorben vibraciones.

#### **5.3.2.5 Las fuentes de información.**

En este criterio interesa saber cuál ha sido la fuente de información principal, y si ha habido más de una, cuáles han sido las fuentes complementarias. La fuente de información utilizada principalmente ha sido la página de referencia de ASK Nature, en la que se pueden encontrar muchos casos bien documentados y con referencias válidas de libros o artículos de revistas científicas, también se han utilizado otras fuentes en internet, como páginas de divulgación científica, wikis, blogs y similares. Algunos casos se han completado por medio de la información de los propios productores o fabricantes, como es el caso de FESTO, en cuya página web existen múltiples ejemplos de biomimética y diseño bioinspirado.

Las revistas científicas dan una buena información respecto al principio biológico y su traducción en principio ingenieril, suele ocurrir que los artículos publicados muestran los experimentos, pruebas e investigación realizadas para esos principios, por lo que están perfectamente descritos y documentados. En un caso, la raya como plataforma robótica, se trata de un trabajo de investigación en el que se explica con cuidado detalle cada parte de la relación natural/artificial, incluyendo el proceso de fabricación del prototipo.

#### **5.3.3 Resultados del ejercicio 2. Solución natural aplicable a un proyecto de diseño**

En este ejercicio se analizan los resultados por medio de varios criterios con el fin de poder determinar la validez de este método. La tabla anexa "Análisis del ejercicio 2" incluye un extracto de todos los resultados para cada uno de los diferentes casos. En este resumen se pueden consultar los resultados de los ejercicios para cada criterio, la tabla se encuentra en el Anexo I - Tablas. Los criterios se y los resultados se explican en detalle en los siguientes apartados, los criterios son los siguientes:

- Selección del individuo natural con su articulación y su pertinencia con el objetivo preestablecido.
- Análisis del Principio Biológico (PB).
- Análisis del Principio Ingenieril (PI).
- Propuesta conceptual, aplicación del principio ingenieril.
- Grado de relación entre sí (analogía PB - PI).
- Aspectos destacables de los resultados (positivos/negativos)



### 5.3.3.1 Individuo natural y característica propia.

La selección del individuo y de la característica propia de éste para ajustarse a los objetivos es elegida por el alumno, este criterio permite conocer el acierto de esta selección y su beneficio para encontrar soluciones naturales que permitan generar conceptos. El único requisito que se establece es que la articulación se encuentre en el exoesqueleto de un ser vivo, aunque en algunas excepciones se han tomado individuos que no tienen exoesqueleto, con diferentes grados de acierto.

En el ejercicio, la mayoría de los casos se han basado en articulaciones o sistemas cuyos componentes ordenan y permiten el movimiento, estas articulaciones pueden ser simples o compuestas, y de ello depende el grado de libertad que esta articulación tenga. En algunos casos se han analizado varias articulaciones de un mismo individuo, o articulaciones de varios individuos, para determinar un principio ingenieril o la aplicación de varios principios ingenieriles a un mismo concepto o solución técnica.

La posibilidad de conseguir un individuo con el que realizar una observación exhaustiva facilita y condiciona la selección, para conocer en detalle la característica de su articulación. Por ejemplo, podemos citar algunos individuos como los cangrejos de río, langostinos, insectos como la tijereta o el bicho bola o la piña del pino. Para el alumno es interesante poder experimentar con estas articulaciones, ver su movilidad, amplitud de giro, la resistencia o su geometría de modo que puede hacer esquemas con los que representar sistemas mecánicos sencillos. Es una manera de comprender su funcionamiento y limitaciones.

Las articulaciones elegidas en mayor número son las de los apéndices, patas o pinzas, en nueve ocasiones, por su facilidad de observación y son las que dan más juego. La unión entre segmentos, metámeros o tagmas del exoesqueleto se han elegido en seis ocasiones, normalmente para analizar la unión por medio del septo o membrana intersegmental que permite el movimiento. Las articulaciones que existen en las uniones entre cabeza, tórax y abdomen se han elegido en 3 ocasiones, siendo similares a las de uniones de segmentos pero más resistente y con menos movilidad, por lo que se orientan hacia otras aplicaciones. Por último se tienen dos casos de élitros o alas y otros dos casos en el que se analiza la articulación de la escala u hoja de la piña.

Otra característica que determina la selección de la articulación es su desempeño, obviando el más básico de permitir y ordenar el movimiento. Los más buscados son empaquetar, compactar, reducir volumen o superficie.

Otra función muy básica es la de apertura y cierre, aplicada a diferentes conceptos de carcasa. También se observa que la protección, defensa y aislamiento son muy demandadas, como caso particular podemos citar la conglobación del bicho bola que se encierra sobre sí mismo como mecanismo de defensa. Otras funciones utilizadas son aquellas que dan flexibilidad a una unión, hacen de tope o límite físico para la articulación, permiten plegar, multiplicar o potenciar un movimiento, entre otras.

### **5.3.3.2 Análisis del principio biológico.**

Con el análisis del principio biológico se pretende comprender el funcionamiento de la articulación del ser vivo, conseguir discernir como se consigue el movimiento y que lo caracteriza, cuáles son sus posibilidades y donde están sus limitaciones. También se pueden interpretar los efectos que produce, y cuál es el beneficio de su aplicación, así como los fenómenos que manifiesta por el carácter de extraordinario que en ocasiones muestra la naturaleza. Es habitual que sus fundamentos traten de expresarse con ejemplos y explicaciones de carácter físico, mecánico, químico, etc. de manera que sean más fáciles de comprender y aporten una representación de lo que realmente ocurre.

Analizar y experimentar con el individuo natural permite tener una información de primera mano para entender como es el principio de funcionamiento de la articulación, además se pueden hacer pruebas más concretas que ilustren la información rescatada en internet u otras fuentes. Los individuos analizados han sido el cangrejo americano, el langostino, y la piña del pino.

Básicamente todas las articulaciones de los exoesqueletos se basan en la combinación de tres factores, el primero el cambio de material, ya que pasa de zonas calcificadas y rígidas a otras flexibles y en ocasiones elásticas. El segundo el cambio de espesor ya que las zonas membranosas deben tener un espesor reducido para permitir el movimiento, y por último la geometría que permite giros más o menos restringidos. Se encuentran casos particulares donde cada uno de los factores anteriores es el elemento clave, por ejemplo el material de recubrimiento de las alas de la tijereta permite tener una doble función de protección y bloqueo gracias a la resilina una proteína que aporta flexibilidad a la vez que le dota de rigidez. O bien la geometría en las pinzas de los cangrejos americanos que forman alojamiento y eje generando una línea de giro apoyada entre las dos piezas, o el cambio de espesor en la articulación de la pata de langostas y saltamontes que une fémur y abdomen por medio de la coxa y el trocánter, partes duras de exoesqueleto que varían en espesor y tamaño (figura 5.7).

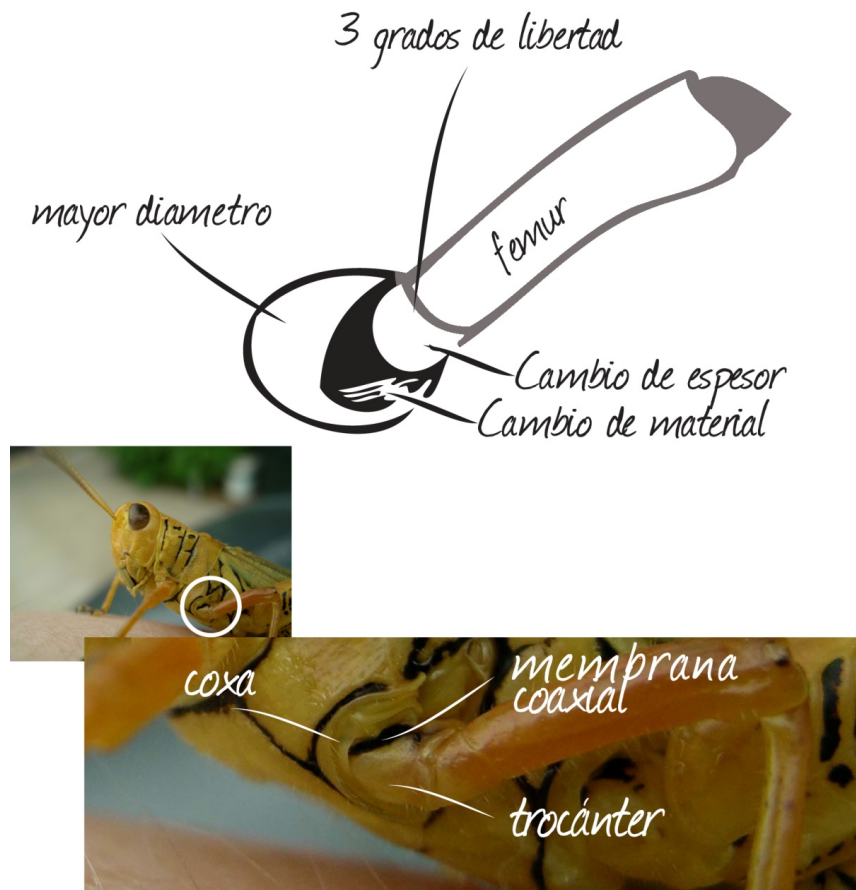


Figura 5.7: Detalle de la articulación entre abdomen y pata de un saltamontes . (Imágenes: Héctor Martínez / David Mur)

Pero también es interesante conocer, además de la propia articulación, otros principios relacionados con ella, como el movimiento de uniones por medio de sistemas hidráulicos vistos en la araña saltadora, que permite extender sus articulaciones traseras mediante un mecanismo por el intercambio de presión de la hemolinfa, fluido corporal, entre el abdomen y sus patas traseras. O bien la apertura de las alas de la Labia Minor comúnmente conocida como tijereta que lo hace impulsando su sangre por unos vasos que tiene en las alas que al llenarse las despliegan según un patrón preestablecido (figura 5.8).

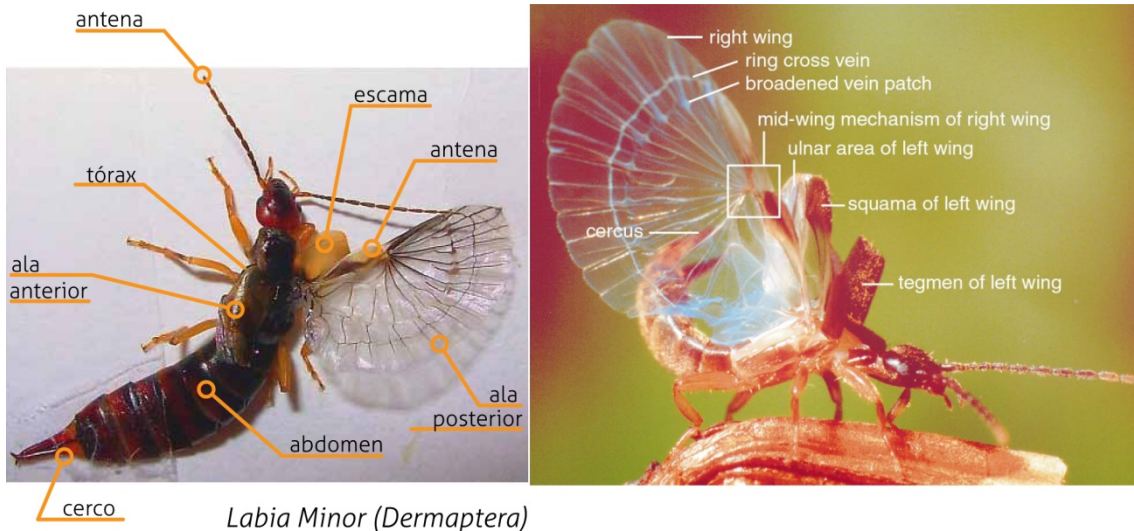


Figura 5.8: Labia Minor, detalles cuerpo y ala. (Imágenes: Haas, F. De Pedro, E. Royo, I.)

Otro principio puede ser el sistema mecánico utilizado por el camarón pistola para multiplicar la velocidad de su pinza con la que martillea a sus presas, la pinza funciona como una ballesta, un par de músculos carga la pinza hasta un máximo de tensión y luego se libera pudiendo producir el efecto de cavitación por la súbita descarga energética, el apéndice se mueve tan rápidamente que disminuye la presión del agua frente a él, haciendo que hierva (figura 5.9). Esto libera pequeñas burbujas que colapsan cuando se normaliza la presión del agua. La cavitación también se da en el caso del camarón mantis, en particular en su pinza delantera, la articulación se cierra con tanta violencia que genera grandes presiones que aturden a su víctima, en este caso la articulación funciona como un trinquete.

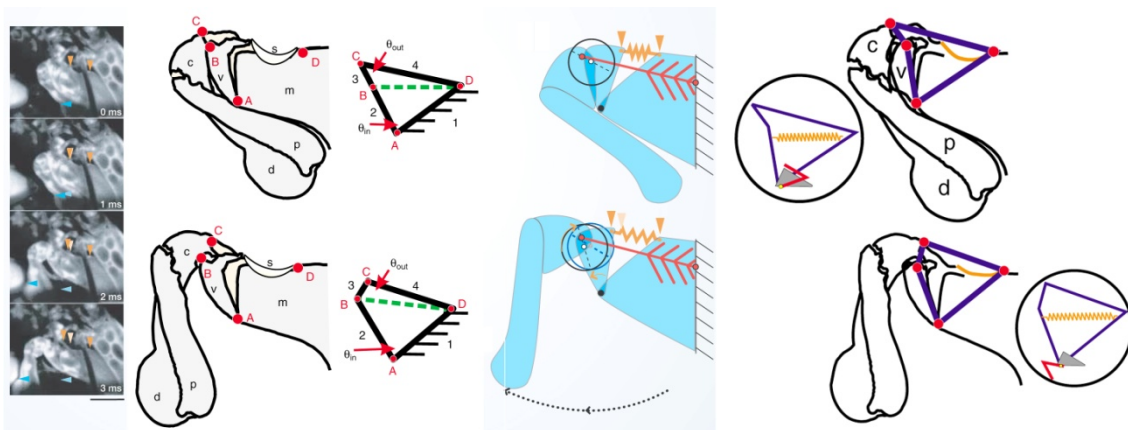


Figura 5.9: Detalle del movimiento de extensión de la pinza del camarón pistola, esquema de barras. (Imágenes: Patek, S.N.)

Otro principio a observar es el hidromorfismo observado en la escama de la piña del pino, donde existe un cambio de forma condicionado por un cambio del grado de humedad relativa, aquí la articulación funciona como una bisagra sin eje compuesta por dos capas de materiales con diferente deformación longitudinal ante variaciones de humedad.

El mecanismo de flexión depende de la forma en que las microfibras de celulosa controlan la expansión higroscópica de las células en las dos capas que componen la escama. Las microfibras se enrollan alrededor del eje central, cuando estas se humedecen. Se alargan cuando el clima exterior es extremo (altas temperaturas), el cono se abre. Si bien este caso no se basa en un exoesqueleto es interesante puesto que se trata de una carcasa o envoltente, que sirve de protección para los piñones y que los libera en el momento que es necesario de modo que la funcionalidad es muy similar y aceptable, además su traducción a una bisagra para una carcasa puede ser de interés ya que ha sido probado con materiales bicapa de celulosa y polímeros.

Otras articulaciones pueden hacer giros dobles o compuestos, el efecto de conglobación del bicho bola protegiéndose con su exoesqueleto, dislocación de alguna parte de la articulación para mejorar la compactación y reducir espacio, funcionamiento como válvulas en el caso de la boca de la bellota de mar, entre otras siendo cada una de ellas similar pero diferente y evolucionada para una función concreta.

### **5.3.3.3 Análisis del principio ingenieril. Grado de relación entre el principio biológico e ingenieril**

Con el análisis del principio ingenieril se pretende definir la traducción del principio biológico en algún tipo de fundamento físico, químico, de ciencia de los materiales, geométrico, de funcionamiento o comportamiento. Esta traslación será la que permita generar los conceptos o ideas para solucionar el objetivo propuesto, estos fundamentos pueden convertirse en condiciones o especificaciones que la articulación de la carcasa deba cumplir. También de manera intuitiva, por ser una representación conceptual, se pueden anticipar los efectos que produce y cuál será el beneficio de su aplicación.

Al igual que en el ejercicio 1 tenemos un criterio que analiza la relación entre ambos principios y nos indica como el ingenieril toma información del natural, y cuál es su grado de parecido con la naturaleza. Del mismo modo se hace referencia a la figura 4.14 del capítulo 4, de metodología propuesta, estableciendo los diferentes grados de relación, y para establecer una relación objetiva de parecido con la naturaleza, se utiliza también el grado de resolución técnica, definiendo como alto aquellos cuya resolución técnica se aproxima en gran medida a la resolución de la naturaleza. Definimos como bajo aquellas soluciones técnicas que no tienen una base ligada a la solución natural.

De los veintidós casos analizados se observa que el número de casos con relación muy alta ha bajado dado que es el propio alumno quien debe definirla y representa una alta dificultad por

la interpretación del principio biológico, sin embargo el hay un elevado número de casos clasificados como altos lo que indica que se ha realizado una correcta traducción del principio biológico al ingenieril, ver tabla 5.6.

Grado de relación PB-PI	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Total 22 casos	4	10	6	2	-

Tabla 5.6: Grados de relación entre principios biológico e ingenieril para el ejercicio 2.

Los casos clasificados como bajo se deben a que no está descrito el principio ingenieril y que no hay una buena relación con el principio natural. En el primero se analiza el bicho bola y su característica de conglobación, pero no hay relación en cómo se articulan las secciones del exoesqueleto, sin embargo existen otros dos ejercicios cuyo análisis es correcto, clasificados como relación media y alta. Para estos dos el principio ingenieril descrito se aproxima mucho al natural, por el análisis de la geometría, el punto de giro, el tipo de fuerzas que se generan sobre la carcasa permitiendo hacer análisis por secciones y detalles. En el segundo se estudia el escarabajo Hércules pero no están descritos ni el principio biológico, ni principio ingenieril, y la relación entre ambas se basa en la intuición y la inspiración, y en aspectos relacionados con las sensaciones y la percepción.

En los casos con una relación media se observa que solo se utiliza parte de la información generada en el análisis del individuo natural, este uso parcial se corresponde además con una baja relación con el principio biológico, y con la definición técnica por lo que acaba perdiéndose parecido en la transformación y por tanto en la aplicación. En este sentido se puede citar el caso del camarón pistola que tiene una detallada información sobre su funcionamiento pero no aparece en el concepto propuesto, no se incluyen las características transformación de elevada energía potencial en cinética, o el principio físico-químico que se produce en el musculo.

Por lo general se observa que se tiende a la simplificación del principio biológico por lo que el principio ingenieril pierde calidad por la definición o el detalle técnico, se obvian características y en ocasiones se hacen transformaciones que no guardan suficiente relación como para reconocer el principio biológico. Hay algún caso en que el principio ingenieril es una consecuencia del principio biológico en vez de un reflejo, como el caso de los insectos coleópteros en los que se estudia la articulación de las alas delanteras que son rígidas, y sirven de protección para las de vuelo. El principio ingenieril se define aquí como un las funciones que se pueden conseguir, apertura central, optimización de espacio y posibilidad de plegado, pero no se hace referencia a como se consigue articular cada una de estas alas.

En aquellos casos en los que se observa un grado de relación alta es debido a que en el principio ingenieril no pierde las características destacadas del individuo, y tiene una buena definición técnica, aunque en algunos casos se producen transformaciones que se alejan de la réplica o la copia que la clasificarían como muy alta. Este es el caso de la articulación del saltamontes en la que para comprobar el funcionamiento de la articulación por medio de un prototipo se ha simplificado en exceso, y se pierden matices que pueden ser relevantes en las futuras aplicaciones. La propia geometrización del principio ingenieril ha llevado a un modelo funcional que representa y soluciona el principio biológico pero no de manera completa. Por ejemplo se ha desechado la característica de cambio de espesor del material por haber dado mucha importancia al cambio de material.

Los casos en que el principio natural está bien documentado y cuenta con una información de calidad los grados de relación son superiores, por ejemplo en el caso de la piña (dos casos), la unión abdomen-fémur del grillo y en el abdomen de la abeja cuya relación es muy alta. Esto indica que la traducción y definición del principio ingenieril tiene más éxito cuanto más detallada y más calidad tiene la información utilizada para definir y comprender el principio biológico, es decir, se aproxima a copias o replicas de funcionamiento alejándose de lo abstracto y la inspiración, incluso se percibe en la definición técnica.

Se deduce que no es el individuo natural el que facilita el encuentro de una mayor relación entre principio biológico e ingenieril, sino quien realiza el análisis, ya que para un mismo referente natural y articulación se dan distintos resultados en el paso al principio ingenieril que es donde se detecta el error.

### **5.3.3.4 Propuesta de aplicación conceptual.**

Presentamos en este apartado algunas propuestas para mostrar cómo se traduce el principio ingenieril en ideas y conceptos que mantienen la relación con el principio biológico. Se han elegido tres casos. El primero por la diversidad de ideas que plantea y como se relacionan con el principio biológico y el ingenieril. El segundo es un caso en el que el número de propuestas es menor, pero la simplificación del principio ingenieril respecto del principio biológico permite hacer un prototipo con el que experimentar y probar su funcionamiento ayudando a plantear ideas y conceptos. Por último se presenta el caso de la piña de pino por dos razones, ha sido realizado por los dos grupos a estudio con buenos resultados aunque diferente número de propuestas, y porque sin ser estrictamente un exoesqueleto tiene características que lo aproximan.

El primer caso es la articulación de la unión entre abdomen y fémur del saltamontes, se han definido veintitrés posibles aplicaciones o ideas agrupadas por la característica de cambio de material con 7 propuestas, 7 para cambio de sección y 9 para los grados de libertad. En el cambio de material se plantean ideas para enchufes de pared, conectores para portátil / móvil, enchufes para cargadores / fuentes de alimentación, amortiguadores o balancines, donde lo más importante es la parte de conexión que se caracteriza por su flexibilidad y adaptación ante tirones, giros o flexiones, ver figura 5.10. Para el cambio de sección se proponen canaleras, tubos de chimenea, enchufes, alcantarillas, objetivos, boquillas de extintores o surtidores de gasolineras, aquí destaca la transición entre la parte rígida y la flexible. Para el aprovechamiento de los grados de libertad se proponen conectores de mangueras, aspersores fijos / móviles, uniones de vehículos y remolques, material médico, cámaras y teleobjetivos, retrovisores y balancines, donde lo que se busca es dotar a las soluciones actuales con mayor libertad de movimiento.

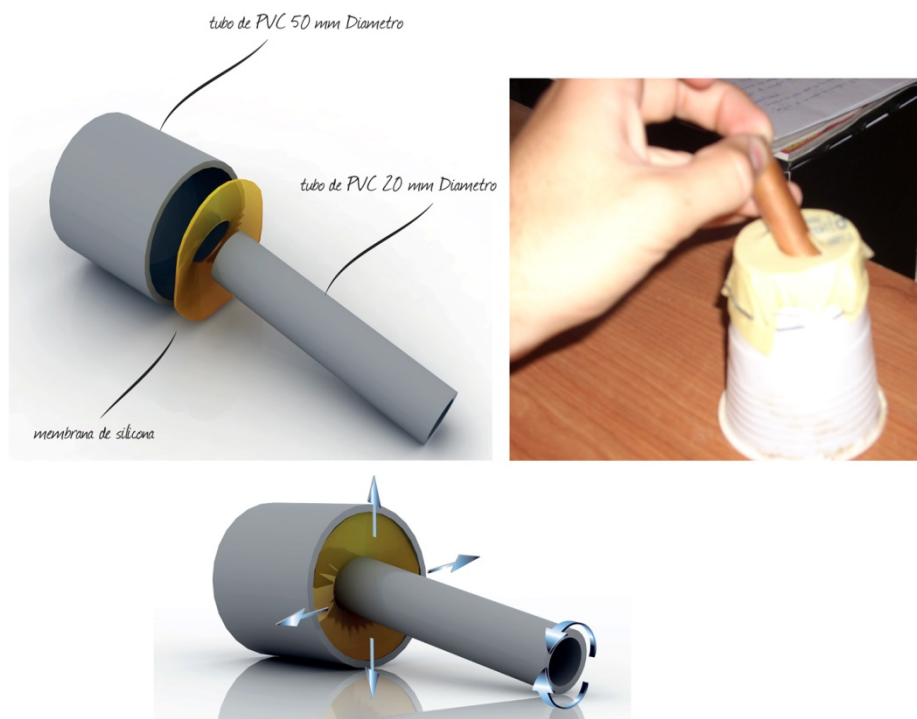


Figura 5.10: Conexión flexible, transición entre diámetros que facilita el movimiento. (Imágenes: Héctor Martínez / David Mur)

La propuesta desarrollada por fin es un conector de enchufe, pero su aplicación es genérica por lo que se puede extrapolar a cualquier tipo de conector eléctrico, ver figura 5.11. La carcasa diseñada consta del conector habitual del objeto o aparato, y el cable que lo atraviesa, existe una nueva zona de unión formada por un material flexible de tal manera que el cable tiene mayor libertad de movimiento y alarga su periodo de vida útil.



No pierde ninguna cualidad actual convirtiéndose en una conexión muy útil y segura tanto en objetos de pequeño o gran tamaño.

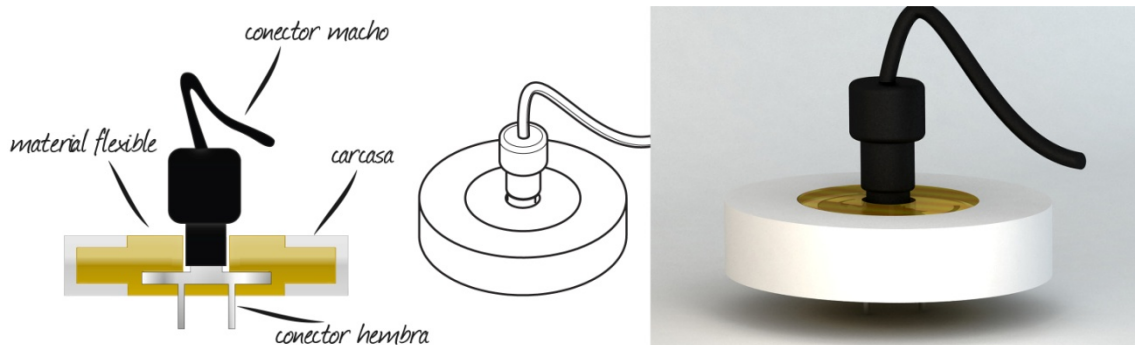


Figura 5.11: Conexión flexible, aplicación sobre un enchufe eléctrico. (Imágenes: Héctor Martínez / David Mur)

El segundo caso está basado en el abdomen de la abeja, cuya capacidad de movimiento y expansión viene dada por su estructura formada por varias placas estructurales en lugar de por una sola. Las placas de la parte superior son más grandes que las situadas en la parte opuesta, todas ellas están dispuestas siguiendo un mismo patrón desde el principio del abdomen hasta el aguijón. La placa superior queda solapada por encima de la inferior, formando una primera sección abdominal, la cual quedará solapada por encima de la siguiente sección abdominal, formada de la misma manera que la anterior. Otro factor fundamental es la membrana interior adherida a las paredes de las placas, la cual permite el desplazamiento entre ellas y su posterior retorno a la posición original. Un estudio similar fue utilizado por Gui Bonsiepe (1978) para la conceptualización de piezas articuladas, ver figura 5.12.

El principio ingenieril se simplifica de manera geométrica, para conseguir la misma libertad de movimientos, en superficies cónicas divididas en cuatro partes iguales, cada una de estas superficies formará una sección y estarán unidas en su interior por otro material más elástico. El material elástico debe de encontrarse en forma de película entre las partes de una misma sección. Sin embargo, deberá de unir secciones contiguas mediante una forma de "s". Con estos requisitos iniciales se pretende conseguir capacidad de expansión longitudinal, capacidad de expansión volumétrica, capacidad de giro relativo entre una sección y la contigua y optimizar la relación de longitud compactada y longitud expandida.

Las aplicaciones posibles aprovechando las características funcionales son recipientes de volumetría y tamaño variable para fluidos, codos con regulación de ángulo para cañerías y desagües, sistemas de protección corporal adaptables (corazas), grifería orientable o recipientes para dispensar de líquidos (salsa, pasta de dientes, ...).

La aplicación conceptual propuesta es un sistema de piezas articuladas para las redes de saneamiento de los edificios, para minimizar el problema de cambio de dirección de las bajantes. El diseño del sistema de desagües actual contempla codos de cañerías con una forma y ángulos fijos. Con este sistema se podrán realizar codos de ángulos variables, condicionados por la disposición de los elementos que conecte dicho codo, dando una mayor capacidad de adaptación a toda la red de saneamiento.

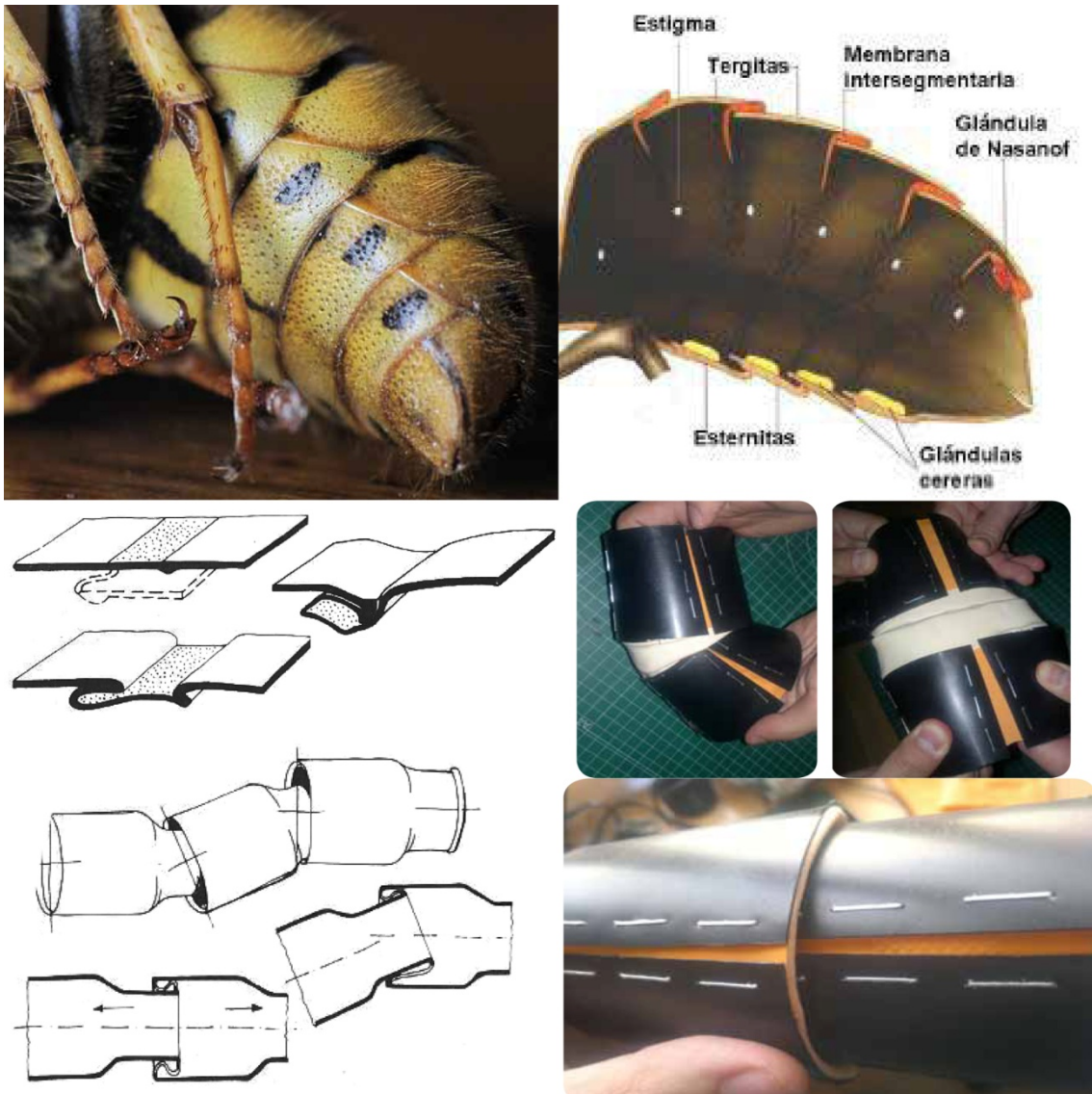


Figura 5.12: Uniones articuladas, detalle del movimiento de la membrana interior. (Imágenes: Gui Bonsiepe / Julián Lizán / Javier Ortiz)

El último caso es el de la piña del pino, como se explico anteriormente la articulación se obtiene por un material compuesto por dos capas con propiedades higroscópicas distintas. En este caso tenemos dos equipos pertenecientes cada uno a uno de los grupos de prueba, la información de partida es exactamente la misma, dado que recurrieron a la misma fuente, y tanto el análisis del principio biónico como del principio ingenieril es análogo, solo cambian las propuestas conceptuales.

El primer equipo ha realizado experimentos con la piña forzándola a cerrarse y abrirse de manera acelerada, reproduciendo algunas de las pruebas de laboratorio observadas en la información que se había recopilado, como por ejemplo la medición de la elongación longitudinal de la sección de la escama. Su principio ingenieril se define por el funcionamiento basado en el uso de dos materiales, uno impermeable y otro higroscópico que modifica su estructura en función de la humedad. La unión de dos materiales con comportamiento diferente ante la humedad, hace que cuando el hidrófugo se humedece, aumente su longitud y por tanto el conjunto se flexiona hacia el lado del material no absorbente.

Este equipo plantea cinco propuestas, un recipiente, caja o almacén para productos con unas características concretas que definieran un rango de humedad determinado al que deberían estar expuestos para mantener sus propiedades intactas y no deteriorarse. Otra posible aplicación sería un invernadero, en el cual la humedad interior debe ser la correcta para que las plantas crezcan. Un envase hermético para alimentos que evita la condensación de agua cuando los alimentos están muy calientes y siguen evaporando agua. Un sistema de refrigeración para los baños domésticos, el cual liberaría la humedad generada. Un sistema similar pero para piscinas o centros acuáticos de ocio de interior en los cuales se acumula excesiva humedad en el ambiente. Estas propuestas están bien definidas y tienen una aplicación clara del principio ingenieril.

El segundo equipo, plantean el mismo principio ingenieril, y las siguientes aplicaciones una pinza que se cierra bajo el agua, estructuras arquitectónicas que permitan protección frente al agua, tejidos impermeables / transpirables como en la aplicación industrial existente, aplicación en invernaderos para la protección de cultivo, un mecanismo de apertura y cierre de un depósito de agua. Un mecanismo anti-vaho / lentes para gafas (ciclismo), un dispositivo de dosificación gradual (cloración piscinas / lavadoras), tapa de sartén para conservar una humedad constante, un cierre automático de persianas / ventanas con aplicaciones en domótica, una sombrilla para una terraza de verano con un cambio de posición ante la lluvia o en invierno, un material de emergencia en rescates acuáticos, un sistema de abonado o sulfato.

El concepto desarrollado se trata de un dispositivo que consta de tres válvulas que integran esta articulación y que dependiendo de la estación, más seca o húmeda, suministra a una semilla, un abono o pesticida. Hay mayor número de propuestas aunque son más conceptuales y están menos desarrolladas, tienen base en el principio ingenieril del que toman la base de funcionamiento.

Un aspecto curioso es que ambos conceptos tienen en cuenta que la selección del material permite ajustar el rango de trabajo, y que el grado de humedad se puede controlar regulándolo para cada aplicación.

#### **5.3.3.5 Aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.**

Veremos resumidamente los aspectos positivos y negativos que se observan en la aplicación de la metodología, se citan aquellos que sirven para extraer conclusiones con las que evaluarla posteriormente. Estas son conclusiones y opiniones expresadas por los alumnos tras la realización del ejercicio.

Positivos:

- El principio biológico se puede dividir en partes y utilizar aisladamente, el ser vivo ofrece distintas posibilidades.
- Posibilidad de observar y experimentar con el individuo natural.
- El paso del principio biológico al principio ingenieril permite generar ideas para conceptualizar, y además se pueden generar varios conceptos con esa misma relación.
- Posibilita la apertura y flexibilidad mental, la innovación y la diferenciación. Es productivo al poder extraer soluciones de la naturaleza por generar diversidad, la aplicación no es única. Permite encontrar ideas de otro modo y que posiblemente no se encontrarían.
- Enseña a buscar, es el primer paso a la investigación.
- Experiencia positiva para futuros proyectos.
- Se puede establecer un marco de trabajo y centrar la búsqueda en una articulación determinada y característica, se puede aislar una función buscada.
- El principio biológico se puede simplificar para aplicarlo a principio ingenieril, pero puede tener una contrapartida por la pérdida de relación.
- El trabajo en grupo multidisciplinar es muy positivo.
- La información los resultados y las soluciones son aplicables a otros proyectos.

Negativos:

- Las articulaciones están muy desarrolladas industrialmente y resulta difícil innovar.
- La información no siempre es completa, de calidad y con suficiente grado de detalle como para poder utilizarla. En ocasiones la información es compleja y difícil de comprender. La información en inglés representa una barrera.
- Difícil superar a la naturaleza. No todo puede hacerse no es posible copiar a la naturaleza.
- Necesaria una reflexión profunda para aplicar los conocimientos del ser vivo
- Resulta difícil conceptualizar. Resulta difícil solucionar a nivel ingenieril.
- Es necesario tener claro el planteamiento inicial
- Es un método poco asentado. Riesgo de fracaso por tomar decisiones erróneas en las primeras fases.
- Elegir lo más fácil de utilizar puede ser un error
- Es necesario que sea interdisciplinar, contar con especialistas.
- Unos conocimientos básicos de biología no son suficientes para este tipo de ejercicios.
- Difícil buscar la aplicación sin conocer el principio biológico
- Necesidad de conocimientos sobre materiales.

### **5.3.4 Resultados del proyecto. Problema técnico y resolución biomimética**

En esta parte del capítulo se analizan los resultados por medio de varios criterios con el fin de determinar la validez de la metodología, estos criterios son:

- Establecer el marco de trabajo.
- Definición de las funciones clave.
- Valoración de la tabla de referentes biomiméticos.
- El grado de relación y analogía entre principio biónico y principio ingenieril.
- La propuesta de aplicación conceptual.
- La valoración de los aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.

La tabla anexa “Análisis del proyecto” incluye un extracto de todos los resultados para cada uno de los diferentes casos. En este resumen se pueden consultar los resultados de los ejercicios para cada criterio, la tabla se encuentra en el Anexo I - Tablas.

Previamente a describir los resultados para cada uno de los criterios desarrollados y analizados es necesario comentar que en general los resultados del conjunto de proyectos son satisfactorios, con algunos ejemplos muy destacados y otros que han tenido resultados menos destacables.

Un hecho que se ha dado en varios casos es que en el desarrollo del trabajo los propios alumnos han introducido cambios en la metodología, en cinco casos de trece se sigue la metodología paso a paso y aplicando cada uno de los métodos propuestos, en siete casos hay cambios en la tabla biomimética y plantean una similar, o hacen un trabajo con el mismo objetivo pero de un modo alternativo, en ocasiones sin tabla, como se comentara más adelante y en detalle. Un caso sigue la metodología pero no completa las diferentes fases, teniendo resultados inconexos y muy poco satisfactorios. Otro caso no sigue la metodología propuesta, invierte algunos pasos y los resultados son muy pobres, podría deberse a desinterés o voluntad de hacerlo de otro modo, ya que comprenden la metodología y han aplicado partes de ella en los ejercicios anteriores superándolos con éxito.

#### 5.3.4.1 Definición del marco de trabajo

Con los resultados de este criterio se pretende ver el posicionamiento del proyecto, como los alumnos eligen un ámbito u otro, y como en conjunto se pueden ver nexos entre los diferentes marcos; Por la coincidencia de características o funciones que se definen en un marco y pueden ser aplicables a otro distinto, esto permite detectar funciones clave que se pueden resolver de diferentes formas por medio del principio ingenieril extraído del principio biónico.

Los trece proyectos se reparten en 6 para el marco de herméticos para alimentos, 3 para sumergible o inmersión y otros 3 para protección de un dispositivo electrónico. Hay un proyecto que no se corresponde literalmente con un marco y que podría estar en dos de ellos, se trata de un proyecto que toma algunas características del hermético sumergible y otras del hermético para proteger el dispositivo electrónico, aunque al final el concepto generado no encaja en ninguno de ellos por ser unas gafas de protección que gracias al hermetismo permite estar en espacios con agresiones externas o ser sumergible. Este caso representa la zona de solape de la figura 5.13 que se vio en el capítulo de metodología propuesta.

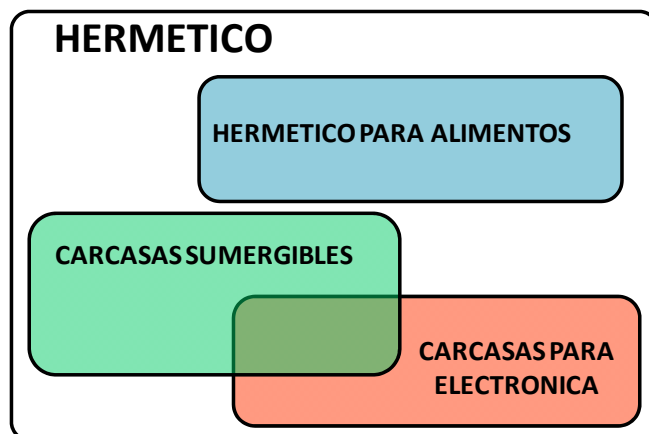


Figura 5.13: El marco de trabajo y sus límites.

Esta zona de solape representa dispositivos que por su diseño pueden ser electrónicos y sumergibles, como en el caso de las nuevas cámaras fotográficas que son sumergibles sin necesidad de tener una carcasa añadida. En los resultados también podemos observar como el marco de trabajo puede cambiar, ampliarse o reducirse, dependiendo de lo general o lo concreta que sea la elección inicial. En ámbitos donde se elige un hermético muy concreto, se observa que se amplía para poder obtener más información y oportunidades de innovación, un caso es un proyecto que inicialmente se plantea para un hermético de alimentos que pueda ir microondas, ampliándose para observar todo tipo de herméticos alimentarios domésticos e industriales, envases herméticos y otros.

Se presentan seis casos en los que antes de la selección del marco se hace un estudio previo de todos ellos, analiza los diferentes tipos de aplicaciones existentes para cada marco. Se pretende conocer el entorno, situaciones de uso, los condicionantes de cada una de ellas, las características y funciones que aportan. Esto servirá para conocer lo que ya existe e indagar en nuevas posibilidades e ideas. Además puede resultar como fuente de inspiración o método de detección de necesidades insatisfechas, puede dar información sobre oportunidades de innovación, de modo que la propia selección del marco de trabajo se orienta a definir funciones clave, o vincular a requisitos de diseño o condicionantes de producto. La búsqueda en el ámbito industrial se orienta a conocer los sistemas más comunes de cierre a nivel industrial, como presión, deformación, juntas de estanqueidad, vacío, roscado, etc....

Se observa que se hace una búsqueda preliminar de referentes naturales que puedan ser solución para esos marcos, y decidir conociendo que ya existen soluciones. En este ámbito resulta más complicado por ser la búsqueda demasiado genérica, aunque se obtienen algunas ideas que podrían ser útiles, se estudian seres con algún tipo de cierre o mecanismo similar como los picos de los pájaros, los bivalvos, parpados, esfínteres, válvulas, etc....

Ha habido un cambio de marco de trabajo después de realizar los mapas mentales al descubrir que algunas de las funciones clave buscadas en el dispositivo electrónico pueden ser muy interesantes para el marco de conservación de alimentos. Este caso representa que funciones clave con un nivel de abstracción alto pueden pertenecer a más de un marco y que el potencial de aplicación es mayor en uno que en otro. El ejemplo de manera resumida: se elige cierre hermético para dispositivos electrónicos para ambientes agresivos. Se realiza un mapa mental en relación al concepto general de "hermético" con el fin de hallar posibles innovaciones. Se detecta un problema existente en otros tipos de herméticos, al descongelar el alimento pierde mucha agua, lo cual resulta visualmente poco agradable, además de suponer una pérdida del sabor y de nutrientes. Con esta premisa se plantea la idea de establecer el marco de trabajo en

torno a un hermético para la conservación de alimentos, sin determinar la escala, tanto en lo referido a productos congelados como a frutas verduras que deben conservarse en cámaras especiales hasta su consumición. Sin embargo hay casos en que la elección se ha realizado por una cuestión de gusto o preferencia, sin que la elección aparentemente se ajuste a un criterio, siendo este caso uno de los mejor desarrollados.

#### 5.3.4.2 Definición de las funciones clave

Se analizan los resultados de la aplicación de los mapas mentales para la búsqueda y definición de las funciones clave, la clasificación de estas para cada marco y la existencia de algunas de ellas que encajan en varios marcos. También se analizan las particularidades de las funciones y su grado de oportunidad u opción de innovación. Algunas funciones se definen como prestaciones o características y viceversa, hay cierta confusión entre ambos términos, en estos casos se pide que se defina el "QUE HACE" para entender la función de modo que por medio de otras preguntas acerca del cómo, para qué, cuándo, dónde, en qué condiciones, se indican los condicionantes de la función clave. En algún mapa mental se han utilizado requisitos de diseño para definir las funciones clave, de modo que hay una orientación hacia un determinado concepto.

Los mapas mentales han demostrado ser una herramienta eficaz y eficiente en la búsqueda de funciones clave, se han encontrado 79 en los diferentes proyectos, como se puede apreciar en la tabla nueve funciones se clasifican como con un alto potencial o grado de oportunidad, 47 grado medio y 33 grado bajo. Todas tienen la posibilidad de generar oportunidades de innovación en un determinado grado, que se define a continuación. Se Clasifican con un grado **bajo** de oportunidad a aquellas funciones que ya están solucionadas, y para las cuales es difícil encontrar en la naturaleza una oportunidad de aportar valor o diferenciación, un grado **medio** se considera a funciones que existen pero se pueden diferenciar, y aportar valor; Y por último un grado **alto** implica que no existen, o que existen muy pocas aplicaciones, y sería interesante encontrar seres vivos que permitieran desarrollarlas.

De media, cada proyecto aporta unas diez funciones clave, cinco grupos no utilizan los mapas mentales, se limitan a hacer listados organizados de funciones, sin incluir niveles ni jerarquía, pero no influye en la definición de función clave, ni por validez, ni por número. Los listados de funciones tienen el inconveniente de no poder establecer niveles de abstracción, ni vínculos entre niveles y funciones. Sin embargo demuestran ser validos, dado que están basados en la técnica de listado de atributos, técnica creada por Crawford (1964) apropiada para la generación de nuevos productos, y utilizada en la mejora de servicios o productos ya existentes.



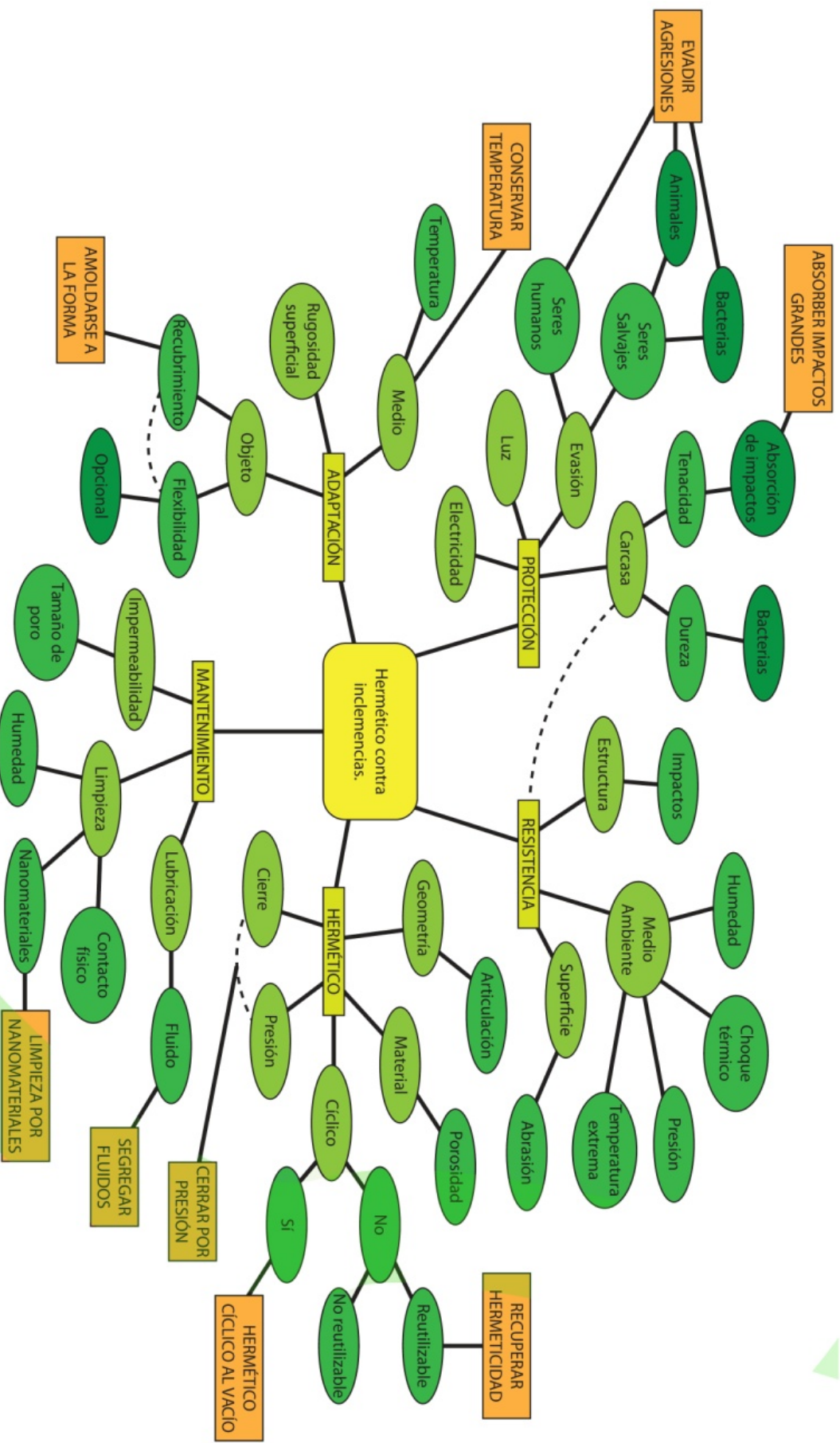


Figura 5.14: Mapa mental para un hermético con aplicaciones para indennencias. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.)

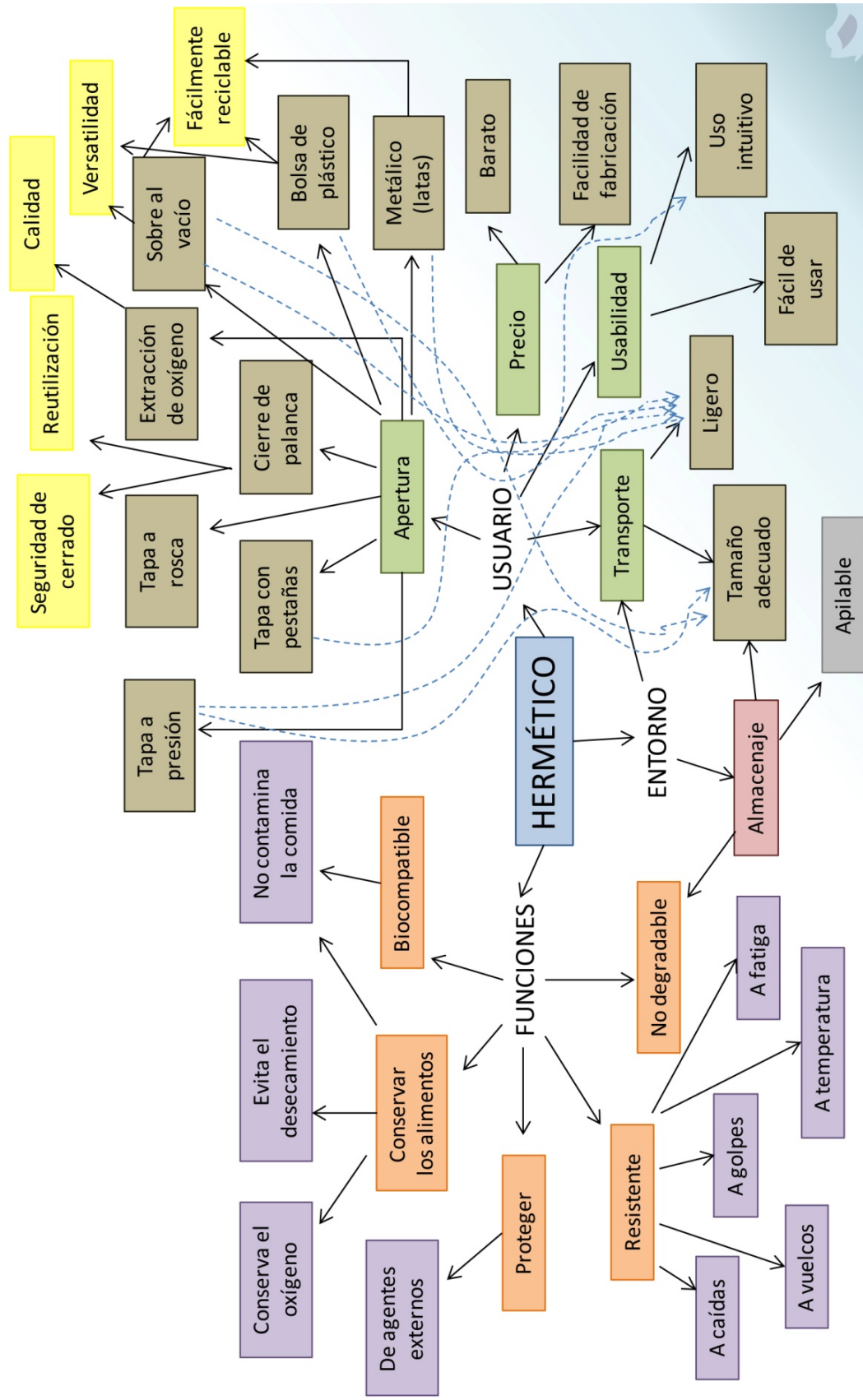


Figura 5.15: Mapa mental que diferencia funciones y cuestiones de uso/usuario. (Imagen: Fandos I., López de Lacalle S., Lorente E., Serón A.)



Algunos proyectos generan más de un mapa mental, hay casos en que se realiza un mapa mental para cada marco de trabajo obteniendo una visión previa de las posibilidades. En ocasiones se genera uno relacionado con grupos funcionales y otro con las particularidades del entorno o el usuario, en otras un mapa por entorno, y en algunos casos los mapas están polarizados por temas, algunos ejemplos se pueden ver en las figuras 5.14, 5.15 y 5.16.

Las funciones clave se agrupan por temas más genéricos o grupos funcionales que están en los niveles inferiores, como protección, barrera, detección, indicador, control y regulación, etc. También quedan de manera independiente en niveles más altos, donde las funciones clave son más específicas y diferenciadas, por ejemplo barrera ante vibraciones o sonido, indicador de alimento en mal estado o hermético intermitente que lo es bajo ciertas condiciones o factores internos o externos. Los grupos genéricos tienen por lo general un grado de oportunidad bajo, en principio parece difícil superar el estado de la técnica actual. Sin embargo las funciones específicas se clasifican con un grado de oportunidad de medio o alto, el ejemplo aparece en la carcasa cuyo recubrimiento pueda ser aislante del sonido excepto en su cierre hermético, por lo que dar solución a esta función del cierre podría tener aplicaciones de interés.

En la tabla 5.7 de funciones clave y grado de oportunidad se puede ver las diferentes funciones clave propuestas y su clasificación, así como el marco de trabajo al que pertenece. Esta tabla es una agrupación temática de las funciones que se han descrito en los proyectos realizados, hay grupos temáticos que tienen aportaciones de más de un equipo de trabajo. Los marcos de trabajo se nombran como A para los herméticos de uso alimentario, E para el hermético para alojar una electrónica en entornos agresivos y S para la carcasa hermética sumergible hasta 250 m.

		FUNCION CLAVE			Grado de Oportunidad
		A	E	S	
1	Hermético	Un solo ciclo	x		bajo
2		Varios ciclos	x	x	bajo
3		Intermitente	x		alto
4		Bajo ciertas condiciones o factores	x		alto
5		Capacidad de generar su propio cierre hermético	x		alto
		la integridad del hermético depende de las condiciones del entorno (interior/exterior)			alto
6	Barrera	Ante olores	x	x	medio
7		Ante la luz	x		bajo
8		Ante temperatura o calor	x	x	bajo
9		Ante humedad / líquidos	x		bajo
10		Ante sonido o vibraciones		x	medio

**ENSAYO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA**

11	Barrera	Unidireccional/bidireccional	x			alto
12		Permeable /impermeable	x		x	medio
13	Transpirable	Permitir el paso de gases o vapores	x			bajo
14	Posibilitar salida de agua o vapor, evitar la entrada		x	x		medio
15	Retener la Humedad. Posibilitar la absorción de humedad		x			medio
16	Recoger, separar y evacuar agua condensada		x			medio
17	Detección	De humedad	x			medio
18		De bacterias	x			medio
19	Indicador	De humedad	x			medio
20		De bacterias	x			medio
21		De alimento en mal estado	x			medio
22		Sistema de alerta, comunicación de variaciones de algún factor	x			medio
23	Control y regulación	De la humedad	x			bajo
24		De la temperatura o calor	x			bajo
25	Acceso al interior. Facilitar la apertura / cierre		x		x	medio
26	Resistencia	A los impactos	x	x		bajo
27		A los cambios de presión	x			bajo
28		A agentes agresivos y/ o químicos		x	x	medio
29		Al choque térmico		x		bajo
30		A tracción/ compresión			x	bajo
31	Evitar agresiones	Expulsión de fluidos.		x		medio
32		Mimetización con entorno		x		medio
33		Defensa		x		bajo
34		Sonido		x		bajo
35		Color (advertencia)		x		bajo
36	Garantizar que permanezca cerrado	Ante presiones	x			bajo
37		Ante variaciones en el entorno	x			bajo
38	Flexible	Capacidad de adaptación	x		x	medio
39		Posibilidad de adaptarse a otros	x			medio
40		Permitir expansión longitudinal			x	medio
41		Permitir expansión volumétrica			x	medio
42		Recuperar el estado inicial			x	bajo
43	Crear compartimentos o divisiones		x		x	alto
44	Permitir adaptar la superficie			x		medio
45	Almacenar	Facilitar entrada y salida	x			medio
46		Apertura y cierre	x			medio
47		Dar estructura	x			bajo
48		Facilitar apilado / encajado	x			bajo
49	Conservar	Mantener la temperatura / isoterma	x			medio
50		Control del grado de humedad	x			medio
51		Evitar cambio de estado	x			medio
52		Generar vacío	x	x		medio
53	Transportar	Adaptable / formato variable	x		x	medio



Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

54		Optimizar espacio	x			medio
55		Poco peso	x	x		bajo
56		Impermeable	x			bajo
57		Resistente	x			bajo
58		Facilitar el transporte		x	x	bajo
59		Que no limite movimientos (ergonomía)			x	medio
60		Que no limite visibilidad (ergonomía)			x	medio
61	Permitir cocinar o preparar comida	Poder subir la temperatura	x			medio
62		Resistente a la temperatura de cocinado	x			medio
63		Indicador de comida lista	x			alto
64		Temperatura constante y homogénea	x			medio
65		Evitar contaminación al cocinar	x			alto
66	Estable (por geometría / gravedad)	Evitar la caída	x			bajo
67	Higiene facilitar limpieza		x	x		bajo
68	Facilitar mantenimiento	Apertura y cierre		x		medio
69	Economizar gasto energético			x		medio
70	Carga de baterías			x		medio
71	Enfriamiento del interior	Evacuación de calor		x		bajo
72		Transmisión de calor unidireccional		x		medio
73	Permitir uso de pantalla táctil			x		bajo
74	Interfaz clara	Influencia del color		x	x	medio
75		Cambio de color	x	x	x	medio
76		Señal acústica			x	medio
77		Señal olfativa			x	medio
78	Identificable. Permitir diferenciar entre otros idénticos		x		x	medio
79	Translucido o transparente	Permitir ver el contenido	x			bajo
80	Antirreflejos			x		medio
81	Sumergible				x	medio
82	Control / regulación de la flotabilidad	Dispositivo emergencia airbag para buceador			x	alto
83	Protección ante agentes internos	Presión			x	bajo
84		Corrosión			x	bajo
85	Protección ante agentes externos	Agua / presión		x	x	bajo
86		Agua / corrosión		x	x	bajo
87		Impactos		x	x	bajo
88		Radiación UV			x	medio
89	Estar articulado				x	medio
TOTALES			54	30	27	

Tabla 5.7: Relación de funciones clave con marcos de trabajo. Clasificación del grado de oportunidad.

**5.3.4.3 Tabla biomimética, búsqueda de los referentes naturales**

Las tablas biomiméticas han tenido diversos resultados siendo un método de encontrar referentes naturales a las funciones clave, partiendo de la función clave permite concretar en varias soluciones o seres vivos que desarrollan esa función clave o similar. Se ha observado que no todos los casos las aplican estrictamente, omiten alguna parte, plantean una alternativa o bien obtienen el mismo resultado sin necesidad de ponerlo en un formato de tabla.

Se analizan los distintos casos. Primero se tiene que solo algunos proyectos aplican la tabla tal y como se explica en la parte teórica, tienen buenos resultados y los referentes naturales encontrados conllevan una buena aplicación, ya que queda claro el principio biónico, e incluye una breve explicación. En las tablas 5.8, 5.9 y 5.10 se aprecian partes de las mismas como ejemplo, cada una de ellas con sus peculiaridades. Después el principio biónico se desarrolla y explica con más detalle para realizar la traducción al principio ingenieril.

FUNCIONES PRINCIPALES	¿PARA QUÉ?	¿DÓNDE?	¿EN QUÉ CONDICIONES?	¿CÓMO?
7- Indicador de humedad y bacterias	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control del alimento (su estado)</li> <li>Control de bacterias</li> <li>(Control de olores)</li> <li>Control de humedad</li> <li>Control de temperatura</li> <li>Control de pH</li> <li>¿Esta mal del todo? ¿Se esta poniendo malo? -&gt; Control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dentro del envase (Detecta los cambios dentro del envase: del alimento)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superación/ no superación, de los límites (de cada factor) que impiden la correcta conservación del alimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indicador visual                             <ul style="list-style-type: none"> <li>-Color</li> <li>-Luz</li> <li>-Forma</li> <li>-Textura</li> </ul> </li> <li>Indicador sonido</li> <li>Indicador de tiempo '¿Cuánto lleva siendo afectado?'</li> <li>Indicador por niveles -&gt; max-min</li> </ul>
8- Controlar o regular la humedad/temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener condiciones idóneas.</li> <li>Evitar la contaminación y los factores no deseados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dentro del envase Interior (dentro del hermético y que afecte directamente).</li> <li>Exterior (Factores en el exterior que pueden penetrar el hermético y afectar negativamente al alimento)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambios en cualquiera de las condiciones no-deseables</li> <li>Cambios de niveles etc...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automático del envase ( que el propio controle)</li> <li>No-auto, que se regule desde fuera</li> </ul>

Tabla 5.8: Tabla biomimética que aplica la base teórica. (Imagen: Cuella A., Durán B., Plamenov Y., Sánchez C.)

FUNCIONES CLAVE		INDIVIDUO	SOLUCIONES	
PROTECCIÓN CONTRA AGENTES	INTERNOS	PRESIÓN	HORMIGA HONEYPOT MATERIAL: membrana elástica que soporta grandes deformaciones.	
		CORROSIÓN	ESTÓMAGO AGENTES QUÍMICOS: segregación de una proenzima (pepsinógeno) la cual protege las paredes internas del ácido clorhídrico.	
	EXTERNOS	AGUA	PRESIÓN	GAMBA MATERIAL: exoesqueleto de quitina semiflexible.
		CORROSIÓN	ALMEJA MATERIAL: matriz orgánica de naturaleza fundamentalmente proteínica (conquiolina) y un depósito inorgánico de carbonato cálcico	
	IMPACTOS	ARMADILLO MATERIAL Y DISTRIBUCIÓN ESTRUCTURAL: capsazón de escamas óseas formado por nueve bandas articuladas.		
EXPANSIÓN	LONGITUDINAL	ABEJA MELÍFERA MATERIAL Y DISTRIBUCIÓN ESTRUCTURAL: placas rígidas de quitina unidas mediante membranas elásticas.		
	VOLUMÉTRICA	HORMIGA HONEYPOT MATERIAL: membrana elástica que soporta grandes deformaciones.		
ARTICULADO		ABEJA MELÍFERA DISTRIBUCIÓN ESTRUCTURAL: unión membranosa en forma de "S" entre placas rígidas.		
REGRESO A LA POSICIÓN INICIAL TRAS DEFORMACIÓN		SANGUIJUELA MATERIAL Y CANTIDAD DE PRESIÓN DEL FLUJO INTERNO: membrana que se expande en mayor o menor medida según el nivel de presión interna del flujo.		

Tabla 5.9: Tabla biomimética que relaciona el individuo natural con la posible solución. (Imagen: Lizán J., Martínez H., Mur D., Ortiz J.)

### Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Función Clave	Objetivos	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
Amoldarse a la forma.	¿Dónde? - En cualquier superficie interna y externa. ¿Cómo? - Flexibilidad - Material/ tejidos - Ausencia de estructura rígida ¿Para qué? - Optimización del espacio - Versatilidad en cuanto a tamaño y forma.	- Pezuña de cabra, (animales de la montaña) - Pulpo - Tonicella-lineata
Conservar temperatura.	¿Dónde? - Condiciones extremas. - Temperaturas variables - Temperaturas constantes ¿Cómo? - Aislado térmico. - Intercambiando calor - Color - Material (espesor) - Estructura (cavidades) ¿Para qué? - Optimizar rendimiento.	- Focas, morsas. - Reptiles.  - Rosa de jericó, cactus.
Evitar agresiones	¿Dónde? - Cualquier entorno. ¿Cómo? - Contraataque - Expulsión de fluidos - 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. - Serpiente coral, bailarina flamenca.
		* Gusano de cuevas

Tabla 5.10: Ejemplo de una parte de la tabla biomimética con los posibles referentes naturales que son solución para la función clave barrera térmica. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.)

En otros casos se plantean tablas muy similares, que incluyen otras columnas como aproximaciones a la solución o referentes ingenieriles, es decir, aplicaciones existentes. En la tabla 5.11 se observan estas columnas, solo se citan los referentes naturales que luego se explican con más detalle y se relacionan con el principio de solución ingenieril.



Funciones clave secundarias	Soluciones	Referentes naturales	Referentes ingenieriles
Evitar paso de fluidos y partículas	-Material	-Capas de la piel -Grasa -Exoesqueleto	
	-Mecanismo	-Bivalvos: músculo aductor, ligamento. -Válvula arterias, vasos sanguíneos	-Tuper -Junta de plástico botes -Junta flexible por presión -Lavadora -Termosellado (queso tranchetes) -Antigoteo -Corcho botella -Válvula aire (balón, rueda, colchón) -Bolsa suero -Bolsa con cierre por encaje -Carcasa de cámara sumergible -Cierre a rosca (bolsa de agua). -Tapa por presión (nocilla, nesquik) -Encaje mediante tornillos, pestañas,
	-Extracción del aire	-Ventosas (pulpo, calamar)	-Ventosa

Tabla 5.11: Ejemplo de una parte de la tabla biomimética con cambios en las columnas incluyendo referentes ingenieriles. (Imagen: Galán S., Notivoli E., Recio A., Sacristán L.)

Algunas tablas alternativas presentan un formato en el que se relaciona función clave con solución natural, solución artificial o ingenieril existente, el grado de oportunidad o innovación e incluso se evalúa este grado de innovación, ver los ejemplos de las tablas 5.12 y 5.13.

FUNCIÓN CLAVE	INDIVIDUO ELEGIDO	SOLUCIÓN NATURAL	TRADUCCIÓN INGENIERIL
No dejar entrar ni salir aire ni fluidos	Ostra	Compresión de sus conchas	Conjunto de tapa y recipiente
Mantenerse cerrado	Almeja	Músculos abductores	Pestañas, cierre por presión, rosca...
Cómoda apertura	Almeja	Ligamento (línea de unión de las valvas)	Bisagras
Buena resistencia	Cangrejo	Dureza de su caparazón	Materiales resistentes al frío, al calor y a los golpes (polipropileno)
Hermeticidad permanente	Ostra	Compresión de sus conchas	Cierre de las latas (de un uso)

Tabla 5.12: Tabla biomimética alternativa con aproximación a la traducción ingenieril. (Imagen: Fandos I., López de Lacalle S., Lorente E., Serón A.)

### Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético






Función clave	Solución actual en el mercado	Solución natural	Grado de innovación	Aplicación
Isotermo	-Jarra termo de 1L. Cerrado mantiene el café a 65 °C durante 12 horas - Un envase secundario. Cámara de aire 	Piel mamíferos.	BAJO	Materiales específicos
Identificable	-----	Fenotipo únicos mundo animal y vegetal	<b>ALTO</b>	Sistema de identificación personalizado.
Traslúcido – Transparente	Múltiples soluciones	Cuarzo, hielo, agua, mariposa, peces abisales	BAJO	-----
Estable	Amplia base 	Montaña, pingüino,	BAJO	-----
Materiales higiénicos	Múltiples soluciones	Antiadherentes: piel tiburón, delfín,	BAJO	-----
Materiales aptos para uso alimentario	Múltiples soluciones		BAJO	-----
Fácil almacenamiento	Formato acordeón Organizador tapas Modulable 	Forma hexagonal (colmena, nenúfar), armadillo, cochinita  	<b>MEDIO</b>	Estructura plegable a modo bolsa de plástico con esqueleto hélice.

Tabla 5.13: Tabla biomimética alternativa, se incluye el grado de innovación y el modo de aplicación. (Imagen: De la Iglesia B., González S., Redondo R.)

Los proyectos en los que se aplica la tabla presentan un amplio número de soluciones, algún caso con 50 referentes naturales, y se observa que aunque se produzcan cambios en el formato los resultados son óptimos, las tablas son una forma de presentación y organización de la información, los contenidos pueden ser más o menos amplios, en ocasiones ampliados en una descripción posterior que relaciona el principio biónico con el principio ingenieril.

En los casos que no se aplica la tabla se aprecia que siguen un mismo patrón pero sin formato, la información se incluye de manera descriptiva, en la figura 5.17 vemos que la tabla se ha transformado en una estructura tipo ficha, teniendo una por cada función clave y en la que se explica en qué consiste, cómo se consigue, en qué condiciones, cuándo y para qué puede servir, así como una lista de posibles candidatos que son estudiados posteriormente.

No hay relación entre tener un grado de relación entre principio ingenieril y principio biónico más o menos elevado, y utilizar la tabla biomimética, pero se aprecia una tendencia a obtener mejores resultados al aplicar ésta última. Los dos casos que tienen una relación baja son en el primer caso por no aplicar la tabla, no se consigue encontrar un individuo en la naturaleza que responda a la función clave, y en el segundo se pasa de las funciones clave al ser vivo sin establecer las líneas de investigación a esta función clave. No se posibilita encontrar un candidato óptimo, y no se describe el principio biónico.

3. DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES CLAVE	
1. Que el hermético actúe como barrera permeable/impermeable unidireccional o bidireccional:	
¿Cómo conseguir la función clave?	¿Para qué sirve/ por qué lo hace (Potenciales aplicaciones)?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material.</li> <li>• Disposición del material.</li> <li>• Estructura.</li> <li>• Disposición de los elementos.</li> <li>• Composición.</li> <li>• Reacciones químicas/ físico-químicas.</li> </ul>	Los herméticos que presentasen dicha característica serían interesante en el campo de los gases tóxicos, al poder aplicarse en lugares en los que fuese necesario una atmósfera controlada con determinadas sustancias y en el caso de que resultase interesante, dejar entrar o salir determinados elementos.
¿En qué condiciones se da la función clave?	Así mismo, podría aplicarse en el campo de los alimentos para evitar la entrada de olores a la comida, pero permitir la salida de determinados gases, como vapor de agua, que se acumulan dentro del hermético.
Variaciones de...	Individuos interesantes a estudiar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humedad.</li> <li>• Temperatura.</li> <li>• Presencia de algo (agentes bióticos/abióticos por ejemplo).</li> <li>• Concentración de algo (agentes bióticos/abióticos por ejemplo).</li> <li>• Presión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejillón/ almeja.</li> <li>• Caracol.</li> <li>• Lapa.</li> </ul>
¿Cuándo?	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antes.</li> <li>• Durante.</li> <li>• Después.</li> </ul>	

Figura 5.17: Ficha descripción función clave y relación con ser vivo. (Imagen: de Pedro E., Manzanares L., Martínez M., Royo I.)

A medida que se avanza con la búsqueda de los referentes biomiméticos se desarrolla paralelamente un estudio del estado de la técnica, buscando más allá de las soluciones de la naturaleza y de las soluciones artificiales ya existentes. A partir de los referentes biomiméticos y de las patentes halladas es posible encontrar conceptos de producto, definiendo el campo de aplicación al que estaría orientado.

Estos estudios sobre el estado de la técnica se realizan con búsquedas, más o menos exhaustivas, en las bases de datos de patentes de la Oficina Española de Patentes y Marcas, donde se accede a patentes a nivel nacional, europeo y mundial. Todos los participantes en el estudio han tenido una breve formación en búsqueda de patentes, suficiente para hacer búsquedas sobre cuestiones concretas como las funciones claves que quieren desarrollar en sus proyectos. No todos los equipos han realizado la búsqueda de patentes, algunos solo han realizado un estudio de mercado y de objetos o productos existentes actualmente, por lo que pueden cometer el error de proponer algo ya real.

Los resultados de estas búsquedas de patentes tienen como objeto poder comprender hasta donde se puede llegar con el desarrollo de una función, y entender si realmente es clave, ya que se puede dar el caso de encontrar que la función clave definida está ya inventada y registrada. Por otro lado es posible encontrar soluciones alternativas a las propuestas, lo cual también permite aportar nuevas soluciones. En los resultados de la búsqueda se han observado muchas patentes que tienen que ver con los herméticos para uso alimentario, por funciones como plegado, aperturas de varios tipos, válvulas, etc. soluciones que se habían propuesto como función clave y que es necesario reorientar, y obliga a utilizar las tablas biomiméticas para conseguir nuevas alternativas de solución.

#### 5.3.4.4 Grado de relación. Analogía entre principio biónico e ingenieril

En los resultados del grado de relación entre principio biónico y principio ingenieril se analizan los resultados para su posterior evaluación (tabla 5.14), la traducción del principio biónico al principio ingenieril es un factor importante en el éxito del proyecto, ya que puede darse una simple inspiración que no justifica demasiado la metodología o replica, y copias de la naturaleza que pueden dar opción a nuevas funciones, o formas de conseguir las.

Grado de relación PB-PI	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Total 13 casos	3	5	2	2	-

Tabla 5.14: Grados de relación entre principios biológico e ingenieril para el proyecto.

En los casos clasificados como bajo se debe principalmente a que no existe una definición del principio biológico, e imposibilita el desarrollo del principio ingenieril, y a que no existe una relación entre la propuesta de solución ingenieril y la de la naturaleza. En uno de los casos ni siquiera existe análisis de los referentes naturales y no se plantea un principio ingenieril, solo se relaciona un referente natural con una solución existente en la actualidad; Para la función de resistencia mecánica se plantea el cangrejo por la dureza de caparazón, sin aportar una justificación o causa de por qué tiene esa resistencia, y como solución existente se plantean materiales resistentes al frío, al calor y a los golpes. El otro hace un análisis de los referentes naturales que pueden ser candidatos a ofrecer una solución, pero no hace una traducción de este principio biónico, tan sólo se hace para uno de ellos y después no se utiliza, ya que se elige una solución existente en la actualidad. Como ejemplo, se explica que se hace un estudio de los siguientes referentes naturales, ostra, vejiga natatoria, aves, escorpión, gusano, lenguas, epiglotis, camaleón y pulpo, se indica cuál es la relación con la función clave, y el por qué de su característica destacable. Después sólo se utiliza el referente del camaleón eligiendo pinturas termocrómicas para asociarlos a la característica de cambio de color.

De nueve posibles soluciones naturales no se aprovecha ninguna, tan solo el cambio de color pero se realiza tal cual existe en la actualidad, el resto ni aparece como característica del diseño final.

En los proyectos con un grado medio se observa que el principio biónico está definido y correctamente relacionado con función clave buscada pero no tiene una correcta traducción al principio ingenieril, bien por estar poco definido, y de manera incompleta, o por no tener una suficiente profundidad en el detalle técnico. En el primer caso se observa que el principio biónico tiene una buena definición e incluso apunta tener opciones de ser una solución novedosa, pero después el principio ingenieril está poco definido técnicamente, la base de fundamento es correcta pero no se termina de definir, un ejemplo sería la función de mantener los niveles de humedad como lo hace el referente biónico *Lupinus Arboreus*, una leguminosa de origen chileno, cuya característica es la de poseer una válvula que se ajusta a los cambios de humedad, mientras el resto de la capa exterior de la semilla permanece impermeable. Esta válvula permite la entrada y salida de vapor de agua para conseguir que el interior de la semilla tenga un nivel de humedad adecuado, pero no deja pasar agua líquida. El principio ingenieril es una simplificación sin fundamento técnico, se trata de un material compuesto por células que absorban la humedad y en consecuencia varíen sus dimensiones. Al absorber la humedad, se hincha, y al perder vapor de agua, se contraen. De esta manera, con la forma adecuada se puede conseguir una válvula que regule la humedad. En este ejemplo falta extraer el mecanismo de la semilla y asimilarlo a un dispositivo técnico. En el otro caso se referencia un ser vivo con un mecanismo o dispositivo técnico existente para una determinada función, y se trata de aportar una mejora fundamentada en el ser vivo.

En los proyectos con una clasificación alta se observa 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 definido y se puede aplicar al diseño. Las formas de establecer esta relación son varias, desde la conceptualización de un modelo natural y su aproximación a como sería su aplicación, hasta un caso en el que se establece una tabla de mejores candidatos.

Un ejemplo lo vemos en la figura 5.18, en la que se observa como la función transpiración está basada en dos referentes naturales, estomas de las plantas y glándulas sudoríparas de los mamíferos, se explica su principio de funcionamiento y se asocia a una posible aplicación sobre la tapa del hermético y a se hace lo mismo para la solución ingenieril.

**TRANSPIRACIÓN**

**MODELO NATURAL**

VEGETALES

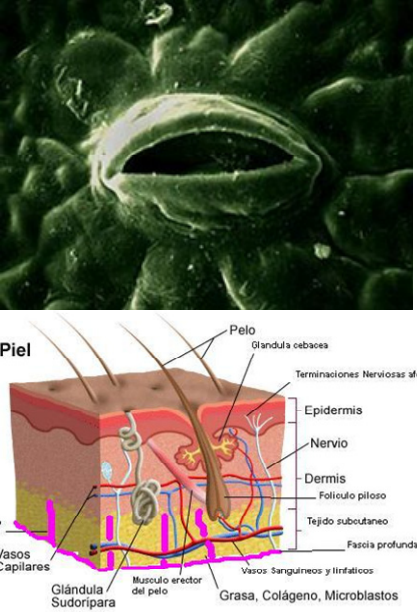
- ESTOMAS: dos células oclusivas; abiertas cuando están turgentes - cerradas cuando pierden turgencia por la pérdida de agua. Pared interna elástica y de mayor grosor que la externa.
- La turgencia la genera el fenómeno de la ósmosis.

MAMIFEROS

- GLANDULAS SUDORIPARAS: glándula tubular enrollada. Demis. Largos y delgados tubos, cerrados por el extremo inferior, donde se apilotonan, formando un ovillo. Se abre al exterior por los poros.
- Proceso fisiológico que está controlado principalmente por el sistema nervioso.

**APLICACIÓN**

**MEMBRANA TRANSPIRABLE** en la tapa del envase con aperturas, basadas en el mecanismo de funcionamiento de los estomas de las plantas, que permita la regulación del contenido en humedad en el interior del envase.



**La Piel**

Terminaciones Nerviosas aferentes

Epidermis

Nervio

Dermis

Folículo piloso

Tejido subcutáneo

Fascia profunda

Vasos Sanguíneos y Linfáticos

Grasa, Colágeno, Microblastos

Musculo erector del pelo

Glandula Sudoripara

Vasos Capilares

Ligamento Dutarneo

Pelo

Glandula sebacea

**Poros rodeados por dos estructuras de material higroscópico con la parte interior más rígida que la exterior**

Figura 5.18: Transpiración en el modelo natural y su aplicación ingenieril de uno de los casos. (Imagen: De la Iglesia B., González S., Redondo R.)

En el siguiente caso se observa una adecuada relación entre ambos principios, el hermetismo de los bivalvos. En este caso se explica por cuatro características del cierre, la geometría de la concha, la masa elástica del borde dorsal de la concha, el ligamento interno o resilio y el musculo abductor. Las cuatro características se utilizaron para describir cuatro principios que fueron aplicados a conceptos de hermético que puede serlo una sola vez un solo ciclo, cómo envases con preparados a modo de precinto e indicador de comida lista, o de manera cíclica de modo que se puede abrir y cerrar repetidas veces pero su cierre indica cuando el interior ha alcanzado una determinada temperatura. Se explica de la siguiente manera, si la geometría coincidente entre ambas valvas supone un aspecto decisivo para el correcto aislamiento del individuo animal, la presencia de una masa elástica adicional que rodea borde dorsal de la concha implica un aislamiento todavía más efectivo, como puede verse en la figura 5.19. Técnicamente se encuentra su explicación en la naturaleza visco-elástica de la masa que las rodea. Se produce una concentración de fuerzas entre ambas valvas de tal manera que la masa se fluye, por su condición viscosa, a lo largo del contorno “rellenando” los posibles huecos o ranuras que se producen entre las valvas. A menor índice de viscosidad mayor será su capacidad para adoptar la forma requerida con módulos de fuerza menores.

Cuando se produzca un cese de las fuerzas aplicadas sobre el borde de la concha, el material retomará su posición natural hasta que vuelva a repetirse el ciclo con posterioridad.

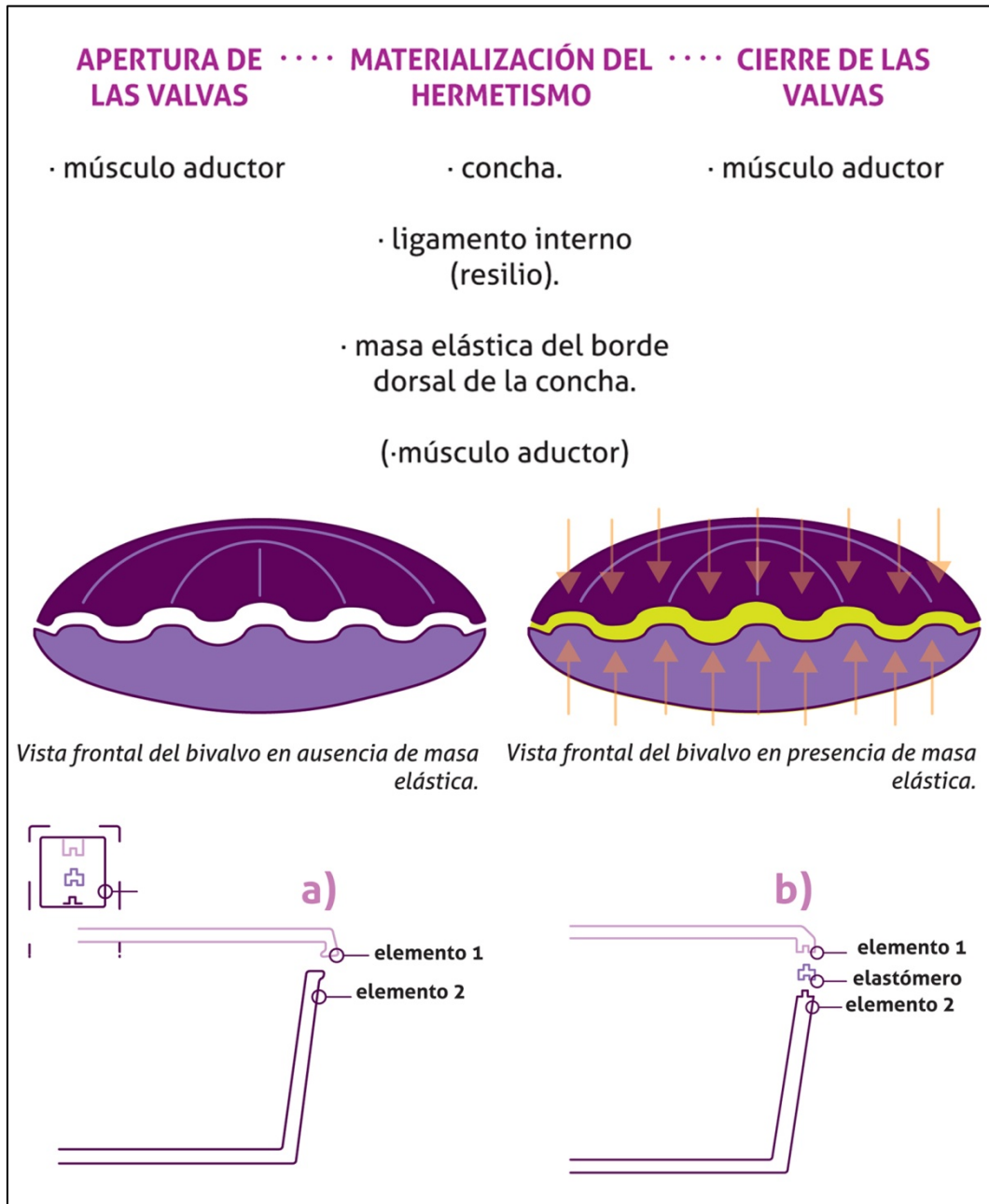


Figura 5.19: Ejemplo de relación principio biónico y principio ingenieril, para un bivalvo y cierre hermético. (Imagen: de Pedro E., Manzanares L., Martínez M., Royo I.)

La solución técnica para el hermético de un solo ciclo de uso propone que el hermético, formado por dos entidades diferenciadas, se encuentre cerrado mediante un proceso industrial de vacío que impida la apertura manual del mismo; La apertura está sujeta a la exposición del hermético a una fuente de calor, y se produce al alcanzar una temperatura superior a la de degradación del termoplástico. Esa temperatura mejora el consumo del

producto, tras su uso el hermético perdería toda su utilidad y terminaría por resultar inservible, de ahí que constituiría un hermético de un solo ciclo de uso.

La solución técnica para el hermético de varios ciclos de uso propone dos piezas diferenciadas y conectadas a través del elemento elastómero de las características descritas anteriormente, ver la figura 5.19. La potencial novedad que incorporaría es que éste se abriría por sí solo cuando el material elastómero alcanzase una temperatura dada.

En los proyectos con una clasificación muy alta se observa que hay una importante aportación del principio biónico a la definición del principio ingenieril, y que además se plantea alguna novedad de modo que la función clave está justificada. En algunos casos la propia relación entre principio biónico y principio ingenieril aporta requisitos de diseño, estableciendo el principio de solución técnica de diseño.

En el siguiente caso vemos de manera resumida el sistema de cierre basado en una especie de tortuga llamada *Malacochersus Tornieri*. Este tipo de tortugas tienen el caparazón más blando de lo normal, que les permite adaptar su tamaño a distintos entornos. En esta especie de tortugas encontramos un sistema de defensa único en el mundo de los quelonios, es capaz de esconderse en agujeros o grietas e hinchar sus pulmones de aire con lo que también dilata su forma y queda encajada en el agujero, siendo imposible extraerla para el depredador.

Por ello, se ha desarrollado un sistema de cierre que tenga la misma función, mediante el aumento de tamaño y volumen, conseguir una posición fija e inamovible. Se trata de una cámara que se hincha por medio de la introducción de aire a través de la misma, adaptándose a la forma de una hendidura que se encontraría en el interior de la carcasa, permitiendo bloquear el movimiento de la misma, además de asegurar un cierre hermético debido al perfecto acoplamiento de las formas, sin dejar espacio para que puedan introducirse partículas o agua por accidente. La traducción ingenieril del principio se representa en la figura 5.20 como la cámara está en situación normal e hinchada llenando su volumen total.

En este caso en particular se copia una función, que aun siendo muy básica permite extrapolarla al diseño de una carcasa, es cierto que al no tener un grado de definición técnica elevado se podría llegar a esta solución de manera intuitiva, ya que se reconoce que hay soluciones similares para otras funciones como el caso de las sondas vesicales.

En el siguiente caso se analiza la *Tonicella Lineata*, un molusco de la clase Polyplacophora conocidos más comúnmente como quitones, cuya función de interés es su capacidad protectora, más concretamente la unión entre el cuerpo del animal con la carcasa superior, y por otro lado la capacidad de adaptarse a las superficies irregulares.



Esta segunda función se estudia en el mismo caso con el ejemplo del caracol analizando el movimiento muscular para permitir el desplazamiento por todo tipo de superficies.

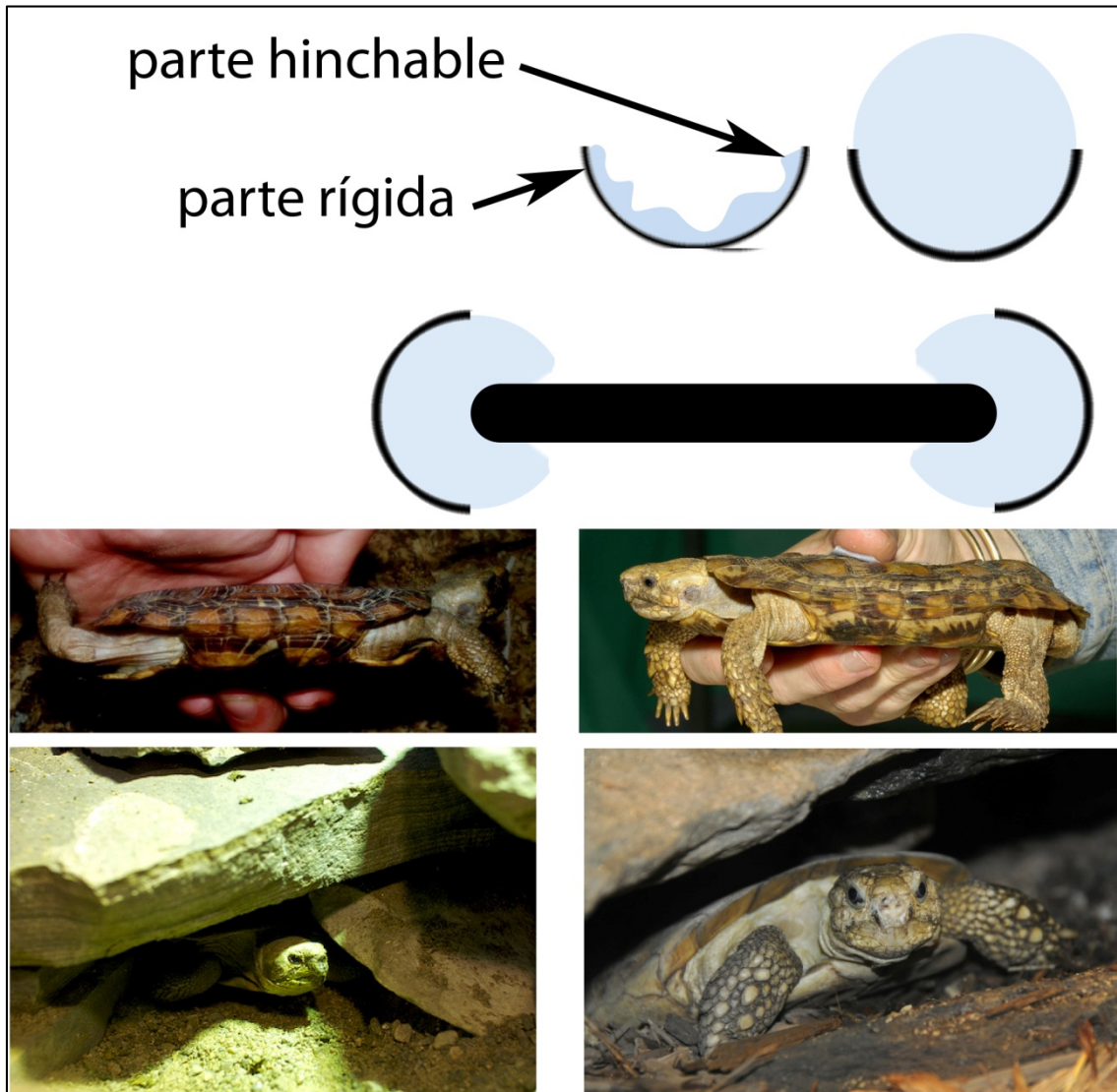


Figura 5.20: Ejemplo de relación principio biónico y principio ingenieril, para tortuga y carcasa inflable. (Imagen: Galán S., Notivoli E., Recio A., Sacristán L.)

Para la analogía ingenieril se tratará de recoger los aspectos interesantes encontrados en la *Tonicella Lineata* que puedan servir para un hermético contra inclemencias, se centra en su capacidad para protegerse con su caparazón a la vez que se camufla y pudiendo adaptarse a la superficie de las rocas, evitando mostrar puntos débiles. Esto lo consigue a partir de diferentes aspectos de su estructura. Lo consigue gracias a la unión entre su cuerpo blando y deformable y a su caparazón, gracias a su estructura geométrica encadenada de 8 conchas que permiten el movimiento y gracias a su faldón semiduro que protege su parte blanda.

El primer análisis es para la unión entre parte blanda y caparazón que es individual para cada sección, transmitiendo estabilidad a éste y mejora a la capacidad de adaptación a formas

rocosas. Puede crearse una analogía a partir de este sistema permitiendo adaptarse a la forma donde se coloque el hermético gracias a una coraza protectora deformable, al estar construida por partes, como puede verse en la figura 5.21.

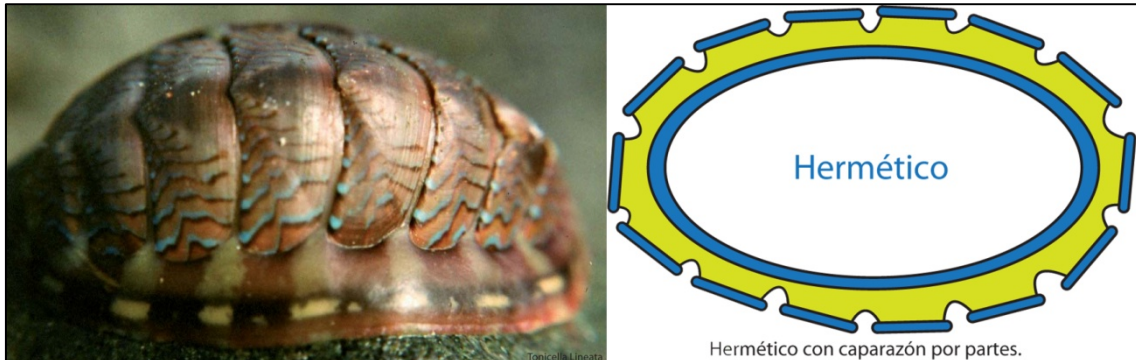


Figura 5.21: Ejemplo de relación principio biónico y principio ingenieril, para molusco y carcasa por partes adaptable. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.)

El segundo análisis es para el encadenado de conchas del caparazón que es contigua entre placas, de esta forma la deformación del cuerpo del animal no se transforma en huecos débiles en la superficie del caparazón. Esta idea puede transmitirse al producto si se considera especialmente importante la protección contra ataques de animales. Podría crearse a partir de una malla de piezas de metal con uniones en forma de bola, para permitir todos los movimientos y que no dejase a la vista ningún punto débil.

El siguiente estudio se refiere al faldón semiduro protector, se trata de la parte del cuerpo de la Tonicella Lineata que sale del propio caparazón de ésta, y forma una última protección entre aquél y la superficie sobre la que se encuentre. Este material no es rígido, ya que se amolda a la superficie del suelo, pero proporciona cierto grado de dureza en sus superficies gracias a la aragonita, forma cristalina del carbonato cálcico.

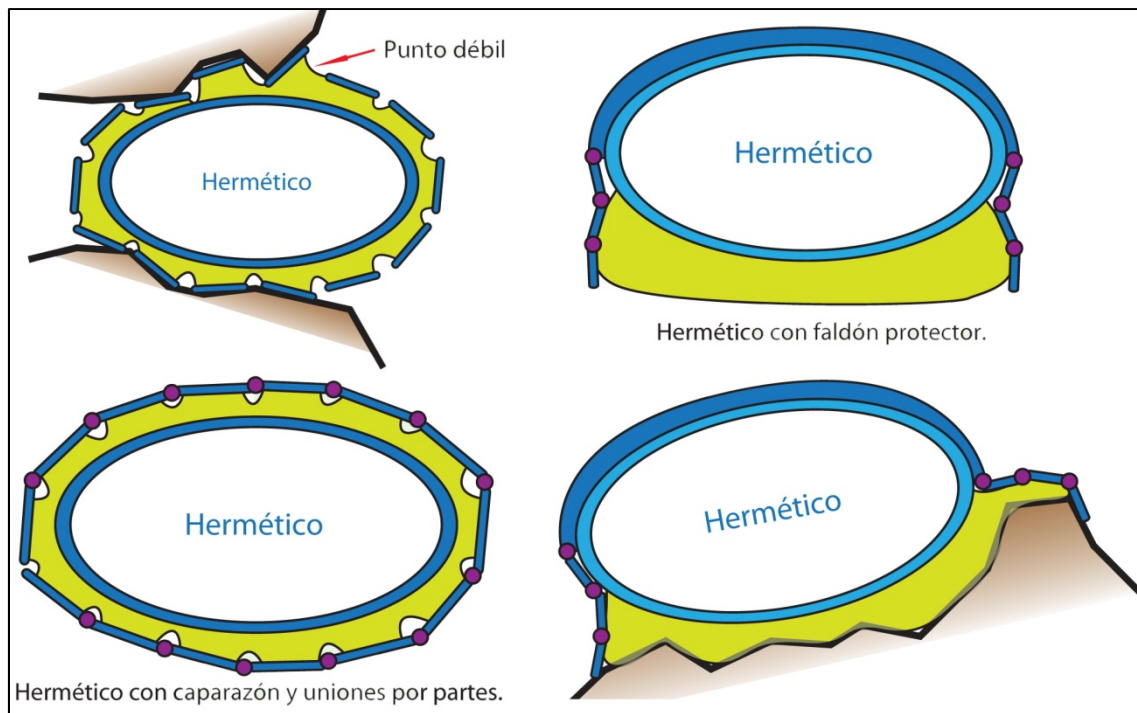


Figura 5.22: Evolución del ejemplo de carcasa por partes adaptable basada en un molusco. (Imagen: Abenia S., Dolcet J., Fernández D., Urchaga C.)

Si el hermético no necesita de protección global, sino solo en la parte con la que se sujete a la superficie a colocar, puede desarrollarse un sistema de faldón que recoja el resto de cualidades pero con este sistema que se adapte a la forma. De esta manera se podría transformar tan sólo la parte baja del hermético y no el global. Además se dispone de un material blando que se adapta a las distintas superficies de modo que no quedan huecos alrededor de la carcasa y se ajusta al contorno exterior, como puede verse en la figura 5.22, donde se ven varios esquemas de aplicación de las soluciones naturales de la carcasa natural.

#### 5.3.4.5 Propuesta conceptual

Los resultados de las propuestas conceptuales son bastante satisfactorios, en general se puede decir que todos los proyectos tienen una buena descripción y definición conceptual, con un listado de especificaciones vinculadas a los resultados del trabajo realizado con las tablas biomiméticas. Las propuestas responden a experiencias previas y ese puede ser un factor para los buenos resultados, prácticamente todos los equipos que han desarrollado el proyecto han tenido previamente la necesidad de definir un objeto o producto a nivel conceptual, planteando requisitos de diseño y necesidades a satisfacer.

En la propuesta de proyecto no se define un objeto concreto a diseñar, se solicita resolver el problema técnico de ser hermético, que se pueda acomodar a una carcasa por lo que el objeto a diseñar puede ser con propuestas muy abiertas, por esta razón no existe coherencia entre los

resultados de los diferentes proyectos y lo que realmente se analiza para poder evaluar posteriormente es como se definen los requisitos funcionales partiendo del principio ingenieril. Veremos muy resumidamente algunos ejemplos ya que en este mismo capítulo se presentan dos proyectos completos a modo de caso.

Por lo general todos los equipos presentan varias opciones conceptuales y eligen una de ellas para desarrollar con más detalle. Para el primer marco de trabajo, hermético para uso alimentario, vemos que a partir de la definición general del concepto se establecen con mayor concreción ciertos aspectos técnicos y descriptivos, por medio de especificaciones de diseño de producto, características técnicas respecto a materiales o construcción, prestaciones, etc. Cada equipo hace sus propias propuestas que están relacionadas con aplicaciones de carácter industrial, contenedores que permiten cocinar, funciones específicas para los condicionantes de un determinado alimento, prestaciones nuevas para un envase comercial de venta de comida precocinada, posibilidad de tener uno o más ciclos de hermeticidad, posibilidad de transpiración, barrera en uno o dos sentidos, ser permeable o impermeable, barrera ante la luz/humedad/calor/olores, indicación de toxicidad, etc. todas las propuestas incluyen aquellas características más interesantes extraídas del principio ingenieril.

En el marco de trabajo para el diseño de una carcasa hermética para dispositivos electrónicos se definen especificaciones relacionadas con cuestiones de protección y resistencia, efectos externos del ambiente, agentes agresivos, identificación y señalización, facilitar mantenimiento por apertura y cierre, necesidad de aporte energético, etc.

En el marco de trabajo de una carcasa con cierre hermético que se pueda sumergir las especificaciones tienen que ver con aspectos de protección ante agentes externos e internos de presión, corrosión, impactos, oxidación o otros relacionados con apertura y cierre, formas de transporte, adecuación del volumen, formatos variables, flexibilidad y expansión de materiales, articulaciones, entre otras.

El hecho de encontrar y aplicar estas funciones que se consideran clave y que no existen en la actualidad, ya que se ha realizado un estudio sobre el estado de la técnica, aporta innovación funcional a dichos conceptos. En algunos casos estas innovaciones pueden diferenciar tanto que se definan nuevos conceptos de producto, esto solo es posible evidenciarlo por medio del desarrollo de dichos conceptos, lo que implica investigación y desarrollo, definición más concreta de materiales y procesos y una evaluación económica.

Los resultados negativos, aquellos proyectos que no han realizado una propuesta adecuada, han aparecido por tener dificultades en pasar de los principio ingenieriles a especificaciones.

Se observa que la incorrecta definición del principio ingenieril lleva a una mala definición de los requisitos de diseño, y que se termina aplicando una solución técnica existente, de este modo la aplicación de la metodología no tiene sentido ya que los referentes naturales no son útiles y su estudio es en vano.

### **5.3.4.6 Aspectos destacables de los resultados respecto a la metodología.**

Aquí se presentan algunas aportaciones de los integrantes de los distintos equipos sobre los aspectos positivos y negativos que han detectado en el desarrollo del proyecto, y como resultado de su trabajo. De manera general se observa y se apunta que la valoración es positiva respecto a la utilidad de la metodología, se considera acertada la aportación de algunos cambios que le dan más sentido y se ajustan mejor a cada proyecto, no se debe perder de vista que las metodologías se enriquecen con los cambios y las adaptaciones a las situaciones particulares.

Del mismo modo, de manera general, también se observa un aspecto negativo, una crítica hacia la dificultad de encontrar individuos en la naturaleza que sean respuesta a las función claves, y la calidad de la información específica de un individuo para conocer su principio biónico.

Este aspecto es recurrente y se anotado también en los ejercicios anteriores evidenciando un inconveniente de la propia metodología.

Las conclusiones y opiniones expresadas por los equipos respecto a los aspectos positivos y negativos que se observan en la aplicación de la metodología en el desarrollo del proyecto, a continuación se citan aquellos que sirven para extraer conclusiones con las que evaluarla posteriormente.

Aspectos positivos:

- Una vez definidas las funciones clave se advierte que son muy genéricas, y la realización de un nuevo mapa mental sirve para detectar otras funciones clave con más interés, en este caso este nuevo mapa mental implica la redefinición de nuevas funciones que cambian de marco de trabajo.
- En la propia tabla biomimética se pueden apuntar principios ingenieriles o requisitos de diseño. Los cambios en las tablas biomiméticas permite vincular la función clave con el principio de solución ingenieril, el estado de la técnica o incluir el grado de oportunidad. Las variaciones en las tablas acomodan la metodología.
- La aplicación del método paso a paso asegura una evolución controlada del proyecto. Un equipo ha errado al no seguir la metodología, y retornar hasta el punto anterior y seguirla, permitió corregir el error y evitar otros futuros.

- Muy beneficioso el hecho de crear grupos multidisciplinarios para el desarrollo de este tipo de proyectos, en el segundo grupo de prueba se podía hacer grupos interdisciplinarios.
- Resulta más cómodo partir de un problema técnico concreto al acotar más la búsqueda de soluciones naturales.
- Los mapas mentales ayudan a dividir el problema en partes, el problema técnico se puede descomponer en un grupo de funciones. En varios casos se comenta que la metodología ayuda a la apertura mental y facilita el proceso creativo. Las ideas generadas son distintas a las que se obtendrían con otros procesos creativos.
- Cuando los requisitos se vinculan a las función claves se obtienen buenas definiciones conceptuales.
- Es posible encontrar huecos de mercado para hacer innovación.
- La información generada puede ser interesante para otros proyectos o aplicaciones en otros entornos.
- La solución a una función clave de un proyecto concreto se puede aplicar a otros proyectos de un mismo marco de trabajo.
- Varios seres vivos pueden aportar soluciones para una misma función clave, del mismo modo se observa que un mismo ser vivo puede sugerir más de una solución para distintas funciones.

### Aspectos negativos:

- Se encuentran dificultades respecto al planteamiento inicial del proyecto, uno erróneo puede conllevar un consumo de tiempo y la repetición de algún paso de la metodología.
- Se observa que algún equipo ha invertido el orden de los pasos de la metodología, haciendo el mapa mental después de la tabla de referentes biomiméticos, esto implica que no hay una relación entre las funciones y los referentes, además indican que hay dificultades en la búsqueda de referentes naturales, quizá no tengan claro el objetivo de la búsqueda.
- Dificultad de definir las funciones clave.
- Dificultad en innovar conceptualmente y en encontrar analogías industriales.
- Dificultad a la hora de encontrar información biológica. Necesidad de encontrar fuentes de información de calidad, con la consiguiente inversión de tiempo y el hecho de que los marcos de trabajo pueden ser demasiado amplios en función del objetivo deseado.
- La búsqueda de información sobre patentes es un proceso, denso y lento.
- Dificultad en la valoración del grado de oportunidad.
- Se observa también que hay grupos que descartan función claves sin llevarlas a la tabla, eliminando potenciales soluciones para el diseño.
- Dificultad en la adaptación de la solución natural al diseño del producto.
- Difícil mejorar un sistema hermético. Dificultad en traducir el principio biónico a principio ingenieril para un producto que debe resolver el problema técnico de hermético.

**5.4 Casos a estudio**

Se han elegido dos casos que pertenecen a dos equipos, uno de cada grupo a estudio, que han realizado su diseño en el mismo marco y que conceptualmente han elegido un objeto funcionalmente similar, con algunas características comunes. El hecho de tener dos equipos distintos que han elegido un mismo tema nos permite comparar los resultados entre proyectos, entre equipos y por las conclusiones a las que han llegado.

**5.4.1 Ejemplo caso 1**

El marco elegido por este equipo ha sido el diseño de una carcasa hermética para inmersión capaz de soportar de 0 a 250 m. de profundidad. Se elige este marco por considerarse bastante atractivo y poco explotado, pudiéndose pensar en herméticos para muchas aplicaciones diferentes. Se aclara la diferencia entre estanco, muy bien cerrado e incomunicado, y hermético, que no permite el paso a nada, ni sólidos, ni fluidos, ni aire. Ya que en las primeras búsquedas se encuentran diferencias y una utilización del término estanco de un modo erróneo, por ejemplo en artículos de náutica.

Se realizan dos mapas mentales, en primer lugar, uno para plantear cuales serían las funciones principales que podría tener una carcasa para el marco escogido, es decir, se parte de una carcasa y de sus principales características, viendo cómo resolverlas y cuáles serían las más características, como se ve en la figura 5.23.

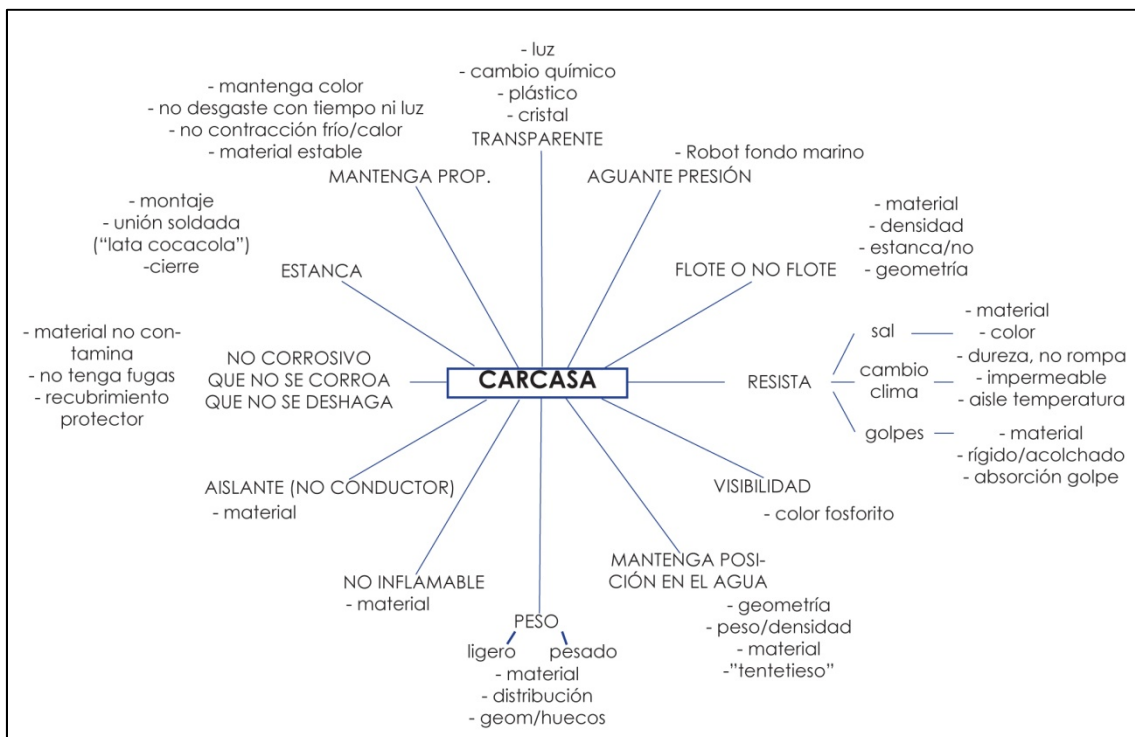


Figura 5.23: Mapa mental para funciones de la carcasa perteneciente al ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)



Por otro lado y más enfocado hacia lo que solicita el proyecto, hay otro mapa mental partiendo de un hermético y de cuáles podrían ser las características principales para que fuera adecuado para un medio acuático, obteniendo el mapa mental que se puede ver en la figura 5.24.

Se definen las mejores funciones clave, las más adecuadas fueron elegidas y posteriormente estudiadas para ver como se podían conseguir y cuáles eran los seres vivos que podrían satisfacerlo, analizando cuál es la relación ingenieril entre el animal y la función clave con el fin de obtener un listado de ellos para una posterior elección y utilización para el hermético buscado, como se ve en la tabla 5.15.

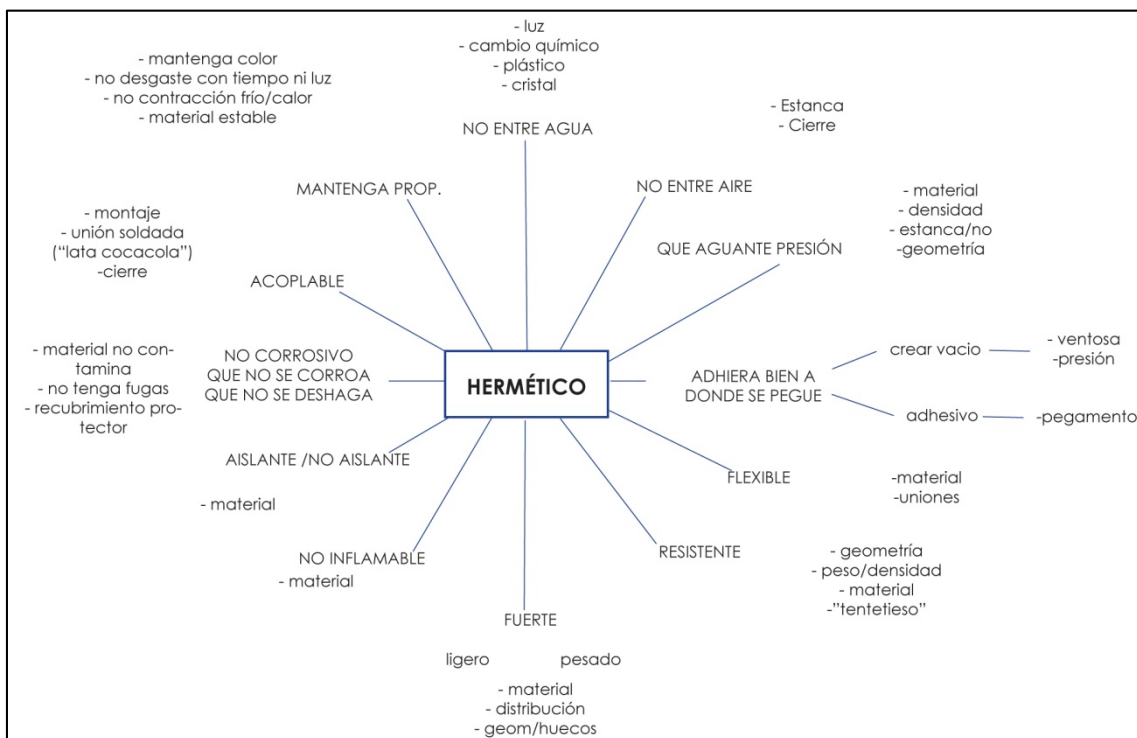


Figura 5.24: Mapa mental de características de un hermético del ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)



FUNCIONES CLAVE	CÓMO PODEMOS CONSEGUIRLO	REFERENTE BIÓNICO
<b>Aguantar la presión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ventosa que crea vacío</li> <li>- Por presión: a los animales marinos no les entra agua ya que tienen unas válvulas que impiden el paso de ésta</li> <li>- Carcasa presurizada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulpo</li> <li>- Caracol</li> <li>- Sanguijuela</li> <li>- Espiráculo de las ballenas</li> <li>- Espiráculo de los delfines</li> </ul>
<b>Resistencia al ambiente marino (el producto se puede salar, corroer, disolver...)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material estable</li> <li>- Inoxidable</li> <li>- Tratamientos superficiales</li> <li>- Recubrimientos plásticos (evitaría la degradación)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbonato cálcico como por ejemplo el caparazón de la mayor parte de los bivalvos</li> <li>- La quitina del exoesqueleto de los artrópodos</li> <li>- Antibiofilm</li> <li>- Acuaporinas (proteínas encargadas del transporte de agua en la célula vegetal y fúngica)</li> </ul>
<b>No conductor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material</li> <li>- Recubrimiento aislante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corcho</li> <li>- Anguilas eléctricas (<i>Electrophorus electricus</i>) ya que son dieléctricas</li> </ul>
<b>Elasticidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material elástico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bolsa de los pelicanos</li> <li>- Hormiga honney pot</li> <li>- Pez globo</li> </ul>
<b>Resistente a los golpes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material rígido</li> <li>- Acolchados</li> <li>- Flexible (que absorba el impacto)</li> <li>- Goma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pepino: tiene una estructura interna que absorbe los impactos</li> <li>- Almohadillas de los animales</li> <li>- Exoesqueleto de algunos animales como por ejemplo las tortugas, el escarabajo hércules o el armadillo.</li> </ul>
<b>Flotabilidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menos denso que el agua</li> <li>- Cámaras de aire</li> <li>- Menos peso que el agua desalojada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vejiga natatoria</li> <li>- Hormigas de fuego (balsas de hormigas)</li> <li>- Nenúfar</li> <li>- El Loto</li> <li>- Aceite</li> <li>- Zooplacton</li> </ul>
<b>Impedir el paso del agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Válvulas de cierre</li> <li>- Material</li> <li>- Uniones herméticas</li> <li>- Barreras</li> <li>- Tapón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esfínteres</li> <li>- Conchas de los bivalvos</li> <li>- Bolsa de los pelicanos. Una vez que cogen el agua</li> <li>- Las plumas de los patos repelen el agua</li> <li>- Los pingüinos tienen una capa de aire caliente entre las plumas y la piel que evitan que pase el agua, ya que ésta se queda entre dichas plumas</li> </ul>

Tabla 5.15: Tabla biomimética para las funciones clave del ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

De manera paralela se ha realizado un estudio del estado de la técnica, buscando patentes de productos existentes, a fin de ver qué existe y en qué destacan, pudiendo ayudar a la hora del posterior diseño de nuestro hermético. Se ha indagado principalmente en material de buceo, manguitos de conexión y válvulas. También se buscaron productos existentes y comercializados, como gafas de buceo, válvulas de colchonetas y similares, carcasas para aparatos electrónicos, cascos de presión, botellas de submarinismo y similares. Para cada uno de ellos hay una descripción de sus características y particularidades en relación a la función de hermético. Se describen los materiales y construcción, algunos procesos de fabricación y detalles técnicos concretos de cada producto.

De los veintisiete referentes biomiméticos listados en la tabla se eligen diez candidatos y se estudian con más detalle, realizándose el análisis del principio biónico. De este estudio aportamos aquí tan solo el individuo y su característica que lo hace especial. Los seres vivos elegidos son los bivalvos por su cierre caja+tapa; Los caracoles o babosas por su pie de reptación con mucosa que lo adhiere y hace el vacío; Los pulpos por sus ventosas para atrapar cosas, y la epiglotis como válvula que impide el paso de alimentos a la tráquea pero permite el paso de aire. Los pelicanos por su bolsa para transportar pescado con la característica de adaptable y elástico que recupera su forma inicial. Los cetáceos como la ballena y el delfín por

su espiráculo para respirar por la característica de válvula. Los peces por su vejiga natatoria para permitir la flotabilidad; Las hormigas de fuego por su capacidad de formar una plataforma resistente al agua ya que forman una balsa en la que se desplazan y les permite sobrevivir a las inundaciones. Los esfínteres por su característica de válvula muscular en forma de anillo que permite el paso de una sustancia de un órgano a otro por medio de un tubo u orificio a la vez que impide su regreso, se pueden estudiar el Esfínter del iris, la epiglotis, el esfínter del cardias o gastroesofágico, el pilórico, la válvula ileocecal, el esfínter de Oddi, el esfínter anal y el uretral. Y por último el corcho por su característica de ligero, “parcialmente impermeable” a líquidos y gases, y su capacidad de soportar grandes presiones sin sufrir cambios permanentes en su estructura.

Una vez estudiados se eligen cuatro candidatos, el pulpo, los bivalvos, el pelicano y el espiráculo. Entonces se utiliza la tabla de referentes en sentido inverso, aislando los mejores candidatos para dar solución a las funciones clave. Se ha elegido estos seres vivos y estructuras naturales considerando que con ellos se puede cubrir casi todas las funciones que se han considerado para la realización del cierre hermético. Las únicas funciones clave que no se cubren son “no conductor” y “flotabilidad”, la conductividad depende del material elegido, y la flotabilidad se entiende cómo que seres vivos flotan debido a que tienen una densidad media menor que la del agua. Por ello se utiliza la información recopilada no sólo de los finalmente elegidos sino de todos ya que podrán aportar conocimientos, inspiración y ayuda aplicable al posterior diseño, en la tabla 5.16 se pueden ver los candidatos, las función claves a las que responde y como consiguen hacerlas. En este proyecto el principio ingenieril de cada principio biónico se obtiene en la fase de conceptualización, representando las soluciones naturales directamente sobre las necesidades descritas por las especificaciones de diseño. En este proyecto se observa que la tabla de mejores candidatos relaciona al ser vivo con la función clave y con el principio biónico, como se puede ver en la tabla 5.16.

MEJORES CANDIDATOS	PULPO	BIVALVO	PELICANO	ESPIRÁCULO
<b>SOLUCIÓN A LAS FUNCIONES CLAVE</b>	- Aguantar presión	- Impedir el paso del agua - Resistencia a los golpes - Resistente al ambiente marino	- Impedir el paso del agua - Elasticidad	- Impedir el paso del agua - Aguantar la presión
<b>CÓMO LO CONSIGUEN (principio ingenieril)</b>	Posee unas ventosas que se mueven en los tres ejes y que permiten su adherencia a la superficie gracias al efecto de vacío que hacen entre ellas y la superficie al extraer el aire por presión.	Los bivalvos, tienen unas conchas que ejercen ce caparazón formadas de carbonato cálcico lo que las hace resistentes al ambiente marino al mismo tiempo que duras. Además para cerrarse e impedir el paso del agua, la unión entre el caparazón superior y el inferior tiene unas hendiduras que encajan y cierran herméticamente, no afectando así al interior.	La bolsa que tiene es una membrana flexible que se adapta al su contenido interior, recuperándose cuando todo elemento es expulsado.	Animales como los delfines o las ballenas utilizan el espiráculo para respirar. Se trata de un orificio que se encuentra en la parte superior de éstos y que debido a la diferencia de presión entre .

Tabla 5.16: Tabla biomimética de mejores candidatos y funciones clave elegidas del ejemplo caso 1. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

La definición conceptual se obtiene por una breve descripción y las especificaciones de diseño. Se busca crear un espacio hermético donde guardar objetos personales como el bolso, ropa, etc. a modo de depósito, para transportarlos y guardarlos, y con el añadido de mantenerlo seco en todo momento, aunque se sumerja en el agua. Como ejemplo se encuentra la aplicación de bolsa que permita ir al agua con ella sin necesidad de dejarla en la playa con los objetos personales, a la intemperie o sin vigilancia, llevarlos siempre encima. Las principales especificaciones de diseño son:

- Hermética para mantener secos los objetos que se introduzcan.
- Permitir apertura y cierre seguros y sencillos
- Aguantar la presión.
- Resistente a la sal, cambio de clima, agua, intemperie.
- Aislante
- Resistente a posibles golpes
- Peso ligero
- Que soporte la corrosión, que no se corroa ni se deshaga.
- Que mantenga las propiedades con el paso del tiempo, con diferentes temperaturas, con la luz del sol, etc.

Como parte de la definición conceptual se explica cada una de las partes. La bolsa como espacio o receptáculo flexible que se adapte a los objetos contenidos, a modo de envase, que será flexible y extensible, adaptándose a los objetos que haya en su interior, siendo de un tamaño proporcional al de sus objetos. Con capacidad suficiente para albergar los objetos que en ella se quieran guardar, teniendo en cuenta aletas de buceo, toalla... a parte del móvil, cámara, llaves, cartera etc. El exterior, que entrará en contacto con el agua, deberá repeler el agua. Al sacarla del agua no estará mojada y se podrá acceder a su interior al instante sin mojar el interior. Deberán ser de un material “que respete la piel”, ya que estará en contacto con ella, y que no se estropee con el tiempo ni pierda sus características.

Respecto a la tapa o cierre, debe tener una dimensión tal que permitirá introducir desde objetos personales, como la cartera o las llaves, hasta útiles de buceo, como aletas; la abertura será lo suficientemente ancha para que quepan éstas. Con un cierre hermético cíclico, con apertura y cierre voluntario, fácil, cómodo y rápido. Un cierre seguro ante posibles golpes, presión, fuerzas externas, que no se estropee con el tiempo ni pierda sus características.

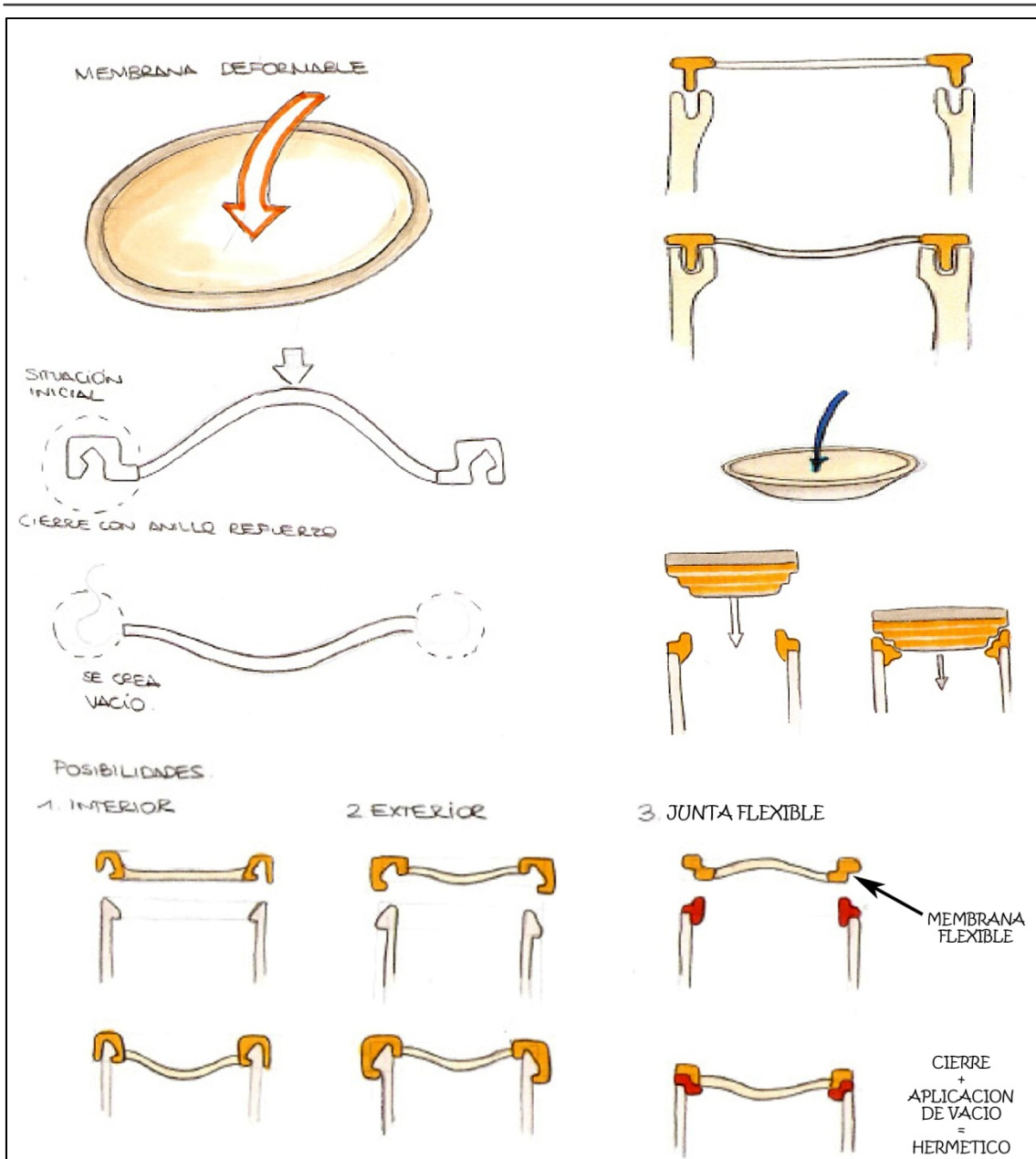


Figura 5.25: Solución para unión hermética de la tapa y crear depresión. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

Se define en este momento cómo conseguir el cierre hermético de la tapa. Para resolver un cierre hermético que cree vacío o depresión, se extrapolan las ventosas de los pulpos para crear una tapa deformable y flexible que se fije al receptáculo, ver figura 5.25. Después, al aplicar una fuerza hacia el interior, se deforma elásticamente creando una presión suficiente que creara cierto vacío en el interior.

El material ha de ser muy elástico y con capacidad de deformarse, para adoptar las diferentes geometrías de los objetos del interior y pueda recuperar la forma original una vez que no estén esos objetos.

Para conseguir esto, utilizamos como referente biónico al pelícano, utilizando su gran bolsa membranosa flexible que puede llenar de agua y peces, y que después de vaciarla vuelve a recuperar su forma original, ver figura 5.26. También añadiríamos más características para mejorar el recubrimiento, como que al salir del agua, la bolsa pudiera “secarse” enseguida, es decir, que eliminara rápidamente el exceso de humedad que tenga en la superficie para quitar el posible peso que se pudiera incorporar, y que además evite el poder mojar los objetos que tengamos dentro. Esto se puede conseguir gracias a un material hidrogógico, que mantendría una capa microscópica de aire en la superficie. Por lo que se deben elegir materiales como las siliconas y látex si son hidrófobas, en caso contrario se deberá aplicar un tratamiento en la superficie.

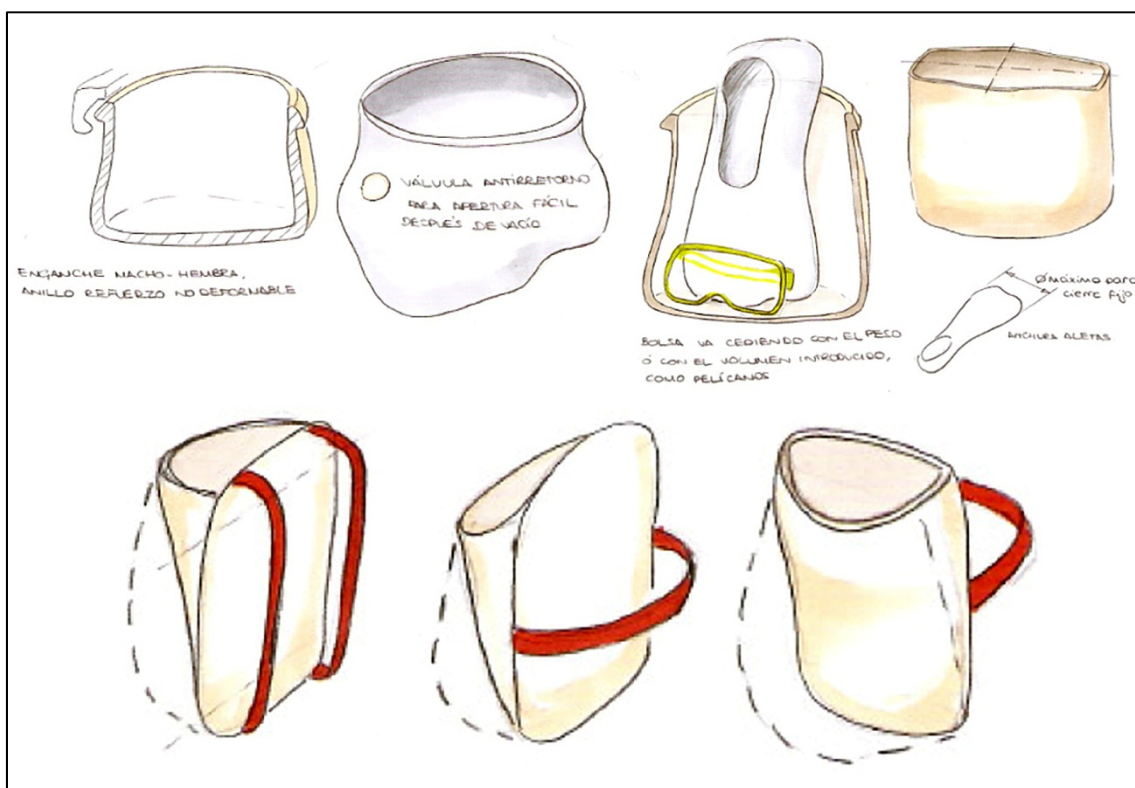


Figura 5.26: Estudio de la relación forma-material, basado en la bolsa del pelícano. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

El anillo de refuerzo forma parte del sistema del cierre, este anillo se basa en los bivalvos, los cuales encajan sus dos conchas de manera que quedan herméticamente cerrados. Extrapolando esta característica, creamos un cierre de refuerzo a la “ventosa” que consiste en encajar el saliente de la tapa en el agujero de la apertura de la bolsa, ver figura 5.26. Sería un sistema de clipado continuo por todo el perímetro de la apertura que serviría de seguridad ante posibles golpes etc.

La válvula anti-retorno facilita la apertura de la tapa, ya que de encontrarse el interior en completo vacío no podría abrirse, la válvula anti-retorno que no dejará entrar el agua, manteniéndose el interior hermético, pero sí que al presionarla dejará pasar ya sea el aire si estás en el exterior o el agua si estás dentro del mar, esto no interesaría por lo que necesita una tapa de seguridad para no presionarla por accidente, ver figura 5.27.

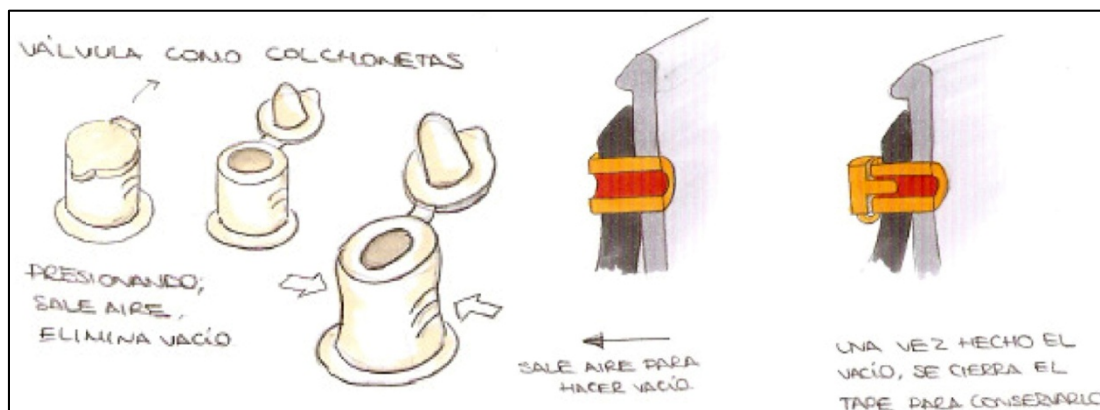


Figura 5.27: Válvula anti-retorno para regular la presión interior. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

Con estas aproximaciones conceptuales el diseño queda definido con más detalle de la siguiente forma. La bolsa o depósito se va deformando según el volumen o peso que se introduzca en ella de manera análoga al pelícano. La idea inicial es hacer dicha bolsa con un material flexible como la goma, el caucho o el látex por ser impermeables, aislantes y elásticos pero no llegaban a cumplir con varios requisitos en su totalidad, como los golpes o posibles cortes producidos por las rocas, fuertes mareas u otros, la resistencia al entorno marino, el contacto con la piel, la resistencia a altas presiones, o que tras deformarse vuelva a su estado natural. Finalmente, se propone crear dos capas una interna y otra externa, cada una de una material adheridas en la parte superior, a modo de piel de varias capas (figura 5.28).

La capa interna es una bolsa en la que se hace el vacío parcial, debe ser suficientemente resistente para soportar la presión, pero por otro lado, que sea deformable con el fin de que se adapte a los objetos de su interior. Después de estudiar varios materiales se ha elegido el PVC flexible, al que se le añaden plastificantes y estabilizantes para que cumpla los requisitos especificados, ya se ha visto que es empleado en otros elementos que cumplen funciones similares.

La capa externa estará adherida a la interna por la parte superior, los esfuerzos que ésta sufra serán transmitidos también en la exterior. Esta capa tendrá otras características como un tejido hidrofóbico para repeler el agua y que una vez salga del agua no empape aquello con lo que entre en contacto, y la flexibilidad para adaptarse a las acciones de la capa interior.



Esta capa será la que ofrecerá la resistencia necesaria al conjunto frente a la sal, a los golpes, haga de aislante...

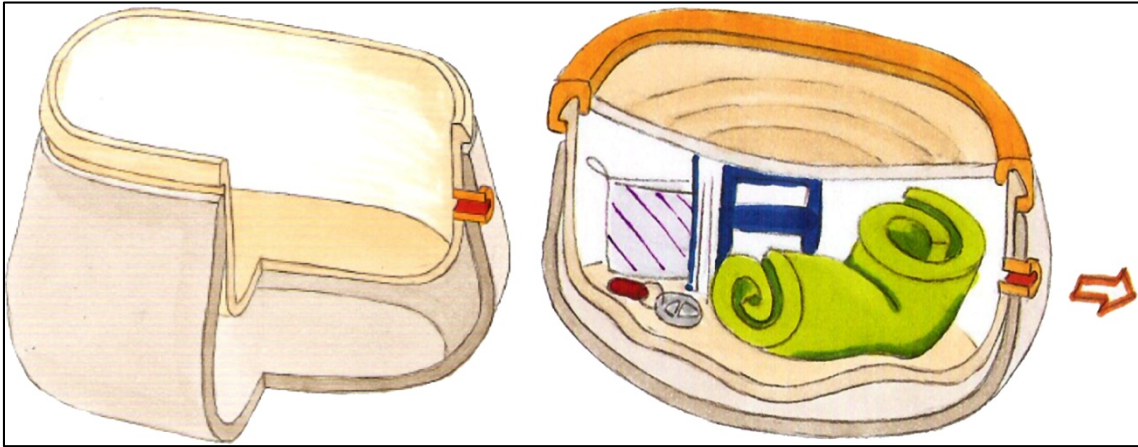


Figura 5.28: Detalle de la doble capa de la bolsa. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

La capacidad de la bolsa se ha pensado en reducirla con el fin de poder transportar objetos básicos, la forma final sería más o menos como una riñonera (forma y tamaño), puesto que este tamaño sería suficiente para almacenar los objetos que se quieren proteger. La bolsa incluiría unas presillas por las que pasaría una correa, adaptable, para que se pueda adaptar a la cintura o cualquier otra parte del usuario.

Para dotar de mayor resistencia al cierre hermético se incluye el refuerzo de fijación, basado en el sistema de cierre de los bivalvos mediante encajes de sus dos partes. Con enganches macho-hembra se consigue una fijación que lo haría resistente a golpes, presión etc. Una vez cerrado y encajado se crearía una unión similar al contorneado, creando un espacio hermético y seguro en el interior. El material elegido sería caucho de silicona transparente, ya que resiste alta presión, es resistente a la corrosión y ligeramente flexible.

El cierre hermético consiste en una tapa, que una vez cerrada con el anillo de fijación se le aplica presión, se deforma, y al ser como una ventosa hace efecto de vacío en el interior creando el hermético que resistirá la presión. En la figura 5.29 se muestra como se encaja la tapa en el cuerpo y se aplica presión en ella deformándola y creando el efecto de vacío en el interior. Una vez cerrado herméticamente, se presiona la tapa y la bolsa, con el orificio abierto, con el fin de reducir su volumen y permitir la salida de aire. Cuando se ha extraído todo el aire, se cierra el tapón dejando el interior hermético y en condición de vacío parcial.

Para facilitar la apertura de la tapa, se abre el tapón, entra el aire y se elimina el vacío, con lo que se podría proceder a la apertura. El tapón ayudará a conseguir dos de las funciones clave de la bolsa, una es permitir una apertura fácil y cómoda y otra es crear el vacío en su interior.

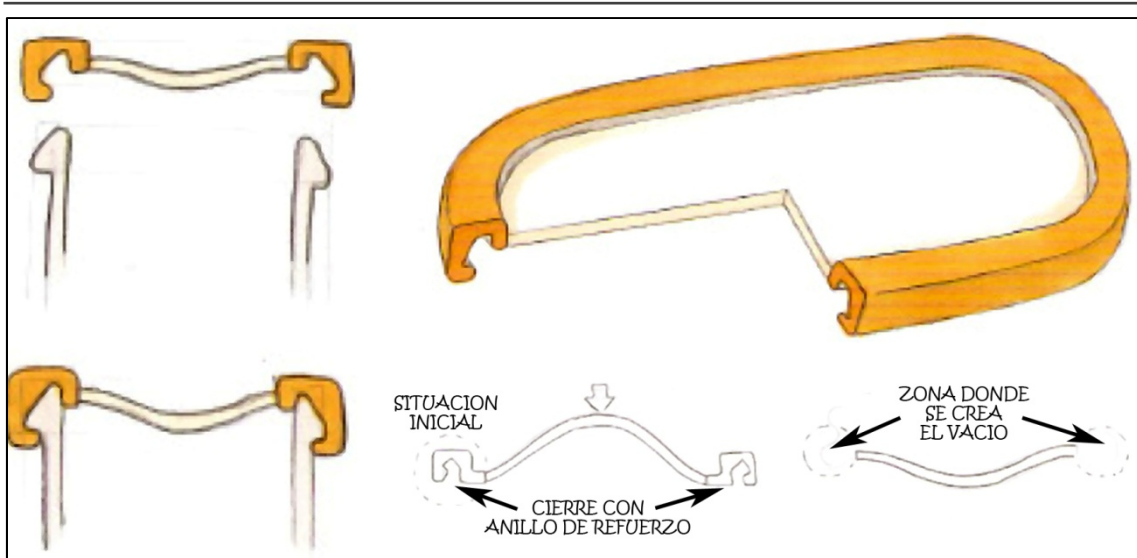


Figura 5.29: Detalle del cierre de la tapa y aplicación de presión para crear el vacío. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

El sistema para fijar la tapa al envase, uniremos mediante unos tubos semi-rígidos, material corrugado, que permite el giro, extensión y compresión para dar mayor ángulo de movilidad a la tapa, e impidiendo su pérdida. Como se observa en el punto 3 de la figura 5.30.



Figura 5.30: Secuencia de uso, de llenado y cierre. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

Se valoran como puntos fuertes de la metodología que se han encontrado gran cantidad de referentes biónicos, hay una gran variedad donde escoger. Como puntos débiles se comenta que no era posible centrarse un solo referente biónico o simplemente seleccionar unos pocos. Y además, la escasez de información sobre los organismos escogidos (figura 5.31).



<b>DEBILIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diversidad de información no específica</li> <li>- Pocas aplicaciones</li> <li>- Posibilidad de dispersión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Patentes existentes</li> <li>- Imposibilidad de realización</li> <li>- Aceptación de los usuarios</li> </ul>
<b>FORTALEZAS</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concepto innovador</li> <li>- Útil</li> <li>- Gran cantidad de información que permite inspiración ayuda u otros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hueco en el mercado</li> <li>- Adicción a los móviles</li> <li>- Poca seguridad</li> <li>- Pensamiento creativo, abstracto e innovador</li> </ul>

Figura 5.31: Análisis DAFO del concepto desarrollado y de los resultados de aplicar la metodología. (Imagen: Fernández P., Llano M., Ros R., Sevil E.)

### 5.4.2 Ejemplo caso 2

Este segundo proyecto ha sido realizado por el grupo a estudio de alumnos del curso de “Biomimética: la naturaleza como fuente de soluciones”. La extensión del proyecto es algo más reducida ya que la dedicación de horas es menor, y también el nivel de definición es distinto. Con el mismo marco de trabajo que el caso anterior. Inician un análisis de los distintos tipos de inmersiones hasta 250 m. voluntarias o accidentales (tabla 5.17).

profundidad	Inmersión voluntaria	Inmersión involuntaria
Baja (0-20 m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Recreo (reloj, cámaras, documentación, dinero,...) (transporte y/o uso)</li> <li>•Limpieza de cascos (carcasa htas)</li> <li>•Pequeños submarinos de recreo (carcasa, cámaras, focos,...)</li> <li>•Anclajes casas flotantes (protección estructural, sensores, htas, )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Caídas (reloj, cámaras, documentación, dinero,...) (transporte y/o uso)</li> </ul>
Media (20-40 m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Neopreno: submarinismo de recreo (relojes, cámaras, comunicación, mapas, iluminación, seguridad,...)</li> <li>•Colocación nasas/piscifactorías (carcasas htas.)</li> <li>•Trabajos submarinos (carcasas htas., iluminación, seguridad, comunicación, planos)</li> <li>•Recuperaciones y reflotamientos</li> </ul>	
Grande (40-250 m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Submarinos</li> <li>•Instalación redes comunicaciones/eléctricas</li> <li>•Anclado boyas y balizas</li> <li>•Gaseoductos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Caja negra</li> <li>•Naufragios</li> </ul>

Tabla 5.17: Tipos de inmersiones y clasificación por profundidades, marco de trabajo caso 2. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.)

La aplicación básica de este objeto será el transporte de objetos personales que han de mantenerse secos, como la cartera, llaves, documentación, comida y bebida, botiquines, ropa y de otros que se pueden mojar pero que tienen un tratamiento impermeable o hermético como linternas y cámaras fotográficas. Tras una primera descripción de que debe hacer el producto se definen las funciones clave, ver tabla 5.18.

Funciones Clave	Característica propia
Que transporte cosas	Volumen adaptable al contenido.
Que sea sumergible	
Resistente a profundidades entre 0 y 40 m	
Que sea cómodo de transportar	Que sea ergonómico. Que no limite los movimientos. Que no limite la visibilidad.
De fácil apertura y cierre	
Que sea fácil de localizar	Colores llamativos.
Resistente	Tracción/compresión. Química: salinidad, alcalinidad o acidez del agua
Múltiples compartimentos	Impermeables. No impermeables.
Flotabilidad	Control de la flotabilidad del nadador: airbag.

Tabla 5.18: Listado de funciones clave del ejemplo caso 2. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.)

Ahora se plantea una alternativa a las tablas biomiméticas, de modo que se estudia cada una de las funciones clave, asociándolas a los objetos o soluciones industriales existentes y a los posibles seres vivos que sean solución (tabla 5.19). Cada una de estas funciones tiene su definición y explica en qué consiste el fundamento del ser vivo y que aplicaciones industriales existen actualmente. Son nueve funciones clave las que se analizan y cuarenta referentes naturales.

Función clave	Solución industrial	Solución natural
Transportabilidad	Tren, camión, avión, barco, furgoneta	Agua (ríos, lluvia,...), viento, glaciar, colada de barro
Sumergible	Submarino, relojes acuáticos, cámaras	Foca, oso polar, pingüino, nutria, cangrejo, rana
Que aguante profundidades entre 0 y 40 m	Submarino, buzo	Ballena, pulpo, medusa, algas, calamar, coral
Que sea cómodo de transportar	Carro de la compra, mochila, riñonera, maleta, cartera, bolso	Bolsa marsupial (transporte del cachorro), pelícano (transporte de comida), nutria (transporte de material para hacer la presa), abeja (transporte de polen), mono (transporte de su cría), pez gato
De fácil apertura y cierre	Bote de conserva, lata abre-fácil, tetrabrik, cremallera, cierre de velcro.	Bivalvo (mejillón, almeja, ostra,...), esfínter: epiglotis, flores, zarigüeya bolsa marsupial se cierra al sumergirse

## ENSAYO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

<b>Función clave</b>	<b>Solución industrial</b>	<b>Solución natural</b>
Colores llamativos	Pinturas, tintes (ropa, pelo,...), fosforescencias (señales de emergencia, pegatinas,...), reflectantes (señales de circulación,...)	Flores, mariposas, manchas de animales (pez payaso), pavo real
Resistencia	Acero/Titanio, Hormigón armado/estructuras metálicas, Chaleco antibalas	Conchas de bivalvos y caparazones, Calabaza, Huevo, Granito, Cáscaras (cocos, almendras, pistachos, nueces,...)
Múltiples compartimentos	Caja de herramientas, Pisos, Cajonera, Mochila con bolsillos	Concha de Nautilus, Célula, Gruta
Flotabilidad	Boyas, Casas y muelles flotantes	Aves acuáticas (patos, gaviotas,...), Insectos acuáticos (tensión superficial), Tiburón y tiburón toro, Calamar gigante, Cachalote

Tabla 5.19: Tabla de funciones clave con aplicaciones industriales existentes y referentes naturales. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.)

Se hace una tabla en la que se indica el grado de oportunidad y de las nueve funciones clave se reduce a cinco que tienen una oportunidad clasificada como alta o muy alta. Este grado de oportunidad es el mismo que se ha analizado en el resto de los casos, siendo cinco una oportunidad muy alta, cuatro se corresponde con alta, tres con media y dos con baja, siendo uno y cero valores que no se tienen en cuenta ya que no aportaran nada y ya estén completamente resueltos, no habrá oportunidad de innovación (tabla 5.20).

<b>Función clave</b>	<b>Grado de oportunidad (sobre 5)</b>
Transportabilidad	0
<b>Sumergible</b>	<b>4</b>
Que aguante profundidades entre 0 y 40 m	1
<b>Que sea cómodo de transportar</b>	<b>5</b>
<b>De fácil apertura y cierre</b>	<b>4</b>
Colores llamativos	0
<b>Resistencia</b>	<b>4</b>
Múltiples compartimentos	2
<b>Flotabilidad</b>	<b>4</b>

Tabla 5.20: Tabla de selección por el grado de oportunidad. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.)

Elegidas estas funciones se hace una nueva búsqueda, con más detalle, de los individuos que pueden ser mejores candidatos para comprender el principio biónico y poder describir el principio ingenieril.

La función sumergible, no suele haber elementos de transporte sumergibles y los que hay son usos improvisados de otros objetos, cuya misión principal no es ésta. Para que el producto sea sumergible se busca el oso polar por su capa de grasa (aislante del frío) y su pelo con grasilla hidrófoba (aislante del agua). También se puede observar a las focas por su capa de grasa (aislante del frío y reserva de alimento) llamada panícula adiposa, sus orificios nasales cerrados en posición de relajación y sus oídos se cierran en contacto con el agua.

La función cómodo de transportar. La innovación es que se adapte al individuo que lo transporta, teniendo en cuenta su peso, fortaleza. Para que el producto sea fácil de transportar se observa la bolsa marsupial por su pliegue de la piel que recubre las mamas y forma una bolsa epidérmica que funciona a modo de incubadora. Los pelícanos por almacenar los peces en su bolsa, transportándolos hacia una zona seca. El pelícano blanco americano es capaz de sostener 11 litros de agua en su bolsa. Los pelícanos más jóvenes, se alimentan cogiendo la comida de la bolsa de sus padres.

La función de fácil apertura y cierre. La innovación es que incorporamos un cierre que impida abrir bajo el agua. Para ello, nos vamos a fijar en la zarigüeya ya que posee una piel densa, grasosa y repelente al líquido, además la hembra carga a las crías en una bolsa impermeable, que al sumergirse cierra la bolsa con su fuerte esfínter y atrapa aire adentro, lo que permite respirar a las crías. También por sus pelos largos que cubren los bordes de la bolsa y las zonas de grasa crean un sello a prueba de agua. La epiglotis, que durante la respiración el velo del paladar desciende, facilitando el libre paso del aire por la faringe, hacia la laringe y la tráquea; la epiglotis permanece levantada en todo momento, el cierre de la laringe ocurre cuando los pliegues vestibulares y vocales se acercan a la línea media durante la deglución.

La función flotabilidad. La principal innovación es que incluiremos una especie de "airbag" que se dispare mediante un tirón ante emergencias, para una rápida ascensión a superficie. Dispondrá de una válvula con la que sacar el aire del compartimento estanco para que no tienda a flotar cuando estemos bajo el agua, o introducirlo si queremos subir. Para esto nos vamos a fijar en el calamar gigante que tiene tendencia a mantener densidades bajas de amonio en relación con el agua de mar, y así mantener la flotabilidad neutra. El tiburón cuyo órgano más grande es el hígado, que viene a remplazar la vejiga natatoria, con él obtiene casi la flotabilidad neutra, que le permite ascender y descender con la misma facilidad con la que lo hacen los peces. El tiburón toro regula su flotabilidad tragando aire, puede cambiar de volumen y ajustar a voluntad su flotabilidad sin necesidad de permanecer nadando para no caer al fondo.

Para ello hacen como los buzos, ajustando su flotabilidad llenando un compartimiento con aire que extraen de su sistema circulatorio, hasta dejar la flotabilidad justa y necesaria para quedar ingravidos. Con estas funciones ya definidas y partiendo de los principios de solución que se presentan en la naturaleza, se plantean las especificaciones de diseño en base a dichas funciones, en la siguiente tabla se puede apreciar un resumen de las especificaciones en relación a las funciones (tabla 5.21).

Función clave	Especificaciones de diseño
Sumergible	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Tratamiento hidrófobo del material</b></li> </ul>
Que sea cómodo de transportar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Forma de mochila</b></li> <li>• <b>Ergonómica</b></li> <li>• <b>Fácil cambio de posición (posterior/anterior)</b></li> <li>• <b>Autosujeción al cuerpo</b></li> </ul>
De fácil apertura y cierre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Cremalleras y velcros</b></li> </ul>
Múltiples compartimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Al menos un compartimento será estanco</b></li> </ul>
Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Resistente a impactos y rozaduras</b></li> <li>• <b>Resistente a la salinidad del agua</b></li> </ul>
Flotabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Airbag para emergencias</b></li> <li>• <b>Posibilidad de regular el aire del compartimento estanco</b></li> </ul>

Tabla 5.21: Tabla de especificaciones de diseño para cada función clave, del ejemplo caso 2. (Imagen: Hernández I., Mairal A., Olivas C.)

Ahora se define el concepto como una bolsa o mochila que sea sumergible gracias a un recubrimiento hidrófobo que se rocía con un spray, con analogía en la grasilla impermeable de la piel del oso polar. Que además será cómodo de transportar, por su forma de mochila ergonómica, similar a la bolsa marsupial, que tiene un fácil cambio de posición (posterior/anterior) según la analogía del pez gato, que nada invertido para capturar alimento y con autosujeción al cuerpo por la analogía: cría del mono que se agarra a la espalda de la madre. Donde existe una fácil apertura y cierre gracias cremalleras y velcros basado en las analogías de la zarigüeya que tiene un esfínter que se cierra dentro del agua y de la epiglotis que separa el aparato respiratorio del digestivo. Estará dotada de múltiples compartimentos, donde uno de ellos será estanco como la bolsa marsupial de la zarigüeya. Tendrá resistencia a impactos y rozaduras como en la cáscara del coco, y resistencia a la salinidad del agua como la tortuga marina que es capaz de eliminar el contenido en sales. Se dotará de flotabilidad como dispositivo de emergencia a modo de airbag para emergencias y a modo de regulación del aire

en el compartimento estanco. Basado en las analogías de la vejiga natatoria de los peces, el hígado del tiburón, el tiburón toro que captura aire en su interior y el calamar gigante.

En el caso 2 no hay ilustraciones o dibujos para representar los conceptos y detalles, por ser un grupo que no integra diseñadores y tener un tiempo más limitado, sin embargo la definición conceptual y las especificaciones llegan a un nivel similar al caso 1.



**CAPITULO 6. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA**



### 6.1 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para comprobar la aptitud del procedimiento propuesto se plantea un sistema doble de validación de la metodología, se contrasta primero mediante un modelo teórico, y en segundo lugar por medio de una encuesta a los diseñadores que la han puesto en práctica, ambas pruebas se relacionan y tienen bloques comunes de modo que se acepta su estructura y su puesta en práctica de modo teórico y práctico. El resultado de ambas validaciones debe ser positivo para dar por probada la metodología. El primer método trata de eliminar los aspectos subjetivos y el segundo de mostrar la aceptación personal.

La prueba de la metodología en su marco teórico se realiza gracias al cuadro de validación de métodos e investigaciones, este se explica con detalle y se marcan los pasos para evidenciar la aptitud del método analizado. La encuesta refuerza los resultados de la aplicación práctica.

La validación permite discriminar los proyectos o resultados satisfactorios respecto de aquellos con menos interés y que no satisfacen los objetivos pre-establecidos, de modo que se puede cuantificar el éxito y la utilidad de la metodología y proceso seguido. Estos resultados menos satisfactorios también son objeto de observación para que de un modo cualitativo se pueda determinar las causas que no han permitido obtener los resultados esperados.

### 6.2 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA MEDIANTE EL CUADRO DE VALIDACIÓN

#### 6.2.1 Descripción del método de validación

Pedersen (2000) y Seeprasad (2006) proponen una forma de probar la validación, "The validation square" que es utilizado de manera general en la validación de métodos y resultados de investigación, y se puede aplicar de manera particular en métodos de diseño donde existen aspectos subjetivos y difíciles de cuantificar.

Este método ha sido utilizado para comprobar otras aproximaciones metodológicas basadas en diseño biomimético o bio-inspirado (Wilson 2008, Messer 2008, Wadia 2011), en las que se persiguen diferentes objetivos de diseño como el diseño robusto, diseño integrado o diseño conceptual.

La validación de la investigación o de nuevos métodos en ingeniería se circunscribe a la tradición de la investigación científica que se basa principalmente en la inducción lógica y / o deducción. Esta tradición exige "validación formal, rigurosa y cuantitativa" (Barlas 1990). Se limita a la resolución de problemas lógicos dado que se basan en modelos matemáticos, por lo que este tipo de validación se utiliza y todavía funciona bien.

Sin embargo, se encuentran problemas en otras áreas de investigación de ingeniería que se basan en declaraciones subjetivas, y en las que es difícil crear una modelización matemática. Este es el caso, la ingeniería de diseño y por ende los métodos de diseño. Por ello es necesario tener algún método de validación de la investigación en diseño en general, y de los métodos de diseño en particular.

Algunos métodos de diseño muestran comportamientos indeseables que se presentan como evidentes cuando se conoce a priori el resultado que deben dar y no lo hacen, por lo que no se pueden generalizar como válidos (Hazelrigg 2003). Casos como el “voice of consumer” método de consulta a los consumidores, el QFD despliegue de la función de calidad, o los métodos de selección por puntuaciones parecen demostrarlo.

Estos métodos mencionados son válidos pero tienen el inconveniente de que en ocasiones no aportan los resultados esperados y reales, siendo necesario aplicar otros métodos. En esta Tesis, la afirmación anterior puede servir para observar los errores y tratar de hacer correcciones para darle validez, conociendo que es aplicable en un determinado marco, no siendo una metodología generalista.

Por otra parte hay que aclarar que si para una determinada propuesta inicial, que es utilizada en varios métodos, se obtienen resultados sustancialmente diferentes, quiere decir que como mucho sólo uno de estos métodos es válido (Hazelrigg 1999). El propósito de comprobar esta metodología es obtener una serie de criterios de aplicación, conocer los requisitos para los cuales esta metodología es útil y efectiva.

Validación se refiere a la existencia de consistencia interna; A lo que es creído, generalmente reconocido y firme, que se puede declarar como válido. Mientras que verificación trata de la justificación de las afirmaciones de conocimiento, de comprobar o examinar la verdad de algo (RAE 2001). Por ello interesa validar la metodología demostrando su consistencia y aplicación útil, en vez de simplemente comprobar que es aplicable. De las afirmaciones anteriores se entiende que hay métodos que han sido verificados como aplicables pero su utilidad no está validada.

Si bien existen métodos que se validan por cuestionarios (Yang 2008), estos solo pueden ser valorados desde la experiencia, es decir necesitan ser puestos en práctica. En esta investigación se plantea el cuadro de validación para evidenciar la consistencia del método en cuanto a la utilidad respecto a un propósito, y por otra parte se plantea la encuesta a diseñadores para evaluar la experiencia.

## VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

En los métodos de diseño se asocia el nuevo conocimiento con la heurística, la indagación y el hallazgo, y con representaciones no precisas de modelos, por lo que la validación de dicho conocimiento se basa en un proceso de crear confianza en su utilidad con respecto a un propósito. Es decir el método debe responder de manera útil a un determinado propósito generando el conocimiento necesario. Así podemos decir que ante un propósito o necesidad pueden haber varios métodos que sean válidos y respondan de manera útil, y entre los que elegir.

Se puede también evaluar el método de manera cualitativa por su eficacia, por ofrecer soluciones correctamente, por la capacidad para generar soluciones y respuestas a ese propósito dado. Y de manera cuantitativa por su eficiencia, por cómo de correctas son las soluciones, definiendo solución correcta como aquellas soluciones de diseño con un rendimiento aceptable, que satisfacen unos criterios evaluables, por ejemplo de cantidad o número, originalidad, novedad, etc.

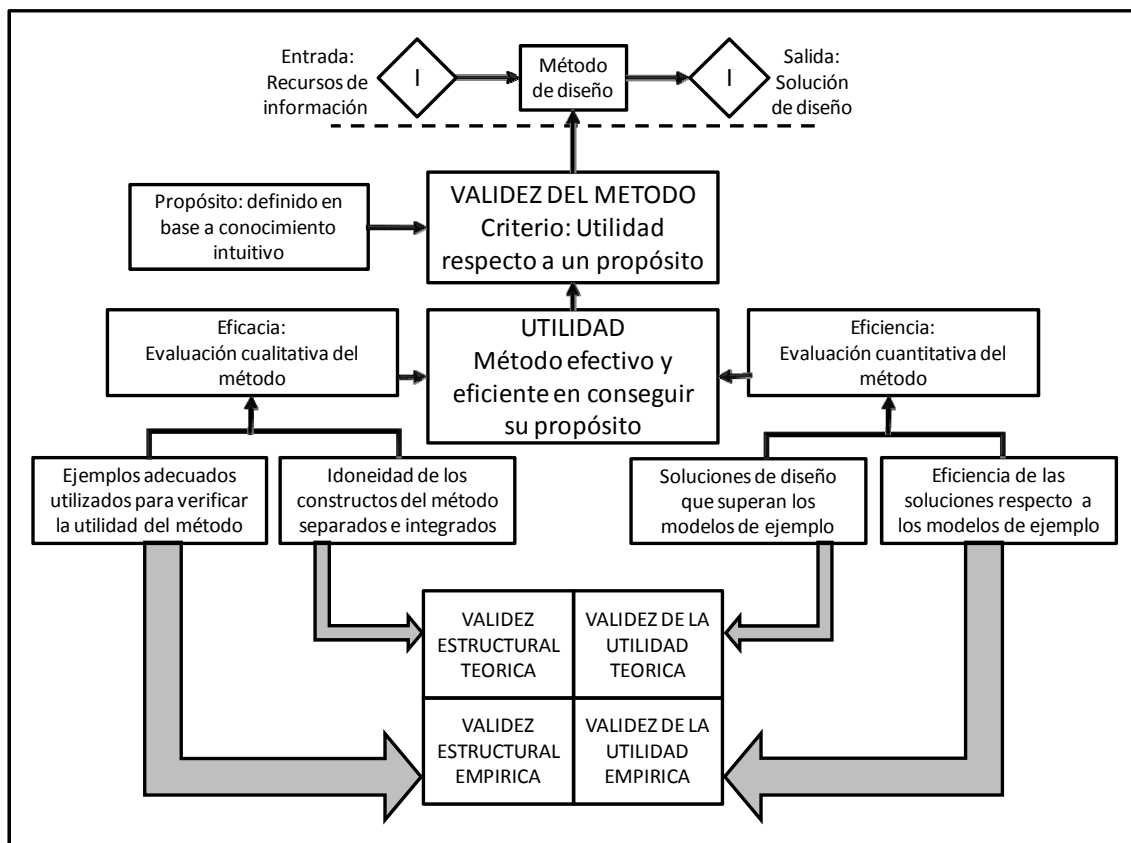


Figura 6.1: Método de validación por medio de "Cuadro de validación". (Pedersen 2000)

La figura 6.1 muestra el cuadro de validación, se observa que un problema puede ser resuelto por un determinado método que genera soluciones de diseño, y es válido por su utilidad respecto a un propósito de una manera eficaz y eficiente.

La efectividad o eficacia del método se evalúa cualitativamente por la validez de su estructura teórica y empírica. La validación estructural teórica implica la aceptación de los constructos individuales que constituyen un método, así como la coherencia interna del conjunto de constructos que forman un método global, siendo un constructo una proposición teórica de algo que sirve para resolver un problema científico determinado. La validez estructural empírica implica que los casos elegidos para ilustrar y verificar el rendimiento del método de diseño son idóneos.

La eficiencia se evalúa por lo que se consigue cuantitativamente en la ejecución, por la validez de su desempeño teórica y empíricamente. La validez de la ejecución empírica se refiere a la confianza generada al utilizar el método en casos prácticos para la consecución de unos objetivos. La validez de ejecución teórica se refiere a aquello que se puede conseguir más allá del caso utilizado como ejemplo, la posibilidad válida de aplicarlo en otros propósitos distintos del ejemplo.

Mientras que la validez teórica puede ser establecida con una extensa revisión bibliográfica, la validez empírica requiere la aplicación de casos apropiados para ilustrar y verificar los métodos de diseño propuestos

### **6.2.2 Validación de la metodología propuesta**

Ahora justificaremos la validación de la metodología propuesta que se evidencia por medio de los casos propuestos en los proyectos vistos en el capítulo anterior. El cuadro de validación nos proporciona una ayuda y guía, demostrando la utilidad del método propuesto respecto a los objetivos predeterminados. Aquí el propósito del método se evidencia en:

- La definición de un marco de trabajo que permita relacionar ambos ámbitos, el natural y el de diseño.
- La determinación de funciones clave que tengan potencial de innovación en relación al problema propuesto.
- Identificar principios biológicos que sean extrapolables y traducidos a principios de ingeniería para su posterior inclusión en productos.
- La definición conceptual de productos que incorporan esas funciones clave por medio de especificaciones concretas de diseño.

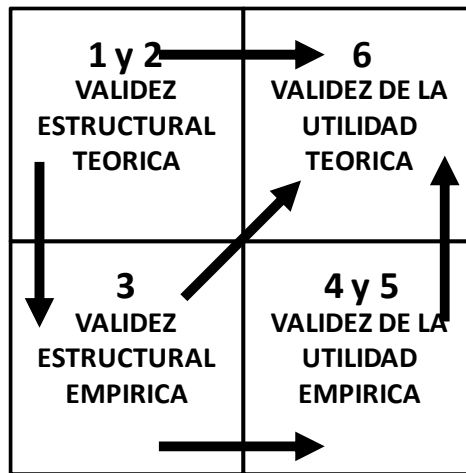


Figura 6.2: Cuadro de validación para validar un método de diseño. (Pedersen 2000)

En la figura 6.2, los números del 1 al 6 representan los argumentos necesarios para aceptar el método propuesto, por lo tanto, para ser considerada como válida la metodología propuesta se debe proporcionar evidencia de qué permite hacer al diseñador (Pedersen 2000). Se debe validar los cuatro aspectos y sus 6 supuestos, los supuestos 1 y 2 permiten validar el supuesto 3, el 3 permite validar el 4 y 5, para validar el supuesto 6 es necesario validar 1, 2, 3, 4 y 5.

<b>Estructura (cualitativo)</b>	<b>Validez estructural teórica</b>	1. Aceptar la validez de los constructos individuales que constituyen el método. 2. Aceptar la estructura y el modo en que se agrupan dichos constructos para formar la metodología propuesta.
	<b>Validez estructural empírica</b>	3. Aceptar la pertinencia de los ejemplos utilizados para verificar el funcionamiento del método.
<b>Aplicación (cuantitativo)</b>	<b>Validez de aplicación teórica</b>	4. Aceptar que los resultados de este método son útiles en relación al propósito inicial de un ejemplo elegido. 5. Aceptar que la utilidad conseguida está vinculada a la aplicación del método.
	<b>Validez de aplicación empírica</b>	6. Aceptar que la utilidad del método va más allá de los casos de ejemplo.

Tabla 6.1: Correspondencia entre los aspectos a validar y los supuestos a aceptar

En la tabla 6.1, los argumentos 1, 2 y 3 se evalúan mediante un examen cualitativo de los constructos individuales del método y forman la base de la validación estructural del método. Los argumentos 4, 5 y 6 se evalúan utilizando indicadores cuantitativos para examinar los resultados de los casos estudiados y forman la base de la validación del rendimiento del método.

### **6.3 VALIDACIÓN ESTRUCTURAL. ARGUMENTOS 1, 2 Y 3**

La metodología propuesta está estructurada según métodos y herramientas existentes en diseño industrial, así como variaciones y nuevas propuestas. Las existentes son el briefing de diseño o redacción de la propuesta que como ya se ha comentado se vincula a la definición del marco de trabajo; El análisis funcional y los mapas mentales relacionados para hacer una herramienta creativa en busca de funciones clave con potencial de innovación; Y por último el diseño conceptual basado en las especificaciones de diseño. Además se incluye la tabla de referentes biomiméticos cuya utilidad es la de encontrar principios biológicos que sean solución para las funciones clave y hacer su traducción en principios ingenieriles, basado principalmente en las analogías y justificado por conocimientos de biología, así como de física, química, mecánica, ciencia de los materiales, etc.

#### **6.3.1 Aceptar la validez de los constructos individuales que constituyen el método.**

Para poder dar validez estructural se hace referencia a las descripciones de los métodos en anteriores capítulos, de metodología de diseño y de diseño biomimético, donde se ha realizado una profunda revisión bibliográfica y se muestra la justificación de cada uno de los métodos. También es necesario mostrar que es válida la estructura del modelo propuesto y la relación entre los distintos métodos, justificando su consistencia. Y por último se revisan los casos de ejemplo para probar la utilidad de la metodología para unos objetivos predeterminados. Cada método utilizado en el modelo propuesto se revisa por su base teórica, validez y utilidad.

##### **6.3.1.1 Briefing de diseño**

El briefing de diseño se utiliza en esta metodología como una herramienta que nos sirve para establecer el marco de trabajo, para definir los requisitos básicos de proyecto y el vínculo entre el campo de actuación en diseño industrial y el ámbito natural.

Tal y como se presenta en esta metodología, vemos que no solo es de común acuerdo la necesidad de establecer un brief de diseño, sino que hay bibliografía que así lo demuestra a lo largo del tiempo hasta la actualidad, se puede citar a las escuelas de Ulm y la Bauhaus, autores que han establecido modelos como Asimow (1962), Archer (1965), Jones (1970), Munari (1979), French (1985), Pahl & Beitz (1995), Roozenburg & Eekels (1995), o bien referencias teóricas como Alexander (1964), Shu (1990), Jones (1984), e incluso está definido en normativa como la VDI 2221 (2008) o el estándar Británico BS 7000 (2008).

En los proyectos realizados se observa que la primera fase del proceso de diseño es la definición de la necesidad, el planteamiento del problema. Durante esta fase, se realiza una investigación con el fin de analizar la situación, las oportunidades, las opciones de mejora y las necesidades. A continuación, se establece una meta por medio de una especificación funcional, destacando las posibilidades técnicas. Esta especificación funcional nos enmarca el trabajo futuro, define los objetivos a conseguir y en la metodología propuesta nos define un marco de trabajo y la relación entre exoesqueletos y carcasas de productos.

### **6.3.1.2 Análisis Funcional**

Como ya se ha explicado en el capítulo de metodología de diseño, existen múltiples referencias respecto al uso y validez del análisis funcional, incluso se citan nuevos métodos desarrollados en los últimos años (Lambert 1999, Sivaloganathan 2001). El análisis funcional tiene una aplicación muy válida en su componente de entender el funcionamiento y uso del producto, pero tiene aun más potencial en la componente de construcción del objeto. Es importante señalar que una función es una representación abstracta de la tarea del sistema, y es independiente de los conceptos de solución específica, una misma tarea se puede conseguir de diferentes modos. Para sistemas complejos, la tarea global a menudo se puede descomponer en sub-funciones conectadas (Palh & Beitz 1995), bien en ramas como los diagramas/esquemas funcionales y árbol de funciones, o en conexiones más abstractas como las presentadas en esta Tesis en los mapas mentales. Al ser una representación abstracta, lógica y repetible de un sistema, la representación funcional puede ayudar específicamente en el proceso de diseño con respecto a la generación de ideas (Chandrasekaran 1993).

Al investigar sobre la validez del método se debe cuestionar su capacidad de aplicación y utilidad, por ser aplicado por varios grupos y con resultados similares e incluso comunes. Las pruebas experimentales han demostrado que, dado el método estructurado de representación funcional por medio de mapas mentales, los diseñadores pueden producir diferentes representaciones con similitudes, y que en diferentes grupos se obtienen resultados comunes (repeticiones). La repetitividad es un factor que evidencia la validez del método. Es importante señalar, que tener un método estructurado de representación funcional que mejora la repetitividad evidencia su valor para ser utilizado por diferentes diseñadores.

En esta investigación, el método de representación funcional en forma de mapas mentales permite hacer una búsqueda de funciones diferenciadas y con potencial de innovación, por medio de representaciones abstractas en las que hay conexiones que se transforman y muestran alternativas a las funciones, que se observarían por medio de un análisis funcional tradicional.

La simplicidad de la representación, la diversidad y la posibilidad de encontrar representaciones similares por distintos diseñadores evidencian su utilidad y aplicación.

#### **6.3.1.3 Mapas Mentales**

Los mapas mentales están bien definidos en la literatura científica como una herramienta o método creativo para la generación y organización de ideas, con aplicación en múltiples campos como la ingeniería y el diseño (Parveen1998), marketing (Anderson 1993), estudios sociales y aprendizaje (Fun 2010) e incluso la biotecnología (Adams 2009). Del mismo hay evidencias de su utilización como herramienta combinada con otras con aplicación en innovación y generación de nuevos conceptos (Jones 2001, Tan 2010).

Las conexiones entre partes de información o conocimiento, de diferentes ámbitos, pueden estimular la creatividad al ser destacadas por la agrupación de la información en un mapa visual. Las funciones que se buscan se pueden conectar y asociar con otras para completar y mejorar un producto y en ocasiones pueden compartir estructura, es decir, conseguir nuevas funciones de componentes que ya existen.

La asociación juega un papel dominante en casi todas las funciones mentales, cada idea tiene numerosas conexiones hacia otras ideas y conceptos, los mapas mentales son un método eficaz de visualización, y es útil en la generación de ideas por medio de asociaciones (Buzan 1991, 1993). Los mapas mentales son actualmente una técnica bien establecida y puede ser utilizada como una poderosa representación gráfica de los resultados de las sesiones creativas.

#### **6.3.1.4 Diseño Conceptual**

El diseño conceptual y la definición de la estructura de funciones son elementos fundamentales en los modelos de diseño por fases (Roozenburg & Eekel 1995). En la literatura actual, referida a investigación en diseño, son fases íntimamente ligadas donde las funciones especificadas definen un concepto único que puede ser desarrollado en alternativas o varios conceptos con unas especificaciones comunes, por ejemplo por medio del análisis morfológico (Zwicky 1969). El análisis morfológico relaciona los requisitos funcionales con opciones conceptuales, si estos requisitos funcionales son resueltos por medio de soluciones biomiméticas nos encontramos con un método en el que la generación de conceptos está bioinspirada. En un enfoque clásico de diseño transformado a biomimético, el diseñador sigue un método sistemático y utiliza estrategias biológicas en la búsqueda de soluciones. Tomando como base un modelo por fases como el método de Pahl y Beitz, dividido en cuatro etapas: planificación, Diseño Conceptual, Diseño de desarrollo, y de Detalle, la fase de especial interés es el diseño conceptual.



El diseño conceptual está ampliamente validado, ha probado su aceptación y aplicación, y es un método citado por todos los autores que trabajan en investigación de diseño e investigación de métodos. El objetivo de la fase de diseño conceptual es que el diseñador determine el principio de solución, la idea de producto o concepto. El diseñador cuenta con especificaciones que pueden ser generadas por medio de soluciones alternativas a las ya conocidas, por medio de soluciones extraídas de la naturaleza.

### **6.3.1.5 Tabla de referentes biomiméticos**

Por último en cuanto a los constructos individuales se incluye la tabla de referentes biomiméticos cuya utilidad es la de encontrar principios biológicos que sean traducidos en principios ingenieriles. Esta tabla sitúa las funciones clave como elemento de partida y hace “preguntas biologizadas” (Gruber 2010) en búsqueda de los mejores candidatos. Estas preguntas se relacionan con la definición de atributos, utilizada en algunos métodos de diseño conceptual, las preguntas matizan la función clave que se busca y tratan de hacer una traducción de la necesidad o requisito que puede tener el producto traduciéndolo en términos de biología. Las respuestas a estas preguntas dan como resultado el descubrir candidatos en el ámbito natural que realizan dicha función por completo o en parte. Una vez que se tienen candidatos con principios biológicos que pueden ser solución, se realiza la traducción al principio ingenieril. La traducción al principio ingenieril ha sido descrita en diferentes metodologías evidenciando la validez de este método.

Desde un punto de vista más abstracto se puede afirmar que estas aproximaciones para pasar de la función clave al individuo natural y del principio biológico al ingenieril están basadas principalmente en la sinéctica y las analogías. Siendo la sinéctica (Marín 1991) un método para convertir lo usual en extraño, para buscar enfoques insólitos, puntos de vista antes no contemplados, para lo que se recurre a las analogías, a la semejanza, a relacionar lo presente con otras cosas remotas, sorprendentes y hasta imprevisibles. La sinéctica y la analogía ha sido utilizadas por grupos de investigación para mejora del campo empresarial, industrial, y comprometidas con la innovación tecnológica.

### **6.3.2 Aceptar la estructura y el modo en que se agrupan los constructos individuales.**

En este apartado se analiza la forma en que los diferentes métodos se combinan para formar la metodología propuesta. El énfasis está en la revisión de la estructura interna de la metodología, la verificación de la coherencia de los flujos de información dentro de la estructura, y confirmación de que las construcciones individuales se utilizan adecuadamente. Una visión general de la metodología propuesta se presenta en la figura 6.3.

En términos de estructura podemos decir que la metodología presenta ciertas características de interés. La primera es que al igual que otros modelos por fases está organizada secuencialmente y las fases están interrelacionadas. Segundo, es coherente con las metodologías tradicionales, vistas en capítulos anteriores. Tercero, utiliza métodos conocidos y contrastados, algunos se han transformado para una mejor aplicación e incluye algunos nuevos. Cuarto y último, los métodos están vinculados, los resultados de los primeros condicionan y permiten el comienzo de los siguientes.

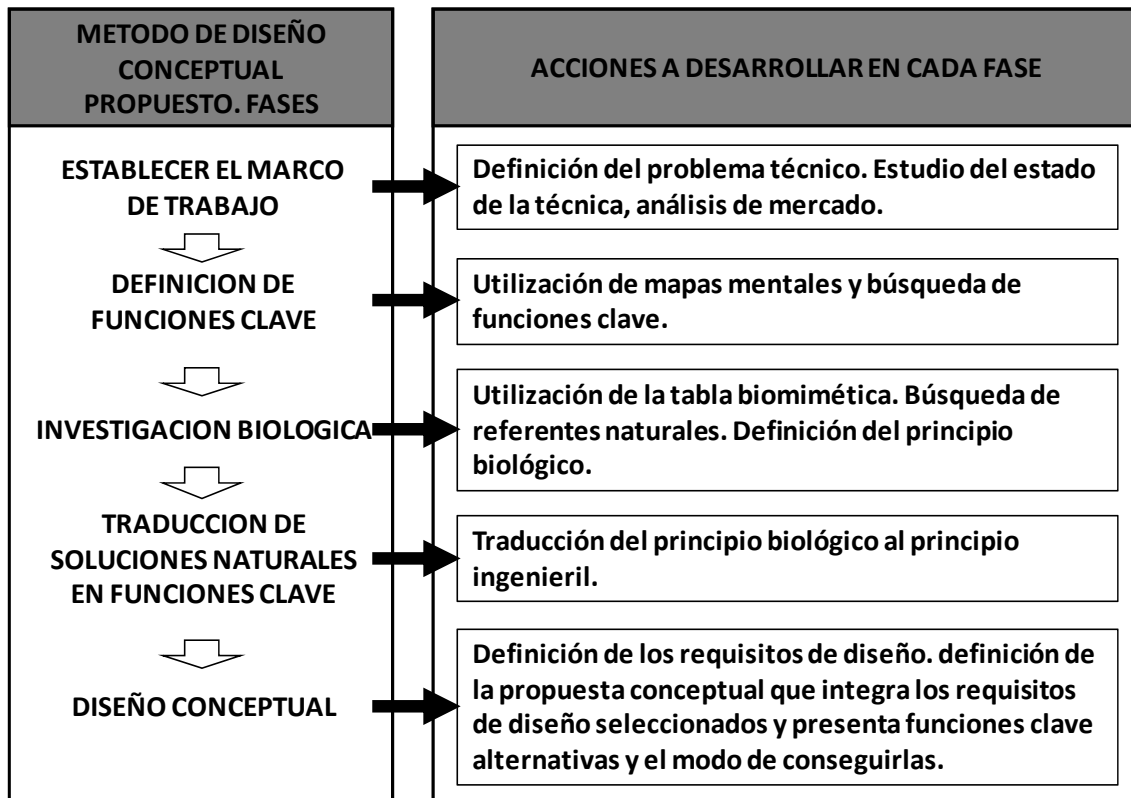


Figura 6.3: Metodología de diseño conceptual propuesta y acciones a realizar en cada fase.

La forma en que se ha secuenciado la metodología, y que justifica el orden de las fases, se debe a dos motivos. Primero, tomar como base metodologías probadas y validadas, y segundo obtener un resultado efectivo en la consecución de los objetivos iniciales, encontrar funciones novedosas y alternativas de manera aislada, que referenciadas a una solución natural son implementadas en nuevos conceptos de producto. La metodología desarrolla un proceso que acota el campo de trabajo encontrando soluciones originales por medio de funciones de interés, que ya estén resueltas en la naturaleza y generan novedades conceptuales, este proceso estructurado es fluido y tiene vínculos entre sus fases.

La metodología manifiesta el proceso para el cual cada fase ha sido adaptada para obtener un resultado óptimo en el inicio de la siguiente fase y óptimo en el conjunto de la metodología. También es de destacar que cada una de estas fases con su adaptación se puede utilizar de manera aislada, como se ha mostrado en los trabajos parciales que evidencian la validez de cada método. La utilización de los métodos de manera aislada ha puesto en práctica para corregir las transformaciones realizadas respecto de los métodos tradicionales.

Los métodos o herramientas que son novedosos y que se han introducido como nuevos en el proceso tradicional, se validan del mismo modo, por medio de práctica y experimentación. En el caso de la tabla biomimética se comienza en una columna de objetivos, otra de atributos que ha de tener el producto y una final de individuos naturales, pero al experimentar con ella se ha descubierto que era más adecuado transformar estos objetivos en funciones concretas que después pudieran ser implementadas en el objeto a diseñar, más tarde se han definido como funciones clave y se vincularon a un determinado campo de trabajo que se describe en una fase previa.

### **6.3.3 Aceptar la pertinencia de los casos utilizados para verificar el funcionamiento del método.**

Para validar esta metodología se han realizado dos tipos de trabajos. Los que utilizan parcialmente la metodología, que se han obtenido 22 casos, y trabajos que utilizan la metodología de forma global de los que se han realizado 13 casos. También se han efectuado 41 ejercicios que sirven para comprender la metodología por medio de resultados reales de proyectos biomiméticos existentes. Además, previamente, se desarrollaron proyectos que ponían en práctica una aproximación a la metodología, y que sirvieron para poder ajustarla y mejorarla, estos proyectos han sido promovidos por el propio investigador, o han sido trabajos académicamente dirigidos por el investigador.

Se ha evidenciado con los casos presentados dos aspectos de la metodología, el primero es que ha demostrado efectividad en la consecución de unos objetivos preestablecidos, es decir, la capacidad de utilizar el método en diferentes proyectos, como la aplicación para una carcasa de uso alimentario, para aplicaciones submarinas o entornos externos agresivos. El segundo es mostrar la utilidad, entendida como el valor que se genera como resultado de su aplicación, se han encontrado funciones clave alternativas que de otro modo hubiera sido difícil de hallar, y además se aportan soluciones originales basadas en cómo se resuelven en la naturaleza. Por ello los casos analizados muestran que el método se puede aplicar parcial o totalmente y que arrojan resultados útiles.

#### **6.4 VALIDACIÓN DE LA PUESTA EN PRÁCTICA. ARGUMENTOS 4, 5 Y 6**

Este apartado evalúa la eficiencia por cómo se aplica y desarrolla en casos concretos y cuáles son los resultados obtenidos tras haber aceptado la validez estructural del método parcial y globalmente, y por los ejemplos utilizados en los casos.

El análisis de estos resultados también revela cómo los principios de diseño biomimético pueden inspirar nuevas y eficaces soluciones para los problemas de ingeniería. De acuerdo a este análisis puede ser aceptada la validez del rendimiento de la metodología propuesta. A continuación se expone la aceptación de la validez de la metodología respecto a su eficiencia.

##### **6.4.1 Aceptar la utilidad del método en relación al propósito inicial.**

Aceptar la utilidad del método está condicionado a los resultados de su aplicación, el fin de un nuevo modelo de diseño puede variar según su enfoque, si es industrial el propósito suele estar vinculado a la mejora, la innovación, reducción de costes, incremento de la calidad, etc. Desde una perspectiva académica, el objetivo es ampliar los conocimientos que pueden ayudar a producir nuevo conocimiento científico.

El método propuesto se plantea para que industrialmente se aporten nuevas ideas y soluciones alternativas que conceptualmente superen lo existente, pretende generar innovación, sabiendo que estos conceptos deben ser desarrollados y detallados. Académicamente aporta un nuevo proceso creativo vinculado a la búsqueda de soluciones en la naturaleza, diferenciándose de otros porque no se ciñe el proceso de diseño a un problema concreto sino a un problema abierto que se puede solucionar de varias maneras y aplicable a varios diseños.

Para evidenciar la utilidad del método, se propone una comparación de los resultados respecto al propósito inicial, establecer si se han logrado los objetivos. Entendiendo el propósito inicial como la definición de funciones clave con cierto grado de potencial para conseguir innovación, encontrar seres vivos que puedan ser principio de solución para dichas funciones y que estas sean aplicables como requisitos de diseño en diseño conceptual.

Se plantean dos verificaciones. Primero, se puede decir que el método es útil si permite plantear soluciones alternativas a objetos o productos existentes, es decir, la solución propuesta es mejor que la existente, si hace algo de un modo mejor. Segundo, se puede decir que el método es útil si se soluciona un problema aun no resuelto, que es más difícil o complejo que los ya resueltos, si hace algo más; Esto quiere decir que se plantean especificaciones que aún no se integran en los productos actuales.

Se han encontrado una serie de funciones definidas como clave que no se encuentran en productos existentes, ver la tabla 6.2. Estas funciones se han analizado respecto a seres vivos que ya las cumplen, y se han definido en las tablas biomiméticas. También se han traducido en forma de requisitos de diseño para hacer el diseño conceptual. Por todo ello podemos decir que en todos los aspectos la metodología alcanza los objetivos iniciales.

En la tabla 6.2 se analiza el caso de hermético para inmersiones o sumergible. En el mercado existen bolsas sumergibles para guardar pequeños objetos, como dispositivos electrónicos, pertenencias personales, cámaras, entre otros, pero no existen bolsas o mochilas sumergibles, las encontradas son impermeables y estancas, no tienen la funcionalidad de ser sumergibles. Se observa en la tabla además que se plantean varias funciones no existentes y otras que se resuelven de un modo alternativo.

En el estudio de mercado se encuentran algunas bolsas impermeables y estancas, de las marcas Seac Sub, Tecnomar o Beaver entre otras, pero ninguna describe la característica de sumergible o de hermético. En la búsqueda de patentes se encuentran algunas patentes, de todas las épocas, en las que se presentan soluciones estancas y herméticas pero todas ellas presentan cierres o contenedores rígidos, en el caso de cierres herméticos flexibles se presentan en objetos de pequeño tamaño como los encontrados en el mercado y citados previamente. Todas ellas tienen un cierre estanco pero no hermético, en el diseño conceptual de dos de los proyectos se plantean soluciones para poder hacer el contenedor o bolsa hermética, y por tanto sumergible.

En la tabla 6.2 se observa que las propuestas de los proyectos hay formas de hacer algo mejor, se plantean soluciones alternativas, la flotabilidad regulada, el airbag de emergencia, la resistencia a los impactos o la reducción de espacio; Y por otra parte se hace algo que aun no se había planteado, se soluciona un problema técnico aun no resuelto que es el de tener un contenedor flexible y sumergible con la característica de hermético.

Con los resultados de la tabla 6.2 podemos validar el método respecto a la consecución de un propósito inicial.

		Proyecto 1. Bolsa para actividades subacuáticas y natación		Proyecto 2. Mochila para actividades acuáticas, rafting, barranquismo, espeleología, etc.	
Sacos y bolsas del mercado. Seac Sub, Tecnomar, Beaver.		Solución técnica	Solución natural	Solución técnica	Solución natural
Solución alternativa (hace algo mejor)	Estanco	Resuelto con un cierre de varias vueltas	Cierre hermético de los bivalvos	Solucionado parcialmente, indefinido técnicamente. Basado en cremalleras y velcros que soporten presión	Zarigüeya que tiene un esfinter que se cierra dentro del agua. La epiglottis separa el aparato respiratorio del digestivo
	Hermético	No resuelto			
Solución a un problema aun no resuelto (hace algo más)	Contenedor flexible	Resuelto gracias al material	La característica de elástico se obtiene de la bolsa del pelicano	Resuelto gracias al material	Basado en la bolsa marsupial de la zarigüeya, las crías son transportadas en su interior adaptándose el volumen.
	Airbag (seguridad)	No planteado		Incluiremos una especie de "airbag" que se dispare mediante un tirón ante emergencias, para una rápida ascensión a superficie.	Vejiga natatoria de los peces. Tiburón toro acumula aire en su interior para ascender
	Flotabilidad regulada	No planteado	No planteado	Dispondrá de una válvula con la que sacar el aire del compartimento estanco para que no tienda a flotar cuando estemos bajo el agua, o introducirlo si queremos subir.	Calamar gigante y la regulación de amonio. El hígado del tiburón sustituye a la vejiga natatoria de los peces por ser un órgano muy grande y graso que le dota de flotabilidad casi neutra. El tiburón toro regula su flotabilidad tragando aire. Y en general la vejiga natatoria de los peces.

Resistencia a impactos	Resuelto parcialmente por la selección del material, PVC reforzado	Resuelto por medio de una doble envolvente, capa interna de PVC flexible y capa externa resistente a la corrosión, impactos, roces, etc... con tejido hidrofóbico para secado rápido	Sin referente natural definida claramente, solo se indica que puede ser como en exoesqueletos flexibles, carcasas resistentes, como en los bivalvos o escarabajo Hércules.	Parcialmente resuelto. Resistencia química, aplicarle un tratamiento contra la salinidad del agua del mar Resistencia mecánica, superficie exterior resistente a impactos y rozaduras	La tortuga marina, tiene una glándula que le permite secretar el exceso de sal del cuerpo. El coco, su fibra de la cascara es resistente al agua marina y se emplea para cables y aparejos de naves, hacer mantas, bolsos, etc.
Reducción de espacio	No planteado	Resuelto por medio de envolvente flexible que se puede comprimir y gracias a una válvula antiretorno se puede evacuar el aire interior	Espiráculo de delfines y ballenas, cierre hermético que se abre solo en una dirección para liberar la diferencia de presión.	Parcialmente resuelto. Se plantea una adaptación del volumen interior en el sentido de mejorar la ergonomía y adaptación del producto al usuario.	La bolsa marsupial en un pliegue de la piel que recubre las mamas y forma una bolsa epidérmica que funciona a modo de incubadora. Los pelícanos no almacenan los peces en su bolsa, la adaptan para transportarlos hacia una zona seca, y tragárselos

Tabla 6.2: Comparación de productos existentes y productos conceptualizados

#### **6.4.2 Aceptar que la utilidad conseguida está vinculada a la aplicación del método.**

Para evidenciar que la utilidad se vincula a la aplicación del método es necesario demostrar que las soluciones conseguidas se deben a su puesta en práctica, y que su contribución difícilmente se hubiera obtenido por otros métodos, tanto por la definición de funciones clave como por la propuesta de soluciones provenientes de la naturaleza.

Por tanto, demostrar la utilidad del método para conseguir unos objetivos se vincula a la aplicación del mismo en la definición del marco de trabajo, la determinación de funciones clave con potencial de innovación, la identificación de principios biológicos que sean posibles soluciones, y la definición conceptual de productos que incorporan esas funciones clave por medio de especificaciones concretas de diseño.

En un proceso de diseño tradicional, el brief de diseño está acotado y tiene unas especificaciones y objetivos concretos. En el método propuesto, el marco de trabajo se puede ampliar o reducir, pueden surgir nuevas especificaciones no existentes a priori, ya que en este marco no se trata de resolver un problema técnico concreto de un objeto sino uno genérico cuya solución sea aplicable a varios objetos. Se consigue de este modo explorar alternativas que no se plantean con los métodos tradicionales, y se evidencia en algunos de los proyectos en los que los diseñadores han analizado los tres marcos de trabajo previamente a su elección, ampliando el espacio de diseño o definen una necesidad a resolver concreta, reduciendo este espacio. También se observa que es posible hacer un cambio de marco de trabajo, ya que el punto de partida lleva a plantear unas funciones clave que pueden ser interesantes en otro marco propiciando el cambio, como se vio en uno de los proyectos que analiza y propone funciones para el marco de hermético para entornos agresivos, y pasan al marco de uso alimentario, caso que no se hubiera dado con un método tradicional.

En el apartado anterior ya se ha descrito que aparecen funciones que difícilmente se hubieran sugerido por otros métodos, la aplicación de los mapas mentales aporta novedad y originalidad, además de un incremento en el número de funciones propuestas. Si partiendo de un objeto realizamos su análisis funcional determinamos un número de funciones, de las que una de ellas es la que le da la característica de hermético, sin embargo aplicando el mapa mental para la característica de hermético podemos encontrar otras funciones y describir qué hacen o cómo lo hacen. En los proyectos realizados se hace un recuento de las funciones clave con un mínimo de 3 y un máximo de 8 funciones clave que se estudian en detalle, pero se llega a tener hasta un máximo de 17 propuestas, número muy elevado para ser alcanzado por otros planteamientos.



Podemos considerar válido el método de la definición de funciones por medio de mapas mentales, puesto que para un problema técnico asociado a una función se plantean varias formas de resolverlo, e implica cierta novedad en las propuestas.

Las tablas biomiméticas han aportado nuevas formas de conseguir las funciones clave. En los proyectos desarrollados se observa que, gracias a las cuestiones formuladas para una misma función se proponen alternativas de cómo se debe conseguir, además de encontrar varios seres vivos capaces de ser solución, por ejemplo la capacidad de cierre hermético se ha detectado en varios seres vivos y proyectos, y se consigue por medio de un esfínter, el cierre de un bivalvo, la epiglotis, etc. En uno de los proyectos se han determinado 50 referentes naturales, normalmente se obtienen más de 20, y aproximadamente unos 5 por cada función que se cuestiona, esto indica el potencial de encontrar nuevas respuestas, y como se ha visto en el estudio de mercado y búsqueda en patentes, supera en número a las soluciones que se han encontrado por medio de técnicas de análisis y creatividad de los métodos tradicionales.

En el apartado anterior ya se ha explicado la utilidad del método para el diseño conceptual, ahora se vincula dicha utilidad a la aplicación del método. Se analiza el hecho de llegar a conceptos que no se habrían planteado por métodos habituales, en primer lugar se puede afirmar que en un proceso tradicional las especificaciones de salida definen el concepto por una serie de atributos o especificaciones funcionales, y los métodos creativos utilizados plantean las soluciones conceptuales. En esta metodología propuesta el diseño conceptual no se describe desde el inicio sino tras la realización de la tabla biomimética en la que se obtienen diversidad de soluciones, de las que se eligen y desarrollan algunas con su principio ingenieril para definir las especificaciones de dicho diseño conceptual, de este modo, a priori no se conocen las especificaciones del objeto a diseñar, tan solo se conocen los principios de solución, y de la combinación de estos se plantean los diferentes conceptos.

Esta metodología implica que en la definición conceptual no hay especificaciones de diseño iniciales, que algunas especificaciones se expresan con más de un principio traído de la naturaleza, y que es la combinación de éstas las que definen los conceptos, por tanto los resultados obtenidos tienen una configuración distinta a la que se obtiene por otros métodos.

### **6.4.3 Aceptar que la utilidad del método va más allá de los casos y proyectos de ejemplo.**

En el capítulo anterior se han mostrado diversos ejemplos de aplicación de la metodología, de forma parcial y global, validando en los apartados anteriores la bonanza de la misma a nivel estructural y empírico. Es necesario probar que se puede generalizar y que va más allá de los casos vistos, siendo aplicable en otros marcos y para otros requisitos.

No existe probada evidencia empírica sobre la aplicación y aportación de métodos basados en biomimética a la definición de funciones y traducción a requisitos de diseño para el diseño conceptual, pero sí que existe para la aplicación ingenieril de algunas soluciones naturales, como se ha visto en el caso de los ejercicios basados en casos reales.

El objetivo se ha cumplido, ya que se utilizan métodos que demuestran ser validos junto a otros que ya han probado serlo, en este trabajo se muestra el beneficio de utilizar la biomimética para explorar y ampliar el espacio de trabajo del diseñador, encontrando nuevas funciones solucionadas por seres vivos que dan como resultado nuevos conceptos de diseño, o conceptos que tienen nuevas funcionalidades.

Ante la cuestión, ¿es posible su aplicación en otros proyectos? Puede afirmarse que sí, y así se ha mostrado en las respuestas a la encuesta que se presenta más adelante en este capítulo. También se puede contestar afirmativamente que sí, dado que una de las condiciones del proyecto es que la metodología se utiliza de manera prospectiva, aplicando métodos exploratorios que reúnen un conjunto de análisis y estudios sobre las condiciones técnicas, científicas, biológicas y de uso de un concepto futuro con el fin de anticiparse a ello en el presente, de ahí su carácter innovador.

Se afirma que los métodos para ayudar a los diseñadores en la expansión y exploración de su espacio de diseño pueden producir mejores diseños. Los resultados muestran que la investigación biológica que incluye la descripción de los principios biológicos ayuda a ampliar el espacio de diseño, y a generar soluciones ingenieriles alternativas y especificaciones de diseño distintas de las existentes.

En este sentido la utilización de un marco de trabajo que relaciona ambos campos, naturaleza y técnica, de manera genérica permite encontrar vínculos que amplían ese espacio de diseño. Se ha mostrado aquí la relación entre carcasas y exoesqueletos, pero es factible su aplicación a nuevas relaciones, y siempre que exista un vínculo entre los dos ámbitos se podrá establecer la relación. Existen evidencias de estudios en este sentido, por ejemplo músculos y actuadores (Bar Cohen 2006), sin embargo estas aproximaciones están caracterizadas por ser demasiado ingenieriles y poco orientadas al diseño.

La utilidad del método va más allá de los casos analizados ya que resulta útil para resolver problemas técnicos que puedan tener un símil en la naturaleza, y además son extrapolables a diferentes entornos, el problema técnico de hermético se plantea en tres ámbitos alimentario, entornos agresivos y submarino, pero puede ser aplicado a otros distintos como por ejemplo carcasas de productos industriales, juguetes, ocio, micro-electrónica, electrodomésticos, etc.

También porque varias soluciones naturales pueden satisfacer un mismo problema técnico, hay muchos candidatos y con alternativas como se ha visto en los ejemplos, con la particularidad de que un solo individuo puede además ser solución para varios problemas técnicos, y que de este modo pueda ampliar el marco de trabajo.

Una derivación de esta última afirmación es que en muchos de los proyectos se han aplicado soluciones que no están relacionadas con la característica de hermético ampliando de nuevo el espacio de diseño, se puede hacer una reutilización de las soluciones del individuo. Y por último es útil ya que la abstracción del principio biológico al principio ingenieril puede ser mayor o menor, conduciendo a copias de las soluciones naturales o simples inspiraciones, como ya se ha mostrado en el gráfico 4.14 del capítulo 4 de metodología propuesta.

La utilidad del método va más allá de los casos analizados y resulta útil para un mayor número de soluciones, que por conocimientos de ingeniería, diseño y aplicación de técnicas de creatividad se obtendrían, y se amplía por las ideas que la observación de la naturaleza aporte. Además las soluciones naturales se abstraen por medio del principio biológico, y pueden ser estudiadas con más o menos detalle ya que dependerá de los conocimientos de quien ponga en práctica la metodología y de la documentación e información con la que cuente. Es útil porque las soluciones naturales se pueden evaluar respecto a las soluciones existentes en el estado de la técnica, y aplicarlas o no, dependiendo de su novedad y aportación.

**6.5 SUMARIZACION DE LA VALIDACIÓN POR MEDIO DEL CUADRO DE VALIDACIÓN**

Una vez validada la metodología por medio del cuadro de validación se puede discriminar los proyectos o resultados satisfactorios, respecto de aquellos con menos interés y que no satisfacen los objetivos pre-establecidos, de modo que se puede cuantificar el éxito y la utilidad de la metodología y proceso seguido. En la tabla 6.3 se muestran los resultados.

		Seguir el método			Observaciones
		Igual	Aproximado	Distinto	
Estructura	Teórica	11	1	1	Tan solo dos grupos no siguen el método propuesto
	Empírica	5	7	1	Los cambios producidos son menores y siguen el método planteando alternativas
		Obtener resultados			Observaciones
		Validos	Medios	No validos	
Aplicación	Teórica				En general se considera aplicable, no hay impedimentos
	Empírica	9	2	2	En general se consiguen los resultados esperados

Tabla 6.3: Sumarización de los resultados según la aplicación del cuadro de validación.

En la tabla 6.3 tanto por su estructura como por su aplicación el método ha sido útil en los proyectos realizados. De manera general se puede decir que la estructura es adecuada y aplicable, aunque se observan modificaciones en algunos proyectos, estas modificaciones se asocian a la unión de fases o pequeños cambios en la tabla biomimética, como ya se ha comentado en el capítulo anterior, estos cambios son para acomodar las búsquedas y para referenciar la función clave a un objeto existente y a los principios de solución de la naturaleza, sin que esto afecte a los resultados obtenidos. Respecto a la aplicación teórica no se puede cuantificar ya que se refiere a la aplicación en otros proyectos distintos de los utilizados como ejemplo o prueba, pero sí que se puede afirmar que ha demostrado ser aplicable a tres marcos de trabajo distintos para un mismo problema técnico. En la aplicación empírica podemos decir que en general los resultados son válidos, y que los proyectos que no lo son presentan resultados distintos de los esperados; Según Hazelrigg (2003) el método se puede considerar válido pero en ocasiones habrá uno aun más adecuado.

Los resultados menos satisfactorios se han analizado de un modo cualitativo, y se ha determinado que las causas para no obtener los resultados esperados se deben a que no se ha aplicado el método según el proceso propuesto. Se han tomado partes pero sin rigor en la puesta en práctica, las propuestas conceptuales no se ajustan a los requisitos iniciales y no se ha propuesto un método de control y seguimiento de la evolución del proyecto que asegure la eficacia.

## **6.6 VALIDACION DE LA METODOLOGIA MEDIANTE ENCUESTAS**

Hay un total de 46 encuestas cumplimentadas de 48 posibles (96% de respuestas), 35 de 36 en total pertenecen al primer grupo de estudiantes de diseño y 11, de 12 totales, al segundo grupo de estudiantes del curso de formación complementaria.

### **6.6.1 Encuestas a los participantes. Objetivos y definición de la encuesta.**

La encuesta está dividida en cuatro bloques que evalúan la metodología, según se observa en la tabla 6.4. Estas partes son, la comprensión de la metodología en la parte teórica y práctica y su correspondencia.

La aplicación o puesta en práctica hace referencia a la facilidad o dificultad para aplicar los métodos, los requisitos previos a su aplicación y la posibilidad de aplicar en el futuro. Se evalúan los beneficios de la metodología por su aplicación respecto al número de ideas y conceptos generados, la innovación y originalidad de las mismas.

## VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Por último se hace un grupo de preguntas para obtener la aceptación, se evalúa la utilidad de la metodología respecto a cómo influye en la generación de ideas y conceptos, en las fases intermedias y finales de proyecto, la estética y caracterización formal, la generación de soluciones ante distintos problemas y la aplicación junto con otros métodos.

1	<b>COMPRESIÓN</b>	<b>Sobre las metodologías expuestas en la parte teórica y aplicadas en la parte práctica:</b>	En general se entienden con claridad
2			Se entienden todas y cada una de las fases del proceso
3			Marcan un proceso fácil de seguir
4			Tienen unos objetivos bien definidos y alcanzables
5			Observaciones:
6	<b>APLICACIÓN</b>	<b>Sobre la aplicación de las metodologías de biomimética:</b>	Existen dificultades de aplicación en el proceso de diseño
7			Los ejemplos facilitan la aplicación
8			Es necesario tener conocimientos previos
9			Es necesario tener unos requisitos iniciales de información
10			Es necesario conocer los requisitos del principio ingenieril
11			Volvería a aplicarlas en otros proyectos
12		Citar las dificultades o facilidades encontradas en la aplicación del proceso, Observaciones:	
13	<b>BENEFICIOS</b>	<b>Aplicar metodologías de biomimética...</b>	permite generar mayor número de ideas y conceptos
14			permite generar ideas novedosas e innovadoras
15			ayuda al diseñador a establecer objetivos de proyecto
16			ayuda al diseñador en el proceso creativo
17			ayuda al diseñador en la fase de conceptualización
18			ayuda al diseñador en la fase de diseño de detalle
19		Observaciones:	
20	<b>VALIDACIÓN</b>	<b>La metodología biomimética es útil para...</b>	la definición de objetivos y nuevos proyectos
21			la fase de definición de ideas y conceptualización
22			la fase de desarrollo, definición de materiales y procesos
23			la fase de detalle y definición final del producto
24			la estética y caracterización formal
25			aplicar soluciones naturales (MB I) al diseño de producto
26			la solución de problemas técnicos (MB II)
27			aplicarla junto con otros métodos y herramientas (p.ej. el análisis funcional y otros)
28		Observaciones:	
			EVALUACION Y CONCLUSIONES PERSONALES

Tabla 6.4: Encuesta a los participantes en el estudio

Cada bloque de la encuesta tiene algunas cuestiones que se contestan con valores numéricos, las preguntas se formulan en positivo por lo que 1 significa muy negativo (muy en desacuerdo) y 5 muy positivo (totalmente de acuerdo), en caso de no querer contestar marcar la casilla NS/NC. Siendo los intervalos [1,2] muy en desacuerdo, [2,3] en desacuerdo, [3,4] de acuerdo y [4,5] muy de acuerdo.

Además cada bloque tiene un espacio para escribir observaciones o comentarios y existe un bloque final en el que se solicita al alumno una evaluación cualitativa que refleje el valor que ha tenido la utilización de la metodología y sus conclusiones personales.

ENCUESTA A ALUMNOS		CUADRO DE VALIDACION
BLOQUE 1 COMPRESION	Comprensión de la metodología expuesta en la parte teórica y aplicada en la parte práctica.	Validez Estructural Teórica
BLOQUE 2 APLICACION	Sobre la aplicación de las metodologías de biomimética.	Validez Estructural Empírica
BLOQUE 3 BENEFICIOS	Beneficios de la aplicación de metodologías de biomimética	Validez de Aplicación Empírica
BLOQUE 4 VALIDACION	Utilidad e la metodología biomimética	Validez de Aplicación Teórica

Tabla 6.5: Correspondencia entre los bloques de la encuesta y el método “cuadro de validación”

Los cuatro bloques de la encuesta se relacionan con los bloques del cuadro de validación utilizado en el capítulo anterior para evaluar la metodología, como se puede observar en la tabla 6.5.

El primer bloque de la encuesta, que se corresponde con la comprensión y claridad de las actividades a realizar, tiene como objetivo validar la metodología de manera teórica para verificar que se comprende con claridad, que marca la estructura global y cada una de sus partes, las fases del proceso, y que los diseñadores que la utilizan conocen los objetivos y como alcanzarlos.

En este bloque también se quiere detectar que existe una buena relación entre la definición teórica y la aplicación práctica, que quien experimenta con ella tiene suficiente base teórica. Estas preguntas también sirven para tener cierto control sobre la validez de las respuestas del segundo bloque que hace referencia a la facilidad o dificultad de aplicación, respuestas positivas en el primer bloque no se pueden corresponder con respuestas negativas en el segundo y viceversa.

El segundo bloque hace referencia a la aplicación, las facilidades o dificultades encontradas, la ayuda de los ejemplos, las necesidades previas de conocimientos, información, o aspectos ingenieriles y la disposición para volverla a aplicar. El objetivo es conocer si la puesta en práctica es satisfactoria y no plantea dificultades, para de alguna manera detectar la aceptación o rechazo.

El tercer bloque determina los beneficios obtenidos por la aplicación de la metodología, y las preguntas tienen como objetivo revelar la utilidad para generar ideas y conceptos novedosos en cantidad y calidad, así como la ayuda que presta en las diferentes fases del proceso de diseño. Este grupo de preguntas determina el aspecto instrumental de la metodología, o la validez de la metodología como herramienta para conseguir mejorar el proceso de diseño tradicional sobre todo en la fase creativa.

El último bloque contiene preguntas que validan la metodología por su utilidad, y se orientan a determinar sobre que fases del proceso de diseño son más aplicables, así como que proceso de los explicados teóricamente parece más válido, o el potencial de utilizarla junto con otros métodos.

Las preguntas tienen como objetivo que se califiquen las diferentes fases de proceso de diseño respecto a la utilización de las metodologías biomiméticas, obteniendo así una respuesta de qué fases son más óptimas para la aplicación de las mismas. En este sentido hay que puntualizar que en los proyectos realizados solo han llegado a la fase de conceptualización dado que es el objetivo de esta investigación, sin embargo conocen el resto de las fases, y pueden valorar por experiencias anteriores y la práctica desarrollada en el proyecto.

### **6.6.2 Evaluación cuantitativa**

En la validación de la encuesta y su estudio cuantitativo se valora el total del conjunto de la muestra y se utilizan los datos de los dos grupos por separado para ver posibles desviaciones y diferencias entre ellos, así como aspectos que puedan afectar a la formación por parte de los grupos.

Analizando los resultados totales y los parciales por grupo se puede ver que ambos tienen respuestas prácticamente iguales, tan solo tres preguntas tienen una desviación notoria o una distribución de respuestas distinta.

Teniendo en cuenta estas preguntas concretas se puede afirmar que la muestra es válida y que existe coherencia en las preguntas independientemente del grupo que responde, no se detecta que el primer grupo de preguntas invalide el segundo como se ha explicado anteriormente por no haber relación entre la comprensión y la aplicación. Se analizan estas tres preguntas y se examinan las razones y causas para esos resultados.

No existe ninguna valoración media global por debajo de 3, es decir, están de acuerdo aunque hay respuestas individuales que están en desacuerdo o muy desacuerdo. La pregunta 8 tiene una valoración inferior a 3 (2,91) para el segundo grupo, se estudiara en detalle.

Sobre las metodologías expuestas en la parte teórica y posteriormente aplicadas en la parte práctica, los diseñadores contestan que se entiende con claridad, estando muy de acuerdo y con una valoración superior a 4 en la global y por grupos.

Sin embargo en la pregunta de si se entienden todas y cada una de las fases del proceso, se detecta una desviación y esta es una de las preguntas que se deben estudiar en detalle, ya que el grupo de estudiantes de diseño contesta que están muy de acuerdo con una valoración

superior a 4 (4,31) y el segundo grupo, formado por personas de diferentes campos y áreas de conocimiento, da una respuesta de estar de acuerdo pero con un valor de 3,55, notoriamente inferior, que puede tener sentido por ser personas que no están relacionados con proyectos de diseño.

Las preguntas de si marcan un proceso fácil de seguir y si tienen unos objetivos bien definidos y alcanzables, tienen una respuesta casi idéntica (medias de 3,89 y 3,84) tanto para el conjunto completo como para los grupos. Pero el primer grupo valora intensamente que los objetivos son alcanzables y están bien definidos con puntuaciones de muy de acuerdo, mientras que el segundo grupo están solo de acuerdo.

En el segundo bloque, sobre la aplicación de las metodologías de biomimética, las respuestas muestran que se está de acuerdo (3,82) en que existen ciertas dificultades de aplicación en el proceso de diseño, pero que los ejemplos facilitan la aplicación (4,65) tanto para el grupo completo como por separado. Respecto a si es necesario tener conocimientos previos, pregunta 8, el segundo grupo valora con una media de 2,91, estando en desacuerdo, siendo un grupo que está menos habituado a proyectos de este tipo.

Queda claro que para aplicar estas metodologías es necesario tener una base inicial de información (3,59), y conocer requisitos del principio ingenieril (3,80), en este caso sorprende que el segundo grupo, con menos conocimiento del método y con componentes que no son ingenieros contesta que está de acuerdo (3,18) pero no tanto como los diseñadores (4,00), es decir, tienen menos necesidad. Todos ellos están muy de acuerdo (4,39) en que volverían a plantearlas en otros proyectos.

Respecto a los beneficios de aplicar metodologías de biomimética, hay un unánime acuerdo en que son muy provechosas ya que permite generar mayor número de ideas y conceptos (4,52), además estas ideas son novedosas e innovadoras (4,74). También ayudan a quien las aplica a establecer objetivos de proyecto (3,91), en el proceso creativo (4,48), en la fase de conceptualización (4,43) o en la fase de diseño de detalle (3,72). Respecto a la fase de conceptualización se observa que el segundo grupo tiene un valor algo menor (3,91) respecto del primer grupo (4,46) y la distribución de las respuestas es inversa donde solo algunos muestran estar muy de acuerdo, 3 componentes de 11, comparado con los 19 del primer grupo que representan más de la mitad, puede ser debido a que los conocimientos y experiencia sobre conceptualización de los miembros del segundo grupos son inferiores, en ocasiones es el primer contacto y aplicación.



En el último bloque se pregunta sobre la utilidad de la metodología biomimética respecto a la definición de objetivos y nuevos proyectos (3,87) valorada positivamente, así como fases de diseño más avanzadas como las de desarrollo, definición de materiales y procesos (3,70), diseño de detalle y definición final del producto (3,48) o la estética y caracterización formal (3,67). De nuevo la fase de definición de ideas y conceptualización obtiene una evaluación muy destacada (4,24), siendo beneficiosa y útil, en el sentido de provechosa y eficaz en su aplicación. Respecto a la utilidad del método indirecto e indirecto, aplicar soluciones naturales (MB I) al diseño de producto y solucionar problemas técnicos (MB II) se valora muy positivamente (4,46 y 4,33 respectivamente), esto implica que la base metodológica utilizada basada extraída del método directo e indirecto es útil, y proporciona los resultados deseados. Además otro factor de interés es determinar la utilidad de combinar los métodos de biomimética junto con otros métodos y herramientas, como el análisis funcional, le valoración es de muy de acuerdo con su utilidad (4,41).

En la tabla 6.6 se presenta un resumen de la encuesta, indicando las medias del total y de cada grupo, así como la distribución de respuestas.

ENCUESTA DE VALIDACION DE LA METODOLOGIA BIONICA		media	media DJ	media UNIV	distribución de respuestas del grupo completo					
					NS/NC	1	2	3	4	5
COMPRENSION	1	25,70	32,51	4,00	1	0	1	6	27	11
	2	4,13	4,31	3,55	0	0	3	5	21	17
	3	3,89	3,89	3,91	0	0	3	8	26	9
	4	25,48	32,31	3,73	1	0	4	11	18	12
	5									
APLICACION	6	25,46	3,86	94,18	1	0	1	13	24	7
	7	4,65	4,66	4,64	0	0	0	2	12	32
	8	24,74	31,60	2,91	1	5	9	13	13	5
	9	3,59	3,60	3,55	0	2	6	8	23	7
	10	25,43	32,43	3,18	1	0	3	12	21	9
BENEFICIOS	11	4,39	4,40	4,36	0	0	1	4	17	24
	12									
	13	4,52	4,49	4,64	0	0	0	5	12	29
	14	4,74	4,80	4,55	0	0	0	1	10	35
	15	3,91	3,94	3,82	0	0	2	10	24	10
VALIDACION	16	4,48	4,49	4,45	0	0	0	1	22	23
	17	4,33	4,46	3,91	0	0	0	7	17	22
	18	3,72	3,77	3,55	0	0	6	12	17	11
	19									
	20	25,50	32,26	4,00	1	0	3	8	26	8
La metodología biomimética es útil para...	21	4,24	4,29	4,09	0	0	1	7	18	20
	22	3,70	3,69	3,73	0	0	5	13	19	9
	23	3,48	3,54	3,27	0	1	10	8	20	7
	24	3,67	3,71	3,55	0	1	4	13	19	9
	25	4,46	4,54	4,18	0	0	0	1	23	22
	26	4,33	4,31	4,36	0	1	0	3	21	21
	27	4,41	4,43	4,36	0	0	1	6	12	27
	28									

Tabla 6.6: Resumen de la encuesta

### 6.6.3 Evaluación cualitativa

En este apartado se evalúa la metodología por medio de los comentarios y observaciones registradas en la encuesta, si bien tienen un carácter eminentemente subjetivo sirven para conocer de primera mano aspectos positivos que pueden reforzar, o negativos que se deben subsanar en la mejora de la esta metodología.

En el primer bloque de preguntas no existen muchas apreciaciones, lo cual se corresponde con las contestaciones numéricas que expresan que la metodología se entiende sin dificultades, en general hay acuerdo en cuanto a la comprensión de la metodología en su contexto teórico y práctico, algunos comentarios hacen referencia a la cantidad de contenidos teóricos necesarios para su posterior aplicación, siendo correcta, o la necesidad de combinar ambas partes para hacer más dinámico el aprendizaje. Hay dos comentarios respecto a que los enunciados no están claros o correctamente expresados, y otro que indica que las metodologías, a veces resultan difíciles de seguir pero marcan un camino, facilitando alcanzar el resultado final.

Respecto al segundo bloque, sobre la aplicación de las metodologías de biomimética, se pide que se citen las dificultades o facilidades encontradas en la aplicación del proceso y se expresen las observaciones necesarias. La mayor dificultad es la búsqueda de información, es un hecho que se cita en la tercera parte de los comentarios, y en ocasiones se relaciona con la calidad de la documentación encontrada, o con la utilidad para definir el principio ingenieril. Se solicita bibliografía especializada o recursos para buscar información sobre biología o seres vivos de interés. Otro aspecto coincidente con varias opiniones es que la información necesaria no está completa, está en otros idiomas o es demasiado técnica y compleja para ser utilizada sin ser un experto biólogo. También coinciden comentarios a cerca de la dificultad de encontrar información de los referentes naturales deseados, la utilidad de lo encontrado o la profundidad y especificidad de la misma.

La calidad de la documentación encontrada también se comenta como un factor que dificulta progresar con esta metodología, por ser superficial y poco específica en ocasiones y demasiado técnica en otras, lo que conlleva a un elevado consumo de tiempo. Sin embargo se comenta que una vez encontrada la información adecuada es sencillo realizar la analogía con el ser vivo.

Algunos comentarios respecto a las dificultades existentes con la metodología hacen referencia a las aparecidas siguiendo el proceso en la aplicación, situaciones de bloqueo o necesidad de retroceder en el proceso, que son solventadas una vez asimilada la metodología y bien marcados los pasos. Se comenta la dificultad de ponerla en práctica por falta de

experiencia, sobre todo al inicio, o de comprender algunos enunciados, porque se entiende lo que se buscaba pero no como conseguirlo. Es necesaria la búsqueda de casos naturales que, en principio, se desconocen, por lo que el punto de partida es demasiado abierto y aleatorio. Sin embargo se expresa satisfacción al ver que se consigue el objetivo.

Respecto al trabajo con funciones clave, se comenta que es costoso y también se detecta que es difícil encontrar soluciones naturales para funciones concretas, pero que el resultado es bueno. A veces es difícil aplicar los principios ingenieriles para el uso que se desea, por su difícil comprensión, o no se ven claros, o los que se creen no son los correctos. La búsqueda de individuos interesantes para posteriormente aplicarlos a los proyectos hace que definir el principio ingenieril sea dificultoso. Una vez encontrados los individuos correctos es más sencillo realizar la analogía siguiendo la metodología de trabajo. La dificultad es la comprensión de los aspectos naturales, la abstracción de pasar del mundo natural a lo artificial, pero lo valioso es que es natural.

En el tercer bloque las observaciones sobre la aplicación de las metodologías de biomimética son muy positivas en el sentido de que hablan de la novedad de la metodología y su potencial aplicación, así como la relación con los aspectos creativos. Algunos comentarios reflejan que son métodos diferentes a los utilizados anteriormente, que motivan y potencian la originalidad. Son interesantes y servirán para futuros proyectos. Es una metodología que hace posible mediante la creatividad generar ideas realmente novedosas, sorprende esa cualidad. Una observación que destaca hace referencia a que la industria real no es consciente aún de los beneficios, siendo que se han mostrado múltiples ejemplos reales de empresas que por medio de la biomimética han obtenido resultados de éxito con sus productos, quizá el comentario haga referencia al potencial del propio método que aun no está generalizado. También se observa que en ocasiones al ir de un ser vivo a un producto, la traducción ingenieril se complica y parece no ser un producto biónico, como reflexión de que los productos pueden no mostrar los beneficios de aplicar la biomimética, debido a que el principio ingenieril no es visible, ni palpable. Es una metodología muy clara con un proceso de trabajo muy concreto que facilita el desarrollo del proyecto.

En el cuarto y último bloque se comenta la utilidad de la metodología biomimética y cómo influye en el proceso de diseño. Se valora el aspecto de aplicabilidad sobre proyectos, su carácter alternativo respecto a otros métodos e inspirador para el desarrollo de productos. Algunos comentarios reflejan que mediante esta metodología se puede acceder a una base de datos amplísima para la realización de proyectos, entendiendo la naturaleza como una base de datos de la que extraer información para diseñar. Una aportación muy interesante a la

formación de conceptos diferentes a los habituales, o bien, una manera de inspiración a la hora del desarrollo de diseño. Es útil para determinar cómo debería ser el material (características) aunque en numerosas ocasiones crea problemas e incertidumbres acerca de la viabilidad técnica del proyecto. Hay que tener cuidado para que la biomimética no nos despiste de la funcionalidad del producto.

### 6.6.4 Evaluación de los participantes

En este apartado se incorpora un resumen de las opiniones y conclusiones personales de quien ha experimentado con la metodología y de su valoración particular. Se puede decir que mayoritariamente la opinión es que ha sido interesante o muy interesante, ya que 18 opiniones de 34 así lo dicen, otros aspectos que se repiten son los que hacen referencia a su utilidad, aplicabilidad, innovación o novedad y motor para la generación de ideas o conceptos, todas ellas con más de 8 opiniones favorables cada uno. En el apartado negativo se vuelve a evidenciar la dificultad para encontrar información, 4 opiniones, y el consumo excesivo de tiempo con 3 opiniones, también hay dos comentarios respecto a la complejidad de aplicar la metodología. Existen varias alusiones que expresan sorpresa, o que la metodología les sorprende por ver algo que no esperaban, que es novedoso o desconocido.

Opiniones de los alumnos:

- Se valora positivamente el hecho de conocer una nueva metodología de trabajo y otras formas de abordar un proyecto, para poder hallar soluciones a problemas técnicos fijándonos en la naturaleza, ya que esta los ha resuelto mucho antes de que se planteen. Resulta curioso poder aplicar principios naturales a productos industriales. Los referentes naturales son una fuente de soluciones innovadoras y funcionales, existen tantos que es casi imposible no encontrar en ellos la solución a los problemas de diseño.
- Muestra al diseñador nuevas opciones de metodología que pueden prestar ideas interesantes y de innovación, muy útil para buscar productos innovadores. La Biomimética es una metodología muy útil que si no te la enseñan es muy difícil de llegar a ella. Además, integra muchas disciplinas que enriquecen al diseñador
- Es positivo conocer diferentes metodologías aplicables en proyectos, así como tener gran cantidad de ejemplos de productos bioinspirados hasta ahora desconocidos. Por otra parte, se gana precisión en la búsqueda de información, lo cual facilita en gran medida las inquisiciones en nuevos proyectos. Cambia la perspectiva a la hora de buscar información atendiendo mucho más a nuestro entorno y al medioambiente, y se tiene una mente más abierta a aplicar los principios de referentes biomiméticos.
- Es una materia muy interesante, para ver y encaminar los proyectos desde otro punto de vista, se tiene que saber ya "algo" sobre las cosas, o un poco sobre "todo" para poder comenzar, basándose en animales, etc., lo más difícil ha sido buscar información científica, la ingenieril, materiales o sistemas que hagan lo que se busca... Así se alcanzan conclusiones/productos muy diferentes a lo que llegarías por

otras metodologías. Se aprenden nuevas formas de trabajar, de conseguir ideas y soluciones que nunca antes se habían conseguido, a no ser por el azar.

- Se considera que es muy interesante, útil y aplicable a la hora de crear nuevos diseños y pensar en cómo poder solucionar ciertos problemas. Ayuda al diseñador también a culturizarse y a ver que en el mundo natural hay mas soluciones de las que aparenta, y que habitualmente no se tienen en cuenta. Es una asignatura fundamental para el diseño de productos, ya que desarrolla una nueva metodología y aumenta considerablemente el número de soluciones a aplicar en un proyecto nuevo
- La cantidad de información disponible en este campo exige continuo seguimiento del mismo a lo largo del tiempo para futuros proyectos y aplicaciones.
- La conclusión final es que la naturaleza tiene muchas soluciones y son difíciles de notar las aplicaciones que ya existen basadas en ella. La forma en que se resuelven las cosas en la naturaleza siempre es la más simple, y es un buen punto de partida para el diseño ingenieril.
- Ha sido una materia que me ha sorprendido gratamente por su contenido. El conocimiento de las metodologías biomiméticas se ha asimilado como un referente más en los sistemas de trabajo y no solo en el diseño. Este curso ha sido una sorpresa, no conocía nada acerca de la biomimética. Me ha gustado bastante.
- La asignatura es de gran ayuda a la formación y desarrollo creativo y metodológico. Me ha aportado un modo de pensamiento más abierto y una visión en cuanto a formas de trabajo y planificación diferentes a las conocidas anteriormente, en definitiva creo que ha sido muy interesante para mi formación.
- Muy interesante el hecho de aplicar este proceso/metodología para el desarrollo de proyectos, pero para aplicarlo y obtener mayor beneficio sería necesario contar con conocimientos previos en ingeniería/biología. Valoro por el motivo anterior que los grupos sean interdisciplinarios.



**CAPITULO 7. CONCLUSIONES**



### 7.1 CONCLUSIONES

A lo largo de la Tesis se han mostrado antecedentes y resultados de la aplicación de la biomimética, la biónica o el diseño bio-inspirado mostrando que los esfuerzos realizados en la investigación de éste área de conocimiento se traducen en avances. Sin embargo está muy poco extendida todavía tanto a nivel de estudios como de aplicaciones (docente o industrial).

Se han analizado diversas metodologías y enfoques aportados por distintos investigadores y se puede concluir en que de forma generalizada existen dos procedimientos, el que comienza con la investigación biológica para terminar en un proyecto, y el que se inicia con una cuestión o problema técnico y se resuelve por medio de la observación de la naturaleza. Partiendo de estos dos métodos genéricos se pueden resolver las diferentes necesidades de cada proyecto con una metodología adaptada, como es el caso de la propuesta en esta Tesis.

La evolución de la biomimética está estrechamente relacionada con el diseño industrial, ya que se conocen aplicaciones por estructura, mecanismos y materiales, vinculadas a las funciones y las formas u otros que se relacionan con los sentidos, las sensaciones o sistemas más complejos. Todos ellos son elementos que caracterizan el diseño industrial y que pueden ser enriquecidos por el aprovechamiento del conocimiento que se tiene de la naturaleza.

Las metodologías de diseño industrial han progresado y se han diversificado, encontrando nichos de especialización. Sin embargo, en esta positiva evolución se detecta un riesgo que deriva de la degeneración de estas metodologías en meras secuencias de comandos y acciones que prescriben en la fase final de desarrollo. La propuesta de esta Tesis tiene como resultado una metodología que ofrece un marco para la orientación de los procesos desarrollados en cada fase cuyo modo de trabajo depende del marco inicial y de los resultados de las fases anteriores. Cada paso dentro del proceso tiene sus metas pero están condicionadas por la situación de partida. Este planteamiento crea cierta incertidumbre sobre los resultados y la eficacia de la metodología, pero se puede afirmar que esta vacilación se asocia a la existente en todo proceso de innovación.

La actual demanda de innovación hace que sea inevitable que surjan nuevos procesos creativos y métodos alternativos en diseño industrial. El proceso de diseño aquí presentado no varía en exceso respecto a los existentes, pero se transforma y se adapta ofreciendo combinaciones de métodos con nuevas metas. Se han descrito en él las relaciones entre análisis funcional y creatividad cuyo proceso creativo establece diferentes niveles en los que encontrar nuevas funciones, o análisis de seres vivos cuyos principios biológicos destacables se pueden traducir en principios ingenieriles aplicables al diseño conceptual.

En ocasiones no hay diferencia entre metodologías de diseño y de desarrollo de producto, cuestión que puede ser debida a las propias definiciones. Sin embargo en la metodología propuesta se ha ratificado el carácter conceptual y una separación deliberada de las fases de desarrollo y de detalle. La proposición está orientada a un proceso muy abierto, creativo, inventivo y de traducción del ámbito natural al ingenieril. Conociendo que hay otros procesos de desarrollo que se orientan a resultados muy concretos como aplicaciones en ciencia de los materiales, robótica y similares. Alejándose de los resultados de otros ámbitos, es una opción utilizar la biomimética para generar innovación en funciones particulares o grupos funcionales, distintos de la principal. Además se evidencia que los casos en los que se combinan varias soluciones naturales son mejores.

Esta metodología huye de los procesos de diseño como formulas, visto en el Diseño Axiomático (Shu 2001), o como recetas culinarias (Munari 2000). Aquí, el proceso y la estructura de la metodología están claramente definidos pero no por ello dejan de ser abiertos y flexibles, adaptándose a las diferentes circunstancias por las que atraviesa el proceso de diseño. Este rasgo que se considera positivo tiene inconvenientes, ya que en ocasiones los diseñadores no se sitúan correctamente en cada fase por tener unas metas inciertas y estar habituados a procesos más normalizados.

Otra diferencia destacable sobre las metodologías tradicionales es la reutilización y la redefinición. El desenlace de cada fase es reutilizable en otros proyectos dado el carácter que tienen sus resultados. Sirva de ejemplo algo ya mencionado, un ser vivo puede tener varias soluciones para un determinado problema y este problema puede ser resuelto alternativamente por varios seres vivos, como se observa en la aplicación de las tablas biomiméticas.

## **7.2 RESULTADOS. SATISFACCION DE LOS OBJETIVOS**

Se presentan los resultados de esta Tesis en base a la satisfacción del objetivo principal planteado inicialmente, así como de los objetivos parciales.

La metodología resuelve el objetivo principal al definir y estructurar un proceso alternativo de diseño conceptual en el que se aportan mejoras funcionales de producto incorporando investigación biomimética como fuente de soluciones. En los capítulos anteriores se evidencia que la metodología ha resultado efectiva en los proyectos desarrollados de modo experimental, ha probado su utilidad al mostrar procesos de diseño conceptual que han utilizado y combinado los métodos sugeridos, y que aportan oportunidades de innovación.

## CONCLUSIONES

---

Como aportación académica se ha definido un nuevo proceso creativo vinculado a la búsqueda de soluciones en la naturaleza, diferenciándose de otros porque no se vincula el proceso de diseño a un problema concreto sino a un problema abierto, en el que se encuentran múltiples soluciones, que se pueden aplicar a varios conceptos y diseños. Los alumnos conocen un método alternativo al análisis funcional para determinar funciones innovadoras, y un modo de solucionar éstas observando la naturaleza, además de conocer los principios de la investigación y la experimentación en biomimética.

Como aportación para la industria se ha establecido que los resultados conceptuales, las nuevas ideas y las soluciones alternativas que superan lo existente, dan pie a posibles líneas de I+D o a investigaciones en detalle. Los resultados conceptuales son una simplificación de ideas que pueden ser desarrolladas para una aplicación concreta, donde la naturaleza es un referente de trabajo o un punto de partida.

Para alcanzar el objetivo principal se han conseguido los siguientes objetivos parciales:

- La definición de marcos de trabajo. Se ha planteado un marco en el que la relación entre naturaleza y diseño, exoesqueletos y carcasas, ha probado dar buenos resultados. También permite generar nuevos marcos y nuevas relaciones, y se ha probado que estas no son exclusivas para su aplicación a un determinado problema técnico. Los marcos de trabajo se pueden solapar y pasar soluciones de uno a otro, estableciendo flujos de conocimiento, como ejemplo se han visto funciones clave pertenecientes a un marco que pasan a ser solución de otro.
- Aplicación de un método creativo que relaciona la definición de funciones clave con los mapas mentales. Se ha obtenido una buena composición creativa, los mapas mentales ayudan a descomponer el problema en partes, realizándose reiteradamente hasta encontrar funciones clave interesantes. Permite tener un número elevado de funciones clave, el número fomenta la calidad, y se encuentran nuevas funciones que permiten al proceso ser innovador.
- Vincular análisis funcional con creatividad y biomimética. En los casos se evidencia que el análisis funcional y los mapas mentales ha mostrado que hay repetitividad y que ante un mismo proyecto se pueden dar resultados similares obtenidos por varios diseñadores, las soluciones extraídas de la naturaleza pueden ser aplicadas de varios modos, ampliando la diversidad de soluciones. Esta combinación permite hacer una búsqueda de funciones diferenciadas y con potencial de innovación, por medio de representaciones abstractas en las que hay conexiones que se transforman y muestran alternativas a las funciones, que se observarían por medio de un análisis funcional tradicional. La simplicidad de la representación, la diversidad y la posibilidad de encontrar representaciones similares por distintos diseñadores evidencian su utilidad y aplicación.
- Hacer propuestas conceptuales. Existe aportación de innovación funcional en las especificaciones de diseño de producto cuando se lleva al diseño conceptual, por aportar soluciones que no están en el mercado o en el estado del arte, pero es necesario hacer I+D para verificarlas. El diseño conceptual vinculado a la generación de nuevos productos y soluciones tecnológicas tiende a ser el factor más importante

en la innovación, por eso se persiguen nuevas formas de generar conceptos, por medio de ordenadores y software, con repositorios o como en este caso por medio de la naturaleza. En esta Tesis se apuesta por algo nuevo, con un proceso evolucionado respecto a lo que ya existe y que aporta un modo de trabajo diferenciado, con sus ventajas e inconvenientes.

- Establecer fuentes válidas de información. La cantidad y calidad de la información afecta a los resultados, mas información y de calidad resulta en mejores resultados. Se debe de favorecer que sea accesible y fácil de comprender, que esté tratada de manera que se pueda definir un principio biológico. Las fuentes de información útiles son repositorios de casos, revistas y publicaciones científicas, pero no siempre son accesibles y hacen obligado un trabajo de investigación y documentación no por todos conocidos, aunque con esta metodología se plantea su aprendizaje.

### **7.3 VALORACION DE LA METODOLOGÍA, SU ENSAYO Y VALIDACION**

Se van a describir algunas conclusiones y reflexiones sobre el carácter de la metodología, su aplicabilidad, beneficios y también sobre sus limitaciones.

Los ejercicios y proyectos muestran que al igual que otras metodologías de diseño esta es aditiva, pudiendo obtener resultados positivos por su utilización por partes o de manera global, los casos muestran ser válidos para la utilización de los métodos por separado, dando mejor resultado en su aplicación en conjunto. Tanto el trabajo global como por partes permite hacer aproximaciones o definiciones conceptuales del producto.

La metodología es prospectiva ya que plantea funciones que resuelven la esperanza de una situación futura, propone nuevas formas de solucionar funciones para problemas existentes u otros que aun no se han planteado. La búsqueda de nuevos modos de resolver las funciones tiene un carácter exploratorio, donde la investigación en funciones resueltas por la naturaleza permite comprender como se resuelven y aplican en diseño. Sin embargo se debe mencionar la dificultad de valorar a priori los resultados de un estudio de prospección y su utilidad.

Este tipo de procesos tienen un problema común en innovación y diseño, y por analogía en el ámbito de la creatividad, que es la reducción de la incertidumbre. No son muy utilizados, ya que son exploratorios y no normativos, es decir, el resultado final no es garantía de éxito. Por contra, son procesos que proporcionan soluciones más innovadoras, que resultan en la obtención de propuestas originales con mejoras respecto a otros procesos como el normativo.

Respecto a la integración de métodos, los vínculos que se establecen y la aplicación de resultados obtenidos de fases anteriores en las siguientes son característicos de la metodología que muestran aplicabilidad y validez, que además dan resultados originales y alternativos.

## CONCLUSIONES

---

Surge un proceso natural en metodología de diseño que es la necesidad de adaptación, de hacer cambios, transformaciones o combinaciones del proceso, inicialmente de un modo intuitivo y después contrastado por los resultados, se ha evidenciado en el caso del proyecto donde los alumnos con un mismo punto de partida han trazado diferentes líneas de trabajo. Las metodologías son para experimentar con ellas y cambiarlas, adaptarlas, como se ha observado en el caso de las tablas biomiméticas donde casi la totalidad de quien experimenta con ellas las ha transformado adaptándolas a la necesidad concreta del proyecto.

Respecto a los aspectos destacables del ensayo podemos decir que la metodología ha evidenciado ser aplicable en docencia como método creativo y un proceso de diseño conceptual cumpliendo con los criterios establecidos y vistos en el apartado 4.3. Los trabajos realizados muestran el aprendizaje de una metodología y se constata con las respuestas de las encuestas, donde se afirma la utilidad del método creativo y su potencial para la innovación.

También se observa que es aplicable en la industria, demostrado en experiencias con otros métodos que integran biomimética, destacando aquí la posibilidad de encontrar nichos de especialización o invención por la aplicación de funciones alternativas o nuevos modos de conseguirlas, teniendo como ejemplo los ejercicios en los que partiendo de un caso resuelto se plantean nuevas aplicaciones. También al aplicar el proceso completo se puede llegar a uno prospectivo, en un marco abierto se beneficia este tipo de procesos.

La metodología sirve para resolver otras funciones distintas de la principal, pudiendo estar relacionadas con la carcasa, como se ha comprobado en los ejemplos estas funciones son independientes del objeto y se pueden aplicar a otros, se ha observado en el caso de los ejercicios donde no había un marco de trabajo y en el proyecto en el que un mismo problema técnico puede darse en distintos objetos.

Se ha probado la bondad de esta metodología, de forma global, en proyectos llevados a cabo de manera experimental con el fin de encontrar soluciones alternativas y reforzar el proceso creativo tradicional, definiendo funciones clave como objetivos y especificaciones que el producto a diseñar debe cumplir. La metodología aquí propuesta no pretende encontrar una solución a un problema dado, como lo hacen otras metodologías, va en busca de soluciones a funciones que pueden ser integradas en diversos productos de un mismo ámbito. El impacto de introducir soluciones de la naturaleza en el proceso de diseño incrementa la novedad de la propuesta conceptual y aumenta el número de soluciones para una función clave.

Es aplicable por diferentes personas con distintas formaciones y grado de experiencia, y es más favorable en grupos interdisciplinares. La metodología no se plantea como interdisciplinar,

pero se ha evidenciado esta necesidad, la colaboración con el biólogo, especialista en zoología o botánica, es muy interesante ya que existe una transferencia de conocimiento de estas áreas, además es de alto valor ya que define el principio biológico, ahorra tiempo ya que el diseñador necesita adquirir conocimiento concreto y necesario para resolver el problema propuesto.

Fortalezas detectadas en el ensayo con la metodología:

- El proceso creativo planteado es más abstracto y sin limitaciones, facilitando encontrar soluciones innovadoras por su mayor libertad creativa.
- Una vez las líneas de investigación biomiméticas están definidas y claras, la tabla es fácil de aplicar y permite hacer una búsqueda rápida de los referentes naturales.
- En la aplicación de la metodología se observa que un mismo individuo o ser vivo o principio biológico pueden ofrecer más de una solución, aportando diversidad. Este hecho es una confirmación de las primeras aproximaciones en las que se planteaba que un ser vivo podía ser solución para más de un problema técnico.
- Se puede decir que la selección de un ser vivo o principio biológico en más de una ocasión muestra relevancia y potencial de aplicación en el diseño conceptual. Se ha evidenciado que un mismo principio biológico puede ser transformado en diferentes soluciones conceptuales, por diferentes diseñadores y ante problemas distintos.
- Un alto grado de relación entre el principio biológico y el ingenieril es posible obtenerlo cuando el diseño conceptual plantea detalles de resolución técnica y el principio aplicado se aproxima a una copia literal del original natural, sin embargo el nivel bajo se detecta en esas propuestas que solo tienen que ver con aproximaciones formales y poco más.
- Cuando se experimenta y observa directamente sobre el ser vivo el principio biológico se plasma mejor y es más fácil generar posibles soluciones. El principio ingenieril llega a un alto grado de analogía, y se observa que los prototipos ayudan a conseguirlo.
- Las tablas biomiméticas son representaciones y estructuras que ayudan a ordenar y aclarar las funciones clave, permiten establecer vínculos y como se ha visto no es exclusivo ya que se puede adaptar. Es una forma de formalizar el proceso y asegurar cierto control para que no queden cuestiones sin analizar. Hay referencias similares, como los gráficos utilizados en los procesos top-down y bottom-up en la Universidad de Friburgo.

Debilidades detectadas en el ensayo con la metodología:

- Cuando algunos principios biológicos son complejos por combinar varios factores, los trabajos presentan dificultades para traducir al principio ingenieril, lo que termina generalmente en una simplificación, tomando solo alguno de estos factores. El sistema natural posee herramientas que le dan ventajas sobre el sistema artificial y eso le hace difícil de replicar. Se observa en la articulaciones de exoesqueletos, un sistema complejo, en el que intervienen aspectos de la propia articulación por geometría, material y cambios de espesor, o de la musculatura y tejidos internos de unión, o de los procesos energéticos, o de los sistemas de fluidos, etc. tener en cuenta todos estos aspectos hace muy compleja y complicada la réplica por lo que se

## CONCLUSIONES

---

termina en simplificaciones que cuanto más se alejan del funcionamiento natural menos contenido técnico tienen y acaban en meras inspiraciones.

- Es difícil definir claramente el marco inicial de trabajo, los definidos inadecuadamente impiden una correcta evolución del proceso. Esto se asocia a que la falta de experiencia dificulta la realización del mapa mental y la definición de las funciones clave.
- La variedad de soluciones naturales generan un proceso divergente, y la dispersión de opciones dificultan la selección de la más óptima. Algunos de los que han experimentado con la metodología llegan a situaciones en las que un proceso tan divergente les ha separado de los objetivos y se han visto perdidos, valorándolo como algo negativo.
- Algunas referencias naturales son encontradas en la investigación biomimética, pero se detecta que la relación entre el exoesqueleto y las carcasas no es exclusiva, ya que algunas funciones clave se pueden resolver por otras soluciones naturales no incluidas en los exoesqueletos y en ocasiones por soluciones técnicas ya descritas.
- Es necesaria la relación con biólogos y especialistas que conocen las formas de vida, sus funciones, su comportamiento y las características que nos permitan desarrollar nuestra solución. Dado que los proyectos de experimentación metodológica no están destinados a llevar a cabo investigaciones sobre los aspectos biológicos, la investigación y búsqueda de alternativas se basa en la forma de aplicar los conocimientos actuales de la biología, las formas de vida, etc. a las necesidades expresadas por los objetos a diseñar.

Algunas conclusiones sobre a quién sirve se vinculan al modo de aplicación:

- Sirve a los estudiantes por tener un nuevo enfoque metodológico, en el que entienden cómo se puede tomar el todo o las partes para hacer sus procesos de diseño, donde la flexibilidad de la metodología es uno de los factores de interés.
- Los diseñadores pueden sacar provecho ya que en sus procesos de diseño podrán aplicar algunos de los métodos para integrarlos en proyectos que no sean académicos, sin necesidad de aplicarlo de manera global.
- A los investigadores porque les abre un nuevo campo en el que desarrollar su actividad, en el que existe un cierto desfase respecto a otros países en los que el apoyo es absoluto.
- A las empresas, un proceso prospectivo como este les puede ayudar a generar nuevas líneas de I+D, alternativas funcionales a sus productos para la obtención de innovación.
- A los divulgadores, ya que es un tema de actualidad y con un alto potencial al poder asociar múltiples campos de la ciencia en los que destacan la biología, el diseño y la industria.

Se muestran algunas conclusiones respecto a la validación de la metodología. Algunos trabajos de investigación formulan nuevos métodos de diseño que son evaluados por un único procedimiento, que en ocasiones los hace incompletos y subjetivos. Plantear un doble método de evaluación basado en amplio número de casos permite contrastar resultados, teóricos y empíricos, de un modo objetivo así como obtener valoraciones personales de quienes han

puesto en práctica el método, evaluando desde la experiencia. Se ha elegido el método "Validation Square" ya que en sí mismo es un método de doble validación, donde se evalúan métodos de diseño por su estructura y comportamiento, o desempeño por medio de criterios teóricos y empíricos. En la validación realizada se aprecia que se establecen premisas y criterios teóricos que son evidenciados experimentalmente y que se corroboran con las respuestas a la encuesta.

Hay métodos que se dan como válidos ante determinadas respuestas o aplicaciones pero esto no quiere decir que sea el mejor o el más adecuado. En la metodología propuesta se ha observado que las partes son válidas para aplicarse en proyectos o actividades de diseño, pero que la estructura global se válida teóricamente por su estructura y aplicación, pero que empíricamente se puede aceptar parcialmente, ya que hay casos que han cambiado la estructura y por tanto la aplicación. Este hecho se ha comentado ya, y confirma que los métodos se adaptan y ajustan a las necesidades del proyecto, por lo que las metodologías flexibles tienen más potencial de aplicación.

Se ha observado también, que el modelo presentado, más abierto con una representación no precisa, se puede transformar para aplicar de una manera útil, esto también implica experimentación y observación de los resultados.

La metodología probada de manera aislada, por una sola persona o un único caso, solo es válida para hacer una aproximación. La evaluación personal previa a la propuesta de la metodología ha servido para experimentar y poner de manifiesto algunas oportunidades y dificultades de la misma. Posteriormente, la puesta en práctica y evaluación por dos grupos distintos permite comparar los resultados y evaluar la metodología y proceso de diseño.

En este sentido podemos decir, que en ambas experiencias los resultados han sido satisfactorios, y comparados con otros procesos de diseño se observa que es más creativo por la originalidad de las propuestas, innovador por las aportaciones de nuevas soluciones para funciones existentes o por la aportación de nuevas funciones, y ante todo por que presenta una manera alternativa de realizar el proceso conceptual de diseño, no basado en especificaciones cerradas.

Se ha demostrado la utilidad de la metodología por medio de la evaluación de diversos casos, que en su planteamiento se han dejado abiertos deliberadamente, para que quien la ponga en práctica realice una aportación. En las evaluaciones de otros trabajos de investigación solo se observan 1 o 2 casos para verificar un método, donde todo está orientado a obtener y analizar un resultado.



### 7.4 CONTRIBUCION DE LA TESIS. APORTACIONES

Las aportaciones respecto a otras metodologías que están en la línea de bio-inspirado o biomimético son:

- La definición del marco de trabajo flexible permite ampliar o reducir el campo de actuación, relacionándose con procesos creativos divergentes por ampliación o convergentes por focalización. Este aspecto se relaciona con la opción de ampliar el espacio de diseño, en relación a la definición de un brief de diseño más abierto y con menos restricciones iniciales.
- La función es lo más importante dado que es el factor de diferenciación para obtener innovación, aunque para ello haya que hacer estudios o investigación posterior. Existen trabajos de investigación y métodos basados en la explotación de soluciones de la naturaleza, pero los campos de actividad no se centran en la definición de nuevas o alternativas formas de realizar funciones, lo más próximo es la exploración de soluciones naturales para resolución de problemas técnicos.
- En esta Tesis se aporta una visión nueva respecto a la resolución funciones distintas de la principal, el diseño de producto se beneficia de soluciones a funciones complementarias, de segundo orden. Muchos productos son capaces de conseguir realizar adecuadamente una función principal, pero la diferenciación e innovación se puede encontrar en otras funciones o en nuevas formas de conseguirlas.
- La formulación de una tabla biomimética como puente entre la función buscada y el referente natural, y su utilidad en la definición del principio ingenieril basado en la observación del ser vivo. La aplicación de la tabla marcan posibilidades de encontrar diferentes referentes naturales para una misma función por medio de las preguntas y cuestiones de cómo obtener dicha función.

Citaremos como contribuciones de este trabajo de investigación la presentación y divulgación en conferencia y publicaciones:

- Conferencia. 5th International Conference on Comparing Design in Nature with Science and Engineering, Design and Nature 2010, Pisa 28 June 2010 through 30 June 2010. (Conference Paper). Aparece como capítulo de libro. Lopez-Forniés, I, Berges-Muro, L. Relation between biomimetic and functional analysis in product design methodology. WIT Transactions on Ecology and the Environment. Volume 138, 2010, Pages 317-328. DOI 10.2495/DN100271
- Artículo en revista indexada. Lopez-Forniés, I, Berges-Muro, L. Diseño conceptual de productos. Un enfoque biomimético para la mejora de funciones. DYNA Ingeniería e Industria. Enero 2012. Vol. 87-1 p.35-44 DOI 10.6036/4313
- Artículo en revista científica. Lopez-Forniés, I, Berges-Muro, L. A top-down biomimetic design process for product concept generation. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, Volume 7, Issue 1, p.26-47. DOI 10.2495/DNE-V7-N1-26-47
- Dos artículos en preparación. El primero para mostrar la metodología y su aplicación en la enseñanza de ingeniería de diseño, un segundo sobre la investigación en funciones para su aplicación en el diseño de productos, apoyado en la definición de un marco de trabajo que vincula exoesqueletos con carcasas de objetos.

## 7.5 CONCLUSION FINAL. REFLEXION

La metodología propuesta es un punto de partida para la investigación en diseño biomimético y diseño bio-inspirado, algunos de los supuestos planteados aquí pueden ser desarrollados de manera específica, ya que se han planteado tres niveles de trabajo, el marco o definición del espacio de trabajo en diseño, la caracterización funcional de este marco y sus nuevas aplicaciones y por último la traducción de soluciones de la naturaleza en aplicaciones concretas en la técnica.

Partiendo de un problema técnico, el nivel de innovación pretendido está sujeto a la dificultad de resolver la función clave solicitada. A mayor innovación, más específica es la función clave, y mayor es el nivel de detalle y definición técnica, así como la dificultad de encontrar un ser vivo; Un principio biológico o una solución natural que responda a esa función tan específica es mayor. Por el contrario, partiendo del estudio específico de un individuo se llegan a soluciones válidas con diferentes niveles de innovación, desde replicas completas hasta meras inspiraciones.

Las funciones genéricas son más fáciles de lograr, por haber más referentes biomiméticos y más conocidos, aunque la novedad es menor. Esta afirmación se vincula a la especialización de individuos y productos, existen funciones en la naturaleza desarrolladas por varios individuos pero cada uno tendrá su propia estrategia o especialización, del mismo modo que los productos se especializan y desarrollan funciones específicas que los diferencian y ponen en un nivel superior respecto a sus competidores.

Se han descrito niveles de analogía con los que comprender mejor el ámbito de trabajo, se han analizado un buen número de casos en los que se han definido el tipo de relación entre la solución natural y la técnica. Sin embargo aun quedan casos inciertos que se deben describir y documentar mejor, quedan aspectos sujetos a la interpretación. Se plantea la idea de establecer criterios para evaluar dichos niveles, pero de nuevo parecen sujetos a subjetividad y su aplicación solo aporta percepción del grado de relación.

Otra reflexión sobre el resultado final de la Tesis plantea la aplicación de ingeniería inversa de casos de éxito de la naturaleza. Si bien esta idea parece muy válida en la generación de soluciones, su orientación se plantea a desarrollos concretos, como se han descrito en aplicaciones muy especializadas de robótica y ciencia de los materiales. En el modelo presentado aquí es útil pero no es el fin, sirve para traducir el principio ingenieril pero no implica que sea la solución única.

## CONCLUSIONES

---

La metodología biomimética propuesta aquí no pretende ser un método completo de diseño, sin embargo es aplicable en muchas fases de diseño, desde la creativa y conceptual hasta la de definición y diseño de detalle, en la que tomaríamos la metodología como solución a un problema técnico concreto.

La biomimética se empieza a convertir en una línea de pensamiento y por ello es aplicable a otros ámbitos del diseño, como los servicios, la gráfica o el diseño de entornos y espacios arquitectónicos. En este sentido debemos considerar que el trabajo, aquí orientado hacia funciones innovadoras en productos, puede tener nuevas direcciones en aspectos como sostenibilidad y ecodiseño, gestión de recursos energéticos, nuevos sistemas productivos o aplicaciones no especializadas de materiales.

La investigación futura se orientan a ampliar la exploración en el campo del diseño conceptual, con el presente trabajo se ha considerado la posibilidad de reutilizar y generar nuevos métodos de diseño conceptual que planteen alternativas en diseño de producto. Ahora, principalmente se va a trabajar en la aportación del diseño conceptual como generador de innovación o motor para la investigación y desarrollo, planteando algunas de las premisas de esta Tesis, como son el diseño prospectivo y la investigación en funciones como aportaciones a la innovación, que puedan ser resueltas basándose en la naturaleza o en otros ámbitos creativos.

Se plantea la mejora de la tabla biomimética, se ha determinado que algunos casos y proyectos han planteado propuestas y adaptaciones de interés, por lo que se aborda el desarrollo de algunas de estas propuestas y experimentar para su mejor aplicación.

Y por último se plantea a largo plazo Iniciar un trabajo en investigación de léxico aplicado en diseño, tratando de realizar un símil de diccionario de funciones naturaleza-técnica que sea aplicable para mejorar y simplificar el uso de la tabla biomimética. Ya existen algunos trabajos de investigación en esta línea aunque los resultados aun no son óptimos y su orientación no es hacia funciones, sino hacia crear un repositorio de soluciones prefabricadas, con lo que se aproxima a otros trabajos de repositorios de diseño.

Todas estas líneas están vinculadas y se pretende que sean las ramas de expansión del que este trabajo de investigación es el punto de origen.

**CAPITULO 8. BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

---

1. ADAMS, David J.; BENISTON, Lee J. and CHILDS, Peter R. N. Promoting Creativity and Innovation in Biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 8, 2009, vol. 27, nº 8. pp. 445-447.
2. ALBERTS, Bruce; DURFORT I COLL, Mercè, and LLOBERA I SANDE, Miquel. *Biología molecular de la célula*. Barcelona: Ediciones Omega, 2004.
3. ALCAIDE MARZAL, Jorge; DIEGO MÁZ, José A. and ARTACHO RAMÍREZ, Miguel A. *Diseño de producto: Métodos y técnicas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
4. ALEXANDER, Christopher. *Notes on the synthesis of form*. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
5. ANDERSON, J. V. Mind Mapping: A Tool for Creative Thinking. *Business Horizons*, 2, 1993, vol. 36, nº 1. pp. 41-46.
6. ANDREASEN, M. M.; and HEIN, Lars. *Integrated Product Development*. New York: IFS Publications, Springer-Verlag., 1987.
7. ARCHER, L. Bruce. Design as a Discipline. *Design Studies*, 1979, vol. 1, nº 1. pp. 17-20.
8. ARCHER, L. B.; and Council of Industrial Design (Great Britain). *Systematic Method for Designers*. London: Council of Industrial Design, 1965.
9. ASIMOW, Morris. *Introduction to Design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1962.
10. ASK Nature. *ASK Nature*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.asknature.org/>>.
11. BACHMANN, T.; and WAGNER, H. The Three-Dimensional Shape of Serrations at Barn Owl Wings: Towards a typical natural serration as a role model for biomimetic applications. *Journal of Anatomy*, 2011, vol. 219, nº 2. pp. 192-202.
12. BALL, Philip. Science in Culture: Beijing Bubbles. *Nature*, 2007, vol. 448, no 7151. pp. 256.
13. BAR-COHEN, Y. *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*. BAR-COHEN, Y. ed., Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006.
14. BAR-COHEN, Y. Biomimetics - using Nature to Inspire Human Innovation. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2006, vol. 1, nº 1. pp. P1-P12.
15. BARLAS, Y.; and CARPENTER, S. Philosophical Roots of Model Validation: Two Paradigms. *System Dynamics Review*, 1990, vol. 6, nº 2. pp. 148-166.
16. BARRY, Katie. *Realinnovation*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.triz-journal.com/>>.
17. BAUMGARTNER, A.; HARZHEIM, L. and MATTHECK, C. SKO (Soft Kill Option): The Biological Way to Find an Optimum Structure Topology. *International Journal of Fatigue*, 11, 1992, vol. 14, nº 6. pp. 387-393. ISSN 0142-1123.
18. BENAMI, O.; and JIN, Y. *Creative Stimulation in Conceptual Design*. 2002. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM, v 24 nº 2. Pp 191-209
19. BENYUS, Janine M. *Biomimicry :Innovation Inspired by Nature*. 1ª ed. New York: Perennial, 2000.
20. Bhushan B. Biomimetics: Lessons from Nature--an Overview. *Philosophical Transactions.Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2009, vol. 367, nº 1893. pp. 1445-86.

- 
21. Biomimicry Institute. *The Biomimicry Institute*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.biomimicry.net/>>.
22. BOGATYREVA, O., et al. *Data Gathering for Putting Biology in TRIZ*. Worcester, MA: Altshuller Institute for TRIZ Studies, 2003. Philadelphia, USA ed. 2003.
23. BOGATYREVA, O. A.; PAHL, A. -Kand VINCENT, J. F. Enriching TRIZ with Biology: The Biological Effects Database and Implications for Teleology and Epistemology. *ETRIA World Conference-2002, Strasbourg*, 2002. pp. 3-1-307.
24. Bohm, Matt, and Stone, Robert. *Product Design Support: Exploring a Design Repository System*. 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 2004, Anaheim, California USA. IMECE2004.
25. BOHM, M. R.; STONE, R. B. and SZYKMAN, S. Enhancing Virtual Product Representations for Advanced Design Repository Systems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2005, vol. 5, nº 4. pp. 360-372.
26. Bohm, Matt, Vucovich, Jayson, and Stone, Robert. *Capturing Creativity: Using a Design Repository to Drive Concept Innovation*. ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, September 2005, Long Beach, California USA. DETC2005.
27. BONSIPE, Gui. Teoría y práctica del diseño industrial :Elementos para una manualística crítica. Barcelona: Gustavo Gili, 1978.
28. British Standards Institution. *BS 7000-2:2008*. London: British Standards Institution, 2008.
29. BROWN, T. Design Thinking. *Harvard Business Review*, 2008. pp. 84-92.
30. BROWN, Tim; and KÄTZ, Barry. *Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation*. New York: Harper Business, 2009.
31. BRUCE, M. J.; HEILING, A. M. and HERBERSTEIN, M. E. Spider Signals: Are Web Decorations Visible to Birds and Bees?. *Biology Letters*, 2005, vol. 1, nº 3. pp. 299-302.
32. BRUSCA, Richard C.; and BRUSCA, Gary J. *Invertebrados*. New York: McGraw-Hill Interamericana, 2005.
33. BRYANT, C., PIEPER, E., WALTHER, B., KURTOGLU, T., STONE, R., MCADAMS, D., AND CAMPBELL, M. *Software evaluation of an automated concept generator design tool*. Proceedings of the 2006 ASEE Annual Conference, paper 2006-1758.
34. BRYANT, C., MCADAMS, D., STONE, R., KURTOGLU, T., AND CAMPBELL, M. *A validation study of an automated concept generator design tool*. Proceedings of the 2006 DETC/CIE, ASME 2006 Intl Design Engineering & Computers and Information in Engineering Conferences, September 2006, Philadelphia, Pennsylvania USA. DETC2006-99489.
35. BRYANT, C., MCADAMS, D., STONE, R., KURTOGLU, T., AND CAMPBELL, M. *A Computational Technique for Concept Generation*. ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. DETC2005.
36. BUZAN, Tony. *Use both sides of your brain: new mind-mapping techniques to help you raise all levels of your intelligence and creativity-based on the latest discoveries about the human brain*. New York: Plume, 1991.

## BIBLIOGRAFÍA

---

37. BUZAN, Tony; and BUZAN, Barry. *El libro de los mapas mentales: Cómo utilizar al máximo las capacidades de la mente*. Barcelona: Urano, 2002.
38. BYTHEWAY, Charles W. *FAST Diagramming*, 1975.
39. CARLO, Menon; and METIN, Sitti. A biomimetic climbing robot based on the gecko. *Journal of Bionic Engineering*, 9, 2006, vol. 3, nº 3. pp. 115-125.
40. CHAKRABARTI, A.; and BLIGH, T. P. An approach to functional synthesis of mechanical design concepts: theory, applications, and emerging research issues. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 1996, vol. 10, nº 4. pp. 313-331.
41. CHANDRASEKARAN, B.; GOEL, A. K. and IWASAKI, Y. Functional representation as design rationale. *IEEE Computer*, 1993, vol. 26, nº 1. pp. 48-56.
42. Columbia Forest Products. *PureBond Columbia*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.columbiaforestproducts.com/PureBond.aspx>>.
43. CRAWFORD, Robert P. *The techniques of creative thinking: how to use your ideas to achieve success*. Wells, Vt.: Fraser Pub. Co, 1964.
44. CROSS, Nigel. Forty years of design research. *Design Studies*, 2007, vol. 28, nº 1. pp. 1-4.
45. CROSS, Nigel. *Engineering design methods strategies for product design*. Chichester; New York: Wiley. 2000.
46. CROSS, Nigel. *Engineering Design Methods*. Chichester England; New York: Wiley, 1989.
47. Delft University of Technology. *Delft Design Guide: Part 1*. Delft, Holanda: Recuperado 20/02/2010. Disponible en: <<http://ocw.tudelft.nl/courses/product-design/delft-design-guide/part-1-approaches-to-product-design-in-delft/>>.
48. DEMING, W. E. *Calidad, productividad y competitividad : la salida de la crisis*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 1989.
49. DI BARTOLO, Carmelo. Naturaleza como modelo, naturaleza como sistema. *Experimenta: ediciones de diseño*, 2000, nº 31. pp. 39-45.
50. DRACHSLER, K. *Bionik – mit einer neuen systematik schneller zu innovationen*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <[http://w3.ipa.fhg.de/PresseMedien/interaktiv/interaktiv\\_2003\\_01.pdf](http://w3.ipa.fhg.de/PresseMedien/interaktiv/interaktiv_2003_01.pdf)>.
51. DYM, Clive L.; and LITTLE, Patrick. *Engineering Design: a project-based introduction*. New York: John Wiley, 2004.
52. EISNER, T.; and NOWICKI, S. Spider web protection through visual advertisement: role of the stabilimentum. *Science*, 1983, vol. 219, nº 4581. pp. 185-186.
53. ERLHOFF, Michael; MARSHALL, Tim and Board of International Research in Design. *Design Dictionary: perspectives on design terminology*. Basel; Boston: Birkhäuser Verlag, 2008
54. FARGNOLI, M. Design process optimization for ecodesign. *Journal of Automation Technology*, 2009, vol. 3, nº 1. pp. 33-39.
55. FERRATER MORA, José. *Diccionario de filosofía*. Barcelona: RBA Coleccionables, 2010
56. Festo. *Air\_ray*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <[http://www.festo.com/cms/es\\_corp/9789.htm](http://www.festo.com/cms/es_corp/9789.htm)>.

57. FINGER, S.; and DIXON, J. R. A review of research in mechanical engineering design. part i: descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes. *Research in Engineering Design*, 1989, vol. 1, nº 1. pp. 51-67.
58. FRENCH, M. J. *Conceptual design for engineers*. London: Design Council, 1985.
59. FUN, Chin Sok; and MASKAT, Norhayati. Teacher-centered mind mapping vs student-centered mind mapping in the teaching of accounting at pre-U level – An action research. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2010, vol. 7. pp. 240-246.
60. GENTNER, Dedre; and University of Illinois at Urbana-Champaign. Dept. of Computer Science. *Evidence for a structure-mapping theory of analogy and metaphor*. Urbana, Ill.: Dept. of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1986.
61. GERARDIN, Lucien. *La Biónica*. Madrid: Guadarrama, 1968.
62. GOEL, A. K.; and STROULIA, E. Functional device models and model-based diagnosis in adaptive design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 1996, vol. 10, nº 4. pp. 355-370.
63. GOEL, Parveen S.; and SINGH, Nanua. PRODUCT DESIGN - Creativity and innovation in durable product development. *Computers & Industrial Engineering*. 1998, vol. 35, nº 1-2. pp. 5.
64. GORDON, William J. J. *Synectics, the Development of Creative Capacity*. New York: Harper, 1961.
65. GOSZTONYI, S.; BRYCHTA, M. and GRUBER, P. Challenging the engineering view: comparative analysis of technological and biological functions targeting energy efficient facade systems. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v 138, 2010, 491-502.
66. GRAY CHRIS, H. 'an Interview with Jack E. Steele'. *The Cyborg Handbook*, 1995. pp. 61-69.
67. GREER, J. L., et al. Enumerating the Component Space: First Steps Toward a Design Naming Convention for Mechanical Parts. , 2003.
68. GRUBER, P.; and GOSZTONYI, S. Skin in architecture: towards bioinspired facades. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v 138, 2010, 503-513.
69. GU, P.; HASHEMIAN, M. and NEE, A. Y. C. Adaptable Design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2004, vol. 53, nº 2. pp. 539-557.
70. GU, P.; HASHEMIAN, M. and SOSALE, S. An Integrated Modular Design Methodology for Life-Cycle Engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1997, vol. 46, nº 1. pp. 71-115.
71. HARKNESS, Jon M. In Appreciation. a lifetime of connections: Otto Herbert Schmitt, 1913 - 1998. Birkhauser Basel, 2002.
72. HAZELRIGG, G. A. Validation of engineering design alternative selection methods. *Engineering Optimization*, 2003, vol. 35, nº 2. pp. 103-120.
73. HELMS, M.; VATTAM, S. S. and GOEL, A. K. Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*, 2009, vol. 30, nº 5. pp. 606-622.
74. HIRTZ, J., et al. A functional basis for engineering design: reconciling and evolving previous efforts. *Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering*, 2002, vol. 13, nº 2. pp. 65-82.
75. HOCHMAN, Elaine S. *La Bauhaus: crisol de la modernidad*. Barcelona etc.: Paidós, 2002.



## BIBLIOGRAFÍA

---

76. HORVATH, I. A treatise on order in engineering design research. *RESEARCH IN ENGINEERING DESIGN*, 2004, vol. 15, nº 3. pp. 155-181.
77. HUBKA, Vladimir; and EDER, W. E. design science introduction to needs, scope and organization of engineering design knowledge. Berlin; New York: Springer. 1996.
78. HUBKA, Vladimir; and EDER, W. E. *Theory of Technical Systems: A total concept theory for engineering design*. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1988.
79. HUBKA, Vladimir; and EDER, W. E. *Principles of Engineering Design*. London; Boston: Butterworth Scientific, 1982.
80. ICSID. Montréal, Canada: ICSID International Council of Societies of Industrial Design. *Definición de diseño actual*. Recuperado 20/02/2012 Disponible en: <<http://www.icsid.org/about/about/articles31.htm>>. (a)
81. ICSID. Montréal, Canada: ICSID International Council of Societies of Industrial Design. *Definición de diseño antigua*, 2012 Disponible en: <<http://www.icsid.org/about/about/articles33.htm>>.
82. Iglesia.net. *Libro del Eclesiastés*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.iglesia.net/biblia/libros/elesiastes.html>>. (b)
83. IGLESIAS CASAL, Isabel. La creatividad en el proceso de enseñanza aprendizaje de ele: caracterización y aplicaciones. 2000.
84. JONES, E.; STANTON, N. A. and HARRISON, D. Applying structured methods to eco-innovation. an evaluation of the product ideas tree diagram. *Design Studies*, 11, 2001, vol. 22, nº 6. pp. 519-542.
85. JONES, J. C. A method of systematic design. *Developments in Design Methodology*. Chichester ; New York : Wiley, 1984. pp. 9-31.
86. JONES, J. C.; and LÓPEZ SARDÁ, María L. *Métodos de diseño*. Barcelona: Gustavo Gilli, 1970.
87. KOCH, Kerstin; BHUSHAN, Bharat and BARTHLOTT, Wilhelm. Multifunctional Surface Structures of Plants: An Inspiration for Biomimetics. *Progress in Materials Science*, 2, 2009, vol. 54, nº 2. pp. 137-178.
88. KURTOGLU, T., et al. Capturing empirically derived design knowledge for creating conceptual design configurations. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference.DETC2005-84405* 2005.
89. LAMBERT, M.; RIERA, B.and MARTEL, G. Application of functional analysis techniques to supervisory systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 1999, vol. 64, nº 2. pp. 209-224.
90. LEE, H., et al. Mussel-Inspired Surface Chemistry for Multifunctional Coatings. *Science*, 2007, vol. 318, nº 5849. pp. 426-430.
91. LITINETSKI, I. B. *Iniciación a La Biónica*. Barcelona: Barral, 2005.
92. LODATO, Franco. Biónica: La naturaleza como herramienta de innovación. *Experimenta: ediciones de diseño*, 2000, nº 31. pp. 46-51.
93. LOPEZ FORNIÉS, I.; and BERGES MURO, L. Relation between Biomimetic and Functional Analysis in Product Design Methodology. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v 138, 2010, 317-328.
94. LOZANO CRESPO, Pedro. El diseño natural. Aproximación histórica, metodologías, aplicación y consecuencias. Tesis doctoral U. COMPLUTENSE DE MADRID, 1994.

- 
95. MALDONADO, Tomás; SERRA CANTARELL, Franciscoand ROMAGUERA I RAMIÓ, Joaquim. *El diseño Industrial Reconsiderado: definición, historia, bibliografía*. Barcelona: GG, 1977.
96. MAÑÁ, Jordi. *El diseño Industrial*. Barcelona: Salvat, 1974.
97. MARTÍ FONT, Josep Ma. *Introducció a la metodologia del disseny*. 1a ed UAB ed., 1999.
98. MASHIMO, S., et al. Attenuation and Distortion of a Compression Wave Propagating in a High-Speed Railway Tunnel. *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, 1997, vol. 40, nº 1. pp. 51-57.
99. MATTHECK, C.; and BETHGE, K. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*. Oxford: Elsevier, 2001. *Mechanical Optimization in Nature, Principles of*, pp. 5247-5250.
100. MCADAMS, D. A.; and WOOD, K. L. A quantitative similarity metric for design-by-analogy. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2002, vol. 124, nº 2. pp. 173-182.
101. MESSER, Matthias. *A Systematic Approach for Integrated Product, Materials, and Design-Process Design*. Tesis doctoral Georgia Institute of Technology. May 2008.
102. MILES, Lawrence D. *Techniques of Value Analysis and Engineering 2d Ed*. New York: McGraw-Hill, 1972.
103. MILWICH, M., et al. Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom. *American Journal of Botany*, 2006, vol. 93, nº 10. pp. 1455-1465.
104. MOLINER, María. *Diccionario de uso del español*. 3ª ed. Madrid: Gredos, 2007
105. MONTAÑA, Jordi; and MOLL, Isa. *Desenvolupament de producte: la gestió del disseny*. Barcelona: Centre d'Innovació i Desenvolupament Empresarial, 2003.
106. MUNARI, Bruno *¿Cómo nacen los objetos? : Apuntes para una metodología proyectual*. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.
107. mundohistoria.org. *Alambre de espino*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <[http://www.mundohistoria.org/temas\\_foro/segunda-guerra-mundial-armamento-maritimo/alambre-puas](http://www.mundohistoria.org/temas_foro/segunda-guerra-mundial-armamento-maritimo/alambre-puas)>.
108. OSBORN, Alex F. *Applied Imagination; Principles and Procedures of Creative Problem-Solving*. New York: Scribner, 1963.
109. OTTO, F. *Architecture et bionique, construction naturelles*, Denges: Delta & Spes, 1985. pp. 9.
110. OTTO, Kevin N.; and WOOD, Kristin L. *Product design: techniques in reverse engineering and new product development*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
111. PAHL, G.; BEITZ, Wolfgangand WALLACE, Ken. *Engineering design: a systematic approach*. London: Springer, 1995.
112. PAHL, G.; BEITZ, Wolfgangand WALLACE, Ken. *Engineering Design*. London: Design Council, 1984.
113. PARKER, Andrew R.; and LAWRENCE, Chris R. Water Capture by a Desert Beetle. *Nature*, 11/01, 2001, vol. 414, nº 6859. pp. 33-34.
114. PEDERSEN ZARI, M. Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. (SB07) *Regional Sustainable Building Conference*, Auckland, New Zealand, Nov 2007.

## BIBLIOGRAFÍA

---

115. PEDERSEN, K., et al. Validating Design Methods and Research: The Validation Square. *DECTC'00, 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences, Baltimore, MA, 2000, 2012.*
116. PEREZ GOODWYN, Pablo, et al. Material structure, stiffness, and adhesion: why attachment pads of the grasshopper (*tettigonia viridissima*) adhere more strongly than those of the locust (*locusta migratoria*) (insecta: Orthoptera). *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 2006, 192(11), 1233-1243.*
117. POHJOLA, V. J.; ALHA, M. K. and AINASSAARI, J. Methodology of Process Design. *Computers & Chemical Engineering, 1994, vol. 18, Supplement 1, nº 0. pp. S307-S311.*
118. PUGH, Stuart. *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering.* Wokingham, England; Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 1991.
119. RANTA, Mervi, et al. Integration of Functional and Feature-Based Product Modelling — the IMS/GNOSIS Experience. *Computer-Aided Design, 5, 1996, vol. 28, nº 5. pp. 371-381.*
120. Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española.* 19a ed. Madrid: Real Academia Española, 1970.
121. Real Academia Española; and Asociación de Academias de la Lengua Española. *Diccionario de la lengua española.* 22a ed. Madrid: Espasa Calpe, 2001.
122. REEF, R.; KANIEWSKA, P. and HOEGH-GULDBERG, O. Coral Skeletons Defend Against Ultraviolet Radiation. *PLoS ONE, 2009, vol. 4, nº 11.*
123. REYSSAT, E.; and MAHADEVAN, L. Hygromorphs: From Pine Cones to Biomimetic Bilayers. *Journal of the Royal Society Interface, 2009, vol. 6, nº 39. pp. 951-957.*
124. RODENACKER, W. *Methodisches Konstruieren, 1971.*
125. ROOZENBURG, N. F. M.; and EEKELS, J. *Product Design : Fundamentals and Methods.* Chichester; New York: Wiley, 1995.
126. ROSHKO, T. The Pedagogy of Bio-Design: Methodology Development. , 2010.
127. SANZ ADÁN, Félix; and LAFARGUE IZQUIERDO, José. *Diseño industrial: desarrollo del producto.* Madrid: International Thomson Editores Spain Paraninfo, 2002.
128. Scandinavian Design. *Tapio Wirkkala.* Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.scandinaviandesign.com/tapioWirkkala/>>.
129. SCHMIDT-NIELSEN, K.; TAYLOR, C. R. and SHKOLNIK, A. Desert Snails: Problems of Heat, Water and Food. *Journal of Experimental Biology, 1971, vol. 55, nº 2. pp. 385-398.*
130. SCHÖN, Donald A. *The Reflective Practitioner: how professionals think in action.* London: Temple Smith, 1983.
131. SEEPERSAD, C. C., et al. The Validation Square: how does one verify and validate a design method?. *Decision Making in Engineering Design, 2006. pp. 305-326.*
132. SELIGER, G. Product Innovation – Industrial Approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2001, vol. 50, nº 2. pp. 425-443.*
133. Servei de Publicacions Elisava. *Naturaleza, diseño e innovación: Propuesta metodológica.* Barcelona: Servei de Publicacions Elisava, 1994.

- 
134. SHARKLET TECHNOLOGIES, Inc. *Sharklet*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.sharklet.com/>>.
135. SHU, L. H. A Natural-Language Approach to Biomimetic Design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 2010, vol. 24, nº 4. pp. 507-519.
136. SIMON, Herbert A. *The Sciences of the Artificial*, Cambridge: M.I.T. Press, 1969.
137. SIVALOGANATHAN, S.; ANDREWS, P. T. J. and SHAHIN, T. M. M. Design Function Deployment: A Tutorial Introduction. *Journal of Engineering Design*, 2001, vol. 12, nº 1. pp. 59-74.
138. SMITH, Julian. *Dolphin-Inspired man-made fin works swimmingly*. Recuperado 20/02/2009. Disponible en: <<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=dolphin-inspired-man-made-fin>>.
139. SONGEL, Gabriel. Estudio metodológico de la biónica aplicada al diseño industrial. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia, 1991.
140. SRINIVASAN, V.; and CHAKRABARTI, A. SAPPHIRE - an approach to analysis and synthesis. *International Conference on Engineering Design (ICED)*, 2009.
141. T., Tateishi. What is Bionic Design?. *Materials Science and Engineering: C*, 4, 1997, vol. 4, nº 4. pp. 205.
142. TAKEDA, Hideaki, et al. Modeling Design Processes. *AI Magazine*, 1990, vol. 11, nº 4. pp. 37-48.
143. TAN, Stella; and MELLES, Gavin. An activity theory focused case study of graphic designers' tool-mediated activities during the conceptual design phase. *Design Studies*, 9, 2010, vol. 31, nº 5. pp. 461-478.
144. TASSINARI, Robert. *El producto adecuado: práctica del análisis funcional*. Barcelona: Marcombo, 1994.
145. TOMIYAMA, T., et al. Design Methodologies: Industrial and Educational Applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, nº 2. pp. 543-565.
146. TORRE, Saturnino d. I.; ARANDA MUÑOZ, Eusebio and MARÍN IBAÑEZ, Ricardo. *Manual De La Creatividad :Aplicaciones Educativas*. 1a ed. Barcelona: Vicens Vives, 1991.
147. UEDA, Kanji. Emergent Synthesis. *Artificial Intelligence in Engineering*, 10, 2001, vol. 15, nº 4. pp. 319-320.
148. UEDA, Kanji. Synthesis and Emergence — Research overview. *Artificial intelligence in engineering*, 10, 2001, vol. 15, nº 4. pp. 321-327.
149. ULRICH, Karl T.; and EPPINGER, Steven D. *Product design and development*. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.
150. University of Cambridge. *Cambridge Materials Selector*. Recuperado 20/02/ 2012. Disponible en: <<http://www-mech.eng.cam.ac.uk/cms/>>.
151. Velcro. *Velcro*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.velcro.es/>>.
152. VINCENT, J. Stealing Ideas from Nature. *RSA JOURNAL -LONDON-*, 1997, nº 5482. pp. 36-43.
153. VINCENT, J., et al. Biomimetics: Strategies for Product Design Inspired by Nature - A Mission to the Netherlands and Germany. Report of A DTI Global Watch Mission, Pera, 2007.

## BIBLIOGRAFÍA

---

154. VINCENT, J. F. V., et al. Putting Biology into TRIZ: A Database of Biological Effects. *Creativity and Innovation Management*, 2005, vol. 14, nº 1. pp. 66-72.
155. VINCENT, J. F. V., et al. Biomimetics: Its Practice and Theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 2006, vol. 3, nº 9. pp. 471-482.
156. VIÑOLAS I MARLET, Joaquim. *Diseño ecológico: hacia un diseño y una producción en armonía con la naturaleza*. Barcelona: Blume, 2005.
157. VOGEL, Steven. *Comparative biomechanics: life's physical world*. Princeton; Oxford: Princeton University Press, 2003.
158. VOGEL, Steven; DAVIS, Kathryn K. and GAVALDÁ, Jaume. *Ancas y palancas :mecánica natural y mecánica humana*. Barcelona: Tusquets, 2000.
159. VOSNIADOU, Stella; ORTONY, Andrew, and Workshop on Similarity and Analogy. *Similarity and Analogical Reasoning*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1989.
160. WADIA, Anosh P. Developing Biomimetic Design Principles for the Highly Optimized and Robust Design of Products and their Components. Master's thesis, Texas A&M University, 2011.
161. WEBER, C. CPM/PDD-an Extended theoretical approach to modelling products and product development processes. *Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium for Design and Manufacture*, 2005. pp. 159-179.
162. Webster Dicctionary on-line. *Design definition*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.websters-online-dictionary.org/definitions/bionics>>.
163. WEGST, Ulrike. *Biomimetic Design Guide*. Recuperado 20/02/2012. Disponible en: <<http://www.materials.drexel.edu/faculty/wegst/>>.
164. WIGGLESWORTH, V. B. temperature and the transpiration of water through the insect cuticle. *Tissue and Cell*, 1986, vol. 18, nº 1. pp. 99-115.
165. WILSON, Jamal O. A systematic approach to bio-inspired conceptual design. Tesis doctoral Georgia Institute of Technology. December, 2008.
166. WILSON, K. J.; and ANDREA, S. G. Methodology for product design based on the study of bionics. *Material Design*, 2004, vol. 26, nº 2. pp. 149-155.
167. WIXSON, James R. *Function analysis and decomposistion using function analysis systems technique*. Washington, D.C.; Oak Ridge, Tenn.: United States. Dept. of Energy; distributed by the Office of Scientific and Technical Information, U.S. Dept. of Energy. , 1999.
168. YAHYA, Hârun; and CLARKE, Abdassamad. *Design in Nature*. London: Ta-Ha, 2002.
169. YAMADA, N., et al. Optimization of Anti-Reflection Moth-Eye Structures for use in Crystalline Silicon Solar Cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, vol. 19, nº 2. pp. 134-140.
170. YANG, M. C. Design Methods, Tools, and Outcome Measures: A Survey of Practitioners. *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2007*.
171. YASUDA, Kunio; and AZUMA, Akira. The autorotation boundary in the flight of samaras. *Journal of Theoretical Biology*, 4/7, 1997, vol. 185, nº 3. pp. 313-320.

172. YODER, Jay A.; RIGSBY, Chad M. and TANK, Justin L. Function of the Urnulae in protecting the red velvet mite, *balaustium* sp., against water loss and in enhancing its activity at high temperatures. *International Journal of Acarology*, 12/01; 2012/04, 2008, vol. 34, nº 4. pp. 419-425.

173. ZACHARIAH, Trevor; and MITCHELL, Mark A. Manual of exotic pet practice (first edition). Mark A. Mitchell, et al eds., Saint Louis: W.B. Saunders, 2009. *INVERTEBRATES*, pp. 11-38.

174. ZWICKY, F. Discovery, invention, research through the morphological approach. New York: Macmillan, 1969.



**CAPITULO 9. ANEXOS**





**ANEXO I – Tabla resumen ejercicio 1**

Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Nº	CASO (PRODUCTO)	PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)	PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2		
1	HOT ZONE SCHEER VENTILATION	RADIADOR INFRARROJOS	Reflexión de la luz en una matriz tridimensional para conseguir orientación paralela	Ojo langosta	Emisión de haces de radiación infrarroja en paralelo, concentración de calor	Focos para espectáculos concentrar o dispersar luz, desviar respecto a la paralela	MUY ALTO	ALTO (adaptación)
2	INVESTIG. UNIVERSIDAD DE ZHEJIANG (CHINA)	SUPERFICIES TRANSPARENTES ANTIRREFLECTANTES	Alta absorción de la luz por la geometría y disposición de los ojos individuales en ojos compuestos	Ojo de las moscas	El mismo, realiza una réplica de laboratorio por medio de una técnica de fabricación llamada ALD, Atomic Layer Deposition	Tragaluz de ojo compuesto y difusor de ojo compuesto.	MUY ALTO	ALTO (Reproducción)
3	JACK (ARTHUR BODOLEFC)	SILLON PLEGABLE	Osmosis iones K+. Movimiento producido por la luz y acciones de presión.	Mimosa púdica	Reacción a una fuerza o presión. bisagras	Tendedor con bisagras actuadas por presión	BAJO	BAJO (Imitación / Inspiración)
4	SHINKANSEN (TREN BALA JAPONES)	MORRO DE LA CABINA Y PANTOGRAFO DE LA CATENARIA	Penetración aerodinámica sin cambios de presión al cambiar de medio. Borde dentado reducción de la turbulencia.	Búho (ala/ pluma) Martin pescador ( pico y cabeza)	Replica del mismo principio natural	Reducción de turbulencias en aspas de ventiladores	MUY ALTO	MUY ALTO (transposición)
5	SHINKANSEN (TREN BALA JAPONES)	MORRO DE LA CABINA Y PANTOGRAFO DE LA CATENARIA	Penetración aerodinámica sin cambios de presión al cambiar de medio. Borde dentado reducción de la turbulencia.	Búho (ala/ pluma) Martin pescador ( pico y cabeza)	Replica del mismo principio natural	Reducción de turbulencias en botas de pesca de río	MUY ALTO	MEDIO

Nº	CASO (PRODUCTO)		PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)		PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2
6	GROASIS (AUQAPRO)	CAJA DE CRECIMIENTO DE PLANTONES DE ARBOLES	El excremento de las aves da protección, mantiene la H <sub>2</sub> O y da nutrientes.	Semillas defecadas por aves	Recoge H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> O. da protección y aislamiento térmico.	Efecto invernadero para recoger agua y llevarla a las plantas	MEDIO	MEDIO (emulación/imitación parcial)
7	GROASIS (AUQAPRO)	CAJA DE CRECIMIENTO DE PLANTONES DE ARBOLES	El excremento de las aves da protección, mantiene la H <sub>2</sub> O y da nutrientes.	Semillas defecadas por aves	Recoge agua de lluvia y la distribuye	Tapa para cazuela Tapa para recipiente de cocción en microondas Aislamiento con carcasa	MEDIO	ALTO (imitación / transposición)
8	Univ. de Bath	Smart Bandage	Vendaje que discrimina las bacterias patógenas y las elimina	Las bacterias rompen la pared celular con enzimas	Células sintéticas que se rompen por el ataque de las bacterias y liberan antibióticos	Jeringuilla con filtro de detección de patógenos	ALTO	MEDIO (imitación)
9	FESTO. Airmotion ride	Músculos neumáticos	Acortar su longitud como efecto de la estimulación por parte de impulsos nerviosos provenientes del sistema nervioso	Músculos, movimiento por contracción y relajación	Movimiento por contracción y relajación de un cuerpo que se llena de aire	Aplicación en plataforma de barco en combinación con un accionamiento hidráulicos	ALTO	BAJO (emulación)
10	BIOSIGNAL	antibiofilm, recubrimiento antibacteriano	Las furanonas reducen la presencia de bacterias sin matarlas	Alga roja furanona (delisea pulcra)	Proceso químico de preparación de superficies para cubrir con furanonas	Hacer recubrimientos de furanonas	MUY ALTO	MUY ALTO (copia)
11	Edificio MEDIATIC	recubrimiento de piel artificial con material EFTE	Basado en la transpiración sudoración	Tomado de la piel de los mamíferos	Capas que hinchan su superficie exterior y dejan pasar más o menos luz, calor y humedad	Aplicación en tiendas de campaña y ropa deportiva	BAJO	BAJO (inspiración)

ANEXO I – Tabla resumen ejercicio 1

Nº	CASO (PRODUCTO)	PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)	PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2
12	KINEGRAMAS Kinigram Suiza	Basado en la iridiscencia por la estructura geométrica de las escamas en las alas de la mariposa	Replica geométrica simplificada para conseguir propiedades ópticas	Efecto óptico en carteles y señales de seguridad	MUY ALTO	MEDIO (replica / imitación)
13	AUTOFLEX de MARAG	Geometría que hace reducción de la reflexión especular	Geometría de matriz de conos alargados para cambiar la reflexión	Botella de vidrio antirreflejos, para evitar incendios	MUY ALTO	MEDIO (copia parc. función)
14	BIG DOG - DARPA	Pierna de perro sistema musculo-esquelético	Replica del sistema con accionamientos hidráulicos y electrónica	Camilla de rescate y transporte de heridos en situación de conflictos	ALTO	ALTO (emulación)
15	Edificio EASTGATE CENTRE de Harare	Ventilación y regulación de temperatura en el edificio	Replica del sistema, simplificado	Ventilación en granjas	MUY ALTO	MUY ALTO (replica)
16	SEASONS (Nao Tamura)	Platos flexibles para servicio de comida	Utilización de la característica del material para cocinar y servir comida	Similar en bolsas para contener alimentos	BAJO	MEDIO (inspiración)
17	WHALE POWER	Aspas de aerogeneradores, aumento de la eficiencia	Replica de la geometría de la aleta en el extremo del aspa	Aplicación en nuevos entornos, aspas de turbinas en centrales hidroeléctricas	ALTO	ALTO (adaptación)
18	ORNILUX Arnold Glass	Algunas telas de araña reflejan la luz UV visible por los pájaros de modo que la evitan	Aplicación de un patrón de líneas que reflejan la luz UV	Aplicaciones de superficies reflejantes de la UV para pájaros y alerta para humanos	MUY ALTO	ALTO (replica)

Nº	CASO (PRODUCTO)		PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)		PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2
19	PURE BOND TECHNOLOGY	Adhesivo útil en ambientes húmedos	El mejillón genera Dihidroxiifenilalanina adhesivo natural de un aminoácido	Mejillón azul (Mytilus Edulis)	Sacar una fórmula similar en características de la proteína de la soja	Otras aplicaciones como en odontología, adhesivos con aplicaciones en estructuras submarinas	MUY ALTO	MUY ALTO (copia / imitación)
20	AIRJELLY Festo	Globo aerostático con vuelo controlado	Hidroesqueleto y movimiento por contracciones musculares	Medusas	Globo de helio para conseguir estabilidad, patas con mecanismo articulado para impulsar	Lo mismo pero con aplicaciones comerciales	MEDIO	MEDIO (simulación)
21	Evan Ulrich Universidad de Maryland (USA)	Prototipo de monocoque	Generación de vórtice de sustentación y ascensión	Semilla de la samara	Replica geométrica	Aplicaciones en ventiladores eficientes, hélices marinas, mezcladores	MUY ALTO	MUY ALTO (imitación)
22	ALBA AYALA, CESAR. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVIERANA, BOGOTA, COLOMBIA	Prototipo de manta raya, robot submarino propulsada por aletas pectorales	Propulsión y navegación por aletas pectorales	Manta raya, Eagle Ray	Replica lo más próximo posible al modelo natural	Aplicación como boya de control remoto, automático con geolocalización	MUY ALTO	MEDIO (replica)
23	ORNILUX Arnold Glass	Aplicación de textura de telaraña para evitar choques de aves con edificios	Algunas telas de araña reflejan la luz UV visible por los pájaros de modo que la evitan	Telas de araña y sus propiedades ante la luz UV	Aplicación de un patrón de líneas que reflejan la luz UV	Recubrimiento plástico para invernaderos, efecto espantapájaros	MUY ALTO	MUY ALTO (Replica)
24	AIRACUDA Festo (efecto finray)	Plataforma robótica submarina	Movimientos musculares de los peces	Barracuda	Efecto Fin-Ray. Musculos artificiales actuadores con aire a presión.	Aplicaciones del mismo objeto	ALTO	ALTO (imitación)

ANEXO I – Tabla resumen ejercicio 1

Nº	CASO (PRODUCTO)	PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)	PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2	
25	QINETIQ Niebla receptor	Cosechadora de agua de niebla	Recuperación de agua de la brisa húmeda, combinación de superficies hidrófilas e hidrofobas	Escarabajo de Namibia	Fabricación de materiales con similares características y estructuras específicas	Prendas y gorras que recogen agua para beber después	ALTO ALTO (Emulación / imitación)
26	ORNILUX Arnold Glass	Aplicación de textura de telaraña para evitar choques de aves con edificios	Algunas telas de araña reflejan la luz UV visible por los pájaros de modo que la evitan	Telas de araña y sus propiedades ante la luz UV	Aplicación de un patrón de líneas que reflejan la luz UV	Aplicaciones en invernaderos y recubrimiento plástico para edificios	MUY ALTO MUY ALTO (replica)
27	LUNOCET	Aletas para natación y submarinismo	Propulsión por aletas, combinación de contracción muscular, geometría específica y cambios de rigidez del material	Aleta caudal del delfín	Replica geométrica (forma, inclinación y posición) y de las características del material en cuanto a flexibilidad. Copia el principio de evitar la caída de presión que favorece el impulso	Propulsión para minisubmarino. Control para salida de humos, fin de chimenea	MUY ALTO MUY ALTO (Copia / emulación)
28	QINETIQ Niebla receptor	Cosechadora de agua de niebla	Recuperación de agua de la brisa húmeda, combinación de superficies hidrófilas e hidrofobas	Escarabajo de Namibia	Fabricación de materiales con similares características y estructuras específicas	Secador de pelo tipo casco	ALTO ALTO (emulación)

Nº	CASO (PRODUCTO)		PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)		PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2
29	PHILIPS HEAD PROTECTION SYSTEM (SUPERSKIN HELMET)	Membrana protectora sobre la superficie del casco de seguridad (motoristas)	La dermis tiene un movimiento relativo entre capas y gracias a su flexibilidad le permite adaptarse y estirarse en las ocasiones necesarias	Flexibilidad de la piel humana	La flexibilidad y movimiento relativo entre capas (por líquido interno) en el recubrimiento que tiene el casco permite reducir la fuerza rotacional cuando se produce un accidente.	Corrección de la dirección de las ruedas en un vehículo cuando entra en un curva, equilibrio de fuerzas	MUY ALTO	MUY ALTO (replica)
30	MIRASOL DISPLAY TECHNOLOGY (QUALCOMM)	Film antirreflejo para pantallas de dispositivos electrónicos	La iridiscencia de las escamas en las alas de las mariposas reduce de la reflexión de la luz	Escamas de las mariposas	Sistema micro-electromecánico compuesto de dos placas conductoras separadas por un espacio, dependiendo de la distancia hay luz reflejada o no	Aplicaciones en señalética para recubrimientos anti-reflejos	ALTO	ALTO (imitación)
31	Double Layer Anti Reflective (DLAR) Laminas de Silicio Cristalino	Film antirreflejo para paneles solares	Prominencias, más pequeñas que la longitud de onda de la luz visible, en la superficie del ojo interfieren la reflexión de la luz	Ojo de la polilla	Replica artificial de la superficie	Aplicación en tiendas de campaña o captadores solares	MUY ALTO	MUY ALTO (copia)
32	ROBOSTRIDER Universidad de Carnegie Mellon	Microrobot	Terminaciones de la patas con pelos hidrorrepelentes que forman una bolsa de aire	Zapatero de agua, Heteroptero	Generación de una fuerza de tensión superficial superior a la gravedad le da flotabilidad	Robots para detección y control de plagas	ALTO	MEDIO (imitación)



ANEXO I – Tabla resumen ejercicio 1

Nº	CASO (PRODUCTO)	PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)	PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2		
33	TECNOLOGIA STABILITECH	Vacunas deshidratadas, aumento de la fecha de caducidad	CRIPTOBIOSIS Supresión de los procesos metabólicos a determinadas temperaturas	Tardigrados	Utilización de un compuesto que mezclado con la vacuna le da estabilidad como si estuviera congelado	Aplicación del mismo proceso a alimentos para su conservación durante el transporte	ALTO	MEDIO (emulación)
34	MMT Textiles LTD	Textiles inteligentes	Bicapa con dos materiales con expansión distinta en función de la humedad	Piña de los pinos	Doble capa de material con ventanas/aperturas	Tomás de aire en edificios, conservación de y aislamiento. Aplicación en alcantarillas	ALTO	ALTO (imitación)
35	HUMMINGBI RD NAV	Robot volador	Vuelo estático del colibrí	Colibrí	Replica del mecanismo, imitación de los movimientos	Aplicación del efecto producido en la joroba del colibrí para reducir vibraciones por medio de zonas rellenas de líquido en máquinas	ALTO	MUY ALTO (imitación)
36	PHILIPS HEAD PROTECTION SYSTEM (SUPERSKIN HELMET)	Membrana protectora sobre la superficie del casco de seguridad (motoristas)	La dermis tiene un movimiento relativo entre capas y gracias a su flexibilidad le permite adaptarse y estirarse en las ocasiones necesarias	Flexibilidad de la piel humana	La flexibilidad y movimiento relativo entre capas (por líquido interno) en el recubrimiento que tiene el casco permite reducir la fuerza rotacional cuando se produce un accidente.	Otras protecciones sobre el cuerpo. Protecciones para aparatos electrónicos, etc.	MUY ALTO	MUY ALTO (imitación)
37	BULL KELP BLOWAVE	Generación de energía submarina	Las algas tienen un anclaje al suelo y se mueven oscilantemente con las corrientes en función de su longitud y nº de hojas	Alga Bull Kelp	Dispositivo que genera energía, anclaje flexible con resistencia a la flexión y torsión, se mueve por acción de las olas en vaivén	Aplicaciones en cimentaciones acuáticas (petroleras, boyas), edificios sometidos a esfuerzos sísmicos	ALTO	ALTO (emulación)

Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Nº	CASO (PRODUCTO)		PRINCIPIO BIONICO (REFERENTE NATURAL)		PRINCIPIO INGENIERIL	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION 1	GRADO DE RELACION 2
38	PLATELETS BRINKER TECH	Sellador de poros y grietas	Cambios de forma y textura pegajosa, se unen para hacer un coagulo	Plaquetas de la sangre	Esfera que se deforma y cierra grietas /poros en conducciones de agua	Antipinchazos, control de flujos de presonas, maletas, trafico, perdidas de energía	ALTO	ALTO (emulación / abstracción)
39	Evan Ulrich Universidad de Maryland (USA)	Prototipo de monocopectero	Generación de vórtice de sustentación y ascensión	Semilla de la samara y arce	Replica geométrica	Bengala de emergencia sustentación prolongada en el tiempo	MUY ALTO	MUY ALTO (transposición n)
40	INSECT TAPE	Cinta adhesiva	Superficie irregular de las patas de los insectos con pelos, unión por fuerzas de van der Waals	Terminaciones peludas de las pata de los insectos	Mismo patrón y dimensiones en polimeros	Superficies no deslizantes, no más clavos, suelas para hielo, cadenas de coche, alfombra de ducha	MUY ALTO	MUY ALTO (copia / reproducción)
41	TIMBERJACK	Maquina forestal	Estructura de patas adaptable a terrenos irregulares	Insectos, saltamontes	Analogía de la pata, forma, proporción y articulación	Detección de minas, amortiguación, regulador de alturas	ALTO	MEDIO (imitación)



**ANEXO II – Tabla resumen ejercicio 2**

ANEXO II – Tabla resumen ejercicio 2

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLÓGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL (APLICACIÓN)	GRADO DE RELACION (ANALOGIA PB - PI)	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS		
						POSITIVOS	NEGATIVOS	
1	CANGREJO AMERICANO (Procambarus clarkii Girard)	Doble articulación de la pinya delantera.	Permitir el movimiento por un cambio de espesor, material y geometría, permite orientarse y poner límite al movimiento	Cambio de espesor, de material (flexibilidad), y adaptar geometría a orientar el movimiento y limitarlo, topes que evitan las roturas	Rotula en dos planos con varios rangos de movimiento. Aplicación en silla y mobiliario de oficina	MEDIO. Transforma la idea original solo utiliza parte de la condición de cambio de geometría.	PB dividido en partes. Experimentación con el individuo natural.	Articulaciones muy desarrolladas, difícil innovación y superar la naturaleza
2	TUERETA/CORT APICOS Labia Minor (Dermaptera)	Articulación n del ala desplegable , apertura consecutiva y no simultáneo. Estudio mecanismo de bloqueo	Apertura por flexibilidad de los pliegues con patrón preestablecido. Presión ejercida por la sangre llena los vasos y empuja las secciones. La resiliña como recubrimiento elástico y de protección	Simulación del plegado de la articulación. Planteamiento de la articulación mas sistema de bloqueo. Articulación mas bloqueo cíclico (apertura-cierre)	7 aplicaciones. Intubación endotraqueal, llenado y expansión del tubo plegado	ALTA. Analogía del PI muy alta pero transformada en la aplicación	Experiencia positiva para futuros proyectos. Fácil extrapolar del PB al PI y poder conceptualizar	Información difícil y compleja. Necesaria una profunda reflexión para aplicar los conocimientos del ser vivo.
3	MANTISPA (Neuroptero)	Plegado de pinzas de la pata delantera	Dislocación de la articulación de la coxa-fémur gracias a la geometría. Además tiene doble rotula y rota el brazo	Doble articulación para conseguir mayor grado de libertad	7 aplicaciones. Mangueras articuladas, sistemas de riego, tubo desplegable en función de la presión del fluido.	ALTO. Utiliza la rotula para conseguir dos grados de libertad por medio de la geometría y del cambio de material	Doble articulación interesante para muchas aplicaciones	Difícil elegir el individuo natural y ver sus características. Depende de la cantidad y calidad de la información

Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLÓGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	DE
4	CONO DE PINO (piña de pino)  Estudio de la articulación de la escala, hoja de la piña	Hidromorfismo, cambio de forma dependiente de la humedad. Sistema de bisagra, deformación longitudinal por comportamiento de diferentes materiales	Material bi-capa impermeable+ higroscópico. Ejemplo de experimento (U. de Bath) papel y polímero	Control de la humedad en recintos y contenedores. Posibilidad de controlar el rango de operación. 5 propuestas, una de ellas control de humedad de invernaderos	MUY ALTO. Solo cambian los materiales	Posibilidad de realizar experimentos. PI muy simple. Aplicación amplia. Fácil extraer solución de la naturaleza.	Dificultad de extraer el PB. Necesidad de tener claro el planteamiento inicial.
5	CAMARÓN MANTIS (estomatópodo)	Efecto de cavitación, liberación de energía. Sistema de palancas cargado por un musculo	Sistema de barras, tensor y gatillo como una ballesta. Independiente de la escala	3 propuestas. Martillo. Prensa. Trampas o cepos.	ALTO. Toma la misma disposición mecánica del ser vivo.	El ser vivo ofrece diferentes posibilidades. Posibilidad de aplicar a varios conceptos	Difícil encontrar ser vivo con suficiente información. Difícil encontrar información del sistema mecánico equivalente
6	ESCORPIÓN  Articulación del abdomen. Mesosoma.	Compresión/flexión de los térgitos para adaptarse a diferentes posiciones gracias a la membrana intersegmental. Inserciones musculares para mover la articulación	Unión de segmentos por medio de músculos /elásticos que se adaptan a diferentes formas	Guarda raíl articulado para carreteras e instalación sobre el existente, barrera laminada	ALTO. Utiliza las uniones rígidas y flexibles, aunque descarta los músculos.	Posibilita la innovación y la diferenciación.	Métodos poco asentados. Dificultad de encontrar información.

ANEXO II – Tabla resumen ejercicio 2

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLÓGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	DE	
7	SALTAMONTES LANGOSTAS (Caelifera)	Unión fémur abdomen. Coxa y membrana	Cambio de espesor y de material. Tres grados de libertad y uno de giro	Simplificación del sistema, verificación con modelo funcional	7 propuestas para cambio de material. 9 para grados de libertad. 7 para cambio de sección. Desarrollo en conectores para enchufes, evitando tirones y roturas.	ALTO. Toma el símil de conexiones internas en articulaciones. flexibles	Facilita la apertura mental. Muy productivo. Flexibilidad. Aprender a buscar.	Dificultad de aplicar la traducción del PB al PI.
8	LANGOSTINO (Penaus Kerathurus)	Articulación de la cola del langostino, abanico. Compactación y empaquetamiento.	Doble giro, de toda la cola y de cada una de las piezas de la cola. Función natatoria y evasiva	Imitación de dos movimientos gracias a dos semiesferas	Conceptos de cajas de envases o carcasas que necesitan reducir volumen y espacio cuando están cerradas	MEDIO. Imita los dos movimientos pero no hay una buena base en el PB	Un individuo puede dar múltiples soluciones. Marco de trabajo para una función clave	Riesgo de fracaso por la toma de decisiones en las primeras fases
9	COCHINILLA DE LA HUMEDAD (Oniscidea)	Exosqueleto, coraza de defensa. Articulación de los segmentos y fenómeno de la conglutinación	Geometría de la sección intermedia, posición del punto de rotación y la unión entre ellas	Imitación y abstracción de la geometría, punto de giro y unión. Studio de fuerzas en la contracción y la extensión.	Aplicación sobre dos conceptos, retráctil y adaptable	ALTO. Bien relacionado pero la aplicación no es afortunada, saca poco partido al estudio previo.	Buena simplificación del PB y abstracción al PI	Eligen lo más sencillo, no profundizan.

Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLÓGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	DE
10	ESCARABAJOS HERCULES o RINOCERONTE (Dynastes Hércules)	No descrita. Articulación quitinosa, elástica. Pinza de enganche.	No descrita. Doble giro horizontal / vertical. Vertical para olas y mareas y horizontal para cubrir mas zonas	Pantalán de puerto. Nueve propuestas	BAJO. Abstracción / inspiración sin entrar en profundidad en el PB	Es posible emular, imitar la naturaleza y favorecer la creatividad por este método. Posibilidad de exportar propiedades y características d la naturaleza	No todo puede hacerse, no es posible copiar a la naturaleza.
11	INSECTOS COLEOPTEROS (Leptinotarsa Decemlineata)	Elevación de 90º respecto de la horizontal. Tiene rotación lateral en el ascenso	Optimizar espacio, plegado y apertura central	Un concepto con varias aplicaciones, tapa de cajón, apertura central y eje posterior.	MEDIO. Solo imita los movimientos y la geometría.		
12	BICHO BOLA (Armadillidium) LANGOSTINO	Cambio de material y espesor	No descrito	Seguridad y protección. Reducción de espacio. Cuatro aplicaciones	BAJO. Lama rígida unida por material flexible	Posibilidad de estudiar un ser vivo y observar la función buscada sobre éste. Posibilidad de evaluar resultados	Información insuficiente y en otros idiomas.



ANEXO II – Tabla resumen ejercicio 2

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLOGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION	ASPECTOS DESTACABLES LOS RESULTADOS	DE
13	TUERETA COMUN. (Forficula auricularia)	Articulación del metámero (anillos). Septo	Simplificación con modelo de cartón. Básicamente igual, incluye el tope o freno mecánico.	7 opciones distintas. Articulación para tren, funda de portátil, zapatilla deportiva (zona flexible), protector de cables, respaldo de somier, mochila.	ALTO. En la aplicación final solo utiliza un movimiento y el tope o freno mecánico.	Posibilidad de muchos conceptos. La abstracción de un metámero es un módulo. Dos alternativas envolvente articulada y superficie articulada.	
14	ABEJA. (Apis Mellifera)	Articulación es del abdomen	Simplificación de como en cuatro secciones unida por una membrana elástica. Mismo grado de libertad de movimiento	Prototipo funcional para verificación de la aproximación conceptual. 5 alternativas, desarrollan codos para tuberías y cañerías orientables.	MUY ALTO. Copia de la articulación con una simplificación para poder fabricar y hacer prototipo.	Las soluciones son aplicables a otros objetos.	Es un método que necesita ser interdisciplinar.
15	CANGREJO AMERICANO (Procambarus clarkii Girard)	Articulación de la pinza delantera, estudio sobre el ser vivo	Basado en el cambio de material, obtención de ejes de giro por geometría y forma y tope o límite de movimiento.	2 conceptos con múltiples aplicaciones. Desarrollan un tapón de aplicador.	ALTO. Buena aplicación que incluye alguna función extra, aplicador de esencias, condimentos, etc.	Experimentación sobre el ser vivo. Experimentación con maqueta. Técnica creativa para obtener diversidad. Posibilidad de reutilización de información y resultados en otros proyectos.	Difícil encontrar información. Es necesario tener conocimientos básicos de biología.

Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLÓGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	DE
16	BELLOTA DE MAR (Balanus)	Válvula que utiliza un sistema de apertura y cierre sensible a la luz para mantener el agua en su interior	Similar al natural pero con un cambio de geometría.	Carcasa sensible a la luz para aplicaciones en ventilación o eliminación de humedad.	ALTO. Simil del músculo que se utiliza para abrir y cerrar al hincharse o no.	Diversidad de ideas. Experimentación con el ser vivo.	
17	CAMARÓN PISTOLA (Alpheus / sinalpheus)	Cierre que almacena mucha energía, al liberarla produce cavitación. Muy alta velocidad. Explicación del principio físico-químico de funcionamiento del músculo.	Simplificación a un trinquete con dos posiciones abierto/cerrado.	6 aplicaciones de sistema de apertura y cierre de seguridad.	MEDIO. Puerta para dique que solo funciona en un sentido.	Diversidad ilimitada. Encontrar ideas que de otro modo no se encontrarían.	La información es dependiente de estudios biológicos. Dificultad en la traducción del PB al PI.
18	ESCORPION	Flexibilidad de la membrana pleural en la unión de metasoma y mesosoma.	Propuesta de 4 PI distintos. 1º membrana discontinua elástica en tiras. 2º similar al anterior pero aumentando la elasticidad. 3º cambio por Tº y Q. 4º membrana hermética y continua. Realizan prototipos para verificación.	Varias aplicaciones para los diferentes PI. Carcasa en segmentos amortiguación en diferentes direcciones, mayor grado de apertura y rotación. Carcasa que se estira en función del producto interior. Aplicaciones en cámaras submarinas.	ALTO.	La aplicación no es única. Una solución natural puede dar varias soluciones técnicas. En biología material y diseño están estrechamente ligados.	

ANEXO II – Tabla resumen ejercicio 2

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLÓGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	DE	
19	BICHO BOLA + ARMADILLO	Articulación de lamas y secciones	Lamas unidades con membrana elástica que se puede extender	Lamas unidades con membranas. Abstracción de las lamas unidades con membranas, geometrización del natural.	5 aplicaciones. Envase hermético de volumen variable. Protecciones deportivas. Recubrimiento para toldos. Invernaderos	MEDIO.	Posibilidad de generar nuevas ideas o mejorar las existentes.	Difficultades para buscar la aplicación sin conocer el PB.
20	PIÑA	Articulación de la escala	Hidromorfismo, cambio de forma dependiente de la humedad. Sistema de bisagra, deformación longitudinal por comportamiento de diferentes materiales	Material bi-capa impermeable+ higroscópico. Ejemplo de experimento (U. de Bath) papel y polímero	12 aplicaciones. Dispositivo configurable, dispensador de abono, semilla o sulfatos en función de las condiciones del entorno.	MUY ALTO.	El modelo natural se puede aplicar al diseño en ingeniería. Nuevas ideas donde cambia el resultado para producir giro no es necesario una bisagra o un eje.	Para un modelo sencillo es difícil encontrar aplicaciones. Necesidad de estudio de materiales.
21	ALAS DE MURCIELAGO	Brazo + mano con sus articulaciones y su membrana	Análisis de la articulación por la inserción muscular por medio de tendones y ligamentos, para absorción de energía	Similar con la mano de los murciélagos y humana.	Estructura desplegable para dar cobijo, tienda de campaña.	ALTO. No se trata de un exoesqueleto.	Beneficio del grupo multidisciplinar. Difícil pero con buen resultado. Nueva forma de trabajo.	Difícil encontrar la analogía ingenieril. Difícil encontrar información biológica.

Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético

Nº	INDIVIDUO Y ARTICULACION	PRINCIPIO BIOLÓGICO (PB)	PRINCIPIO INGENIERIL (PI)	PROPUESTA CONCEPTUAL	GRADO DE RELACION	ASPECTOS DESTACABLES LOS RESULTADOS	DE
22	<p>ARAÑA SALTADORA (Spieler Sitticus)</p> <p>Articulación con mecanismo de salto</p>	<p>Sistema hidráulico interno cambio de presión entre abdomen y patas traseras del fluido corporal (hemolinfa)</p>	<p>Cambio de presión de fluidos, entre cámaras</p>	<p>7 aplicaciones. Sombrilla, estructura desplegable, el cambio de presión hace el intercambio de fluido y amortigua el retroceso.</p>	<p>MEDIO.</p>	<p>Fácil apertura y cierre. Nuevos conceptos. Posibilidad de extrapolar a otros objetos Una pequeña parte del ser vivo da muchos resultados</p>	<p>Difícil de solucionar a nivel ingenieril.</p>

**ANEXO III – Tabla resumen proyecto**

Nº	MARCO DE TRABAJO	FUNCIONES CLAVE (FC)	TABLA BIOMIMÉTICA REFERENTES NATURALES (RN)	GRADO DE RELACION ANALOGIA PB-PI	PROPUESTA CONCEPTUAL (ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PRODUCTO)	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	
						POSITIVOS	NEGATIVOS
1	ALIMENTOS De uso doméstico y para cocción en microondas	7 FC genéricas. No realizan mapa mental. Las FC son abstractas y poco definidas	No realizan tabla pero tienen un mismo patrón. 24 RN para 7 FC, 4 de alerta y aviso, 2 de hacer vacío y 1 de hermético I/O	ALTO. Basado en el cierre de valvas. Estudio de proteína abductina. Hermético por geometría.	3 conceptos aplicando varias de las funciones clave descritas. Sistema de alerta indicador de variaciones. Hermético intermitente. Pérdido de la condición de hermético tras la aplicación de un proceso físico.	Aplicar el método conocido ayuda y da control. Apertura mental.	Al comienzo la metodología parece confusa.
2	ALIMENTOS	Mapa para obtener 4 grupos con 17 FC, varias situaciones de cocinado y precocinado.	Realizan un cambio en la tabla. Relacionan la solución artificial existente con el referente natural y la solución natural. 50 RN algunos coinciden en alguna FC	ALTO. Asocia PB a PI ya conocidos y otros los aporta nuevos.	Contenedor de comida fresca que puede cocinarla. Buena definición de las características y como conseguirlas	Proponen una alternativa a la tabla biomimética.	Solo desarrollan algunas de las 17 FC que tienen, desaprovechan cierto potencial.
3	ALIMENTOS Definición de la situación de uso, para ensaladas frescas	Sin mapa mental. 15 FC, 12 + 3 características. 4 con grado de innovación medio y 3 de interés, grado innovación alto.	Plantean una nueva tabla. Relaciona la FC con las soluciones actuales, soluciones naturales, grado de innovación y aplicaciones. Encuentran 22 referentes naturales, alguno repetido para varias funciones	ALTO. Buena definición del modelo natural y de cómo sería la aplicación.	Bien definido el PI pero solo describe el modo de conseguirlo sin profundizar ni hacer una especificación concreta.		Difícil encontrar información relativa al modelo natural. Pocas oportunidades de innovación en este mercado. Deficiente gestión del tiempo.

ANEXO III – Tabla resumen proyecto

Nº	MARCO DE TRABAJO	FUNCIONES CLAVE (FC)	TABLA BIOMIMÉTICA REFERENTES NATURALES (RN)	GRADO DE RELACION ANALOGIA PB-PI	PROPUESTA CONCEPTUAL (ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PRODUCTO)	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	
						POSITIVOS	NEGATIVOS
4	ALIMENTOS Hay un cambio de marco tras realizar el mapa mental	8 FC muy genéricas. Realizan varios mapas mentales, uno específico para FC y otro para funciones genéricas.	1ª tabla con 4 FC y 10 RN que se replantea por no ser solución para las FC propuestas. 2ª tabla con 6 FC y 33 RN, se apuntan algunos PI en la propia tabla.	MEDIO. Muy conceptual con poco detalle y definición técnica. Función de válvula reguladora de humedad para germinación de semillas.	Contenedor de alimentos, cámara industrial de conservación. Hermético, sin proliferación de bacterias y con señal de aviso, barrera para los UV, estable a la Tª.	La propia tabla biomimética sirve para apuntar el PI. La generalidad de las FC hacen que las soluciones de la naturaleza también sean generalistas y con poca definición.	Es necesario tener claro el planteamiento inicial. Difícil determinar las FC. El estudio de patentes es lento y denso.
5	ALIMENTOS Parten de referentes existente en el mercado y sus características.	En el mapa determinan 12 características y definen finalmente 4 FC. Se definen oportunidades de innovación.	11 RN sin paso intermedio por líneas de investigación de la tabla.	BAJO. No hay investigación del PB y no se explica el PI. Basado en la almeja.	3 conceptos pero poco explicados, incompleto.	Sin aportación.	Sin aportación.
6	ALIMENTOS hacen análisis previo de los 3 marcos antes de elegir	11 FC, pero no realizan mapa mental.	Tabla incompleta, 10 RN para 11 FC, hay menos referentes que funciones.	BAJO	5 conceptos poco definidos para una mochila termo. Hacen propuestas para todos los marcos de trabajo, definiendo las funciones que deben incluir		Invierten el orden de la metodología. Mapa mental después de la tabla. Búsqueda de referentes naturales sin detalle.

Nº	MARCO DE TRABAJO	FUNCIONES CLAVE (FC)	TABLA BIOMIMETICA REFERENTES NATURALES (RN)	GRADO DE RELACION ANALOGIA PB-PI	PROPUESTA CONCEPTUAL (ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PRODUCTO)	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	
						POSITIVOS	NEGATIVOS
7	ELECTRONICA	Mapa mental del que obtienen 9 FC. Analizan y definen 4FC viendo pros y contras respecto del RN	Sin tabla, lo hacen referenciando la necesidad con la solución natural. 15 RN para 4 FC	MUY ALTO. Bien explicado el PB y como llevarlo al PI	Poco definidas las especificaciones, muy completo el diseño de detalle	Los mapas mentales ayudan a hacer una división del problema en partes. Una FC se obtiene en varios seres vivos	Mucho trabajo para hacer la búsqueda de varios seres vivos. Difícil mejorarla función de hermético.
8	ELECTRONICA Análisis previo de los tres marcos	Mapas mentales para obtener 8 FC y 19 soluciones que se llevan a la segunda columna de la tabla biomimética.	Modificación de la tabla, relaciona FC con posibles soluciones, referentes naturales y soluciones existentes. 43 RN para 8 FC y plantean 19 posible soluciones	MUY ALTO. Relaciona cada FC con un PB y una solución técnica actual o define un nuevo PI	Dos conceptos muy bien definidos y completos. Algunas especificaciones las trae del la relación PB-PI y otras las define de otros productos.	Las ideas generadas son distintas a la de otros métodos,. La información generada puede ser interesante para otros trabajos y reutilización en otros entornos.	Difícil de traducir del PB al PI para la función hermético. Difícil estudiar la función hermético de productos existentes.
9	ELECTRONICA	Sin mapa mental. 14FC evaluación de las FC con tabla de oportunidades	Sin tabla. Proponen una nueva que evalúa el grado de oportunidad. Permite desechar FC que no pasan el PB.	MEDIO. Asocia un PB a una solución industrial para poder aplicarla después.	Carcasa de protección para dispositivos tipo Ipad, notebook, etc. Que tiene varias funciones bien definidas por las especificaciones	Nueva tabla de grado de oportunidad. Valoración positiva de trabajo interdisciplinar. Problema técnico acota la búsqueda de soluciones.	Difícil innovar conceptualmente y encontrar analogías e información biológica. Difícil valorar grado de oportunidad.



ANEXO III – Tabla resumen proyecto

Nº	MARCO DE TRABAJO	FUNCIONES CLAVE (FC)	TABLA BIOMIMÉTICA REFERENTES NATURALES (RN)	GRADO DE RELACION ANALOGIA PB-PI	PROPUESTA CONCEPTUAL (ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PRODUCTO)	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	
						POSITIVOS	NEGATIVOS
10	SUMERGIBLE Definición del marco por entorno, aplicaciones actuales y condicionantes	9 FC, 5 de ellas a desarrollar. 4 FC con un grado de oportunidad alto y 1 muy alto.	No utilizan la tabla pero siguen el mismo patrón. 43 RN para las 9 FC	MUY ALTO. Relaciona el PB con el PI y con los requisitos de diseño, según el requisito elige un Pb y realiza la traducción al PI.	Muy bien definido, completo y bien referenciado a las FC. Mochila que cumple con las especificaciones planteadas y en la definición de producto dada.	Acertados cambios en la metodología, tienen éxito. Muy buena definición del concepto por requisitos de FC.	Floja visualización del producto para una muy buena definición conceptual.
11	SUMERGIBLE Elección por ser poco explotado y plantear muchas opciones de aplicación.	Realizan dos mapas mentales, uno para carcasas y otro para hermético. 7FC con 22 posibles soluciones o formas de conseguirlo.	Realizan un cambio en la tabla. Plantean la relación entre FC, posibles soluciones y referentes naturales. Estudio de productos existentes y de patentes. 28 Referentes naturales para 7 funciones clave.	ALTO. Plantean una tabla de “mejores candidatos” en la que se relacionan los seres vivos con las posibles soluciones para las FC y el PI	En la definición de especificaciones se plantea el QUE como una especificación y los COMO en forma de PI que se han desarrollado de los PB. Conceptualmente plantean una bolsa o cesta sumergible	Mucha cantidad de información útil para otros proyectos. Posible innovación en un hueco de mercado. Pensamiento creativo abstracto e innovador.	Ya hay muchas patentes, difícil innovar. Fácil desviarse del objetivo. Demasiados seres vivos para elegir solo uno. Alguna información no es demasiado útil.
12	SUMERGIBLE Análisis previo de los tres marcos. Inicio en la definición de carcasa y de hermético, como punto de salida.	Mapa mental con 4 grupos de funciones, un total de 9FC.	Tabla con cambios, se relaciona función clave con ser vivo y solución natural, donde la solución natural es una descripción de cómo se consigue el PB. 9 seres vivos para 9 FC.	ALTO. La relación entre PB y PI es buena aunque la característica de hermético no es la principal.	Buena definición de requisitos, falta algo de profundidad. Aplicaciones en conexiones de articulaciones para submarinos. Codos articulados en cañerías.	Todas la FC se pueden aplicar a productos de un mismo grupo.	Error al partir de un proyecto anterior no lo mejoran solo lo completan.

Nº	MARCO DE TRABAJO	FUNCIONES CLAVE (FC)	TABLA BIOMIMÉTICA REFERENTES NATURALES (RN)	GRADO DE RELACION ANALOGIA PB-PI	PROPUESTA CONCEPTUAL (ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PRODUCTO)	ASPECTOS DESTACABLES DE LOS RESULTADOS	
						POSITIVOS	NEGATIVOS
13	ENTORNOS EXTERIORES sin electrónica. Análisis preliminar antes de elegir un marco, estudio de soluciones naturales e industriales.	Realización de varios mapas mentales para decidir sobre qué marco trabajar. Mapas para grupos de funciones, formas de conseguir éstas y sobre herméticos, se eligen 4FC.	Cambio en la tabla, relacionan la función clave con el modo de conseguirlo. Realizan una serie de preguntas para definir las FC y la relación con el ser vivo. De 30 referentes naturales se quedan con 2.	ALTA. Buena definición dl PB y PI. Solo es aplicable parcialmente y resulta un problema.	Generan 6 conceptos, el desarrollado finalmente está bien definido por la especificaciones de diseño, sobre ese concepto desarrollan el PI para hacer una mejor aplicación al concepto. Se diseñan unas gafas de protección herméticas, tipo natación, sin acceso a la zona del ojo.	Los mapas mentales ayuda a generar ideas y organizarlas para realizar la búsqueda de información.	

