

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



TESIS:
PROPUESTA Y APLICACIÓN
DE UN MÉTODO DE DISEÑO
INSPIRADO EN LA NATURALEZA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

POR SANTIAGO CHAVEZ REAL

ASESOR: M.I. ANTONIO ZEPEDA SÁNCHEZ

MÉXICO, 2015

"La naturaleza es imaginativa por necesidad, y ha resuelto muchos de los problemas a los que nos enfrentamos hoy en día. El mundo a nuestro alrededor es una enciclopedia viva de genialidad".

- Janine M. Benyus

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme terminar mi carrera y realizar este trabajo tan gratificante.

Al M.I. Antonio Zepeda Sánchez, por su incansable apoyo y asesoría para lograr este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería, por aportar todos los recursos y conocimientos durante estos últimos cuatro años y medio.

A mis padres, por su apoyo, aliento, cariño, y por siempre creer en mí. Por absolutamente todo. Este trabajo es para ustedes.

A mis hermanos, por su paciencia, por escucharme y darme sus puntos de vista y aportar algo cada vez que les hablaba del trabajo.

A Andrea, por sus interminables ánimos, por aguantarme y apoyarme en cada momento de mi trabajo, en las buenas y en las malas. Por siempre creer en mí.

A mi familia, por su motivación y entusiasmo al escucharme, y por siempre haber confiado en que algún día llegaría este día.

A mi abuelo, que siempre estuvo conmigo y por ser una fuente de inspiración. Vito, este título es para ti.

A mis amigos, por chistes de ingenieros mecánicos, por hacerse los que entendían y por su ayuda en el desarrollo de esta tesis.

MUCHAS GRACIAS A TODOS

ÍNDICE	pág.
1. Marco Teórico	1
1.1. Historia	1
1.2. Glosario	3
2. Investigación de las Metodologías de Diseño	9
2.1. Dr. George E. Dieter	9
2.2. Dr. Julian F. V. Vincent	10
2.3. Dr. Y Dra. Bogatyrev	10
2.4. Dra. Jacquelyn K. Nagel	12
2.5. Dr. Michael E. Helms	15
2.6. Janine M. Benyus	16
3. Definición de las Herramientas de Diseño	21
3.1. Descomposición Funcional y Síntesis	21
3.2. Métodos Morfológicos	22
3.3. TRIZ: Teoría para la Resolución de Problemas de Inventiva	23
3.4. Inventor's Manual	25
3.5. Engineering-to-Biology Thesaurus	30
3.6. Categorías Biológicas	31
3.7. Escalas Biológicas	32
3.8. Técnicas para la Búsqueda de Información	33
3.9. Life's Principles	33
3.10. AskNature	33
4. Propuesta de Método	35
5. Caso de Estudio	41
5.1. Necesidad	41
5.2. Definición del Problema	42
5.3. Descomposición	44
5.4. Recopilación de Información	49
5.5. Abstracción del Principio Biológico	50
5.6. Generación de Conceptos	53
5.7. Selección de la Solución	55
5.8. Evaluación de la Solución	57
Conclusiones	59
Bibliografía y Referencias	61
Apéndice	65

OBJETIVOS

- Adquirir un mayor conocimiento acerca de las herramientas aplicadas en la ingeniería de diseño.
- Desarrollar una propuesta de método de diseño inspirado en la naturaleza para la generación de conceptos y la creación sistemática de productos biomiméticos.
- Aplicar la propuesta de método en un caso de estudio sencillo, a manera de prueba de escritorio y demostrar la secuencia lógica de esta.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se analizaron diferentes metodologías de diseño como la tradicional propuesta por George. E. Dieter ([Dieter & Schmidt, Engineering Design, 2009](#)). y aquellas inspiradas en la naturaleza para finalmente proponer un método que las combine. Este método está enfocado solamente a la etapa de diseño conceptual, debido a que es la etapa del diseño más importante para la generación de soluciones en ingeniería. Como demostración se aplicó a un problema sencillo de ingeniería a manera de caso de estudio.

Planteamiento del Problema

El diseño inspirado en la naturaleza ha sido estudiado por diferentes personas a lo largo de la historia, sin embargo, se requiere de una metodología que integre los conceptos de ingeniería con los de la biología, para desarrollar soluciones nuevas a problemas actuales.

El enfoque de este trabajo consiste en la investigación, difusión y validación del diseño inspirado en la naturaleza como una herramienta y potencial fuente de innovación y sustentabilidad en ingeniería.

Justificación

Tomando como fundamento principal el hecho de que la vida ha evolucionado durante un periodo de 3,800 millones de años, resultado de un proceso de prueba y error, el diseño inspirado en la naturaleza nos provee de soluciones probadas y exitosas y, a manera de demostración, existen los modelos y sistemas naturales que después de todo este tiempo perduran hasta nuestros días.

La situación climática a nivel mundial exige productos y procesos sustentables, así como amigables con el ambiente, de manera que tengan un impacto significativo en la sociedad, el menor impacto posible en el entorno en el que se desenvuelve y, -aplicado de una manera ideal- el mejoramiento en sus funciones. Esto es lo que la naturaleza ha logrado con los diseños que ha generado desde entonces.

Alcance

La aplicación del método planteado para la resolución de un problema o necesidad hasta la etapa de diseño conceptual. Esto es, el fundamento y selección de conceptos para la posterior fabricación de un prototipo funcional.

Descripción por Capítulo

Este trabajo se divide en cinco capítulos:

- *Antecedentes*: La presentación de la historia del diseño inspirado en la naturaleza. Ya que es una corriente o filosofía nueva, se considera necesario este apartado para la definición de algunos conceptos para el buen entendimiento y esclarecimiento de la terminología utilizada tanto en la parte de la metodología como la parte biológica del trabajo a presentar.
- *Investigación de las metodologías de diseño*. La exposición de las metodologías existentes o propuestas por diferentes autores, dedicados a la investigación en el ámbito del diseño y que han involucrado a la naturaleza como fuente de inspiración en su trabajo.
- *Definición de las herramientas de diseño*. Se muestran y explican las herramientas de diseño utilizadas en las metodologías de los autores. Aunque no todos los recursos que se presentan en esta sección están hechos para el diseño inspirado en la naturaleza en concreto, se les encontró útiles para el desarrollo de la propuesta de método.
- *Propuesta de método*. Las metodologías estudiadas serán comparadas y contrastadas con la metodología de diseño del ingeniero George E. Dieter, la cual tiene una gran difusión y aplicación en ingeniería en la actualidad. Tomando como base esta metodología, se integrarán las herramientas que se consideraron relevantes de cada una de estas metodologías para así conformar un método de diseño. En este capítulo se describe a detalle los pasos a seguir.
- *Caso de estudio*. La aplicación del método propuesto con el fin de resolver una necesidad actual.

Una vez definidos los objetivos de este estudio y de haber limitado el conocimiento que se abarcará en el mismo, se hace una breve introducción al diseño inspirado en la naturaleza, su historia, y un glosario que servirá de referencia para la terminología utilizada a lo largo del trabajo.

1. MARCO TEÓRICO

A continuación se presenta de forma breve el desarrollo del diseño inspirado por la naturaleza a lo largo de la historia y la aplicación de este en la ingeniería por diferentes personajes en diferentes épocas. También se definen algunos conceptos clave para el claro entendimiento de esta corriente del diseño.

1.1. Historia

Al hablar de diseño inspirado por la naturaleza existen diferentes términos inherentes a la materia, como es el caso de biomimética, biónica, biognosis o biomimicry, los cuales a lo largo de la historia se han referido a este proceso de extracción, adaptación, copia o derivación de principios o estrategias biológicas para su implementación en la ingeniería.

La biomimética, término acuñado por Otto Schmitt en los años cincuenta, (aquí nos referimos a este término como sinónimo de los anteriores), proviene de las palabras griegas βίος (bios: vida) y μίμησις (mimesis: imitación). Es un acercamiento a problemas de ciencias biológicas utilizando la teoría y la tecnología de las ciencias físicas. (Vincent, Bogatyreva, Bogatyrev, Bowyer, & Pahl, 2006).

Aquellos que desean buscar sus inicios podrán encontrar muchos intentos históricos por copiar la naturaleza viviente. Por ejemplo, Leonardo da Vinci, quien observó animales y plantas y vislumbró la posibilidad de convertir los principios biológicos en tecnológicos. Después, se hizo más énfasis en la necesidad de incrementar la capacidad funcional de los dispositivos de ingeniería. Hoy, las ideas biomiméticas también son impulsadas por los conceptos de sustentabilidad e ingeniería compatible con la naturaleza y pueden ser considerados como un enfoque de eco-innovación. (Bogatyrev & Bogatyreva, BioTRIZ: a win-win methodology for eco-innovation, 2014).

A continuación se presentan varios ejemplos extraídos del artículo Biomimetics: its practice and theory (Vincent, Bogatyreva, Bogatyrev, Bowyer, & Pahl, 2006) en los que se muestra como se ha estudiado a la naturaleza, con el fin de diseñar nuevos productos o encontrar nuevas soluciones a problemas de ingeniería:

- El ala estable diseñada por Ignaz e Igo Etrich en 1904 se derivó de la larga (15 cm de envergadura) semilla alada de la *Alsomitra macrocarpa*, una liana que crece en las islas del Pacífico (Coineau & Kresling, 1987). La semilla con sus excrescencias funciona como un ala volante y puede planear distancias significativas.
- La invención del Velcro creado por George de Mestral, quien se inspiró mediante la observación de las cualidades y comportamiento de los ganchos en la superficie del cadillo bajo el microscopio.
- Observando que las hojas del loto permanecen siempre limpias, independientemente de crecer en aguas lodosas y estancadas llevó a la producción

de Lotusan, una pintura para superficies autolimpiables (Barthlott & Neinhuis, 1997). Texturas superficiales similares están siendo utilizadas para repeler polvo o para remover fácilmente la suciedad, y han sido observadas en muchas otras plantas y en otros sistemas, como en las alas de los insectos (Wagner, Neinhuis, & Barthlott, 1996). Las mismas propiedades superficiales están siendo desarrolladas en metales.

- Soft Kill Option (un modelo de elemento finito creado por Mattheck (1989) desarrollado a partir de sus estudios en formas para reducir los esfuerzos en el crecimiento adaptativo de los árboles) fue utilizado para diseñar el chasis del coche biónico de Daimler – Chrysler, basado en la forma del pez cofre (*Ostracion meleagris*), el cual tiene la combinación inusual de un gran volumen dentro de una pequeña separación entre ejes (Anon, 2005).
- El adhesivo seco fue desarrollado a partir del mecanismo adhesivo de las patas de los geckos. Un solo pelo de la pata de un gecko (seta) se adhiere igualmente bien en superficies hidrofóbicas e hidrofílicas, generando fuerzas de van der Waals de 10 MPa, demostrando que las propiedades adhesivas de las setas del gecko son resultado del tamaño y la forma de las yemas de este animal, las cuales se conforman a la topografía superficial local y no son mayormente afectados por la química superficial (Autumm, 2001) (Geim, y otros, 2003).

La difusión y la aplicación práctica de la biomimética como metodología de diseño aún permanece vaga, pero imitar a la naturaleza o ser inspirado solamente por sus formas, colores, y texturas no es biomimética; esto conlleva un conocimiento mayor en el área de la biología, y se debe de estar informado sobre la ciencia de la naturaleza, no simplemente por su aspecto. (El-Zeiny, 2012).

El diseño inspirado por la naturaleza está ganando importancia como un movimiento en el desarrollo del diseño ambientalmente consiente y sustentable, esto a veces resulta en innovación. Desde el punto de vista de los estudios en diseño, algunas características que hacen del diseño inspirado por la naturaleza un problema especialmente interesante de estudiar son las siguientes:

1. El diseño inspirado por la naturaleza es inherentemente interdisciplinario. Por definición, requiere de analogías cruzadas entre dos diferentes campos del conocimiento, la biología y la ingeniería.
2. Ya que los objetos, las relaciones y los procesos tanto en biología como en ingeniería son muy diferentes, biólogos e ingenieros típicamente se expresan con una terminología muy diferente, lo que crea problemas de comunicación.
3. Ya que los biólogos en general buscan comprender los diseños de la naturaleza, mientras los ingenieros generalmente buscan generar diseños para nuevos problemas, ellos típicamente utilizan diferentes métodos de investigación y frecuentemente tienen diferentes perspectivas en el diseño.

4. Los diseños biológicos tienden a ser más multifuncionales e independientes que los diseños ingenieriles.
5. Los recursos, como los materiales y los procesos, disponibles en la naturaleza para realizar o abstraer diseños conceptuales son típicamente muy diferentes a aquellos recursos disponibles en el dominio de la ingeniería.

Estos puntos se deberán tomar en cuenta al abordar un problema biomimético como ingenieros. (Helms, Vattam, & Goel, 2009).

1.2. Glosario

Al ser un tema relativamente nuevo en ingeniería, es necesario establecer algunas definiciones de la terminología utilizada en el diseño inspirado en la naturaleza y las diversas corrientes o propuestas contenidas en este estudio. Al esclarecer los términos, se hace una aportación a la ingeniería para un mejor entendimiento del trabajo propuesto, así como futuras referencias al diseño inspirado en la naturaleza.

- ACCIÓN

Es el cambio o modificación que un sujeto hace a las propiedades del objeto. Una acción incluye las fases de inactividad. (Inventor's Manual)

- BIOMIMÉTICA

(Ingeniería) El estudio de la estructura y la función de sistemas biológicos como modelos de diseño e ingeniería de materiales y máquinas.

(Biología) La imitación de la vida utilizando sistemas biológicos análogos.

- CAMPO

Es la energía que proporciona la acción o interacción entre dos entidades o sustancias. El campo puede ser: mecánico (incluyendo el acústico), térmico, químico, eléctrico, magnético y electromagnético, gravitacional y nuclear. (Inventor's Manual)

- CONTEXTO

Es el entorno que rodea al sistema y define a la función principal del mismo Incluye un conjunto de circunstancias, reglas, restricciones, niveles de abstracción, memorias de eventos pasados, y expectativas de un futuro probable e inevitable. (Inventor's Manual)

- DISEÑO

Concepción original de un objeto u obra destinados a la producción en serie. (RAE)

- ENTORNO

Son los alrededores físicos más cercanos al área del problema del sistema. (Inventor's Manual)

- FORMA

Configuración externa de algo. (RAE)

(Biología) Estructura que forma parte de algún ser vivo. (RAE)

- FUNCIÓN

Es el resultado de un número de acciones (pueden ser cero) que proporciona el comportamiento del sistema. La función depende del contexto y también define el contexto. (Inventor's Manual)

- HEURÍSTICA

Técnica de la indagación y del descubrimiento. (RAE)

En algunas ciencias, manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc. (RAE)

- MÉTODO

Modo de decir o hacer con orden. (RAE)

Modo de obrar o proceder, hábito o costumbre que cada uno tiene y observa. (RAE)

- METODOLOGÍA

Ciencia del método. (RAE)

Conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal. (RAE)

- OBJETO (PRODUCTO)

Es un componente del sistema que será controlado, procesado o modificado. (Inventor's Manual)

- PRINCIPIO BIOLÓGICO

Parte de la solución biológica utilizada como inspiración o recurso para abordar un problema en ingeniería.

- PROCESO

Conjunto de las fases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial. (RAE)

(Biología) Conjunto de las fases sucesivas utilizadas por un ser vivo con cierta finalidad. (RAE)

- SISTEMA

Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto. (RAE)

~ Biológico

Red compleja de entidades biológicas relevantes. (RAE)

Entidad que se compone de elementos los cuales interactúan entre ellos y están juntos para realizar una función. (Inventor's Manual)

- SOLUCIÓN BIOLÓGICA

Proceso, sistema o forma biológica utilizada por la naturaleza para abordar un problema.

- SUB-SISTEMA

Es la parte del sistema que apoya a la función principal de sistema, y este puede incluir a su vez sub-sub-sistemas. En ingeniería de sistemas, existe una clara jerarquía de tales sub-sistemas: elementos, componentes y partes. Por simplicidad, se consideran estas palabras como sinónimos. (Inventor's Manual)

- SUJETO (HERRAMIENTA)

Es un componente del sistema que realiza una acción para afectar o cambiar un objeto o su entorno. (Inventor's Manual)

- SUPER-SISTEMA

Es el sistema que incluye otros sistemas como sub-sistemas. (Inventor's Manual)

- SUSTANCIA

Es la materia de la cual todos los objetos físicos están compuestos. La sustancia también tiene estructura, y está hecha de bloques de construcción discretos (moléculas, átomos). Pero no se consideran las propiedades estructurales de la sustancia si el contexto del problema permite "omitir" este aspecto. (Inventor's Manual)

- SUSTENTABILIDAD (SOSTENIBILIDAD)

Capacidad de poder mantener los aspectos biológicos en su productividad y diversidad a lo largo del tiempo, y de esta manera ocupándose por la preservación de los recursos naturales a fomentar una responsabilidad consciente sobre lo ecológico y al mismo tiempo crecer en el desarrollo humano cuidando el ambiente donde vive. (Wikipedia)

- MÚSCULO PLANTARIS

Es un músculo superficial que forma parte de la parte posterior de la pierna, y ayuda a la en la flexión plantar del tobillo, así como en la flexión de la articulación de la rodilla. (Wikipedia)

- MÚSCULO FLEXOR DIGITALIS LONGUS

Es un músculo situado en la zona tibial (interna) de la pierna y es responsable del movimiento y flexión de los dedos del pie. (Wikipedia)

- MÚSCULO GASTROCNEMIUS

Es un poderoso músculo situado en la parte posterior baja de la pierna. Se extiende desde sus dos cabezas justo por encima de la rodilla hasta el talón. El gastrocnemius participa principalmente en correr, saltar y otros movimientos "rápidos" de la pierna, mientras que en menor grado que participan caminar y en la posición de pie. (Wikipedia)

Una vez presentados el marco teórico y el gran potencial que tiene esta nueva corriente de la ingeniería de diseño se enuncian las metodologías estudiadas que, junto con las herramientas de diseño, sirvieron como referencia para la creación del método de diseño.

2. INVESTIGACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO

En este apartado se definen las diferentes metodologías propuestas para la aplicación del diseño inspirado en la naturaleza. Esta información se utilizó para la propuesta del método de diseño, y este se aplicó a modo de caso de estudio.

2.1. Dr. George E. Dieter

El Dr. George E. Dieter, profesor emérito de la Universidad de Maryland, se ha desenvuelto en las áreas de los procesos de manufactura, la ingeniería de diseño, la ingeniería de calidad, y la educación en la ingeniería a lo largo de su vida, desarrollando y publicando una metodología de diseño (Figura 2.1) en su libro *Engineering Design* junto con su colega Linda C. Schmidt, de la cual solo se utilizará la parte de diseño conceptual, como se planteó en los alcances de este trabajo.

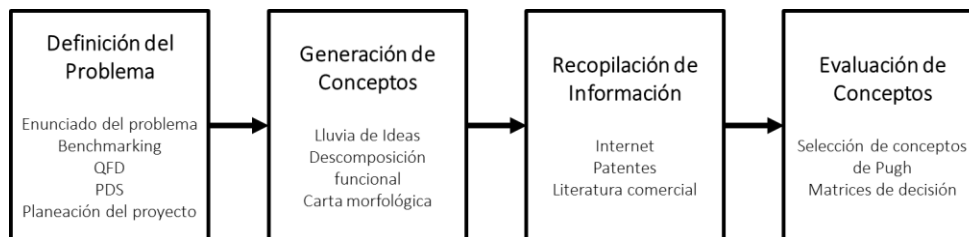


Figura 2.1. Metodología de diseño de Dieter (Diseño Conceptual).
(Dieter & Schmidt, *Engineering Design*, 2009).

A grandes rasgos el diseño conceptual se resume en cuatro etapas:

- Definición del problema: En esta etapa se definen los requerimientos y restricciones del proyecto con base en la necesidad y gusto del cliente.
- Recopilación de información: Se comienza una investigación del estado del arte del producto o proceso a diseñar, cómo fue diseñado anteriormente y la posible solución de las funciones que este desempeñará.
- Generación de conceptos: Se realizan diferentes actividades para integrar los conocimientos adquiridos en la investigación previa y así empezar a definir el resultado.
- Evaluación y selección de conceptos: Termina la etapa de diseño conceptual y tras una serie de criterios aplicados se obtiene una solución.

Al haber aplicado esta metodología con anterioridad, se consideró pertinente utilizarla como un punto de partida sobre el cual desarrollar la propuesta de método que se desarrolló y que se presenta en el siguiente capítulo de este trabajo.

2.2. Dr. Julian F. V. Vincent

Julian Vincent, doctor en biología por la universidad de Sheffield, fue profesor de biomimética en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Bath y director del Centro para Tecnologías Biomiméticas y Naturales.

Pasó la mayor parte de su carrera como investigador en el Departamento de Zoología de la Universidad de Reading, estudiando el diseño mecánico de organismos y trabajando para introducir partes de estos diseños en nuevas tecnologías.

Su misión en la Universidad de Bath fue introducir los conceptos de la biología en la ingeniería y el diseño, y así, hacer que el diseño adaptativo de los organismos esté disponible para el diseño de ingeniería avanzada y de control.

Vincent propuso la siguiente metodología de cinco pasos (Glier, Tsenn, Linsey, & McAdams, 2011):

1. Definición del problema. Lista de propiedades y funciones deseables e indeseables.
2. Analizar y comprender el problema para encontrar los conflictos y contradicciones. Encontrar la analogía funcional en biología o utilizar la matriz de contradicciones biológicas.
3. Comparar soluciones recomendadas por la biología y TRIZ. Encontrar soluciones comunes en biología e ingeniería. Enlistar los principios técnicos y biológicos recomendados.
4. Basado en estas soluciones hacer un "puente" del diseño natural a diseño técnico. Hacer ambos sistemas compatibles. Hacer una lista de las composiciones generales recomendadas.
5. Para crear una tecnología completamente nueva agregar a los principios TRIZ algunos principios puramente técnicos o biológicos.

2.3. Dr. Y Dra. Bogatyrev

Dr. Nikolay Bogatyrev

El Dr. Nikolay Bogatyrev es un experto en TRIZ y consultor con más de veinte años de experiencia en el Reino Unido y Rusia. El doctor actualmente enseña TRIZ en la Universidad de Bath para futuros ingenieros y administradores.

Es doctor en biología, pero su principal interés es el enfoque ingenieril y conciencia ecológica en la arquitectura y el diseño. Él tiene más de ochenta publicaciones desde ciencia popular hasta artículos de investigación y libros.

Aplicando TRIZ en la ecología y la agricultura, Nikolay desarrollo un conjunto de reglas para la eco-ingeniería y las publicó en el libro “Ecological Engineering of Survival”.

Dra. Olga Bogatyreva

La Dra. Olga Bogatyreva tiene conocimientos en ciencias conductuales y en la psicología y utiliza esta experiencia para desarrollar los métodos más eficientes para la enseñanza de la creatividad y la inventiva. Su campo principal es el comportamiento organizacional y la toma de decisiones grupal en el cual tiene más de sesenta publicaciones. Ella tiene un título en ciencia de la teoría de la complejidad y un doctorado en biología.

Los doctores propusieron esta metodología de seis pasos ([Bogatyrev & Bogatyreva, TRIZ-based algorithm for Biomimetic design, 2012](#)). Cada etapa del algoritmo consiste en descripciones precisas del procedimiento y sugiere herramientas relevantes de TRIZ para su asistencia. Así, las etapas del diseño biomimético son:

1. Definir las funciones principales del dispositivo, su entorno, tiempo, y tamaño de la escala. Utilizar herramientas TRIZ para la definición del problema.
2. Hacer una lista de parámetros esenciales para el desempeño de la función principal: Formular los requerimientos del prototipo biológico. Expresar el desafío en términos de los requerimientos conflictivos. Definir las contradicciones.
3. Buscar prototipos en la biología. Disecar, analizar y clasificar los prototipos de acuerdo a los requerimientos funcionales principales. Revelar los parámetros principales de función/comportamiento y formular los requerimientos para su implementación en ingeniería. Revelar las contradicciones.
4. Describir el comportamiento del bio-prototipo utilizando el operador de 9 ventanas. Definir los atributos requeridos para cada elemento del sistema y su entorno. Extender la lista de propiedades añadiendo los opuestos de cada parámetro.
5. Arreglar los parámetros que son relevantes para la función principal en una tabla con las partes de las variables del sistema en columnas y filas.
6. Encontrar una combinación de los parámetros más deseables, posibles y asequibles para crear un dispositivo biomimético no necesariamente existente en la naturaleza, pero que puede ser implementado con la ayuda de la ingeniería. Combinar las incompatibilidades utilizando los 40 Principios Inventivos.

2.4. Dra. Jacquelyn K. Nagel

La Dra. Nagel trabajó como egresada del doctorado en el Laboratorio de Ingeniería de Diseño de la Universidad James Madison. En su trabajo doctoral exploró la integración del diseño inspirado en la naturaleza con metodologías de diseño funcionales para la creación sistemática de productos biomiméticos.

La aplicación de su metodología de diseño sistemática llevó al desarrollo de sistemas de sensores biomiméticos químicos y ópticos y a un dispositivo de recolección térmico solar inspirado en el líquen.

Su metodología consta de los siguientes pasos (Nagel & Stone, *A Systematic approach to Biologically-inspired Engineering Design*, 2011):

1. Definición del problema

El primer paso determina la dirección que tendrá el proceso de diseño. El diseñador puede elegir si empezar de manera tradicional con los requerimientos de un cliente o explorar alguna curiosidad. Estos dos caminos son identificados como diseño basado en el problema o diseño basado en la solución, respectivamente. Tomar el camino del diseño basado en el problema significa que el diseñador debe recopilar un conjunto de necesidades, requerimientos y restricciones. Identificar las necesidades del cliente es la parte más relevante e importante del proceso de diseño, ya que estas forman las bases de la funcionalidad del producto, así como sus especificaciones.

2. Descomposición

El segundo paso involucra la descomposición de las necesidades o de algún sistema biológico interesante en, primero, un modelo de caja negra y posteriormente un diagrama funcional. Todos los modelos creados con este método utilizan el léxico del modelado de base funcional. Respecto al diseño basado en el problema, el propósito de la caja negra es abstraer las funciones generales.

3. Consulta

El paso tres involucra consultar una base de conocimiento para identificar soluciones para cada par funcional o de flujo del diagrama funcional. Se requieren dos bases de conocimiento: una que contenga sistemas ingenieriles exitosos y la otra que contenga sistemas biológicos. Para integrarse a este método, se requiere que ambas estén indexadas por funciones y flujos.

4. Hacer conexiones

El paso cuatro involucra hacer conexiones. Las conexiones a través de analogías, metáforas y primeros principios (axiomas) asisten para formar lazos o puentes entre los dominios de la biología y la ingeniería. Las conexiones son pasos que permiten que el ingenio de la naturaleza sea descubierto y adaptado para su uso en sistemas de ingeniería.

5. Generación de conceptos

El quinto paso involucra la generación de conceptos y la creación de soluciones conceptuales inspiradas en la biología. La síntesis de conceptos involucra análisis y reflexión. El análisis de las soluciones biológicas e ingenieriles arrojadas por el paso 3. La reflexión de las conexiones al dominio de la ingeniería formuladas en el paso 4. La síntesis de soluciones existentes en ingeniería y las soluciones inventivas inspiradas en la naturaleza derivan en una nueva idea. Una vez que se realiza la síntesis, el resultado será cuando menos de un concepto.

6. Múltiples avenidas de diseño

Ofreciendo cinco pasos de alto nivel, los cuales son personalizables dependiendo el problema, esta metodología no debe ser vista como una secuencia estricta de la aplicación de herramientas iterativas. Mejor dicho, la metodología de diseño debe verse como un punto de partida o como un conjunto de guías para llegar al diseño inspirado en la naturaleza. Permitiendo tomar un enfoque basado en el problema o en la solución. Empezando por las necesidades del cliente, una curiosidad, un sistema biológico conocido, o un proceso biológico conocido, todas las alternativas son posibles con esta metodología. La Figura 2.2 resume las avenidas del diseño basado en el problema que cercanamente sigue con el diseño sistemático tradicional.

7. Validación

La validación inicial de la metodología de diseño sistemática inspirada en la naturaleza se consigue a través de la aplicación de la metodología para (1) verificar si esta reproduce productos biomiméticos existentes y, (2) identificar una versión del desarrollo de un concepto íntimamente relacionado a través de una revisión de la literatura. El análisis y la reproducción de productos biomiméticos existentes a través de su función primaria permiten la verificación de la metodología ya que el resultado es conocido. Validar la metodología para productos biomiméticos no existentes requiere una revisión la literatura para cuantificar si las variantes del concepto son realistas o de ciencia ficción. Encontrar una versión desarrollada íntimamente relacionada con un diseño conceptual biológicamente inspirado que indica que el concepto es factible. La semejanza está basada en la funcionalidad y en los componentes seleccionados para lograr dicha funcionalidad. Existen dos formas para evaluar la validez de un producto biomimético según Nagel:

7.1. Probar a través de productos biomiméticos existentes.

7.2. Probar a través de conceptos coincidentes en productos existentes.

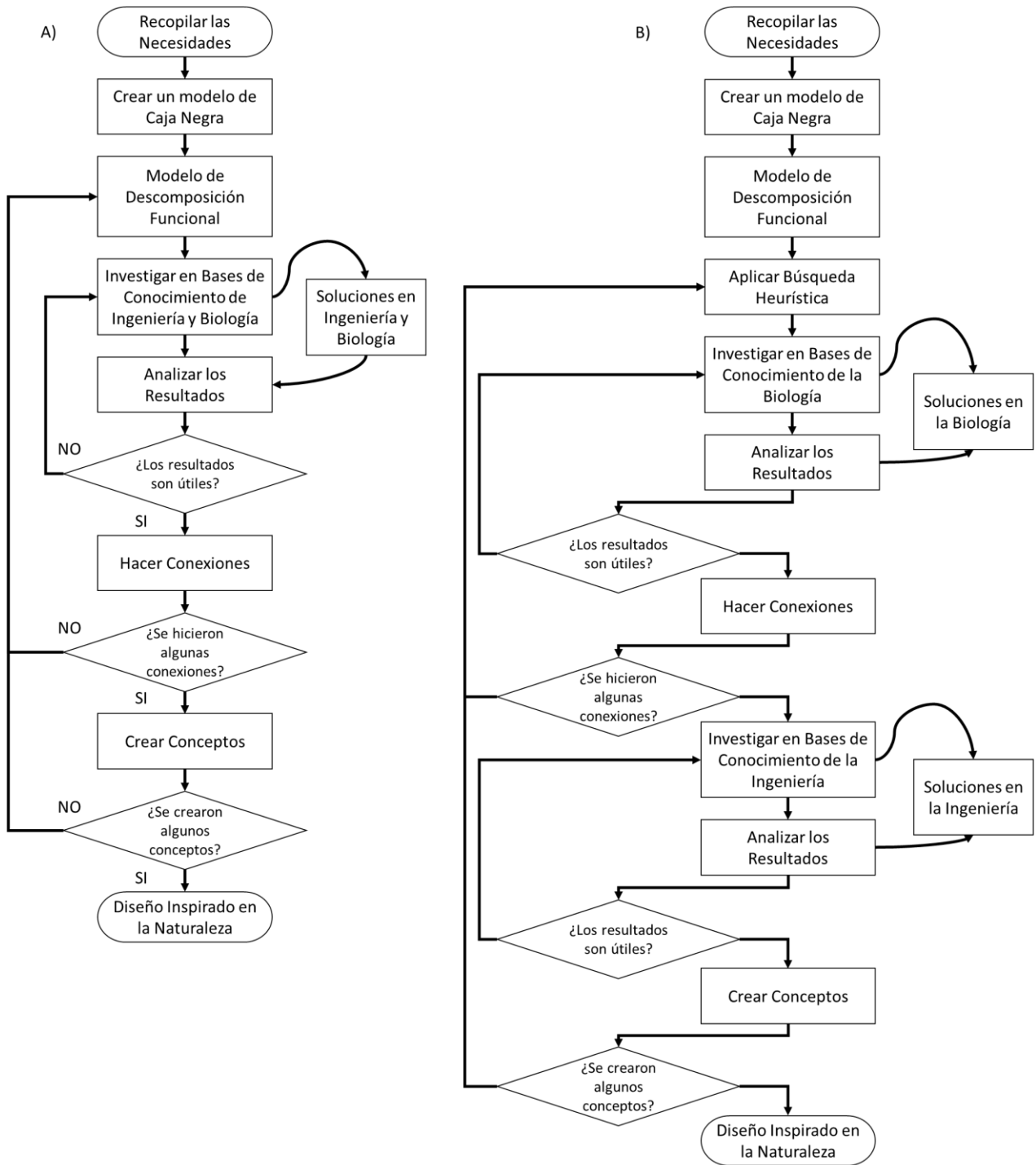


Figura 2.2. Diagramas de flujo del proceso de diseño sistemático inspirado en la naturaleza; A) Diseño tradicional; B) Aplicando la heurística. (Nagel & Stone, A Systematic approach to Biologically-inspired Engineering Design, 2011).

2.5. Dr. Michael E. Helms

La investigación del Dr. Helms, del Tecnológico de Georgia, en diseño inspirado en la naturaleza, se centra en el proceso cognitivo del diseño, donde el diseño se apoya en la extracción de analogías de la naturaleza. En el contexto de una clase a nivel licenciatura de diseño inspirado en la naturaleza él notó que la formulación de problemas en un contexto de diseño abierto e innovador es difícil, dinámico, e influenciado por analogías biológicas disponibles para los diseñadores. Así, una analogía biológica no solo funciona para generar soluciones a problemas, pero también para entender y acotar el problema en sí. El llamó a este proceso por el cual un sistema biológico influencia la formulación de problemas Evolución Analógica del Problema (APE, por sus siglas en inglés).

Con base en un estudio de un grupo de alumnos de diferentes áreas del conocimiento, presentado en su artículo (Helms, Vattam, & Goel, 2009), Helms concluyó que existen dos principales estrategias para abordar los problemas en el diseño biomimético, a continuación se detallan los pasos que componen a cada una de estas:

1. Diseño enfocado en la solución (De la biología al diseño):
 - 1.1. Identificación de una solución biológica:
Los diseñadores comienzan con un fenómeno biológico por desarrollar.
 - 1.2. Definición de la solución biológica:
Este paso lleva a los diseñadores desde el análisis de estructuras y mecanismos superficiales hasta el entendimiento de un sistema biológico.
 - 1.3. Extracción del principio:
Después de que el fenómeno biológico es ampliamente estudiado y comprendido, los principios son extraídos de una forma la cual involucra remover las referencias estructurales y ambientales del dominio biológico. En otras palabras tomar este fenómeno y aterrizarlo al conocimiento ingenieril.
 - 1.4. Replanteamiento de la solución:
Este paso consiste en considerar como los humanos pueden ver la utilidad de la función lograda por el fenómeno biológico.
 - 1.5. Búsqueda de un problema:
Después de replantear el fenómeno biológico como algo útil para la humanidad, se identifica un problema donde este principio se aplicará.
 - 1.6. Definición del problema:
Se define el problema aplicando herramientas como descomposición y optimización funcional, de las que se hablará más adelante.

1.7. Aplicación del principio:

El principio biológico se traduce al dominio de la ingeniería introduciendo nuevas restricciones. E.g. Peso, flexibilidad, resistencia al impacto y criterios del proceso de manufactura.

2. Diseño enfocado en el problema (Del desafío a la biología):

2.1. Definición del problema:

Ya que se tiene el problema a solucionar, se puede pensar en el problema como una función.

2.2. Replanteamiento del problema:

¿Cómo las soluciones biológicas logran x , y o z función?

2.3. Búsqueda de una solución biológica:

Se habla de cuatro estrategias o técnicas generales para encontrar una solución biológica relevante para el problema. Estas se exponen en la sección 4.8.

2.4. Definición de la solución biológica.

2.5. Extracción del principio.

2.6. Aplicación del principio.

2.6. Janine M. Benyus

Janine M. Benyus es una bióloga, consultora de innovación, y autora de seis libros, incluyendo *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. En *Biomimicry*, ella llama a esta disciplina emergente que emula los diseños y procesos de la naturaleza (Estudiar una hoja para inventar una mejor celda solar es un ejemplo.) para crear un planeta más sustentable y saludable.

En 1998, Janine cofunda la primera consultora bio-inspirada en el mundo, obteniendo diseños sustentables de la naturaleza para más de doscientos cincuenta clientes.

En 2010, ella y su equipo combinan las dos ramas (con y sin fines de lucro) de la empresa en una sola para formar *Biomimicry 3.8*. Trabajando como una empresa social, *Biomimicry 3.8* es la empresa líder a nivel mundial de consultoría de innovación biomimética, entrenando a profesionales, y programas de estudio de desarrollo para los educadores. Su misión es inspirar, educar y conectar a la comunidad cada vez mayor de profesionales de la biomimética en todo el mundo.

Su metodología consta de los siguientes pasos:

1. Definir el contexto.
Especificar el problema así como sus condiciones operativas.
2. Identificar las funciones.
Determinar las funciones clave que el diseño debe desempeñar. ¿Qué necesita hacer este diseño?
3. Integrar los Principios de la Vida (Life's Principles)
Comprometerse a incorporar los Principios de la Vida a los requerimientos de diseño. Los Principios de la Vida son lecciones de diseño de la naturaleza, basadas en el hecho de que la vida en la Tierra está interconectada, interdependiente, y sujeta al mismo conjunto de condiciones operantes.
4. Descubrir modelos naturales.
Encontrar organismos o ecosistemas que han evolucionado estrategias para resolver las funciones necesarias.
5. Abstracter estrategias biológicas.
Determinar el mecanismo detrás de cada estrategia de los organismos y traducirla a un principio de diseño. Ayuda: Remover las referencias biológicas.
6. Lluvia de ideas bio-inspiradas.
Pensar diferentes ideas para aplicar los principios de diseño y así resolver el problema.
7. Emular los principios de diseño.
“Pulir” las mejores ideas del paso anterior y desarrollar un concepto de diseño. Considera aspectos de escala y si se puede ir más allá de emular la forma para también emular el proceso y el ecosistema.
8. Medir según los Principios de la Vida
Evalúa tu diseño utilizando los Principios de la Vida como una lista de verificación.

Al combinar estos pasos, podemos encontrar dos diferentes enfoques similares a los que plantea Helms en su metodología. Estos se muestran a detalle en la Figura 2.3.

“Si queremos emular conscientemente la genialidad de la naturaleza, necesitamos ver diferente a la naturaleza. En Biomimicry, vemos a la naturaleza como modelo, medida, y maestra.” (Benyus, 1997).

- La naturaleza como Modelo: Biomimicry es una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza y luego emula estas formas, procesos, sistemas, y estrategias para resolver problemas humanos – sustentabilidad. El Biomimicry Guild

y sus colaboradores han desarrollado una herramienta práctica de diseño, llamada la Espiral de Diseño (Biomimicry Design Spiral), para usar a la naturaleza como modelo.

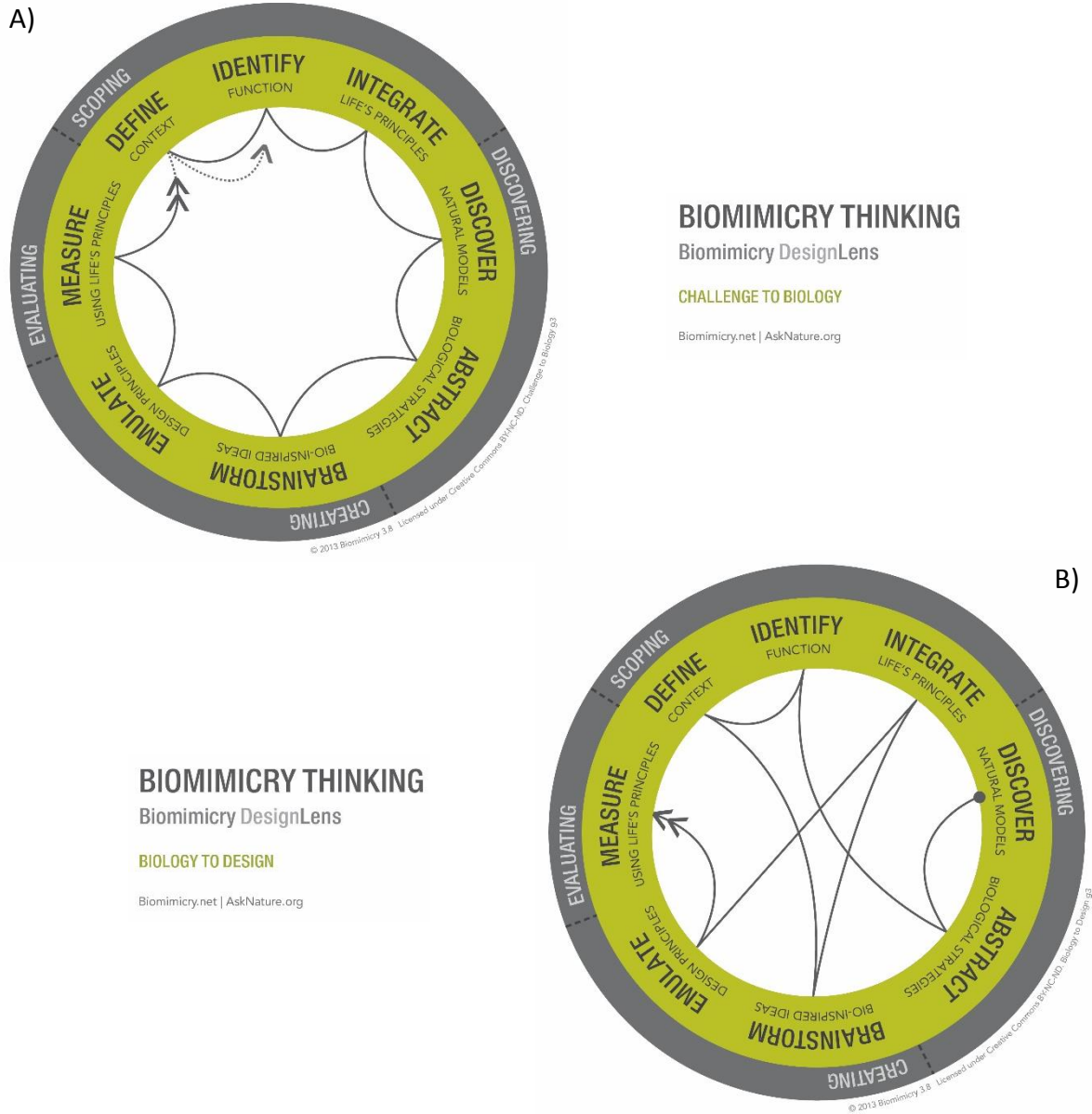


Figura 2.3. Biomimicry Design Lens. En esta imagen se resume la metodología planteada por Biomimicry 3.8. A) Del desafío a la biología. B) De la biología al diseño.
(Biomimicry Thinking: Biomimicry 3.8, 2014)

- La naturaleza como Medida: Biomimicry utiliza un estándar ecológico para juzgar la sustentabilidad de nuestras innovaciones. Después de 3,800 millones de años de

evolución, la naturaleza ha aprendido lo que funciona y lo que perdura. La naturaleza como medida está capturada en los Principios de la Vida (Life's Principles) y estos están incrustados en el paso de evaluación de la Espiral de Diseño.

- La naturaleza como Maestra: Biomimicry es una nueva forma de ver y valorar a la naturaleza. Esta introduce una era basada no en lo que podemos extraer del mundo natural, sino en lo que podemos aprender de este.

Una vez establecidas las metodologías de diseño con las que se trabajaron, se definen las herramientas que utilizan cada uno de los autores. De esta forma se esclarece el cómo se pretende aplicar dichas herramientas y en qué etapa de la metodología de Dieter se considera que podrían aplicarse.

3. DEFINICIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO

Siendo que no existe una metodología de diseño “oficial” en el diseño inspirado en la naturaleza, si existen algunas herramientas derivadas del diseño y adaptadas a esta nueva corriente que se inspira en las formas y funciones de la naturaleza. Una vez conocidas las metodologías de diseño, es importante describir estas herramientas utilizadas por los autores y otras que fueron consultadas para el desarrollo del método de diseño.

Las herramientas que se integraron a la propuesta de método son las siguientes:

- Información tomada del libro *Engineering Design* (Dieter & Schmidt, *Engineering Design*, 2009).
 - Descomposición Funcional y Síntesis
 - Métodos Morfológicos
 - TRIZ: Teoría para la Resolución de Problemas de Inventiva
- *Inventor’s Manual* (Bogatyrev & Bogatyreva, *Inventor's Manual*, 2014).
- *Engineering-to-Biology Thesaurus* (Nagel & McAdams, *An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design*, 2010).
- Información tomada del artículo *Function-based, biologically inspired concept generation* (Nagel, Nagel, Stone, & McAdams, 2010).
 - Categorías Biológicas
 - Escalas Biológicas
- *Técnicas para la Búsqueda de Información* (Helms, Vattam, & Goel, 2009).
- *Life’s Principles* (*Biomimicry Design Lens: Biomimicry 3.8*, 2015).
- *AskNature* (*Why AskNature?: AskNature*, 2015).

3.1. Descomposición Funcional y Síntesis

Una estrategia común para resolver cualquier tarea compleja o describir un sistema complejo es descomponer estos en unidades más pequeñas que son más fáciles de manejar. La descomposición debe resultar en unidades, las cuales representan significativamente la entidad original. Las unidades de la descomposición deben de ser obvias para el que lo descompone. Las descomposiciones son útiles para entender la tarea de diseño y para la asignación de recursos.

Existen dos formas de descomposición:

- **Descomposición Física**

Muchos ingenieros comienzan con la descomposición física, en la que separan un producto en sus diferentes sub-ensambles y estos a su vez hasta llegar a un sub-sistema o

componente mínimo e indispensable y describir cómo funcionan estas partes para crear el comportamiento del producto.

Esto ayuda al ingeniero y al diseñador a contemplar la totalidad de componentes en un producto y pensar si una parte pudo haber sido omitida o agregada en el diseño que se analiza. Este proceso pretende dar a conocer las partes de un sistema o producto sin asociar funciones a cada componente.

- **Descomposición Funcional**

El diseño sistemático representa a todos los sistemas técnicos como transductores interactuando con el mundo que los rodea. El sistema interactúa con el usuario y con el ambiente intercambiando flujos de energía, material, y señal con ellos. En 1997 comenzó una investigación para estandarizar un lenguaje funcional (Little, Wood, & McAdams, 1997) y años más tarde resultó el establecimiento de una Base Funcional (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002).

En la Base Funcional se estandarizaron los tipos de flujos y los nombres de los bloques de funciones, organizándolos en clases generales y dividiéndolos en tipos más específicos (Tablas A-1 y A-2)¹, esto para facilitar la labor del diseñador en encontrar y representar componentes y sistemas en diferentes niveles de abstracción.

La descomposición funcional produce un diagrama llamado estructura de función o diagrama funcional, que es un diagrama de bloques que representa flujos de energía, material, y señales como flechas etiquetadas que unen y muestran la interacción entre los bloques de funciones.

La estructura de función es muy diferente de la descomposición física de un producto porque una función es el comportamiento combinado de componentes mecánicos y su arreglo físico.

La estructura de función más generalizada es la descripción de un solo bloque de función de un dispositivo. Este tipo de estructura de función (un solo bloque de función) es llamada la representación de caja negra de un dispositivo. Esta debe enlistar la función general de un dispositivo y proporcionar todos los flujos apropiados de entrada y salida.

3.2. Métodos Morfológicos

El análisis morfológico es un método que se utiliza para representar y explorar las relaciones en problemas multidimensionales. Al haber un gran conjunto de componentes que pueden

¹ Las tablas y figuras designadas con la letra A hacen referencia al apéndice A al final del trabajo.

solucionar la función requerida, existe una gran variedad de combinaciones que satisfacen la misma funcionalidad.

En conjunto con el método de descomposición funcional (Sección 4.2), estos métodos son utilizados para estructurar la información para la síntesis de diferentes componentes para cumplir la misma funcionalidad requerida.

El enfoque morfológico general para diseñar se resume en los siguientes tres pasos:

- Dividir el problema general de diseño en sub-problemas simples.
- Generar conceptos de solución para cada sub-problema.
- Combinar sistemáticamente las soluciones de los sub-problemas en diferentes soluciones completas y evaluar todas las combinaciones.

El enfoque morfológico comienza con la descomposición funcional del problema de diseño en estructuras de funciones, y una vez localizado cada sub-problema se crea una carta morfológica, una tabla que organiza las soluciones de los sub-problemas siendo las columnas cada uno de los sub-problemas y las filas las diferentes alternativas a las que se llegaron en la generación de conceptos. Estas soluciones pueden ser representadas mediante dibujos sencillos o palabras.

Durante la evaluación de las combinaciones, se pueden encontrar soluciones inviables o imprácticas, pero se recomienda no apresurarse y descartar estas alternativas sin antes hacer un buen análisis.

Es también recomendable hacer bocetos de los sistemas mostrando el conjunto de soluciones de los sub-problemas para relacionar la función con la forma, y así, aterrizar los conceptos de diseño que a esta altura podrían parecer abstractos.

3.3. TRIZ: Teoría para la Resolución de Problemas de Inventiva

La Teoría para la Resolución de Problemas de Inventiva, conocida por el acrónimo “TRIZ” es una metodología para la resolución de problemas adaptada para proveer soluciones innovadoras a problemas científicos y de ingeniería. Genrich Altshuller, un inventor ruso, desarrolló TRIZ a finales de los años cuarenta y en los años cincuenta del siglo XX.

En 1946, Altshuller comenzó su trabajo para crear una nueva ciencia de la invención (Orloff, 2006); (Shulyak, 2000). Altshuller y unos pocos de sus colegas comenzaron por estudiar certificados de autor, el equivalente en la Unión Soviética de las patentes. La premisa básica de TRIZ es que los principios de solución derivados del estudio de invenciones novedosas pueden ser codificados y aplicados a problemas de diseño

relacionados para producir principios inventivos. Altschuller y sus colegas construyeron su metodología para generar soluciones inventivas para diseñar y publicar su primer artículo de TRIZ en 1956.

Tras el estudio de alrededor de 200,000 certificados de autor (similares a las patentes), encontró que los inventores, cuyos resultados fueron exitosos, reconocieron contradicciones técnicas en los problemas de diseño y superaron estas utilizando un principio que presentó una nueva forma de pensar respecto a la situación. El grupo de Altschuller estudió invenciones que superaron contradicciones técnicas, identificaron los principios de solución utilizados en cada caso, y los destilaron en 40 ideas de soluciones únicas. Estos son los 40 Principios Inventivos de TRIZ (Tabla A-4). Muchos de los principios inventivos enlistados tienen un significado especial introducido por Altschuller.

Los 40 principios de TRIZ tienen una notable amplia gama de aplicación. Sin embargo, estos requieren un grado de estudio considerable para su total entendimiento.

Un diseñador se enfrenta a un sistema que tiene ciertas desventajas. Estas desventajas pueden ser eliminadas cambiando el sistema o alguno de sus sub-sistemas, o modificando un sistema de mayor nivel. TRIZ es un proceso en el que se replantea la tarea de diseño de modo que las principales contradicciones sean identificadas y que los principios inventivos apropiados sean aplicados. TRIZ lleva a los diseñadores a representar problemas como contradicciones técnicas separadas del sistema.

TRIZ entonces provee uno o más principios inventivos que han sido utilizados para superar esta contradicción en el pasado, como fue encontrado en la búsqueda de documentación de invenciones anteriores. La matriz de contradicciones de TRIZ es la herramienta clave para seleccionar los principios inventivos correctos que se utilizarán para encontrar formas creativas para superar las contradicciones. Esta matriz es una matriz cuadrada con 39 filas y columnas referentes a los parámetros de ingeniería (Tabla A-3). Incluye aproximadamente 1250 contradicciones de sistemas, un número bajo dada la diversidad de los sistemas en ingeniería.

La matriz de contradicciones de TRIZ guía a los diseñadores a los principios inventivos más útiles. Una contradicción técnica ocurre cuando una mejora en un parámetro ingenieril del sistema resulta en el deterioro de otro parámetro. Por lo tanto, el primer paso para encontrar una solución de diseño es expresar el enunciado del problema para revelar las contradicciones.

Para resolver una contradicción donde el parámetro i se mejora a expensas del parámetro j , el diseñador localiza la celda de la matriz en la fila i , columna j . La celda contiene el número de uno o más principios inventivos que otros inventores utilizaron para superar la contradicción. (Dieter & Schmidt, *Engineering Design*, 2009).

3.4. Inventor's Manual

En el Manual del Inventor, la mentalidad inventiva fundamental se divide en siete etapas. En cada etapa se realizan una serie de preguntas que te conducen a través del proceso. Este manual se base en TRIZ y adapta algunas de las herramientas utilizadas en esta teoría como parte del algoritmo que se presenta a continuación.

En estas etapas de los Siete Escalones para el Pensamiento Inventivo (SEPI) (Figura A-5) del libro Inventor's Manual se plantean una serie de preguntas y herramientas que se utilizarán a modo de consulta y ayuda en la propuesta de método. A continuación se definen cada una de estas:

Etapa 1 (SEPI – 1):

1. ¿Es realmente un desafío? ¿Es parte de un desafío más amplio? Si es el caso, empezar desde lo más general.
2. Escoge el modelo funcional para tu desafío:
 - ¿Falta una función útil?
 - ¿Resultado insuficiente?
 - ¿Función perjudicial?
 - ¿La misma función es útil y perjudicial?
3. ¿Hay alguna solución existente? ¿Por qué no son adecuadas y que haría que lo fueran?

Etapa 2 (SEPI – 2):

1. Definir lo que realmente se quiere alcanzar, esto es:
 - ¿Una función?
 - ¿El resultado de una función?
 - ¿La ilusión de un resultado?
 - O la satisfacción del proceso
2. Escoger el modelo del Resultado Ideal Final de las siguientes opciones:
 - a. Una función útil o su resultado no son necesarios.
 - La función no es necesaria.
 - La función deseada aparece solo cuando y donde es necesaria.
 - La función se realiza sin el sistema.
 - b. Una función insuficiente o su resultado se vuelven suficientes, o su insuficiencia se vuelve aceptable.
 - c. Una función perjudicial o su resultado:
 - Se vuelve útil.

- Nunca aparece.
- d. El resultado de la neutralización de funciones útiles en vez de generar daño se vuelve útil.
 - e. Un efecto perjudicial desaparece naturalmente.

Etapa 3 (SEPI – 3):

1. Describe lo que tienes actualmente. Localízalo: DÓNDE y CUANDO se manifiesta por si solo el problema: encuentra el TIEMPO y LUGAR operacional. Reduce la complejidad, haz un modelo sencillo:

“Sujeto – Acción – Objeto”

2. Enlista todos los objetos en la zona y tiempo del problema que:

- Son afectados por la ausencia o insuficiencia de funciones útiles.
- Producen o son afectados por una función perjudicial.

3. Encuentra el contexto donde los objetos enlistados en 3.2 no generan problema alguno.

Etapa 4 (SEPI – 4):

1. Haz una lista de las propiedades del SUPER-SISTEMA – el entorno más próximo al área del problema. Cambia el entorno.

2. Cambia el sistema: las propiedades de los objetos, sus partes o el modo de acción para conseguir el Resultado Ideal Final declarado en 2.2.

3. Crea las condiciones para el RIF, busca algún detalle, efecto o acción indeseable y encuentra su: Tiempo, lugar, dosis, modo y usuario ADECUADOS. Si hay éxito ir a la etapa 7.

Etapa 5 (SEPI – 5):

1. Revela los requerimientos contradictorios: Enlista todas las metas conflictivas, las funciones, las acciones y los parámetros. ¿Hay muchos obstáculos? Explora el sistema con mayor profundidad: ve a las Etapas 2 y 3.

2. Agrava el conflicto: Haz que una función perjudicial suceda en su capacidad máxima y ve cómo utilizar esto.

3. ¿Qué propiedades de los objetos que están involucrados en un área del problema impiden la creación de las condiciones para el Resultado Ideal Final? Si la respuesta no aparece a la mano, ve a la etapa 4 y explórala a fondo.

4. Expresa el conflicto de una o ambas formas:

- Quiero que el parámetro sea “A” y no “A”. (Contradicción física).
- Mejorando el parámetro “A”, “B” empeora. (Conflicto técnico).

Etapa 6 (SEPI – 6):

1. ¿En qué condiciones funcionan las soluciones estándares? ¿Puedes crear dichas condiciones? Si no, define lo que te detiene y ve al 5.2.

2. Crea las condiciones donde los obstáculos desaparecen naturalmente. Invierte las condiciones de operación y vuelve a los daños beneficios. Varía parámetros importantes del sistema considerando extremos. E.g. Si es pequeño imagínalo grande.

3. Haz que el efecto útil aparezca solo donde y cuando sea necesario.

Recorta los elementos que producen daños pero delega sus funciones útiles a otros objetos. Si no pueden ser recortados, replázalos por una copia inofensiva – el elemento X.

4. a. Separa las propiedades conflictivas con principios inventivos (ver los números):

- En el tiempo (10, 11, 15, 19, 20, 21, 27);
- En el espacio (4, 14, 17, 30, 31);
- En un sistema (1, 2, 3, 5, 6, 7, 16, 24, 34, 40);
- En el control del sistema (23, 25);
- Invierte la condición (13, 22);
- Por diferentes estados físicos (26, 32, 33, 35, 36);
- Con un campo (8, 9, 12, 18, 28, 29, 37, 38,39);

b. Utiliza la matriz de contradicciones de BioTRIZ para encontrar el modelo para una solución ganar-ganar.

Etapa 7 (SEPI – 7):

1. ¿La solución destaca más problemas? Si es el caso explora el desafío con mayor profundidad, ve por la siguiente columna empezando del 2.1.

2. Simplifícalo: remueve todos los elementos que no apoyen a la función principal de tu proceso/producto.

3. Maximiza su eficiencia, recórtalo: remueve los elementos costosos pero delega sus funciones a otra parte del sistema, sus partes o su entorno.

4. Convierte tu solución en un método.

- Varía los parámetros importantes del sistema considerando extremos;
- Invierte el método: Defínelo de una manera opuesta y encuentra una aplicación para ello.

Herramientas del Manual del Inventor

Adicionales a las preguntas de cada una de las Etapas, se utilizan las siguientes herramientas definidas en el Manual del Inventor:

- Plantilla de Nueve Ventanas

En esta etapa se busca construir un modelo para mapear sistemas complejos para entender los elementos del sistema afectados por un problema en específico, y analizarlo a profundidad. Esta herramienta permite considerar problemas en cuanto a su:

- *escala*, tomando en consideración la jerarquía de las partes del sistema; teniendo en cuenta el entorno donde trabaja.
- *tiempo*, tomando en cuenta el proceso, historia (también el futuro) de todo el sistema y sus partes. Se puede considerar la escala de tiempo (años, meses, minutos o incluso segundos) de acuerdo a la naturaleza del problema y el proceso en el que está involucrado. Pero primero se necesita identificar el momento exacto donde aparece el problema;
- *localización*, definiendo el lugar exacto donde el problema aparece - también llamado la “zona operacional” del problema.

Si se plantea el sistema donde se identificó el problema en el cuadro central de la Plantilla de Nueve Ventanas, se puede describir tomando en cuenta sus causas globales y las consecuencias definiendo el contexto del problema.

Esta plantilla se puede aplicar en cuatro diferentes Etapas:

- SEPI - 2: Resultado Ideal Final. (Tabla A-6).
- SEPI - 3: Contexto (Tabla A-7).
Ejemplo: El contexto es el conjunto de circunstancias, reglas, restricciones, niveles de abstracción, memorias de eventos previos (columna izquierda de la Plantilla de Nueve Ventanas); expectativas de un futuro probable e inevitable (columna

derecha); y una variedad de entornos – circunstancias tales como el natural, social, y cultural (fila superior de la Plantilla de Nueve Ventanas – puede ser múltiple). El nivel inferior de la Plantilla de Nueve Ventanas representa el desarrollo del sub-sistema (partes del sistema) en el tiempo.

- SEPI - 4: Recursos. (Tabla A-8).
- SEPI - 6: Mapa de Soluciones para Conflictos Funcionales. (Tabla A-9).

- **FISSST (Tabla A-10)**

Todos los parámetros de un sistema se pueden organizar en seis categorías: Campo o Energía, Información, Sustancias, Estructura, Espacio y Tiempo. La lista de todas las modificaciones que se pueden hacer al sistema se presentan en esta tabla que se encuentra en SEPI - 4.

- **Reglas para Recortar (Tabla A-11)**

Esta herramienta se encuentra en SEPI - 6. En el punto 6.1 se tratan de encontrar las condiciones bajo las cuales los obstáculos desaparecen. Para el mejor entendimiento de esta herramienta se cita este punto:

Considera todos los elementos del sistema que posiblemente puedan proporcionar la función deseada. La solución, probablemente, no se encuentra en el mismo contexto en el cual el problema se originó.

Si se tienen funciones o acciones perjudiciales, la solución más radical es deshacernos por completo del elemento que produjo este daño – un proceso al que se refiere como “recortar”. Pero se necesita estar muy atento – el candidato para ser recortado puede ser útil para el sistema e incluso irremplazable. Antes de acercarse a los modelos inventivos de solución, hay que intentar la opción más sencilla – recortar el elemento dañino. Esta herramienta sirve en conjunto con el Mapa de Soluciones a Conflictos Funcionales.

- **Principios de Separación (Tabla A-12)**

Esta herramienta es una tabla en la que se define cómo separar dos propiedades contradictorias. Las propiedades contradictorias que son requeridas para el mismo objeto o proceso pueden mantenerse juntas solo si no interactúan, y pueden separarse siguiendo los Principios de Separación. Esta herramienta está definida en SEPI - 6.

- **Matriz de Contradicciones de BioTRIZ (Figura A-13)**

La Matriz de Contradicciones Expandible (donde todos los parámetros han sido reacomodados en seis clases) representa una versión comprimida y generalizada de la matriz de contradicciones de Altschuller. Organizando los parámetros en clases hace que la Matriz de Contradicciones de BioTRIZ esté abierta a algunos parámetros adicionales que se necesiten considerar – así, no se está restringido a los 39 parámetros originalmente enlistados en la versión de Altschuller. La descripción de estas seis clases se puede encontrar en la tabla FISST.

Esta matriz considera la alternativa de no encontrar los factores que generen contradicciones, por lo tanto se propone elegir a qué clase de parámetros corresponden los parámetros deseados y así, elegir la opción de parámetro indefinido donde se enlistan los Principios Inventivos más eficientes para esa clase particular de contradicciones. Esta herramienta está definida en SEPI - 6.

3.5. Engineering-to-Biology Thesaurus (Tablas A-14 y A-15)

Debido a los problemas de los ingenieros por entender la biología, ya sea por la gran cantidad de información o por la difícil terminología que se maneja se desarrolló un Tesoro de la Ingeniería a la Biología (traducción del inglés).

Esta es una herramienta que ofrece a los ingenieros, con pocas bases en biología, traducir el conocimiento y aterrizarlo al dominio de la ingeniería. Los términos biológicos en el tesoro se correlacionan con el dominio de la ingeniería a través del emparejamiento con funciones o flujos sinónimos del léxico de la Base Funcional, que apoya el modelado funcional y la representación abstracta de cualquier sistema funcional, así como la colaboración, creación y descubrimientos en el área de la biología.

En este tesoro solamente se consideran verbos y sustantivos que son sinónimos a los términos de la Base Funcional. Los términos biológicos que entran en los conjuntos de flujos y funciones, y que corresponden a múltiples funciones o flujos, se repiten y se indican en letras itálicas para designar un caso especial. De este modo, la clasificación esta predeterminada de acuerdo con el modelo del autor; sin embargo, este permanece como el intermediario entre los dominios de la ingeniería y la biología. Una herramienta como el tesoro de la ingeniería a la biología aumenta la interacción entre el usuario y los recursos del conocimiento presentado la información como una tabla de búsqueda. Este simple formato fomenta a hacer asociaciones entre los léxicos de la ingeniería y la biología, de este modo fortalece la habilidad del diseñador para utilizar la información biológica. (Nagel & McAdams, *An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design*, 2010).

3.6. Categorías Biológicas

La dificultad fundamental en el modelado de la biología ocurre cuando se intentan comprender los puntos de vista múltiples de un sistema biológico. Entender como el conocimiento biológico esta interrelacionado, aunque categorizable, ofrece una percepción al diseñador en cómo manejar información fuera del dominio de la ingeniería y que esta sea de la mejor ayuda en el proceso de diseño.

Investigadores descubrieron (Raven & Johnson, 2002) (Campbell & Reece, 2003) que los organismos biológicos tienen tres maneras para interactuar con un ambiente cambiante: fisiología, morfología, y el comportamiento. Un organismo biológico se adaptará una nueva funcionalidad (fisiología) o estructura (morfología), o aprenderá un nuevo comportamiento para obedecer las acciones instintivas de protegerse, reproducirse y mantenerse.

Cuatro categorías biológicas fueron propuestas (Martin & Hine, 2000) (Raven & Johnson, 2002) (Campbell & Reece, 2003) (Henderson & Lawrence, 2005) y están definidas de la siguiente manera:

- Fisiología: Las funciones vitales y actividades de un organismo, contrario a su estructura.
- Morfología: La forma y estructura de un organismo, y la asociación entre estructuras del mismo.
- Comportamiento: La suma de las respuestas de un organismo a estímulos internos o externos.
- Estrategia: Comportamiento general que es exhibido por múltiples rangos biológicos para lograr diferentes metas.

La estrategia se mantuvo como un término separado para advertir al diseñador de repetir los comportamientos que comprenden múltiples sistemas biológicos pero que resultan en diferentes resultados.

Cuando se crea una abstracción para representar un sistema biológico, considerando preguntas que cada una de estas categorías puedan resolver puede ayudar para clarificar y dirigir como el modelo está siendo creado. Por ejemplo, hacerse una pregunta acerca del comportamiento/estrategia es explorar el porqué. Hacerse una pregunta acerca de fisiología es explorar el qué, y hacerse una pregunta acerca de morfología es explorar el cómo.

Por lo tanto la utilización de las categorías biológicas es el primer paso para asistir en poner la información en perspectiva.

Además de responder a las preguntas de diseño relacionadas con los sistemas biológicos, el modelo funcional biológico debe cumplir con la elección de escalas biológicas.

3.7. Escalas Biológicas

La segunda herramienta para asistir en poner la información biológica dentro de la perspectiva correcta es la escala biológica. La escala biológica se ocupa de la cantidad de detalle requerido para desarrollar una representación adecuada de un sistema biológico, mientras se adhiera a la categoría biológica escogida y a la pregunta de diseño planteada.

Las escalas biológicas ayudan en definir el nivel de detalle requerido para crear un modelo funcional de un sistema biológico. Los modelos biológicos computacionales se utilizan como un marco para las escalas biológicas.

Los modelos biológicos computacionales van desde un nivel atómico hasta un nivel de población y tienen el siguiente orden:

- Atómico
- Molecular
- Complejo molecular
- Sub-celular
- Celular
- Sistemas multicelulares
- Tejido
- Órgano
- Sistemas multiorganos
- Organismo
- Población

Aunque las escalas biológicas pueden ser vistas como restricciones del modelo, también son un reto de diseño creativo.

Al generar un modelo funcional biológico, la escala biológica se restringe a una sola escala. Generar modelos restringidos por escalas biológicas tienden a ser más análogos a como los sistemas ingenieriles están modelados: sin embargo, los modelos funcionales pueden representar escalas biológicas mezcladas para demostrar fenómenos biológicos específicos de interés para los diseñadores.

Así como para la categoría, el diseñador debe tomar claves de la literatura o de algún biólogo en cuanto a que información representa la escala de interés. Es importante al desarrollar modelos funcionales biológicos de escalas mezcladas recordar que cualquier

concepto derivado de las conexiones hechas entre sistemas naturales e ingenieriles también tendrán que ser de escalas mezcladas. (Nagel, Nagel, Stone, & McAdams, 2010).

3.8. Técnicas para la Búsqueda de Información

Helms define cuatro estrategias o técnicas generales para encontrar una solución biológica relevante para el problema:

- **Cambiar las restricciones**
Si el problema está definido de una forma vaga como “mantenerse fresco”, habrá que cambiar las restricciones para incrementar el espacio de búsqueda, por ejemplo por “termorregulación”.
- **Campeón adaptador**
Encontrar un organismo o sistema que sobreviva en los casos más extremos del problema en estudio. Por ejemplo, para “mantenerse fresco”, buscar animales que sobrevivan en el desierto o en climas ecuatoriales.
- **Variación dentro de una familia de soluciones**
Cuando muchos organismos se han enfrentado y resuelto el mismo problema de maneras ligeramente diferentes, ve las pequeñas diferencias en las soluciones e identifica relaciones correlacionadas en el espacio del problema.
- **Multifuncionalidad**
Encuentra organismos o sistemas con soluciones únicas que resuelvan múltiples problemas simultáneamente.

3.9. Life's Principles (Figura A-16)

Los Principios de la Vida (traducción del inglés) representan patrones generales encontrados entre las especies sobrevivientes que prosperan en la Tierra. La Vida integra y optimiza estas estrategias para crear condiciones que conducen a la vida. Aprendiendo de estas profundas lecciones de diseño, nosotros podemos modelar estrategias innovadoras, medir nuestro diseño contra estos puntos de referencia sustentables, y permitirnos ser enseñados por el ingenio de la naturaleza utilizando los Principios de la Vida como ideales aspiracionales. (Biomimicry Design Lens: Biomimicry 3.8, 2015).

3.10. AskNature

AskNature es una base de datos de soluciones biológicas. En esta base está estructurada para la búsqueda de funciones, y como resultados se obtienen artículos, productos,

estrategias, expertos, etc. Una vez hecha la descomposición funcional e identificadas las funciones de los sub-sistemas, esta base de datos encuentra los organismos que han resuelto la función y de que forma la resolvió. Cuenta con más de 1800 fenómenos naturales y cientos de aplicaciones bio-inspiradas.

Con base en el estudio de cada una de estas herramientas se propuso una clasificación por etapas de diseño teniendo como referencia la metodología de Dieter. Esta clasificación se muestra en la Tabla 3.1.

Herramienta \ Etapa	Definición del Problema	Recopilación de Información	Generación de Conceptos	Evaluación y Selección de Conceptos
Descomposición Física y Funcional	X		X	
Matriz Morfológica				X
Plantilla de Nueve Ventanas	X		X	X
FISSST	X		X	
Mapa de Soluciones para Conflictos Funcionales				X
Matriz de Contradicciones BioTRIZ			X	
E2B Thesaurus		X		
Categorías Biológicas	X	X		
Escalas Biológicas	X	X		
Técnicas de Búsqueda de Información		X		
Principios de la Vida	X			X
AskNature		X		

Tabla 3.1. Compilación y clasificación de las herramientas de acuerdo a la metodología de diseño de Dieter.

Sin embargo, al insertar la parte biológica en la metodología de Dieter, las etapas de diseño se ven modificadas en la propuesta de método.

Una vez expuesta la información que se analizó, se presenta la propuesta de método, donde se pretende incluir algunas de las características consideradas relevantes de las metodologías antes vistas y conseguir una secuencia lógica para la creación de diseños inspirados en la naturaleza.

4. PROPUESTA DE MÉTODO

Después de haber estudiado cada una de las metodologías y las herramientas utilizadas por los autores antes mencionados se formuló la propuesta de método. Esta pretende integrar a la ingeniería con la biología, y así tentativamente enriquecer tanto el proceso de diseño, como el resultado obtenido.

Con las metodologías estudiadas anteriormente se realizó la comparación que se muestra en las Tablas A-17 a A-19.

De esta comparación de las metodologías de diseño inspirado en la naturaleza se clasificaron cada una de sus etapas en la metodología de Dieter para establecer de forma clara la correspondencia de cada una de estas en las etapas de diseño y correlacionarlas con las herramientas utilizadas en esta metodología.

Una vez hecha la clasificación se obtuvieron una serie de etapas (frases o palabras que definieran lo que se realizará en cada uno de estos pasos) sobre los cuales se integrarían las herramientas utilizadas en las metodologías de diseño inspirado en la naturaleza. Estas etapas se ven reflejadas en la Figura 4.1.

En la propuesta de método de diseño, se buscó responder a una serie de preguntas en cada una de las siete etapas que este conlleva. Esto con la finalidad de esclarecer que se quiere de cada una de las etapas y el porqué de cada una de las herramientas utilizadas en esta, y así plantear una suerte de algoritmo para el diseño inspirado por la naturaleza.

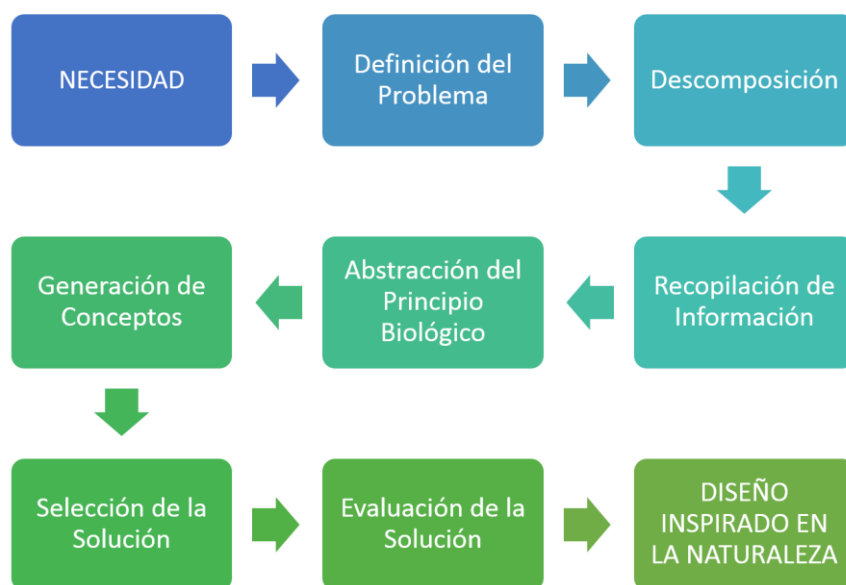


Figura 4.1. Propuesta de método.

Las preguntas a resolver se muestran en la Tabla 4.1, así como las herramientas que se utilizarán para resolverlas.

	Etapa	Preguntas a Resolver	Como Resolverlas (Herramientas)
1	Definición del Problema	¿Cuál es el problema?	Inventor's Manual (IM): SEPI - 1
		¿Cómo ha sido resuelto el problema?	Libros, Artículos, Patentes, etc.
		¿En qué consiste?	Restricciones y Especificaciones
2	Descomposición	¿Cómo funciona el sistema? ¿Qué funciones hay que resolver?	Descomposición Física y Funcional (DFF)
		¿Cuál es el Resultado Ideal Final (RIF)?	Plantilla de Nueve Ventanas (P9V) IM: SEPI - 2
		¿En qué contexto se desenvuelve el sistema?	Plantilla de Nueve Ventanas (P9V) IM: SEPI - 3
3	Recopilación de Información	¿Cómo lo ha resuelto la naturaleza?	Libros y Textos de Biología, AskNature, Técnicas de Búsqueda de Información, Categorías Biológicas y Escalas Biológicas
4	Abstracción del Principio Biológico	¿Cómo aterrizamos el conocimiento biológico en el dominio de la ingeniería?	Engineering-to-Biology Thesaurus (E2B)
		¿Cómo ha resuelto las funciones la naturaleza?	DFF
5	Generación de Conceptos	¿Con qué recursos contamos?	P9V IM: SEPI - 4
		¿Dónde está el problema?	FISSST
		¿Necesitamos recortar algo? ¿Podemos reemplazar esto por algo más o delegarlo a otra parte del sistema?	Mapa de Soluciones a Principios Funcionales, Reglas para Recortar, Principios de Separación
		¿Qué contradicciones existen? ¿Contradicción física o conflicto técnico?	IM: SEPI - 5
		¿Cómo se resuelven estas contradicciones?	Matriz de Contradicciones BioTRIZ IM: SEPI - 6
6	Selección de la Solución	¿Con qué alternativas de solución contamos?	Matriz Morfológica
		¿Nuestra solución es la mejor?	Matrices de Decisión
7	Evaluación de la Solución	¿Nuestro diseño es sustentable?	Life's Principles
		¿Existe algo parecido? ¿Qué tan cerca llegamos del RIF?	Comparar el RIF planteado con el Resultado Final que se obtuvo
		¿Podemos generalizar nuestra solución en un método?	IM: SEPI - 7

Tabla 4.1. Preguntas a resolver mediante la propuesta de método.

A continuación, se explica a detalle cada una de las etapas y como se pretende aplicar las herramientas en cada una:

1. Definición del Problema

- Partiendo de una necesidad se describe el problema, qué es lo que se busca resolver, sus especificaciones y restricciones. Se utiliza como referencia la SEPI - 1 y las preguntas que se plantean en este apartado.
- Se hace una investigación del estado del arte referente al problema, como se ha resuelto este problema, utilizando información de artículos, libros, patentes, etc.
- A partir de esta etapa y en todas se recomienda hacer bosquejos, diagramas, y anotar las ideas que vayan surgiendo. De esta forma se irá documentando el avance del proyecto.

2. Descomposición

- Se analizan los sistemas y sub-sistemas que componen al súper-sistema, esto con la finalidad de encontrar de una manera más fácil las funciones que desempeñan cada uno de los componentes y sus conjuntos.
- Se determinan las funciones principales que son realizadas por cada sistema y sub-sistema.
- Se modela el súper-sistema como una Caja Negra (solamente entradas y salidas), de acuerdo con las funciones y flujos definidos en la Base Funcional (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002).
- Una vez obtenida la Caja Negra, esta se debe desarrollar hasta obtener un Diagrama Funcional que muestre la correlación de las funciones en el proceso y demuestre como este funcionará en conjunto.
- Se define un Resultado Ideal Final que se pretende alcanzar después de llevar a cabo el método de diseño. Se utiliza como referencia la SEPI - 2 y las preguntas que se plantean en la misma etapa.
- Se define el contexto en el cual el sistema se desenvuelve para tratar de crear las condiciones ideales para el funcionamiento o proliferación del proceso o dispositivo. Se utiliza como referencia la SEPI - 3 y las preguntas de la Plantilla de Nueve Ventanas que se plantean en la misma etapa.

3. Recopilación de Información

- Ya que tenemos información de cómo ha sido resuelto en el área de la ingeniería, con base en las funciones y utilizando la base de datos de AskNature, se busca cómo la naturaleza ha resuelto dichas funciones, en que categoría biológica y a que escala.
- Como ayuda se tienen las Técnicas de Búsqueda de Información (Helms), que proponen algunos casos útiles para enriquecer la investigación.

- Una vez obtenida la información, se sugiere profundizar en textos especializados de biología para lograr un completo entendimiento del organismo o proceso que se va a emular.

4. Abstracción del Principio Biológico

- Al tener la información disponible, se tiene que aterrizar el conocimiento y lenguaje biológico en términos de ingeniería para su total comprensión. Para esto se utiliza el Engineering-to-Biology Thesaurus (Tesauro de la Ingeniería a la Biología). Con esto se traduce la información y se pone en términos de la Base Funcional.
- Una vez obtenida la traducción, se descompone el organismo u organismos en términos funcionales y se hace un diagrama funcional del proceso que se emulará.

5. Generación de Conceptos

- Se buscan los recursos disponibles, o bien, de qué forma podemos dar solución al problema utilizando el entorno y cómo podemos crear las condiciones propicias para el desempeño del súper-sistema o sus partes. Se utiliza como referencia la SEPI - 4 y las preguntas de la Plantilla de Nueve Ventanas que se plantean en la misma etapa.
- Se localiza el problema que se tiene para resolver cierto sistema o sub-sistema. Se utiliza como referencia la SEPI - 4 y la tabla de FISSST, en donde se encuentran las categorías en las que se clasifica la matriz de contradicciones BioTRIZ.
- Mediante la aplicación del Mapa de Soluciones a Principios Funcionales determinamos si es necesario “recortar” alguna parte del sistema o si podemos delegar la función de este componente o sistema a otro componente o sistema. Se utiliza como referencia la SEPI - 6 y el Mapa de Soluciones a Principios Funcionales, Las Reglas para Recortar y los Principios de Separación que se plantean en la misma etapa.
- Se buscan las contradicciones y se define su tipo (contradicción física o conflicto técnico).
- Una vez definidas las contradicciones y haciendo uso de la matriz de contradicciones BioTRIZ, se encuentran los Principios Inventivos que nos orientarán para resolver el problema. Se utiliza como referencia la SEPI - 6 y las preguntas, la matriz de contradicciones BioTRIZ, y los Principios Inventivos (estos principios se encuentran detallados en el libro Inventor’s Manual páginas 65-105) que se plantean en la misma etapa.

6. Selección de la Solución

- En el caso de tener múltiples soluciones, se forma una matriz morfológica en donde se define cada una de las soluciones que se obtuvo para sistema. Esto nos da una matriz, que, combinando cada uno de los elementos de las filas nos arroja una solución distinta a nuestro problema. Ahora escogeremos la correcta.
- Se realizan matrices de decisión para cada uno de los sistemas. Se utilizan los parámetros del sistema, dando peso de manera justificada a cada uno de ellos mediante una comparación por pares. De esta forma se obtendrá la solución final.

7. Evaluación de la Solución

- Utilizamos la plantilla de los Life's Principles (Principios de Vida) para determinar si nuestra solución tiene algún grado de sustentabilidad. Esta etapa también puede ser utilizada para determinar las especificaciones y restricciones del problema.
- Se compara el Resultado Ideal Final con el resultado final. ¿Alcanzamos nuestra meta?, Si no, ¿Qué podemos hacer para mejorar la solución?
- Como un extra, se busca generalizar la solución obtenida en un método, para buscar aplicaciones más allá de la aplicación para la que se creó. Se utiliza como referencia la SEPI – 7 y las preguntas que se plantean en la misma etapa.

Finalmente, se plantea el diagrama de flujo u algoritmo (Figura 4.2) para la aplicación del método (basado en el diagrama de flujo planteado por Nagel (Figura 2.2.)):

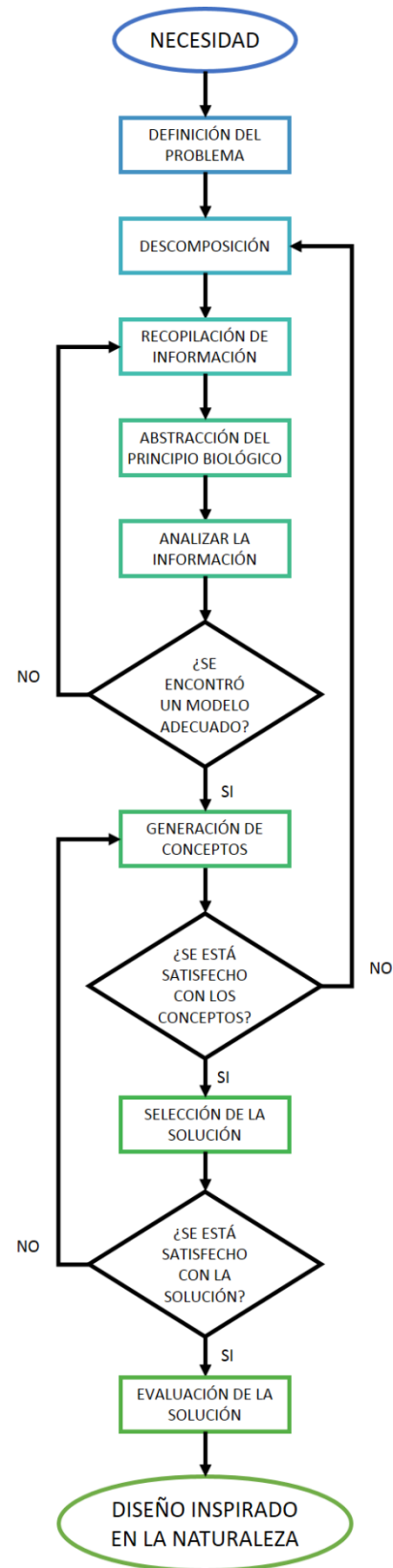


Figura 4.2. Diagrama de flujo de la propuesta de método.

En el siguiente apartado, se presentará el caso de estudio para demostrar la aplicación de la propuesta de método definida en este capítulo, a fin de visualizar la secuencia lógica en la solución de un problema de ingeniería. Dicha demostración se hace a manera de prueba de escritorio, tal como se hace para comprobar la lógica de un programa de cómputo.

5. CASO DE ESTUDIO

La propuesta de método desarrollada en el apartado anterior, será aplicada en la solución de un caso sencillo para la demostración de su uso.

En esta sección, primeramente se define el desafío. Después, se aplicará el método de diseño para así demostrar la validez y su posible futura aplicación en la generación de conceptos y la creación sistemática de productos biomiméticos y en el ámbito del diseño inspirado en la naturaleza.

5.1. Necesidad

En la actualidad mexicana, y en concreto las personas que viven en el Distrito Federal se calcula que circulan alrededor de tres millones de automóviles diariamente. Estas personas ocupan, en promedio, 2.5 horas para su traslado y esto contribuye con el 43% de la producción de dióxido de carbono (CO₂). Existe una fuerte pérdida de productividad horas/hombre, si se considera la cantidad de tiempo invertido en el transporte de los 19 millones de habitantes metropolitanos.

La problemática que enfrentamos en la Ciudad de México es un reflejo de los retos globales de sustentabilidad y desarrollo, y está altamente vinculada con las consecuencias de un esquema de movilidad orientado al uso intensivo del automóvil. Este esquema reduce la oportunidad de que sus habitantes disfruten a plenitud de su tiempo, salud y, principalmente, de su calidad de vida. (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2006).

La Estrategia de Movilidad en Bicicleta (EMB) de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal busca promover el uso de la bicicleta como forma de movilidad sustentable dentro de la Ciudad de México, a través del fomento e impulso del transporte intermodal.

Responde a un modelo de ciudad basado en el bien común, la convivencia armónica entre ciudadanos, la recuperación del espacio público, la mejora en la salud de los habitantes y el establecimiento de una infraestructura que logre integrar al ciudadano con tu entorno. (Movilidad en Bicicleta: Secretaría del Medio Ambiente, 2015).

A continuación se presentan algunas cifras que justifican dicha iniciativa (La bicicleta en México, en intensa competencia con la bicicleta: La Jornada Ecológica, 2012), (Estadísticas publicadas: Por mi ciudad en bicicleta, 2011):

- En el siglo XX, 80% de la población mexicana vivía en zonas rurales. Actualmente el 70% reside en áreas urbanas.

- La Ciudad de México cuenta con una superficie aproximada de 1,500 km².
- El 70% de la superficie es propicia para el uso de las bicicletas, ya que cuenta con pendientes menores al 6%.
- El 40% de los viajes en la ciudad de México tienen una duración menor a 15 minutos en una distancia menor a los 8 km. Esto convierte a la bicicleta en un medio potencial de interconexión con el transporte público.
- El 70% de los viajes se realizan en transporte público.
- De acuerdo con un censo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2010), el gasto diario en transporte público es de 17 pesos, lo cual significa hasta un 35% de los ingresos de algunos mexicanos.
- En las horas pico, la velocidad promedio alcanzada por los coches es de 14 km/h mientras que en bicicleta se superan los 16 km/h.
- La duración promedio de un viaje en bicicleta es de 21 minutos.
- Actualmente se cuentan con 42 km de ciclovías.
- 40% de los ciclistas usan una bicicleta de montaña.
- 79% de los ciclistas tienen menos de 40 años.
- 13% de los ciclistas son mujeres.
- El Distrito Federal cuenta con 970 biciestacionamientos.
- 31% de los viajes realizados en bicicleta tienen como destino el trabajo.
- 110 mil 913 viajes diarios se realizan en bicicleta.

5.2. Definición del Problema

Con base en las cifras dadas en el punto anterior y a partir de la necesidad planteada se propone a manera de demostración el rediseño de una bicicleta para la ciudad.

Los problemas más comunes en el uso de una bicicleta son los siguientes:

- La presión en las llantas debe ser monitoreada constantemente para evitar alguna pinchadura o desgaste prematuro.
- Se requiere mucho mantenimiento en la cadena y en los elementos de la transmisión. Esta no deben de estar en presencia de polvo. La cadena debe ser lubricada con regularidad.
- Un asiento mal diseñado puede tener repercusiones en la salud de los ciclistas.
- Como la bicicleta circula por un terreno irregular, esto puede provocar vibraciones y a su vez, el desprendimiento de piezas como tornillos.
- Algunas bicicletas, al contar con un sistema de frenado por cables externo, llegan a perder cierto grado de maniobrabilidad.
- Todos estos problemas contribuyen a que este medio de transporte sea incómodo para la mayoría de los usuarios.
- La energía invertida en el movimiento se pierde durante este proceso, haciendo el transporte poco eficiente en términos energéticos.

Requerimientos:

- Mínimo mantenimiento
- Ligera
- Cómoda
- Que permita un transporte intermodal
- Apropiaada para un viaje en la ciudad
- Barata

Especificaciones:

- Peso menor a 15 kg.
- Materiales resistentes pero ligeros

Estado del Arte

A continuación se presentan algunos modelos existentes en el mercado que se estudiaron, esto con la finalidad de usarlos como fuente de inspiración a lo largo del proceso de diseño.



A-bike™ (Plegable y plegada).



Strida™ (Plegable y plegada).



Bicicleta Brompton™ (Plegable y plegada).



Detroit Bikes™ (Bicicleta tipo A).

En la Tabla 5.1 se muestran algunas especificaciones de las cuatro opciones que se utilizarán.

	A-bike™	Strida™ EVO	Brompton™ S1E	Detroit Bikes™ A-Type
Material del marco	Al 6061-T6 y Fibra de Vidrio	Al serie 7000	Acero	Acero al Cr-Mo templado
Tipo de transmisión	Cadena	Banda	Cadena	Cadena
Diámetro de la llanta [in]	6	16 o 18	16	26
Número de velocidades	2	3	1	3
Peso [kg]	5.6	13	10.3	-
Límite de altura	-	4'9" - 6'4"	-	5'5" - 6'2"
Suspensión	No	No	Si	No
Plegable	Si	Si	Si	No
Dimensiones plegada [mm]	670 x 300 x 160	1150 x 510 x 230	565 x 545 x 250	N/A
Precio	230.99 GBP	699 USD	770 GBP	699 USD

Tabla 5.1. Comparación de las bicicletas.

(Technical Info: A-Bike, 2015), (Products: STRiDA EVO: STRiDA, 2015), (Bike Builder: Compare Bikes: Brompton, Brompton), (The A-Bike: Detroit Bikes: Download Spec Sheet, 2015).

5.3. Descomposición

Antes de comenzar con la descomposición, se muestran las partes de una bicicleta, como en la Figura 5.1.

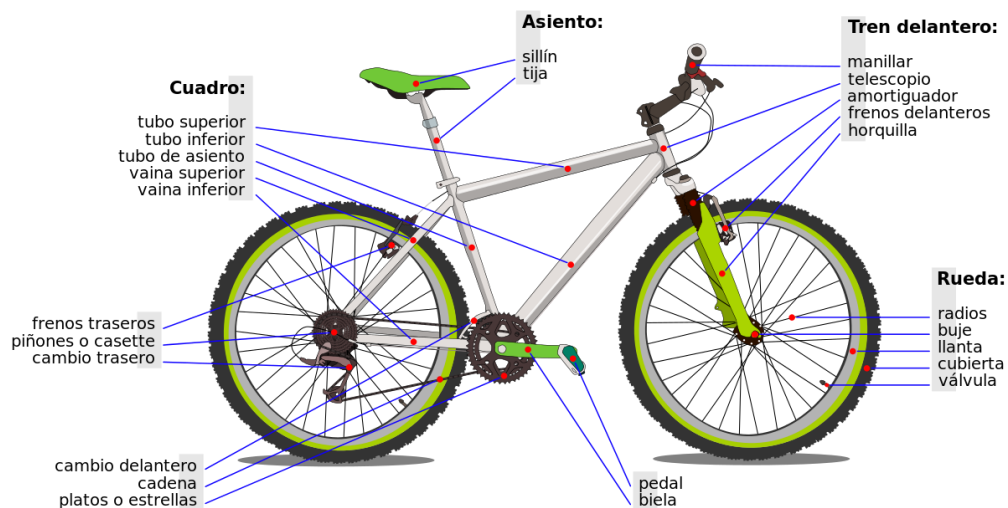


Figura 5.1. Partes de una bicicleta.

Descomposición Física

De esta forma se clasificaron las partes de la bicicleta sin importar la funcionalidad de cada una de ellas.

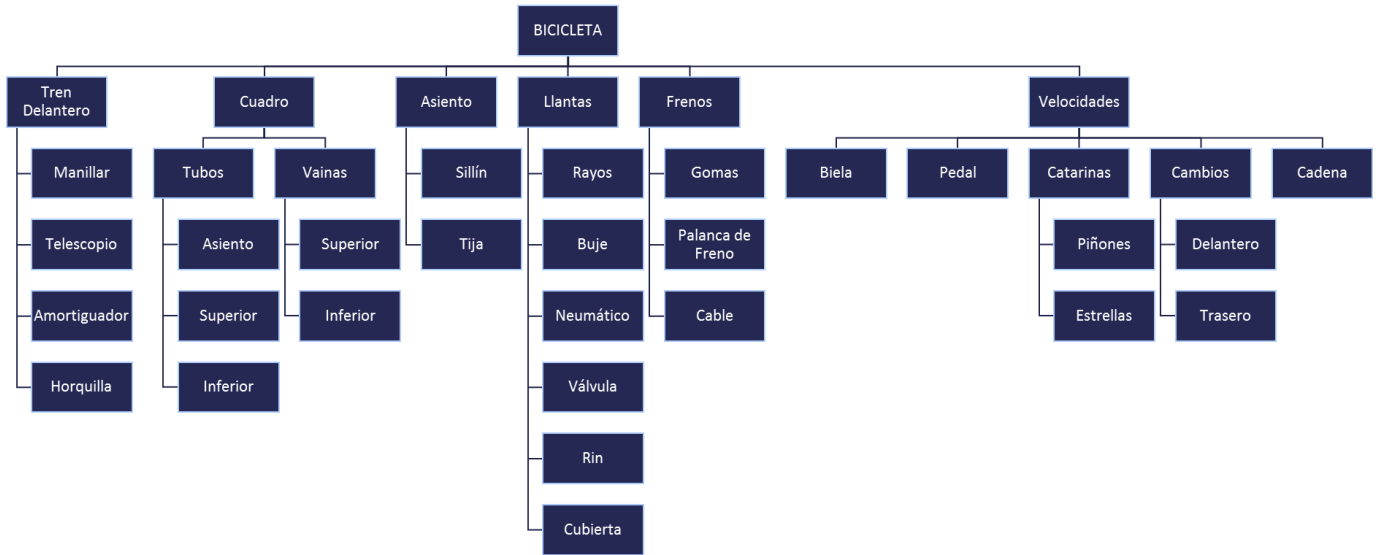


Figura 5.2. Descomposición Física de una bicicleta.

Descomposición Funcional

En la Figura 5.3 se muestra el Diagrama Funcional, donde se describe el funcionamiento de una bicicleta con base en el léxico de la Base Funcional (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002). Las funciones principales se muestran en **negritas**.

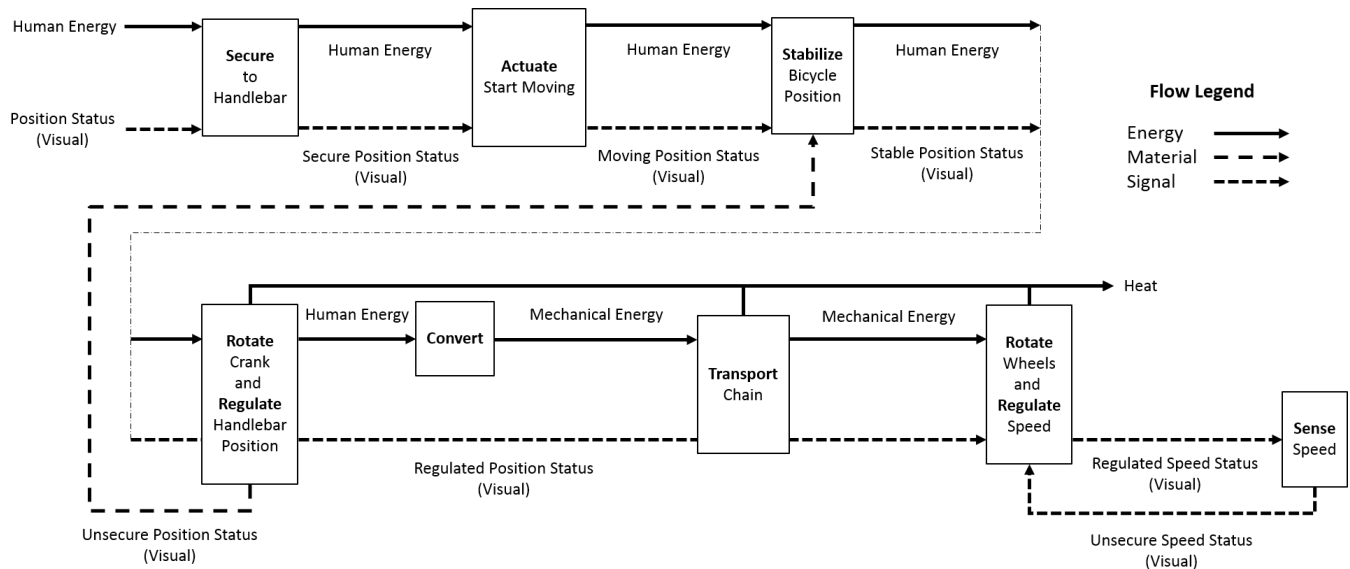


Figura 5.3. Descomposición Funcional de una bicicleta.

El diagrama fue redactado en inglés por facilidad, ya que los nombres estandarizados de las funciones y los flujos se encontraban en dicho idioma y al traducirlo se podría perder el contexto y significado que daban los autores originales.

En resumen, las funciones que se presentan en el sistema son las siguientes (se agregaron algunas funciones que se pensó tomar en cuenta a pesar de que estas no estuvieran mencionadas en la Tabla A-2) (Ver Anexo):

- Referente al usuario
 - Asegurar (Secure)
La persona debe de asegurarse al manubrio de la bicicleta antes de comenzar el movimiento.
 - Actuar (Actuate)
Comienza el movimiento.
 - Estabilizar (Stabilize)
Mantener una posición segura.
 - Regular (Regulate)
Control de la posición del manubrio y de la velocidad (aumentar o disminuir).
 - Sentir (Sense)
Se percibe un exceso o necesidad de aumentar la velocidad. De esta forma la persona retroalimenta el sistema para hacer un cambio en la velocidad.
- Referente al sistema
 - Rotar (Rotate)
Movimiento de la biela y la rueda respecto a un eje.
 - Convertir (Convert)
La energía humana se convierte en energía mecánica gracias al sistema de transmisión (catarinas, estrella y piñón).
 - Transportar (Transport)
Esta función representa el movimiento de la cadena.
 - Soporte (referente a la estructura de la bicicleta)
Esta función representa el rol del marco o cuadro de la bicicleta, que sostiene a todo el sistema.

En este contexto, la palabra sistema hace referencia al diagrama funcional como si fuera una representación en diagrama de bloques (modelado de sistemas físicos).

En la Figura 5.4 se muestra la clasificación de los sistemas y sus componentes según su función.

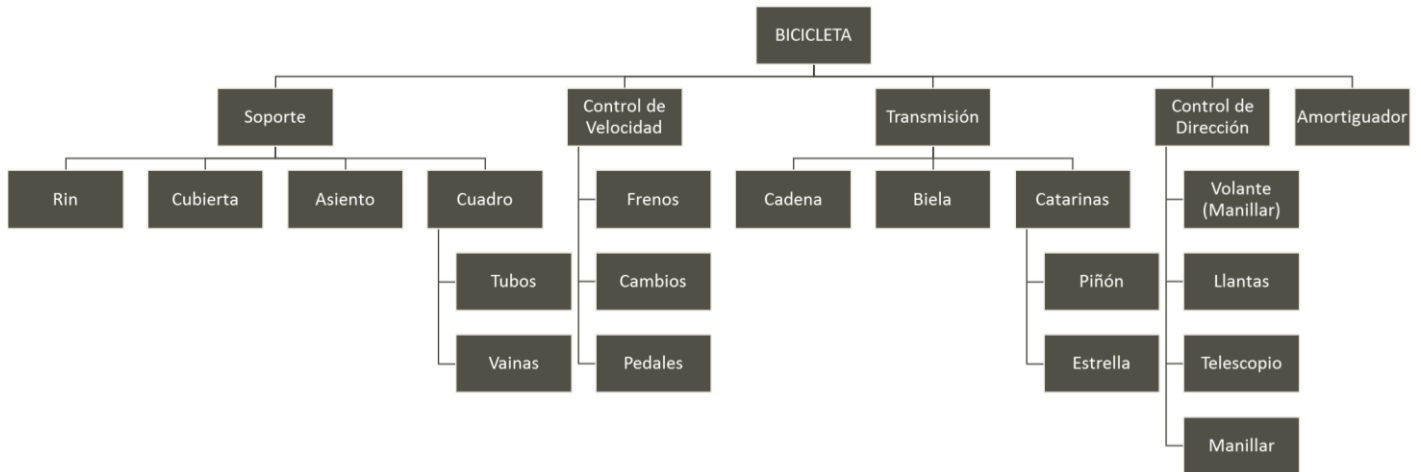


Figura 5.4. Clasificación de las partes de una bicicleta según su función.

Resultado Ideal Final (RIF)

Como resultado de este proceso de diseño se pretende tener una bicicleta, que no requiera trabajo para su movimiento (carente de masa) y que no requiera mantenimiento alguno. El RIF es que no haya bicicleta pero, sin embargo, que las personas se puedan transportar de una forma cómoda, segura y eficiente. Realmente lo que se quiere es el resultado de una función: el transporte.

Por lo tanto, el problema en el que se centrará este ejemplo será en permitir el movimiento del usuario de una manera más sencilla y eficiente.

Contexto

El contexto en el que se desenvolverá la bicicleta que se diseñó es la Ciudad de México, un ambiente con tierra, y con un largo periodo de lluvia (aproximadamente de mayo a octubre) y una temperatura media de aproximadamente 17.7 en el año 2014 ([Climatología: Temperaturas y Lluvia: CONAGUA, 2014](#)). Como se vio en la definición del problema, el 70% del terreno en la Ciudad de México cuenta con pendientes menores al 6%.

En términos del sistema, el problema radica en el desperdicio de la energía que se invierte en el movimiento de la bicicleta.

Súper-Sistema (Entorno)	Comienza el movimiento	La bicicleta está en movimiento	La bicicleta continúa su movimiento.
Sistema (Zona del Problema)	Se invierte energía para iniciar el movimiento.	Sistema ineficiente para el movimiento. Se pierde la energía invertida previamente.	Se continúa perdiendo la energía que se invierte en el sistema.
Sub-Sistema (Componentes)	Los componentes comienzan a moverse.	Los componentes funcionan correctamente.	Los componentes continúan con una funcionalidad normal.
	Fue	Ahora	Será

Tabla 5.2. Planilla de Nueve Ventanas (Contexto). Ver Tabla A-7.

Con base en la Plantilla de Nueve Ventanas se propone una contextualización del problema (Tabla 5.3) y como se podría resolver.

Tiempo	Antes del Problema	Durante el Problema	Después del Problema
Plantilla de Nueve Ventanas (P9V) (Referente a la Zona del Problema)	Se requiere realizar una función o agregar algún componente que solucione el problema con anterioridad.	Una función útil es necesaria.	El resultado de una función faltante se logra por otros medios o no es necesaria.
Aplicación de la P9V al problema a resolver	Se agrega un componente a la bicicleta que aumente la eficiencia del trabajo invertido y almacene la energía suministrada al sistema. E.g. Volante de inercia.	La energía que se invierte en el movimiento de la bicicleta no es almacenada y se pierde. Por lo tanto contamos con un proceso ineficiente.	Al agregar algún componente con antelación, el problema se resuelve.

Tabla 5.3. Contextualización del problema.

A partir de esta propuesta buscaremos un Principio Biológico en la naturaleza que nos ayude a resolver nuestro problema.

5.4. Recopilación de Información

Con base en la Tabla 5.3 se buscaron en la base de datos de AskNature algunas estrategias en las cuales los organismos almacenen la energía durante el movimiento. Los resultados que se tomaron fueron:

- El gálago (imagen de la izquierda)
- El walabi (imagen de la derecha)



Imágenes tomadas de la página AskNature ([Bushbaby: AskNature, 2015](#)), ([Tammar Walaby: AskNature, 2015](#)).

Al ser dos estrategias muy similares y al encontrar más información acerca del walabi, la información que se presenta a continuación será referente al segundo exponente.

La siguiente información fue tomada textualmente de la página AskNature ([Tammar Walaby: AskNature, 2015](#)) y traducida al español.

Tendones que almacenan energía: Walabi

Los tendones en las piernas del walabi utilizan la energía eficientemente mediante el aprovechamiento del almacenamiento de energía elástica.

Aunque la mayoría de los animales que corren en el suelo muestran un aumento en el costo de energía a medida que aumenta la velocidad, el walabi puede ir más rápido sin que esto le cueste más energía.

Además, la hembra puede llevar la pesada carga de una cría en su bolsa sin incrementar el costo de locomoción. Estas notables dotes se deben a la utilización del almacenamiento de energía elástica en los grandes tendones de sus patas traseras. Durante la fase de salto, el movimiento hacia adelante del walabi representa la energía cinética, y el jalón gravitacional hacia el suelo durante la fase de salto es una forma de energía potencial. Estas energías se transforman en energía de deformación elástica durante la extensión de los tendones cuando las patas tocan el suelo. Esta energía puede ser recuperada en el retroceso elástico de estos tendones que ayudan a propulsar el walabi de nuevo hacia el aire.

Tanto como el 90% de la energía almacenada en los elásticos puede ser recuperada para dicho reúso. Cuanto más rápido vaya el walabi y mayor sea la carga, más energía cinética y potencial que se almacena y se recupera elásticamente, por lo tanto, el costo de movimiento puede mantenerse inalterado con la velocidad o carga sobre un rango de velocidades.

El uso del retroceso elástico de los tendones también se encuentra en otros grandes animales que corren (como el caballo y el pavo) pero en un grado mucho menos dramático en términos de ahorro de energía como la observada en los canguros y walabis con sus enormes extremidades posteriores y los tendones de las extremidades traseras. La estrategia general de almacenamiento de energía elástica como medio de aumentar la eficiencia energética del aparato locomotor también se observa en una variedad de animales acuáticos desde el calamar hasta los delfines.

El uso de la energía elástica almacenada podría ser considerada en el diseño humano en todo tipo de estructuras móviles para incrementar la eficiencia energética. La “Locomoción resorte” ha sido utilizada en el diseño del pogo saltarín y algunas piernas prostéticas.

5.5. Abstracción del Principio Biológico

A partir de la información presentada previamente, se hará un análisis de cómo funciona este mecanismo.

Primero que nada se definirán los músculos involucrados en el movimiento del miembro inferior del walabi. Estos son cuatro:

- Gastrocnemius lateral (LG)
- Gastrocnemius medial (MG)
- Plantaris (PL)
- Flexor digitorum longus (FDL)

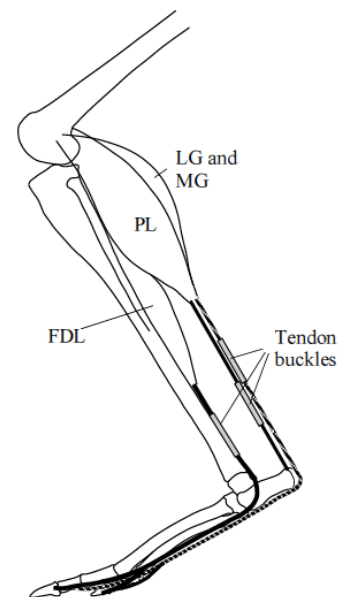
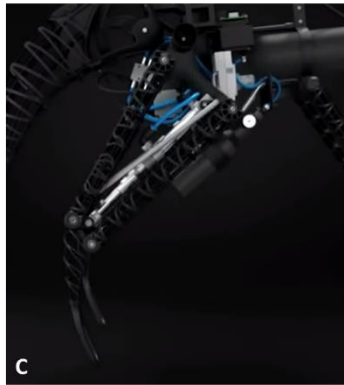


Figura 5.5. Miembro inferior de un walabi. (Biewener, Konieczynski, & Baudinette, 1998).



Imágenes tomadas del video BionickKangaroo de Festo Bionic a través de YouTube.
(Festo - BionickKangaroo (English): YouTube, 2014).

En las imágenes (A-D) se describen las etapas del ciclo de movimiento del walabi y se explican a continuación.

- A. En esta posición inicia el movimiento del walabi. El musculo gastrocnemius (Compuesto por el gastrocnemius lateral y el medial y cuyo tendón es el equivalente al tendón de Aquiles en los humanos) se ve representado por el resorte blanco en cada una de las imágenes. En esta primera etapa se encuentra en reposo.
- B. Antes de despegar, hay un cambio en el centro de masa del walabi y con esto el gastrocnemius consigue su máxima extensión.
- C. La fuerza de deformación elástica invertida en el paso anterior ayuda al walabi a despegar, ya que el tendón almacena la energía cinética del paso B y es liberada en forma de energía elástica en este paso.
- D. Finalmente el walabi aterriza sobre la punta de sus patas gradualmente pasando por el paso A y terminando en B antes de despegar nuevamente. Al aterrizar, el walabi ahorra la energía invertida para comenzar el movimiento y la reutilizará en el próximo salto.

Una vez descrito el ciclo de movimiento del walabi, se enlistan las funciones que este realiza y se buscan en los nombres de las funciones estandarizados (Tabla A-2). En caso de no ser

encontrados, se buscan en el Engineering-to-Biology Thesaurus (Tesauro) para incorporarlos en la descomposición funcional que se hará posteriormente. La Tabla 5.5 muestra un extracto del tesauro completo en el cual se presentan las funciones que se utilizarán en el paso siguiente.

Funciones realizadas por el walabi:

- Movimiento
- Extensión del tendón
- Salto
- Conversión de energía (animal, química, cinética, potencial, elástica)
- Almacenamiento de energía

Por energía animal se refiere a la quema de calorías para esto convertirlo en energía mecánica para el movimiento del organismo.

Clase	Secundaria	Terciaria	Función Biológica Correspondiente
Canalizar	Transferir	Trasportar	Saltar, rebotar
Control de Magnitud	Cambio	Forma	Extender, alargar
Convertir	Convertir	-	Quemar (Calorías)

Tabla 5.4. Aplicación del Engineering-to-Biology Thesaurus al caso de estudio.

Las funciones de la Tabla 5.4 se presentarán en *itálicas*, para así distinguir la base funcional (Hirtz) del propio tesauro (Nagel).

Descomposición Funcional y Abstracción del Principio Biológico

En la Figura 5.6 se muestra la descomposición funcional del principio biológico, y una vez estandarizado en términos de la Base Funcional se continuará con la generación de conceptos. Nuevamente la descomposición funcional se llevará a cabo en inglés, debido a la facilidad, ya que los nombres estandarizados de las funciones y los flujos se encontraban en dicho idioma y al traducirlo se podría perder el contexto y significado que daban los autores originales.

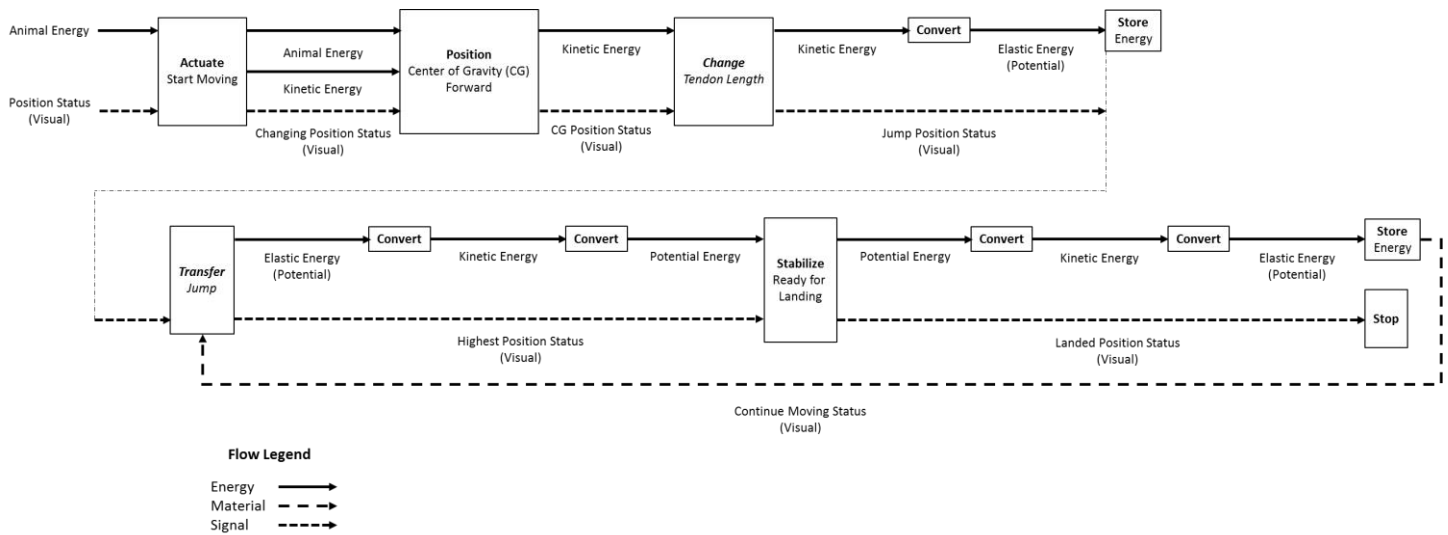


Figura 5.6. Descomposición Funcional del Principio Biológico.

5.6. Generación de Conceptos

Con la información obtenida en el paso anterior se sintetizó la información acerca del principio biológico, y como siguiente paso comenzará la generación de conceptos.

Recursos

Jerarquía	Propiedades del entorno: Terreno irregular y con pendientes. Estas propiedades no cambian en el tiempo.		
	Propiedades del Sujeto: Pesado Fuente de energía limitada Propiedades del Objeto: Ineficiente Sujeta a desgaste	Lugar del Problema: El usuario mueve la transmisión.	Propiedades del Sujeto: Se cansa (fuente de energía limitada). Propiedades del Objeto: Conversión pobre de energía. Parámetros de la Acción: Costosa en términos de energía. Al no almacenarse la energía esta se pierde.
	Propiedades de los componentes del Sujeto: Restringidos grados de libertad, energía limitada de movimiento. Propiedades de los componentes del Objeto: Metálicos (sujetos a oxidación), sujetos al desgaste, requieren mantenimiento.		
	Antes del Problema	Durante el Problema	Después del Problema

Tabla 5.5. Planilla de Nueve Ventanas (Recursos). Ver Tabla A-8.

Al analizar las propiedades del sujeto y el objeto, así como los parámetros de la acción se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se puede cambiar el medio de transmisión metálico (cadena) por otra forma de transmisión que permita tener un ciclo de vida mayor. E.g. Una banda. Sin embargo, la fricción y el desgaste es algo con lo que siempre se contará, pero este componente no requerirá el grado de mantenimiento que requiere una cadena. Sin embargo esto queda fuera del alcance del caso de estudio.
- Se requiere un componente adicional que ayude a almacenar la energía invertida para después utilizarla. E.g. Un resorte. De esta forma se obtendrá una mayor eficiencia energética.
- El punto anterior ayudará a solucionar el problema de la fuente de energía limitada, ya que la energía, en vez de desperdiciarse, se almacenará y se usará para seguir con el movimiento de la bicicleta.

De esta forma, se encontró que los problemas referentes a la bicicleta se encuentran en las siguientes categorías propuestas en la tabla de FISSST (ver Tabla A-10). Estas categorías serán utilizadas para encontrar las contradicciones y para la búsqueda de Principios Inventivos en la matriz de contradicciones de BioTRIZ.

- Campo/Energía: Una vez convertida la energía humana en mecánica se requiere almacenarla.
- Tiempo: Se requiere un proceso constante, y que la energía invertida no se pierda de una manera rápida.

Haciendo uso del Mapa de Soluciones para Conflictos Funcionales (Tabla A-9) y contestando la pregunta (se supone que el problema de la eficiencia energética de la bicicleta debe ser abordado antes de que haya problema alguno) ¿La función puede ser realizada por otra parte del sistema sin algún daño al objeto?, la respuesta sería no, por lo tanto este nos sugiere cambiar el objeto y separar las propiedades conflictivas utilizando los Principios de Separación o, encontrar Principios Inventivos en la matriz de contradicciones de BioTRIZ. Se optó por la segunda.

Contradicciones

Con base en las categorías de FISSST seleccionadas con anterioridad, se consultó la matriz e BioTRIZ en las categorías correspondientes y se encontró la siguiente contradicción:

- Al mejorar la duración de acción de un objeto en movimiento, la pérdida de energía es mayor (parámetro 28).

Tomando estas intersecciones como entrada para la matriz de contradicciones de BioTRIZ, se encontraron los siguientes Principios Inventivos: 6, 18, 28, 35.

Solución de las Contradicciones: Principios Inventivos

A continuación se enuncian los Principios Inventivos arrojados en el paso anterior acompañados de una breve descripción acerca de su posible aplicación (Bogatyrev & Bogatyreva, *Inventor's Manual*, 2014):

- Acción preliminar (10):
 - Actuar con anterioridad.
 - Pre-arreglar los eventos.
- Acción periódica (19):
 - Pulsar y repetir.
 - Usar pausas entre acciones para realizar una acción diferente.
 - Coordinar el ritmo en un sistema, sub-sistema y súper-sistema o entorno.
- Oxidantes fuertes (38):
 - Reemplazar el aire común por aire enriquecido con oxígeno.
 - Utilizar factores ambientales para la oxidación.
 - Utilizar oxígeno ionizado u ozono.
 - Introducir un “poco” de novedad a un proceso antiguo.
- Cambio de parámetros (35):
 - Explorar umbrales y límites.
 - Variar los parámetros explorando sus extremos.

Para esta contradicción, y a modo de confirmación con lo recabado en la recopilación de información, se añadirá un resorte que almacene la energía para evitar la pérdida de energía.

5.7. Selección de la Solución

Matriz Morfológica

Después de haber determinado las opciones y haber resuelto la contradicción, se exponen las posibles soluciones para el problema de la transmisión. Con la matriz morfológica se explorarán las alternativas de solución para los conceptos de solución que se llamarán *medio de transmisión* (sustituto de la cadena) y *almacén de energía* (tipos de resortes o componentes que almacenen energía que pudieran ser utilizados). Estos se mostrarán en la Tabla 5.6.

Conceptos para la Solución de Sub-Problemas		
Número de Fila	Medio de Transmisión	Almacén de Energía
1	Banda Plana	Resorte a Tensión
2	Banda tipo V	Banda Elástica
3	Banda Redonda	-
4	Banda de Sincronización	-

Tabla 5.6. Matriz morfológica aplicada al caso de estudio.

Así, contamos con 8 posibles combinaciones con las cuales solucionar nuestro problema. A continuación se hará una evaluación de cada uno de estos conceptos para finalmente elegir la solución final del problema. Al ser un método muy conocido en la ingeniería, no se llevará a cabo el desarrollo de la matriz de decisión, ya que no cumple con los alcances de este trabajo que son la demostración de las herramientas de diseño inspirado en la naturaleza. Sin embargo, se incluyen los parámetros y las calificaciones que se deberán considerar en un trabajo a futuro.

Matriz de Decisión

Antes de llegar a la matriz de decisión, existen dos pasos anteriores. Estos son:

- La Comparación por pares, en donde se establecen los factores de peso de la matriz de decisión, comparando subjetivamente cada uno de los parámetros que se evaluarán en el proceso y que se consideran indispensables en la matriz de decisión.
- Alternativas de solución, en donde con base en los parámetros de cada una de las alternativas (mostrando cantidades reales), estas se califican conforme a las siguientes fórmulas:

$$\beta_i = \text{propiedad escalada } i = \frac{\text{valor numérico de la propiedad } i}{\text{mayor valor de } i \text{ bajo consideración}} \cdot 100$$

Fórmula 5.1. Escalamiento de valores para el valor mayor de interés.
(Dieter & Schmidt, Engineering Design, 2009).

$$\beta_i = \text{propiedad escalada } i = \frac{\text{menor valor de } i \text{ bajo consideración}}{\text{valor numérico de la propiedad } i} \cdot 100$$

Fórmula 5.2. Escalamiento de valores para el valor menor de interés.
(Dieter & Schmidt, Engineering Design, 2009).

Finalmente, el producto del factor de peso de la escala obtenida nos arroja la calificación final. Esta calificación se comparará con el esquema de evaluación para las alternativas de diseño propuesto por Dieter (Tabla 5.7). En este trabajo se tomará como referencia la escala de 11 puntos.

Escala de 11 puntos	Descripción	Escala de 5 puntos	Descripción
0	Solución totalmente inútil	0	Inadecuado
1	Solución muy inadecuada		
2	Solución débil	1	Débil
3	Solución pobre		
4	Solución tolerable	2	Satisfactorio
5	Solución satisfactoria		
6	Buena solución con algunos inconvenientes		
7	Buena solución	3	Bueno
8	Muy buena solución		
9	Excelente (excede los requerimientos)	4	Excelente
10	Solución ideal		

Tabla 5.7. Esquema de Evaluación para Alternativas de Diseño u Objetivos.
(Dieter & Schmidt, Engineering Design, 2009).

5.8. Evaluación de la Solución

Respecto a la sustentabilidad del producto conforme a los Principios de la Vida o Life's Principles (Tabla A-16), se concluye que este cumple con los siguientes rubros:

- Evolucionar para Sobrevivir
 - ✓ Replicar estrategias que funcionen: El rediseño de la bicicleta se basó en el uso eficiente de energía de los walabis.
- Eficiente con los Recursos
 - ✓ Se utiliza un proceso de bajo consumo energético: Esto se logra gracias al principio biológico que se adaptó.
 - ✓ Reciclar todos los materiales: De alguna forma solamente se agregarán componentes a un producto ya hecho, y así, se reciclarían casi la totalidad de las piezas.
 - ✓ Ajustar la Forma a la Función: Al agregar los resortes, las modificaciones que se necesitan hacer al proceso de manufactura de la bicicleta son mínimos.
- Localmente en Sintonía y Sensible
 - ✓ Utilizar Materiales y Energía fácilmente disponibles: Las bicicletas son un producto disponible en la mayor parte del planeta, así como los resortes, mientras que la energía la proporciona el ser humano.

Resultado Ideal Final (RIF) vs. Resultado Final (RF)

Comparando el RIF con el RF podemos ver que no se logró llegar al objetivo propuesto, el cual fue:

“Como resultado de este proceso de diseño se pretende tener una bicicleta, que no requiera trabajo para su movimiento (carente de masa) y que no requiera mantenimiento alguno. El RIF es que no haya bicicleta pero, sin embargo, que las personas se puedan transportar de una forma cómoda, segura y eficiente. Realmente lo que se quiere es el resultado de una función: el transporte. Por lo tanto, el problema en el que se centró este ejemplo fue en permitir el movimiento del usuario de una manera más sencilla y eficiente.”

Sin embargo, se logró obtener, hipotéticamente, un medio de transporte con mayor facilidad en su uso y con una mayor eficiencia energética, fruto de la imitación de una estrategia implementada por la naturaleza.

Este principio biológico podría tener aplicaciones en cualquier dispositivo en el que se quiera almacenar la energía cinética (coches, prótesis, y cualquier otro medio de transporte) y que se quiera utilizar en otras aplicaciones, haciéndolos más energéticamente eficientes.

CONCLUSIONES

En este trabajo investigué y recopilé información de diferentes metodologías y de las herramientas aplicadas en estas. Las herramientas, enlistadas en el trabajo, fueron examinadas, analizadas y ordenadas en el método de diseño propuesto. En estas herramientas encontré nuevos recursos que complementaron mi formación como ingeniero y como diseñador.

Mediante el uso de las herramientas de diseño y posterior a su comprensión y análisis, construí un método de diseño inspirado en la naturaleza, comparando las nuevas metodologías con la metodología de George E. Dieter, frecuentemente utilizada en la ingeniería. Una vez contrastadas y comparadas las metodologías y las herramientas se construyó una propuesta de método. Esta propuesta fue aplicada a un caso de estudio dando como resultado el concepto de una bicicleta que, hipotéticamente, podría hacer del uso de estas un medio de transporte más eficiente en términos de energía. Al hacer uso de analogías entre los dominios de la ingeniería y la biología, queda intrínseco el hecho de que este método puede dar como resultado un producto biomimético. Sin embargo, cabe recalcar que no todas las herramientas fueron utilizadas o no fueron aplicadas en su totalidad. Esto podría deberse a la integración parcial de herramientas de metodologías diseñadas en conjunto o al pobre entendimiento que tuve acerca de las mismas. También, algunas herramientas que ya han sido utilizadas en ingeniería no se vieron desarrolladas por completo o incluso aplicadas, dando por entendido que de estas se conoce su definición y su aplicación.

La secuencia lógica del método fue demostrada aplicando la mayoría de las herramientas de diseño y haciendo referencia a la experiencia que mis estudios en la Facultad de Ingeniería me dejaron y a la metodología de George E. Dieter (aunque se hicieron algunas modificaciones e intercambios en algunas herramientas), pero es importante seguir profundizando en el conocimiento acerca del diseño y las herramientas utilizadas en esta rama de la ingeniería. Sin embargo, con base en mi experiencia en la ingeniería de diseño y en la aplicación de metodologías, esta fue llevada de una manera indicada.

A modo de trabajo futuro se mejorará este método, dándole una mayor solidez definiendo de una forma más clara las herramientas que este contendrá, se dará una mayor difusión, y será aplicado de una forma íntegra, demostrando que la naturaleza es una fuente creadora de inspiración, así como un asesor tecnológico confiable.

Finalmente, encontré en este trabajo una gran dote para la investigación y al mismo tiempo logré definir la rama de ingeniería a la que me gustaría especializarme. Creo que este trabajo resultó en un ejercicio muy completo para un ingeniero: la investigación, la toma de decisiones, el aprender de los errores y mejorar las cosas en un trabajo futuro.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Bibliografía

- Biomimicry Design Lens: Biomimicry 3.8.* (2015). Obtenido de Biomimicry 3.8 Web site: <http://biomimicry.net/about/biomimicry/biomimicry-designlens/lifes-principles/>
- Biomimicry Thinking: Biomimicry 3.8.* (2014). Obtenido de Biomimicry 3.8 Web site: <http://biomimicry.net/>
- Bogatyrev, N. R., & Bogatyreva, O. A. (2012). TRIZ-based algorithm for Biomimetic design. *TRIZ Future*. Lisboa, Portugal: ETRIA.
- Bogatyrev, N. R., & Bogatyreva, O. A. (2014). BioTRIZ: a win-win methodology for eco-innovation. En *Eco-innovation and the Development of Business Models: Lessons from Experience and New Frontiers in Theory and Practice*. Springer.
- Bogatyrev, N. R., & Bogatyreva, O. A. (2014). *Inventor's Manual*. BioTRIZ Ltd.
- Dieter, G. E., & Schmidt, L. C. (2009). *Engineering Design*. Nueva York, NY, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- El-Zeiny, R. M. (2012). Biomimicry as a Problem Solving Methodology. *ASEAN Conference on Environment-Behaviour Studies* (págs. 502-512). Bangkok, Tailandia: Elsevier.
- Glier, M. W., Tsenn, J., Linsey, J. S., & McAdams, D. A. (2011). Methods for Supporting Bioinspired Design. *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE 2011*. Denver, CO, Estados Unidos: ASME.
- Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). *Biologically inspired design: process and products*. Atlanta, GA, Estados Unidos: Elsevier.
- Nagel, J. K., & McAdams, D. A. (2010). An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design. *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010*. Montreal, Quebec, Canadá: ASME.
- Nagel, J. K., & Stone, R. B. (2011). A Systematic approach to Biologically-inspired Engineering Design. *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011*. Washington DC, Estados Unidos: ASME.
- Nagel, J. K., Nagel, R. L., Stone, R. B., & McAdams, D. A. (2010). Function-based, biologically inspired concept generation. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* (págs. 521-535). Cambridge University Press.
- Tammar Walaby: AskNature.* (2015). Obtenido de AskNature Web site: <http://www.asknature.org/strategy/b9112b1197b81cf81b046c57bedcaeee#.VQI4yYvF-So>
- Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A.-K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society*, 471-482.

- Referencias

- Anon. (2005). DaimlerChrysler Hightech Report.
- Autumm, K. (2001). Evidence of the van der Waals adhesion in gecko setae. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, (págs. 12 252-12 256). USA.
- Barthlott, W., & Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: innovations inspired by nature*. Nueva York, NY, Estados Unidos: HarperCollins Publishers.
- Biewener, A. A., Konieczynski, D. D., & Baudinette, R. V. (1998). In Vivo Muscle Force-Length Behavior during Steady-Speed Hopping in Tammar Wallabies. *The Journal of Experimental Biology* (págs. 1681-1694). The Company of Biologist Limited. (Brompton). Obtenido de Bike Builder: Compare Bikes: Brompton: <http://bikebuilder.brompton.com/Comparator.aspx>
- Bushbaby: AskNature*. (2015). Obtenido de AskNature Web site: <http://www.asknature.org/strategy/7c2f2f9b06ee099a5a090f8ac13f9c88#.VQXJ14vF-So>
- Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2003). *Biology*. San Francisco, CA: Pearson Benjamin Cummings.
- Climatología: Temperaturas y Lluvia: CONAGUA*. (2014). Obtenido de CONAGUA: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/TempsyPrecip/Mensuales/2014Prec.pdf>
- Coineau, Y., & Kresling, B. (1987). *Les inventions de la nature et la botanique*. Paris, Francia: Museum National d'Histoire Naturelle.
- Estadísticas publicadas: Por mi ciudad en bicicleta*. (2011). Obtenido de Por mi ciudad en bicicleta: <http://micudadenbici.com/libro/estadisticas-2/>
- Festo - BionicKangaroo (English): YouTube*. (04 de Abril de 2014). Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=mWiNIWk1Muw>
- Geim, A. K., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Novoselov, K. S., Zhukov, A. A., & Shapoval, S. Y. (2003). Microfabricated adhesive mimicking geck foot-hair. *Nat. Mater*, (págs. 461-463).
- Henderson, I. F., & Lawrence, E. (2005). *Henderson's Dictionary of Biology*. Essex: Pearson Education.
- Hirtz, J., Stone, R. B., McAdams, D. A., Szykman, S., & Wood, K. L. (2002). A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. *Research in Engineering Design*, Vol. 13, 65-82.
- La bicicleta en México, en intensa competencia con la bicicleta: La Jornada Ecológica*. (30 de Enero de 2012). Obtenido de a Jornada Ecológica: <http://www.jornada.unam.mx/2012/01/30/eco-c.html>
- Little, A., Wood, K. L., & McAdams, D. A. (1997). Functional Analysis. *1997 ASME Design Theory and Methodology Conference*. Nueva York: ASME.
- Martin, E., & Hine, R. S. (2000). *Oxford Dictionary of Biology*. Oxford: Oxford University Press.

Movilidad en Bicicleta: Secretaría del Medio Ambiente. (2015). Obtenido de Secretaría del Medio Ambiente: <http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/movilidad-sustentable/movilidad-en-bicicleta>

Orloff, M. A. (2006). *Inventive Thought through TRIZ*. Nueva York: Springer.

Products: STRiDA EVO: STRiDA. (2015). Obtenido de STRiDA: <http://www.strida.com/en/products/?method=detail&aid=142>

Raven, P. H., & Johnson, G. B. (2002). *Biology*. Boston: McGraw-Hill.

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. (2006). *Estrategia de Movilidad en Bicicleta de la Ciudad de México*. Ciudad de México.

Shulyak, L. (2000). *The Innovation Algorithm*. Worchester, MA: Technical Innovation Center, Inc.

Technical Info: A-Bike. (2015). Obtenido de A-Bike Web site: http://www.a-bike.co.uk/?page_id=19

The A-Bike: Detroit Bikes: Download Spec Sheet. (2015). Obtenido de Detroit Bikes: <http://detroitbikes.com/wp-content/uploads/2013/10/The-A-Type-Spec-Sheet.pdf>

Wagner, T., Neinhuis, C., & Barthlott, W. (1996). Wettability and contaminability of insect wings as a function of their surface scultures. *Acta Zool.*, (págs. 213-225). Estocolmo, Suecia.

Why AskNature?: AskNature. (2015). Obtenido de AskNature Web site: http://www.asknature.org/article/view/why_asknature#menuPopup

APÉNDICE	pág.
Tabla A-1 Clases de flujos estándar y tipos de flujos (Adaptadas por Otto y Wood).	66
Tabla A-2 Nombres de funciones estandarizados (Adaptados por Otto y Wood).	66
Tabla A-3 Lista de los 39 parámetros de ingeniería de TRIZ.	67
Tabla A-4 Lista de los 40 principios inventivos de TRIZ.	68
Figura A-5 Los Siete Escalones para el Pensamiento Inventivo (Algoritmo para generar soluciones).	69
Tabla A-6 Plantilla de Nueve Ventanas (Resultado Ideal Final).	70
Tabla A-7 Plantilla de Nueve Ventanas (Contexto).	70
Tabla A-8 Plantilla de Nueve Ventanas (Recursos).	71
Tabla A-9 Mapa de Soluciones para Conflictos Funcionales.	72
Tabla A-10 FISSST.	73
Tabla A-11 Reglas para Recortar.	74
Tabla A-12 Principios de Separación.	74
Figura A-13 Matriz de Contradicciones BioTRIZ.	75
Tabla A-14 Funciones biológicas correspondientes a la Base Funcional.	76
Tabla A-15 Flujos biológicos correspondientes a la Base Funcional.	77
Figura A-16 Life's Principles.	78
Tabla A-17 Cuadro comparativo de las metodologías Inspiradas en la Naturaleza.	79
Tabla A-18 Primera clasificación de las Metodologías.	80
Tabla A-19 Introducción de las Metodologías Inspiradas en la Naturaleza en la Metodología de Dieter.	81

Tabla A-1 Clases de flujos estándar y tipos de flujos (Adaptadas por Otto y Wood).

Flow Classes		
Energy	Material	Signal
Human	Human	Status
Hydraulic	Solid	Acoustic
Pneumatic	Liquid	Olfactory
Mechanical	Gas	Tactile
• Translational		Taste
• Rotational		Visual
• Vibrational		
Electrical		
Acoustic		
Thermal		
Magnetic		
Chemical		

Fuente: K. Otto, and K. Wood, *Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.

Tabla A-2 Nombres de funciones estandarizados (Adaptados por Otto y Wood).

Function Class	Basic Function Names	
	The symbol → indicates that an Output flow is required for the function type	Alternate Wording of Basic Functions
Branch	Separate	Detach, disassemble, disconnect, divide, disconnect, subtract
	Remove	→ Cut, polish, punch, drill, lathe
	Distribute	Absorb, dampen, diffuse, dispel, dispense, disperse, empty, resist, scatter
Channel	Refine	Clear, filter, strain, purify
	Import	Allow, capture, input, receive
	Export	Eject, dispose, remove
	Transfer	
	Transport	→ Lift, move
	Transmit	→ Conduct, convey
	Guide	Direct, straighten, steer
	Translate	→
Rotate	→ Spin, turn	
Connect	Allow GDL	→ Constrain, unlock
	Couple	Assemble, attach, join
	Mix	Add, blend, coalesce, combine, pack

Continuación Tabla A-2

Control Magnitude	Actuate	Initiate, start
	Regulate	Allow, control, enable or disable, interrupt, limit, prevent
	Change	Adjust, amplify, decrease, increase, magnify, multiply, normalize, rectify, reduce, shape
	Form Condition	→ Compact, compress, crush, pierce, shape → Prepare, adapt, treat
Convert	Convert	Condense, differentiate, evaporate, integrate, liquefy, process, solidify, transform
Provision	Store	Contain, collect, reserve, capture
	Supply (extract)	Expose, fill, provide, replenish
Signal	Sense	Check, discern, locate, perceive, recognize
	Indicate	Mark
	Display Measure	Calculate
Support	Stop	Insulate, protect, prevent, shield, inhibit
	Stabilize	Steady
	Secure	Attach, fasten, hold, lock, mount
	Position	Align, locate, orient

Fuente: K. Otto, and K. Wood, *Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.

Tabla A-3 Lista de los 39 parámetros de ingeniería de TRIZ.

Parámetros de Ingeniería Utilizados para Representar Contradicciones en TRIZ		
1. Peso de un objeto en movimiento.	14. Resistencia	27. Confiabilidad
2. Peso de un objeto estático.	15. Durabilidad de un objeto en movimiento.	28. Precisión de medida.
3. Longitud de un objeto. en movimiento.	16. Durabilidad de un objeto estático.	29. Precisión de manufactura.
4. Longitud de un peso estático.	17. Temperatura	30. Factores perjudiciales que actúan en un objeto.
5. Área de un objeto en movimiento.	18. Brillo	31. Efectos secundarios perjudiciales.
6. Área de un objeto estático.	19. Energía gastada por un objeto en movimiento.	32. Fabricación
7. Volumen de un objeto en movimiento.	20. Energía gastada por un objeto estático.	33. Conveniencia de uso.
8. Volumen de un objeto estático.	21. Potencia	34. Reparabilidad
9. Velocidad	22. Perdida de energía.	35. Adaptabilidad
10. Fuerza	23. Perdida de sustancia.	36. Complejidad del dispositivo.
11. Tensión, presión	24. Pérdida de información.	37. Complejidad de control.
12. Forma	25. Pérdida de tiempo.	38. Nivel de automatización.
13. Estabilidad del objeto.	26. Cantidad de sustancia.	39. Productividad

Fuente: (Dieter & Schmidt, *Engineering Design*, 2009).

Tabla A-4 Lista de los 40 principios inventivos de TRIZ.

Nombres de los Principios Inventivos de TRIZ	
1. Segmentación	21. Correr a través
2. Extracción	22. Convertir daño en beneficio
3. Calidad local	23. Retroalimentación
4. Asimetría	24. Mediador
5. Simetría	25. Autoservicio
6. Combinado	26. Copiar
7. Universalidad	27. Un objeto barato y efímero en lugar de uno caro y duradero.
8. Muñeca anidada	28. Reemplazar un sistema mecánico.
9. Contrapeso	29. Uso de una construcción neumática o hidráulica.
10. Neutralización previa	30. Película flexible o membrana delgada.
11. Acción previa	31. Uso de materiales porosos.
12. Equipotencialidad	32. Cambio de color
13. Inversión	33. Homogeneidad
14. Esferoidalidad- Curvatura	34. Partes rechazables o regenerativas
15. Dinamicidad	35. Transformación de estados físicos y químicos de un objeto.
16. Acción parcial o exagerada.	36. Transición de fase.
17. Moverse a otra dimensión.	37. Expansión térmica
18. Vibración mecánica	38. Uso de oxidantes fuertes.
19. Acción periódica	39. Ambiente inerte
20. Continuidad de una acción útil.	40. Materiales compuestos

Fuente: (Dieter & Schmidt, Engineering Design, 2009).

Análisis paso a paso del problema

Niveles para revelar la solución

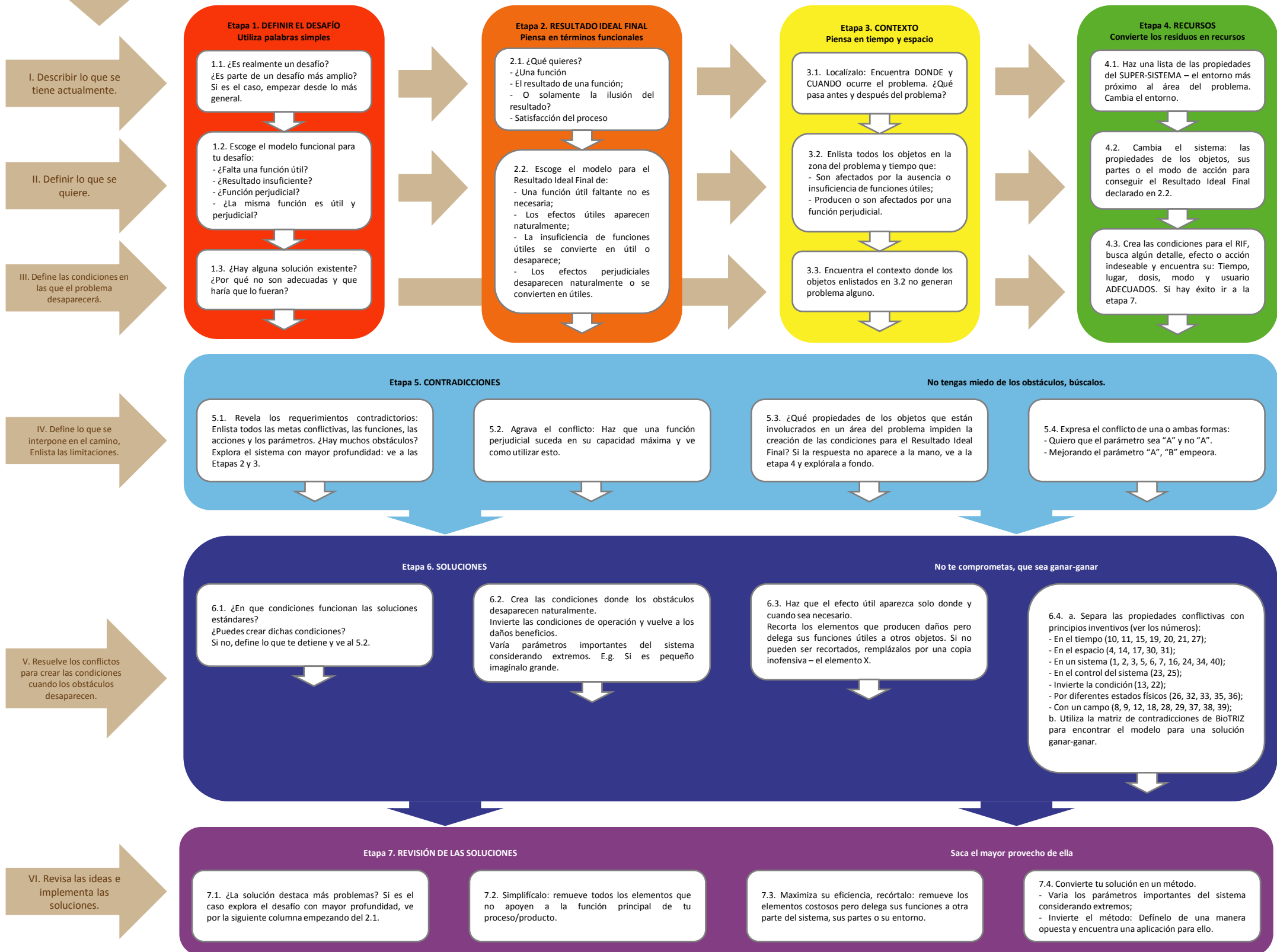


Figura A-5 Los Siete Escalones para el Pensamiento Inventivo (algoritmo para generar soluciones)
Fuente: (Bogatyrev & Bogatyreva, Inventor's Manual, 2014).

Tabla A-6 Plantilla de Nueve Ventanas (Contexto).

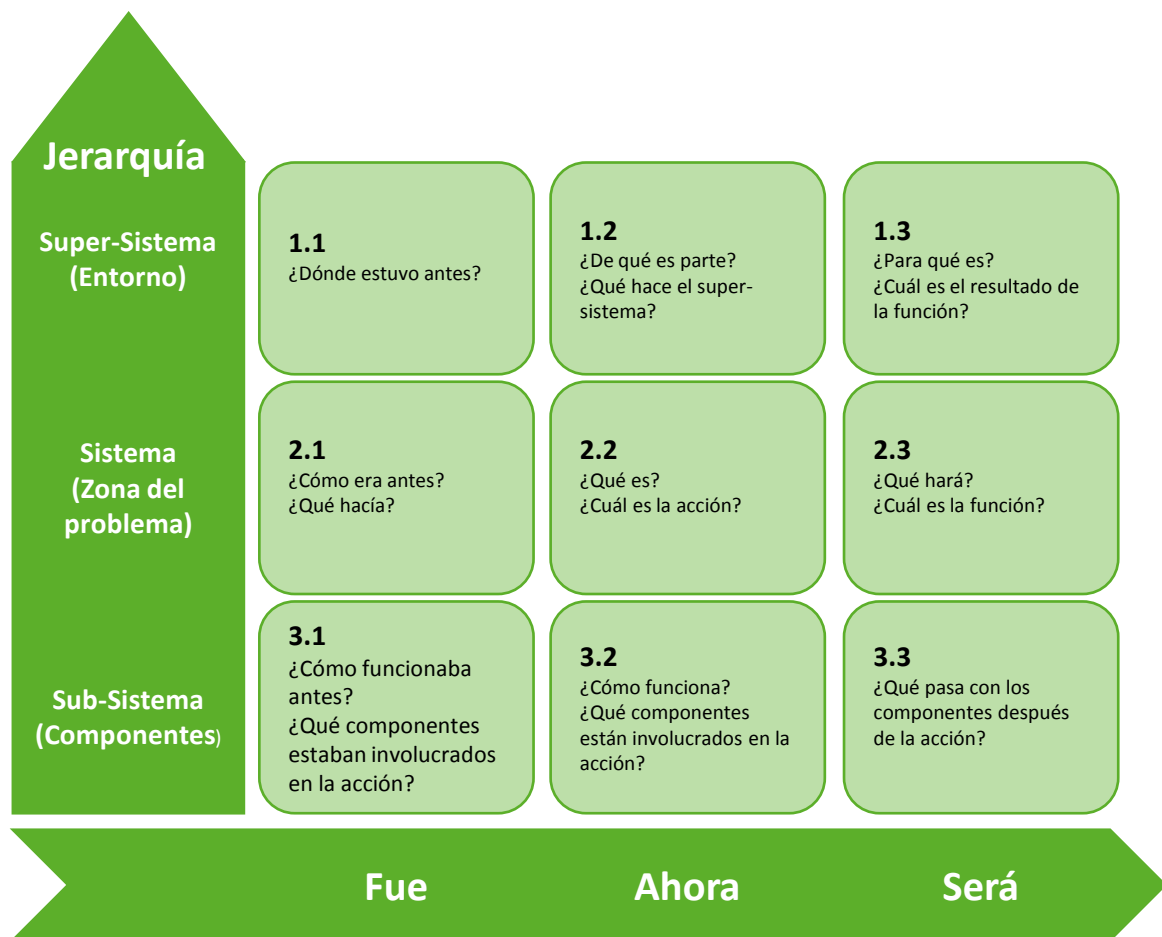


Tabla A-7 Plantilla de Nueve Ventanas (Recursos).



Fuente: (Bogatyrev & Bogatyreva, Inventor's Manual, 2014).

Tabla A-8 Plantilla de Nueve Ventanas (Resultado Ideal Final).

Fuente: (Bogatyrev & Bogatyreva, Inventor's Manual, 2014).

Jerarquía

Super-Sistema (Entorno)

1. Una función faltante está presente en otro proceso o sistema.
2. Una función insuficiente es suficiente en otro proceso o sistema.
3. Una función considerada perjudicial fue útil en otro sistema o proceso.
4. La neutralización dañina de funciones útiles estuvo ausente en otros sistemas.
5. Una función útil fue realizada por el entorno con anterioridad.

1. Una función faltante es realizada por el entorno.
2. El entorno compensa la insuficiencia de una función.
3. Una función perjudicial desaparece en diferentes condiciones.
4. La neutralización dañina de funciones útiles desaparecen en las nuevas condiciones.
5. Funciones útiles realizadas por el entorno.

1. El resultado de una función faltante no es necesario.
2. El resultado de una función insuficiente no es necesario.
3. Un resultado dañino es aceptable.
4. La neutralización dañina de funciones útiles es compensada por el entorno.
5. El resultado de funciones útiles no es necesario, ya que el daño nunca aparece.

Sistema (Zona del problema)

1. Una función faltante estuvo presente antes en el sistema.
2. Una función insuficiente fue suficiente antes en el sistema.
3. Una función perjudicial fue prevenida previamente.
4. Funciones útiles contraproducentes no son necesarias o el daño que causan es prevenido.
5. Una función útil fue realizada previamente.

MI PROBLEMA:

1. Falta una función útil.
2. Una función útil es insuficiente.
3. Una función perjudicial está presente.
4. Las funciones útiles son contra-productas.
5. La misma función es útil y perjudicial.

1. El resultado de una función faltante se logra por otros medios o no es necesaria.
2. El resultado de la insuficiencia es aceptable.
3. El resultado de una función perjudicial se convierte en aceptable, útil o se neutraliza.
4. El resultado perjudicial de la neutralización de funciones útiles se neutraliza.
5. El resultado de una función útil no es necesario.

Sub-Sistema (Componentes)

1. Una función faltante es realizada por una parte diferente del problema previamente.
2. Una función insuficiente se vuelve suficiente si se realiza con anterioridad por un componente del sistema diferente.
3. Una función perjudicial se bloquea previamente por las partes del sistema o por el elemento X añadido.
4. La neutralización de funciones útiles desaparece si una de estas es realizada por una parte diferente del sistema.
5. Una función útil fue realizada previamente por una parte diferente del sistema.

1. Una función faltante es lograda por otros componentes del objeto o del sujeto.
2. Una función insuficiente se vuelve suficiente si es realizada por una parte diferente del objeto o del sujeto.
3. Una parte perjudicial del sistema no es necesaria.
4. Funciones útiles dejan de ser contraproducentes si son realizadas por otros componentes.
5. El modo de acción útil elimina el daño.

1. El resultado de una función faltante aparece por sí mismo, naturalmente.
2. El resultado de la función insuficiente aparece por sí mismo, naturalmente.
3. Partes diferentes o añadidas al sistema corrigen el resultado de la función perjudicial.
4. El resultado perjudicial de la neutralización de funciones útiles es corregida por diferentes partes del sistema.
5. Una función útil es realizada por diferentes partes del sistema sin causar daño.

ANTES DEL PROBLEMA

DURANTE EL PROBLEMA

DESPUÉS DEL PROBLEMA

Tabla A-9 Mapa de Soluciones para Conflictos Funcionales.
Fuente: (Bogatyrev & Bogatyreva, Inventor's Manual, 2014).

**Super-Sistema
(Entorno)**

1.1
¿La función perjudicial fue útil antes?
¿Si? – Cambia las condiciones de operación ve al 2.3.
¿No? – Ve al 3.1.

1.2
¿La función útil puede ser proporcionada a grande escala, por otro sistema o por recursos en el entorno?
¿Si? – Recorta ambos – el sujeto y el objeto.
¿No? – Invierte las condiciones o ve al 1.3.

1.3
¿Se necesita el resultado de una función útil?
¿Si? – Bloquea el resultado de la acción perjudicial por condiciones del entorno.
- Proporciona el resultado de la función útil por el entorno.
¿No? - Ve a l 1.1 antes de recortar.

**Sistema
(Zona del problema)**

2.1
¿La función puede ser realizada por otra parte del sistema sin algún daño al objeto?
¿Si? – Recorta al sujeto completamente.
¿No? – Cambia el objeto: Separa las propiedades conflictivas utilizando los principios de separación.
- Ve a la matriz por PI.



2.3
¿El resultado de la función útil puede ser proporcionado sin el objeto?
¿Si? . Ve al 3.3 antes de recortar el objeto.
¿No? – Recorta al sujeto después de la función útil.

**Sub-Sistema
(Componentes)**

3.1
¿El componente perjudicial del sujeto fue útil antes?
¿Si? – Cambia el componente del objeto. Ve al 3.3.
¿No? – Recorta el componente perjudicial del sujeto.

3.2
¿Las funciones dañinas y útiles son proporcionadas por el mismo componente del sujeto?
¿Si? – Bloquea o neutraliza la acción dañina con otro objeto. Ve al 1.3.
¿No? – Ve al 3.1 antes de recortar el dañino pero conservando el útil.

3.3
¿El componente del objeto que es afectado por la acción perjudicial útil en el futuro?
¿Si? – Protégelo utilizando un mediador.
¿No? – Ve al 2.3 antes de recortar el componente.

**ANTES DEL PROBLEMA
EVÍTALO**

**DURANTE EL PROBLEMA
TRATA CON ÉL**

**DESPUÉS DEL PROBLEMA
CORRÍGELO**

Tabla A-10 FISSST.

C	<p>Campo/Energía ¿Qué es lo que lo mueve? ¿Por qué funciona todo? ¿Qué energía utiliza?</p>	<p>Hazlo inerte o conductivo, cambia la fuente de la energía o el tipo de campo que actúa (gravedad, luz solar, geomagnético, eléctrico, acústico, calor). Considera dos estrategias – caro pero duradero o barato pero de vida corta.</p>
I	<p>Información ¿Para qué es? ¿Cómo funciona? ¿Cómo se procesa y controla la información?</p>	<p>Hazlo estándar, (estable o adaptable), regula (programas flexibles o estrictos), cambia la subordinación (valor, rango dominante, jerarquía). Afecta el conocimiento, la experiencia, actitudes, sentimientos. Usa o modifica la regulación, intercambio de información, detector, medidor, adapta temas, retroalimentación y alimentación anticipada negativa o positiva. Camuflajea o imita (oculta, cubre, observa, patrulla).</p>
S	<p>Sustancia ¿Qué es? ¿De qué está hecho? ¿Qué contiene, produce o tiene?</p>	<p>Utiliza, agrega (compone, descompone, disuelve), homogeniza, o distingue, remueve o modifica las propiedades del material (masa, densidad, etc.) Cambia las propiedades del material: aumenta su resiliencia, o flexible, funde, congela, cristaliza, sublima, solidifica, condensa, cuaja, absorbe, sustituye. Utiliza aire y agua.</p>
E	<p>Estructura ¿Cómo está estructurado? ¿Cuáles son sus componentes? ¿A qué está conectado y cómo? ¿Cómo está soportado?</p>	<p>Haz una estructura regular o irregular, homogénea o características gradientes, como malla, fractal o jerárquica. Utiliza, agrega, remueve o reagrupa partes y sus interacciones. Haz a los elementos de la estructura compatibles, modulares, reemplazables/irreemplazables (de la misma escala E.g. LEGO o diferentes, pero compatibles E.g. DUPLO).</p>
E	<p>Espacio ¿Dónde está? ¿Qué espacio ocupa? ¿Cuál es su forma (altura, ancho, largo, etc.)? ¿Cuál es la dirección? Hacia donde, desde donde, distancia.</p>	<p>Usa o modifica la posición espacial o la forma geométrica del sistema o la forma de sus partes (longitud, área, volumen, perfil). Extiéndelo, córtalo, haz formas simétricas o asimétricas, combina/separa espacios, aumenta o disminuye los parámetros espaciales.</p>
T	<p>Tiempo ¿Cuándo, qué tan seguido, como cambia a través del tiempo? Largo, mediano o corto plazo, cambios regulares o pospuestos.</p>	<p>Modifica la velocidad (retraso/aceleración) de un proceso, o cambia el orden o ritmo de las acciones, haz que las acciones sean continuas o periódicas, síncronas o asíncronas, rápidas o lentas, regulares o irregulares. Que las acciones sean pasadas o preliminares.</p>

Fuente: (Bogatyrev & Bogatyreva, Inventor's Manual, 2014).

Tabla A-11 Reglas para Recortar.

Reglas para Recortar

1. Encuentra la ubicación o el lugar de la función principal.
2. Define los elementos que están involucrados en realizar la función.
3. ¿Las funciones de trabajo de cada elemento apoyan a la función principal? ¿Qué funciones son perjudiciales?
4. Remueve los elementos que no apoyan a la función principal del proceso o producto.
5. Modifica el elemento principal que afecta la eficiencia de la función.
6. ¿Este elemento costoso es útil?
7. ¿Se puede recortar el elemento que aumenta el costo del producto o proceso? En caso de no poderse, ¿Por qué no?
8. ¿Se puede delegar la función del elemento que aumenta el costo del producto o proceso a otras partes útiles del sistema o del entorno? Si no se puede encontrar dicho elemento entonces preguntar:
9. ¿Puede algún factor X barato y disponible desempeñar la función, permitiendo recortar el componente costoso?

Tabla A-12 Principios de Separación.

Tipo de Separación	¿Cómo funciona?	Ejemplo
Separa las propiedades conflictivas en el tiempo.	Obtén requerimientos opuestos en diferentes tiempos.	Un paraguas se hace chico cuando se guarda y se hace grande cuando se utiliza.
Separa las propiedades conflictivas en el espacio.	Un requerimiento se cumple en un lugar, y lo opuesto se cumple en otro lugar.	Una puerta con una gatera puede estar cerrada para las personas pero abierta para un gato.
Separa los elementos conflictivos o los componentes del sistema con un mediador.	Introduce un mediador donde dos características conflictivas reaccionan diferente.	Unos guantes para horno protegen las manos del calor.
Separa las propiedades conflictivas en un sistema jerárquico.	Una solución para el objeto, y otra solución para sus partes.	Una cadena de bicicleta es flexible, pero está hecha de partes rígidas: son rígidas a nivel sub-sistema, pero flexibles a nivel sistema.
Invierte la condición.	Invierte algo completamente.	En vez de una cerca, haz un zanja.
Separa los estados físicos opuestos en el sistema.	Cambia la fase o las propiedades químicas de un elemento o componente del sistema.	No se puede cargar agua en una canasta, pero si la congelamos, esto se hace posible.

Fuente: (Bogatyrev & Bogatyreva, Inventor's Manual, 2014).

Main TRIZ Contradiction Matrix table with columns for Substance, Space, Time, Energy/Field, Structure, and Information/Regulation, and rows for various parameters like Mass, Length, Area, Volume, Shape, Speed, etc.

Tabla A-14 Funciones biológicas correspondientes a la Base Funcional.

Class	Secondary	Tertiary	Biological Function Correspondents	
Branch	Separate		Bleaching, meiosis, <i>react</i> , flower, replicate, mitosis, segment, <i>electrophoresis</i> , dialysis, denature, free, detach, release	
		Divide	Division, prophase, metaphase, anaphase, cleave, cytokinesis	
	Remove		Deoxygenate, filtrate, deamination, liberate, expulsion, evacuate	
	Distribute		Circulate, diffusion, exchange, disperse, scatter, spread, spray	
Channel	Import		<i>Absorb</i> , attract, consume, inhale, intake	
	Export		<i>Bind</i> , block, breakdown, excrete, inactivate, repel	
	Transfer		Migrate	
		Transport		Circulate, conduct, diffuse, pump, shift, displace, fly, swim, jump, bounce
	Guide	Transmit		Communicate, <i>transduce</i>
				Orient, position, slide, tunnel
		Translate		<i>Synthesize</i> , transcribe
Rotate			Oscillate, spin, turn, swivel, roll	
	Allow DOF		Articulate	
Connect	Couple		Recombination, mate, build, phosphorylate, bond, synthesis, latch, lock, extend, link, overlap, <i>stretch</i>	
		Join	<i>Bind</i> , adhere, bond, fuse	
	Link		Clamp, <i>activate</i> , <i>bind</i> , project	
	Mix		Blend, <i>contract</i> , exchange, fragment	
Control Magnitude	Actuate		<i>Activate</i> , induce, trigger	
	Regulate		<i>Electrophoresis</i> , gate, organogenesis, respire, preserve, sustain, preserve, remain, stabilize, maintain	
		Increase		Hyperpolarize, <i>pinocytosis</i> , <i>grow</i> , expand, multiply
		Decrease		Compress, coil, divide, fold, shorten, <i>wrap</i>
	Change			<i>Pinocytosis</i> , <i>degrade</i> , alter, <i>bind</i> , catalyze, <i>contract</i> , hydrolysis, inflammation of, twist, <i>mutate</i> , radiate, charged, slip, acclimatize, alternate, fluctuate
		Decrement		Decarboxylation, <i>constrict</i>
		Shape		Elongate, <i>stretch</i> , attach, <i>spread</i>
		Condition		Osmosis, <i>constrict</i>
	Stop			Clog, extinguish, halt, interphase, seal, suspend
Prevent			Constrain, obstruct	
	Inhibit		Cover, destroy, inhibit, repress, surround	
Convert	Convert		Polymerize, <i>synthesize</i> , burn, gluconeogenesis, metabolize, <i>grow</i> , transduction, fermentation, glycolysis, hydrolyze, hydrolysis, respiration, ionize, decompose, <i>degrade</i> , <i>develop</i> , <i>mutate</i> , <i>photosynthesis</i>	
Provision	Store		Conserve, <i>hold</i> , <i>convert</i> , deposit, <i>photosynthesize</i>	
		Contain	<i>Absorb</i>	
	Collect		<i>Absorb</i> , catch, breakdown, concentrate, digest, reduce	
	Supply		Feed, lactate	
Signal	Sense	Detect	Locate, see, smell	
		Measure	Observe, monitor, gauge, watch	
	Indicate Process			Fluorescence, communicate, react, mark
			Learn	
Support			<i>Develop</i> , <i>wrap</i>	
	Stabilize		Homeostasis, cling, <i>hold</i> , <i>bind</i> , <i>connect</i>	
	Position		Envelope	

Overall increasing degree of specification →

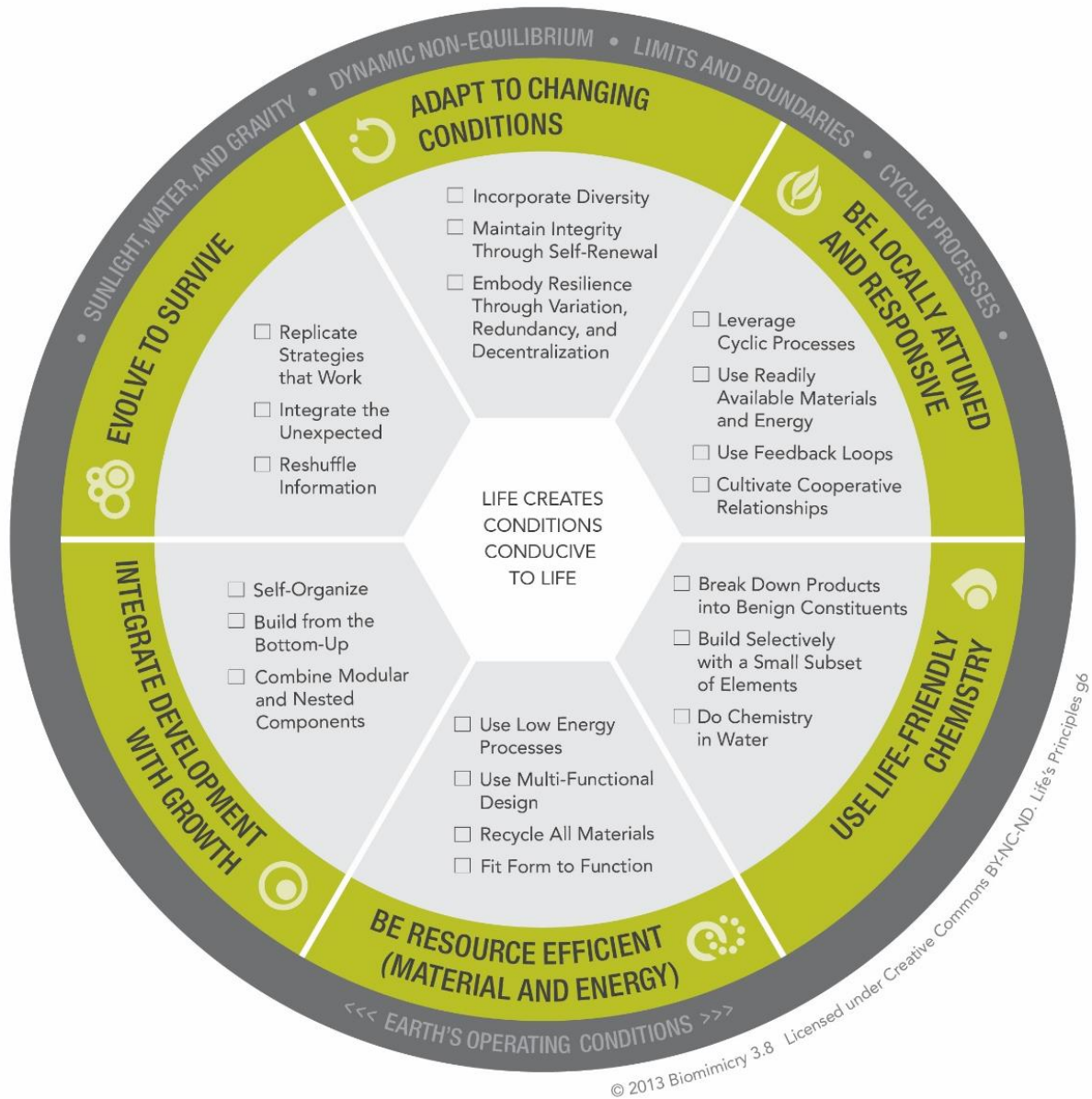
Fuente: (Nagel & McAdams, An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design, 2010).

Tabla A-15 Flujos biológicos correspondientes a la Base Funcional.

<i>Class</i>	<i>Secondary</i>	<i>Tertiary</i>	<i>Biological Flow Correspondents</i>	
Material	Human		Being, body	
	Gas		Oxygen, nitrogen, chlorine	
	Liquid		Acid, chemical, water, concentration, solute, cytokine, pyruvate, fluid, nicotine, auxin, opium, glycerol, carotenoid, plasma, repressor	
	Solid	Object		Body, substrate, microfilament, microtubules, structure, DNA, motor, fiber, chain, matter, nucleus, organ, tissue, muscle, ligand, cilia, gtp, flagella, RNA, tRNA, mRNA, tube, vein, heart, plant, ribosome, seed, apoplast, endotherm, ectotherm, stem, kidney, egg, ovaries, leaves, embryo, bacteria, gene, oncogene, cryptochromes, urea, chloroplasts, carbon, glucagons, adipose, angiosperm, meristems, mineral, stoma, shoot, capillary, receptors, hair, tendon, neuron, photoreceptors, mechanoreceptors, host, chromosome, algae, petiole, promoter, phyla, lysosome, introns, exon, archaea, allele, cone, strand, centriole, spore, euryarchaeota, sporangia, zygote, sulfur, ctenophore, lipoproteins, stp, nephron, hyphae, plasmodesma, angiosperms, conifer, plasmid, xylem, pigment, sperm, hippocampus, somite, parathormone
		Composite		Molecule, enzyme, virus, phloem, ribozyme, prokaryote, macromolecule, polymerase, nucleotide, polypeptide, organelle, symplast, mesophyll, brood, codon, messenger
	Mixture	Gas-gas		Air, dioxide
		Liquid-liquid		Solution, poison, slime, blood, urine, cytoplasm, peptide, hormone, melatonin, thyroxine, calcitonin, thyrotropin, estrogen, somatostatin, cortisol, glucagons, adrenocorticotropic, testosterone
		Solid-solid		Adenosine, glial, glomerulus, blastula, monosaccharides, membrane mulch, phosphate, gibberellin, plastids
		Solid-liquid		Lipids, glutamic acid, synapse, peptidoglycan, cell, centrosomes, phytochrome, retina, insulin, protein, hemoglobin
	Signal	Status		Change, variation, lateral, allosteric, swelling, catalyzes, translation, exposed, active, separated, cycle, form, reaction, redox, deficiency, saturated, diffusion, broken, vicariant, hybridization, orientation, resting, cues, magnetic, volume, under, organized, fruiting, fatty, anaphase, metaphase, conjugation, osmolarity, senescence
Auditory			Sound	
Olfactory			Smell	
Tactile			Cold, pain	
Taste			Gustation	
		Visual	Length, shortened, long, dark, full, double	
Control			Place, inhibit, release, excretory, development, match, inducer, digest, integrate, translation, transduction, equilibrium, grown, splicing, capture, distributed, prophase, phosphorylation	
		Analog	Flowering, center, synthesis, binding, photosynthesis	
	Discrete	Flower, translocation		
Energy	Human			
	Acoustic		Echolocation, waves	
	Chemical		Calorie, metabolism, glucose, glycogen, ligand, nutrient, starch, fuel, sugar, mitochondria, synthesis, o, lipids, glucose, gibberellins	
	Electrical		Electrons, potential, q, feedback, charge, fields	
	Electromagnetic	Optical		Light, infrared
		Solar		Light, sun, ultraviolet
	Hydraulic		Pressure, osmosis, osmoregulation	
	Magnetic		Gravity, fields, waves	
	Mechanical			Muscle, pressure, tension, removing, stretch, depress
		Rotational		
		Translational		
Pneumatic			Pressure	
Thermal			Temperature, heat, infrared	
Overall increasing degree of specification →				

Fuente: (Nagel & McAdams, An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design, 2010).

Figura A-16 Life's Principles.



LIFE'S PRINCIPLES

Biomimicry DesignLens

Biomimicry.net | AskNature.org

Fuente: (Biomimicry Design Lens: Biomimicry 3.8, 2015).

Tabla A-17 Cuadro comparativo de las metodologías Inspiradas en la Naturaleza.

PASOS	AUTORES					
	VINCENT	NAGEL	BOGATYREV	HELMS	BENYUS (BIOMIMICRY THINKING)	DIETER
1	Definición del problema. Lista de propiedades y funciones deseables e indeseables.	Definición del problema.	Definir las funciones principales del dispositivo, su entorno, tiempo, y tamaño de la escala. Utilizar herramientas TRIZ para la definición del problema.	Definición del problema.	Definir el contexto.	Definición del problema.
2	Analizar y comprender el problema para encontrar los conflictos y contradicciones. Encontrar la analogía funcional en biología o utilizar la matriz de contradicciones biológicas.	Descomposición.	Hacer una lista de parámetros esenciales para el desempeño de la función principal: Formular los requerimientos del prototipo biológico. Expresar el desafío en términos de los requerimientos conflictivos. Definir las contradicciones.	Replanteamiento del problema.	Identificar las funciones.	Recopilación de información.
3	Comparar soluciones recomendadas por la biología y TRIZ. Encontrar soluciones comunes en biología e ingeniería. Enlistar los principios técnicos y biológicos recomendados.	Consulta.	Buscar prototipos en la biología. Disectar, analizar y clasificar los prototipos de acuerdo a los requerimientos funcionales principales. Revelar los parámetros principales de función/comportamiento y formular los requerimientos para su implementación en ingeniería. Revelar las contradicciones.	Búsqueda de una solución biológica.	Integrar los Principios de la Vida (Life's Principles)	Generación de conceptos.
4	Basado en estas soluciones hacer un "puente" del diseño natural a diseño técnico. Hacer ambos sistemas compatibles. Hacer una lista de las composiciones generales recomendadas.	Hacer conexiones.	Describir el comportamiento del bio-prototipo utilizando la Plantilla de 9 Ventanas. Definir los atributos requeridos para cada elemento del sistema y su entorno. Extender la lista de propiedades añadiendo los opuestos de cada parámetro.	Definición de la solución biológica.	Descubrir modelos naturales.	Evaluación y selección de conceptos
5	Para crear una nueva tecnología completamente nueva agregar a los principios TRIZ algunos principios puramente técnicos o biológicos.	Generación de conceptos.	Arreglar los parámetros que son relevantes para la función principal en una tabla con las partes de las variables del sistema en columnas y filas.	Extracción del principio.	Abstraer estrategias biológicas.	
6		Múltiples avenidas de diseño.	Encontrar una combinación de los parámetros más deseables, posibles y asequibles para crear un dispositivo biomimético no necesariamente existente en la naturaleza, pero que puede ser implementado con la ayuda de la ingeniería. Combinar la incompatibilidades utilizando los 40 principios inventivos.	Aplicación del principio.	Lluvia de ideas bio-inspiradas.	
7		Validación.			Emular los principios de diseño.	
8					Medir según los Principios de la Vida.	

Tabla A-18 Primera clasificación de las Metodologías.

PASOS	AUTORES					
	VINCENT	NAGEL	BOGATYREV	HELMS	BENYUS (BIOMIMICRY THINKING)	DIETER
1	Definición del problema. Lista de propiedades y funciones deseables e indeseables.	Definición del problema.	Definir las funciones principales del dispositivo, su entorno, tiempo, y tamaño de la escala. Utilizar herramientas TRIZ para la definición del problema.	Definición del problema.	Definir el contexto.	Definición del problema.
2	Analizar y comprender el problema para encontrar los conflictos y contradicciones. Encontrar la analogía funcional en biología o utilizar la matriz de contradicciones biológicas.	Descomposición.	Hacer una lista de parámetros esenciales para el desempeño de la función principal: Formular los requerimientos del prototipo biológico. Expresar el desafío en términos de los requerimientos conflictivos. Definir las contradicciones.	Replanteamiento del problema.	Identificar las funciones.	Recopilación de información.
3	Comparar soluciones recomendadas por la biología y TRIZ. Encontrar soluciones comunes en biología e ingeniería. Enlistar los principios técnicos y biológicos recomendados.	Consulta.	Buscar prototipos en la biología. Disectar, analizar y clasificar los prototipos de acuerdo a los requerimientos funcionales principales. Revelar los parámetros principales de función/comportamiento y formular los requerimientos para su implementación en ingeniería. Revelar las contradicciones.	Búsqueda de una solución biológica.	Integrar los Principios de la Vida (Life's Principles)	Generación de conceptos.
4	Basado en estas soluciones hacer un "puente" del diseño natural a diseño técnico. Hacer ambos sistemas compatibles. Hacer una lista de las composiciones generales recomendadas.	Hacer conexiones.	Describir el comportamiento del bio-prototipo utilizando la Plantilla de 9 Ventanas. Definir los atributos requeridos para cada elemento del sistema y su entorno. Extender la lista de propiedades añadiendo los opuestos de cada parámetro.	Definición de la solución biológica.	Descubrir modelos naturales.	Evaluación y selección de conceptos.
5	Para crear una nueva tecnología completamente nueva agregar a los principios TRIZ algunos principios puramente técnicos o biológicos.	Generación de conceptos.	Arreglar los parámetros que son relevantes para la función principal en una tabla con las partes de las variables del sistema en columnas y filas.	Extracción del principio.	Abstraer estrategias biológicas.	
6		Múltiples avenidas de diseño.	Encontrar una combinación de los parámetros más deseables, posibles y asequibles para crear un dispositivo biomimético no necesariamente existente en la naturaleza, pero que puede ser implementado con la ayuda de la ingeniería. Combinar la incompatibilidades utilizando los 40 principios inventivos.	Aplicación del principio.	Lluvia de ideas bio-inspiradas.	
7		Validación.			Emular los principios de diseño.	
8					Medir según los Principios de la Vida.	

Tabla A-19 Introducción de las Metodologías Inspiradas en la Naturaleza en la Metodología de Dieter.

METODOLOGÍA DIETER	AUTORES				
	VINCENT	NAGEL	BOGATYREV	HELMS	BENYUS (BIOMIMICRY THINKING)
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	Definición del problema. Lista de propiedades y funciones deseables e indeseables.	Definición del problema.	Definir las funciones principales del dispositivo, su entorno, tiempo y tamaño de la escala.	Definición del problema.	Definir el contexto.
			Utilizar herramientas TRIZ para la definición del problema.		Identificar las funciones.
			Hacer una lista de parámetros esenciales para el desempeño de la función principal: Formular los requerimientos del prototipo biológico.		Integrar los Principios de la Vida (Life's Principles).
			Arreglar los parámetros que son relevantes para la función principal en una tabla con las partes de las variables del sistema en columnas y filas.		
RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	Encontrar la analogía funcional en biología o utilizar la matriz de contradicciones biológicas.	Consulta.	Buscar prototipos en la biología.	Búsqueda de una solución biológica.	Descubrir modelos naturales.
	Comparar soluciones recomendadas por la biología y TRIZ. Encontrar soluciones comunes en biología e ingeniería. Enlistar los principios técnicos y biológicos recomendados.	Hacer conexiones.		Definición de la solución biológica.	Abstraer estrategias biológicas.
	Basado en estas soluciones hacer un "puente" del diseño natural a diseño técnico. Hacer ambos sistemas compatibles. Hacer una lista de las composiciones generales recomendadas.			Extracción del principio.	
GENERACIÓN DE CONCEPTOS	Analizar y comprender el problema para encontrar los conflictos y contradicciones	Descomposición.	Revelar las contradicciones.	Replanteamiento del problema.	Lluvia de ideas bio-inspiradas.
			Disectar, analizar y clasificar los prototipos de acuerdo a los requerimientos funcionales principales. Revelar los parámetros principales de función/comportamiento y formular los requerimientos para su implementación en ingeniería. Revelar las contradicciones.		
		Generación de conceptos.	Describir el comportamiento del bio-prototipo utilizando la plantilla de 9 Ventanas. Definir los atributos requeridos para cada elemento del sistema y su entorno. Extender la lista de propiedades añadiendo los opuestos de cada parámetro.		Emular los principios de diseño.
		Múltiples avenidas de diseño.	Arreglar los parámetros que son relevantes para la función principal en una tabla con las partes de las variables del sistema en columnas y filas. Encontrar una combinación de los parámetros más deseables, posibles y asequibles para crear un dispositivo biomimético no necesariamente existente en la naturaleza, pero que puede ser implementado con la ayuda de la ingeniería. Combinar la incompatibilidades utilizando los 40 principios inventivos.		
EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE CONCEPTOS	N/A	Validación.	N/A	N/A	Medir según los Principios de la Vida.
COMENTARIOS	Propuesta del autor: Para crear una nueva tecnología completamente nueva agregar a los principios TRIZ algunos principios puramente técnicos o biológicos.	N/A	N/A	Se define un sexto paso, el cual abarca la aplicación del principio. Esto no entra en la etapa de diseño conceptual.	N/A
REFERENCIA	Methods for supporting bioinspired design	A systematic approach to biologically-inspired engineering design.	TRIZ-based algorithm for Biomimetic design.	Biologically inspired design: process and products.	Biomimicry Institute.