

Diseño de estructuras modulares obtenidas por medio de microscopía basados en metodología
indirecta

Gustavo Andrés Pachón Reyes y Cristian David Hernández Herrera

Trabajo de Grado para Optar el título de Diseñador Industrial

Directora

PhD. Clara Isabel López Guadrón

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Diseño Industrial
Bucaramanga

2023

Tabla de Contenido

	Introducción	9
1	Descripción General	10
1.1	Planteamiento del problema.....	10
1.2	Justificación	11
1.3	Pregunta de diseño	14
1.4	Objetivo General.....	14
1.5	Objetivos Específicos.....	14
1.6	Metodología	14
2	Marco Teórico	16
2.1	Investigación + creación	16
2.2	Método directo	17
2.3	Metodología	17
2.4	Método	17
2.5	Método indirecto.....	18
2.6	Bioforma	18
2.7	Biomimesis o Biomimetica.....	18
2.8	Estructuras modulares.....	19
2.9	Estereomicroscopia.....	20
2.10	Microscopia SEM	21
3	Recursos de investigación	21
3.1	Artrópodos	21
3.1.1	Lepidópteros (mariposa).....	23
3.1.1.1	Características de los lepidópteros.	24
3.1.1.2	Morfología de la mariposa.....	24
3.1.1.2.1	Cabeza	25
3.1.1.2.2	Tórax.	27
3.1.1.2.3	Alas.....	28
3.1.2	Díptera (mosca).....	32
3.1.2.1	características generales.	33

3.1.2.2	Morfología de la mosca	33
3.1.3	Gryllidae (Grillo)	36
3.1.3.1	Características generales.....	36
3.1.3.2	Ciclo de vida.....	37
3.1.4	Anisópteros (libélula).....	40
3.1.4.1	Características de los anisópteros.....	41
3.1.4.2	Morfología de la libélula.	41
4	Proceso Metodológico	49
4.1	Matriz de priorización.....	49
4.2	Geometrización.....	54
4.3	Moodboard.....	57
4.4	Auxetica y relación de Poisson	59
4.4.1	Tipos de estructuras Auxéticas	61
4.4.1.1	Estructuras quirales.....	61
4.4.1.2	Estructuras reentrantes.....	62
4.4.1.3	Unidades rotatorias.....	63
4.4.2	Principales características	63
4.5	Generación auxética tridimensional.....	64
4.6	Evaluación y selección de estructura	67
4.7	Lluvia de ideas	71
4.8	Proceso analítico jerárquico.....	73
4.9	Exploración temática	78
4.9.1	Riesgos de la práctica.....	78
4.9.2	Cabezal de Boxeo	78
4.10	Benchmarking.....	80
4.11	Simulaciones comparativas.....	83
4.12	Emulación tridimensional	89
4.12.1	Modelado 3D	89
4.12.2	Prototipado rápido.....	91
	Conclusiones	95
	Referencias bibliográficas	97

Lista de tablas

Tabla 1 Clasificación de los artrópodos	22
Tabla 2 Matriz de estrategias biológicas	48
Tabla 3 Matriz de selección estrategias biológicas	52
Tabla 4 Estrategias biológicas seleccionadas de la matriz de priorización	54
Tabla 5 Resultado deformación cargas axiales	69
Tabla 6 Resultado porcentaje disminución energía cinética	71
Tabla 7 Generación de ideas	72
Tabla 8 Matriz comparación de criterios.....	74
Tabla 9 Matriz de prioridades en la categoría de deporte	75
Tabla 10 Matriz de prioridades en la categoría medicina	75
Tabla 11 Matriz de prioridades en la categoría podología	76
Tabla 12 Matriz de prioridades en la categoría de amoblamiento	76
Tabla 13 Matriz de prioridades final	77
Tabla 14 Variables estándar para simulaciones	84
Tabla 15 Resultado de tensiones, deformaciones y aceleración máximas	87
Tabla 16 Cálculo de fuerza total experimentada durante el impacto	88

Lista de figuras

Figura 1	Relación entre los conceptos de modelo, proceso, método y metodología.....	15
Figura 2	Los cardos como fuente de inspiración para la creación del velcro.....	19
Figura 3	Vasos sanguíneos subcutáneos del ratón (zoom 11,5x).....	21
Figura 4	Morfología mariposa.....	24
Figura 5	Esquema del ojo.....	25
Figura 6	Esquema de cabeza.....	26
Figura 7	Sección transversal escama de mariposa.....	31
Figura 8	Estructura tridimensional presente en escamas.....	32
Figura 9	Morfología de la mosca.....	33
Figura 10	cabeza y piezas bucales de una mosca muscida.....	34
Figura 11	Ciclo de vida del grillo.....	38
Figura 12	Anatomía externa del grillo.....	40
Figura 13	Característica estructural de la libélula.....	41
Figura 14	Estructura cabeza de un odonato.....	42
Figura 15	Abdomen de odonato.....	44
Figura 16	Morfología alar de una libélula.....	45
Figura 17	Detalle microscópico ala de una libélula.....	46
Figura 18	Proceso de geometrización.....	55
Figura 19	Moodboard.....	58
Figura 20	Coefficiente de Poisson positivo.....	60
Figura 21	Coefficiente de Poisson negativo.....	60
Figura 22	Estructura quiral.....	61
Figura 23	Estructura reentrante.....	62
Figura 24	Unidades rotatorias.....	63
Figura 25	Generación de estructuras auxética.....	65
Figura 26	Simulaciones de cargas axiales.....	68
Figura 27	Simulación de impacto en estructura.....	70
Figura 28	Cabezal de Boxeo.....	80
Figura 29	Recopilación productos existentes.....	81
Figura 30	Simulación de impacto.....	85
Figura 31	Vistas modelo 3d.....	90
Figura 32	Vista explosionada modelo 3d.....	91
Figura 33	Impresión 3d Tpu.....	92
Figura 34	Impresión 3d en resina flexible.....	93
Figura 35	Impresión 3d resina flexible 70 ^a	94

Lista de apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la
Biblioteca UIS

Apéndice A. Geometrificaciones

Apéndice B. Moodboard

Apéndice C. Generación auxética tridimensional

Apéndice D. Evaluación y selección de estructura

Apéndice E. Lluvia de ideas

Apéndice F. Proceso analítico jerárquico

Apéndice G. Benchmarking

Apéndice H. Test de simulaciones comparativas

Apéndice I. Video renderización

Apéndice J. Guía de diseño para la metodología indirecta

Resumen

Título: Diseño de estructuras modulares obtenidas por medio de microscopia basados en metodología indirecta.*

Autores: Gustavo Andres Pachón Reyes, Cristian David Hernández Herrera.**

Palabras Clave: Bioforma, Biomimesis, estructuras modulares, Esteromicroscopía.

Descripción: Durante millones de años la naturaleza ha evolucionado desarrollando sus propios mecanismos para hacer frente al entorno en el que se desenvuelve con el propósito de subsistir, es por esto por lo que la humanidad a través de la historia la ha tomado como principal fuente de inspiración para la resolución de problemas cotidianos mediante la unión de la tecnología y la biología, implementando así diferentes herramientas para tener una observación y análisis más detallado a sus estructuras y composiciones de manera más asequible. Siguiendo la línea de la metodología indirecta se realiza un proceso de caracterización a través de imagenología de animales artrópodos, apoyados con la herramienta de estereomicroscopia ubicada en la sede Guatiguará de Piedecuesta de la Universidad Industrial de Santander, con el que se realiza una extracción de características formales y estructurales que permiten determinar cualidades con un potencial innovador, para posteriormente ser aplicadas en el desarrollo de estructuras modulares y que a su vez puedan ser llevadas a la resolución de un problema. En el desarrollo de este proyecto se toma como punto de partida una base teórica y metodológica indirecta para un seguimiento estructurado que lleve al correcto desarrollo de manera precisa, así mismo paralelamente se plantea una guía práctica que proporciona una estructura organizada y flexible a los diseñadores a lo largo del proceso, fomentando la creatividad, la colaboración y la creación de soluciones que se inspiren en la eficiencia y majestuosidad de la naturaleza.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Directora: Clara Isabel López Gualdrón, Diseñadora Industrial.

Abstract

Title: Design of modular structures obtained through microscopy based on indirect methodology.*

Authors: Gustavo Andres Pachón Reyes, Cristian David Hernández Herrera.**

Key Words: Bioform, Biomimicry, modular structures, Stereomicroscopy.

Description: For millions of years, nature has evolved by developing its own mechanisms to adapt to the environment in which it thrives, with the purpose of survival. This is why throughout history, humanity has taken it as a primary source of inspiration for solving everyday problems through the integration of technology and biology, implementing different tools to have a more accessible and detailed observation and analysis of its structures and compositions. Following the indirect methodology approach, a characterization process is carried out through imaging techniques on arthropod animals, supported by the stereomicroscopy tool located at the Guatiguará campus of the Industrial University of Santander in Piedecuesta. This process allows for the extraction of formal and structural characteristics that determine qualities with innovative potential, which can be applied in the development of modular structures and subsequently be used to solve a problem. In the development of this project, a theoretical and indirect methodological foundation is used as a starting point for a structured approach that leads to precise and accurate development. Simultaneously, a practical guide is proposed, providing an organized and flexible structure for designers throughout the process, fostering creativity, collaboration, and the creation of solutions inspired by the efficiency and magnificence of nature.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial Design. Director: Clara Isabel López Gualdrón, Industrial Designer.

Introducción

La ciencia ha evolucionado con base en el conocimiento adquirido a través del tiempo y las necesidades sociales, es por ello que se ha dado un lugar privilegiado al estudio de la naturaleza como fuente de inspiración para la resolución de problemas. Es así que la biomimesis se ha convertido en una herramienta que mejora significativamente el proceso de innovación en los productos a través de la interpretación, investigación, análisis y observación de la naturaleza.

En la actualidad el ser humano ha atravesado varias crisis sociales, políticas, económicas, ambientales, entre otras, donde estos problemas requieren de soluciones innovadoras y creativas. Sin embargo, la mayoría de diseñadores industriales o profesionales afines han experimentado ante los problemas “bloques creativos” (Simberg, 1964)¹. Es en la naturaleza donde dichos profesionales pueden establecer una oportunidad de inspiración mediante la observación con el fin de establecer analogías en sus comportamientos, cualidades estructurales, anatomía, eficiencia de sus procesos, entre otros.

Es así que partiendo de esta premisa y abordando la oportunidad de establecer la naturaleza como una fuente de inspiración para la resolución de problemas junto con el seguimiento de un proceso metodológico indirecto basado en la biomimética como alternativa para el desarrollo de diseño tradicional y con la toma de modelos naturales como punto de partida, para la posterior realización de procesos de abstracción, identificación, definición, planteamiento, emulaciones, entre otros, y apoyados además con el uso de herramientas de observación microscópicas suministradas en parte por laboratorios de observación de la Universidad Industrial de Santander (UIS), razón por la cual se plantea el presente proyecto de grado en modalidad de trabajo de investigación, cuyo objetivo está centrado en la elaboración de estructuras modulares concebidas a partir de fuentes naturales.

1 Descripción General

1.1 Planteamiento del problema

El concepto de creatividad es un término que ha tomado una gran importancia en el desarrollo de las prácticas humanas². Este concepto se encuentra ligado a la actividad del profesional en diseño, para generar y aportar productos innovadores, gracias al proceso metodológico entendido como la sucesión de etapas por las cuales pasa el profesional para obtener soluciones a los problemas planteados. En este proceso intervienen factores cognitivos, afectivos y de comportamiento que influyen directamente en la capacidad creativa de cada persona; dicha capacidad se ve disminuida por bloqueos creativos que surgen como resultado de la presencia de inseguridades y el temor de ir más allá de lo conocido por el profesional.

La naturaleza es el sistema vivo por excelencia, son aproximadamente 4.500 millones de años de experiencia. La vida y los organismos que la habitan son un excelente punto de partida para imitar, pues le llevan al ser humano millones de años de desarrollo³. Históricamente los seres humanos han observado la naturaleza, cada vez que contemplan algo que funciona eficientemente tienden a imitarlo. Es así que muchos de los objetos que rodean la vida cotidiana de las personas están desarrollados a partir del funcionamiento evolutivo de diferentes organismos. En el año 1505 Leonardo da Vinci tomo como referencia la naturaleza, específicamente el estudio del vuelo de los murciélagos, entre otros estudios, que serían los predecesores de diferentes tecnologías que utiliza el ser humano hoy en día⁴.

Es por esto que actualmente existe un campo llamado biomimética que se dedica al estudio de la naturaleza como base para la obtención de inspiración y para el posterior desarrollo de tecnologías que resuelven problemas que la naturaleza ya ha resuelto.

La bio inspiración genera nuevas oportunidades, relacionando diferentes métodos de diseño y técnicas de creatividad para obtener soluciones a problemas con alto contenido innovador, pues la presencia de analogías obtenidas del entorno natural, generan un valor diferenciador en el desarrollo de nuevos productos.

La biomimética puede proporcionar diversidad proyectual y soluciones a los problemas propuestos (López-Forniés 2010)⁵.

Es así que, mediante la articulación de la biomimética junto a la línea de la metodología indirecta enmarcada dentro del proceso de diseño como alternativa al desarrollo del diseño tradicional, y siguiendo su guía preestablecida donde se da su punto de partida en el descubrimiento de los modelos naturales, para posteriormente generar procesos de abstracción, identificación, definición, planteamiento, integración, emulación, y con el apoyo de herramientas de observación microscópica se realizó un aporte frente a los sesgos del proceso creativo, para finalmente establecer reconfiguraciones formales y funcionales con base en un componente innovador.

1.2 **Justificación**

Tomando como base la primera forma de investigación en el que el ser humano observó a la naturaleza para la solución de problemas, y la accesibilidad actual de herramientas para la observación detallada, se pretende desarrollar este proyecto que consiste en la búsqueda de inspiración de componentes analógicos a través de imágenes tomadas por microscopia SEM, para establecer una fuente creativa con un componente diferenciador en el marco de la metodología indirecta, y con ello plantear estructuras modulares como un recurso para la reconfiguración de problemas de diseño.

Realizar una búsqueda en la naturaleza es un gran punto de partida porque presenta claros ejemplos de cómo los organismos han sobrevivido a través de la evolución. No solo de recurso sino también de ideas, sistemas, funciones, formas, entre otras. Y basado en la metodología indirecta que es el análisis detallado de un individuo dando resultados en forma de principios básicos o de funcionamiento que se traducen en soluciones técnicas y aplicables a diferentes proyectos de diseño.

Algunos ejemplos que muestran cómo se representa la fisiología a partir de estrategias biológicas relacionadas dentro de la biomimética, son los estudios de las mariposas, bajo un microscopio es posible observar estrategias biológicas como: las alas de las mariposas que están construidas con venas y nervaduras que al volar soporten la fuerza del viento creando un flujo de aire llamado efecto paracaídas, dando una forma específica a las alas en las etapas de movimiento durante el vuelo; así mismo el color en las alas de las mariposas puede variar según el porcentaje de absorción del calor y los rayos UV al igual que de refracción de los mismos; otro caso, sobre los espiráculos que son aperturas en los costados de las orugas, conectados a una serie de sistemas tubulares que se encargan de comunicar los gases dentro y fuera del cuerpo controlando la hidratación de sus cuerpos y previniendo la deshidratación por alta temperatura; (Jerry A., 2011)⁶.

La diversidad de soluciones permite encontrar aplicaciones que pueden ser aplicadas en diferentes proyectos de diseño. Un sujeto de observación puede tener varias características biológicas, y alguna de estas puede ser una solución para un determinado proyecto, o mediante la combinación de más de un principio o estrategias biológicas.

La biodiversidad permite que el número de posibles soluciones se multiplique, y además se puede encontrar una misma estrategia en varios individuos de diferentes especies, aunque la forma de conseguir la solución adaptativa de estos, es diferente en cada caso, como la recolección

de la humedad ambiental por parte de las telas de araña, o como lo hacen los escarabajos de Namibia.

Apoyando la línea de la observación microscópica como base de inspiración para futuros problemas, es preciso mencionar la investigación, a cargo del Instituto de Tecnología de California y del Instituto de Tecnología alemán Karlsruhe, la investigación partió iniciando con el estudio de la mariposa negra y del hecho de que esta especie necesite luz solar para volar, esta característica ha derivado en la adaptación de unas alas que tienen la capacidad de absorber la luz solar en un rango muy amplio en espectro y ángulo. Posteriormente a la investigación y a la apropiación de esta cualidad, se planteó su aplicación en el desarrollo de paneles solares que mejoran su absorción entre un 90% a 200% dependiendo del ángulo de incidencia de la luz.

Por medio de este trabajo se pretende generar un aporte en el ámbito creativo, con el establecimiento de procesos basados en la metodología indirecta, para la generación de ideas análogas con base a la biomiméisis, biónica o bioforma apoyados en la observación microscópica, buscando dar solución a la ausencia y estancamiento de ideas durante la indagación de inspiración en los procesos creativos.

Actualmente la Universidad Industrial de Santander, en su sede Guatiguará en el municipio de Piedecuesta cuenta con servicios de microscopia SEM, que permiten apoyar el desarrollo en la parte inicial del proyecto enfocado en la observación a gran detalle por estructuras que presentan los sujetos de estudio, se realizó un trabajo de observación en diferentes animales basado específicamente en el sub grupo de los artrópodos. Como ya se mencionó, este trabajo se enfoca en una metodología indirecta, ampliando el campo de observación a diferentes sujetos en búsqueda de estrategias biológicas de valor.

1.3 **Pregunta de diseño**

¿Cómo la metodología indirecta apoya el proceso de investigación y creación orientado al diseño de estructuras modulares derivados de la naturaleza para mejorar la reconfiguración y desarrollo de productos?

1.4 **Objetivo General**

Definir un método de investigación-creación orientado al diseño para la innovación, dirigido a la generación de estructuras modulares concebidas a partir de fuentes naturales.

1.5 **Objetivos Específicos**

- Establecer un protocolo para el desarrollo de actividades de investigación-creación a partir de la revisión de metodologías para las áreas de proceso.

- Aplicar la propuesta de método en un caso de estudio basado en diseño de estructuras, a manera de prueba y demostrar la secuencia lógica.

- Diseñar estructuras modulares a partir del análisis de la naturaleza, mediante la observación de imágenes de microscopía.

- Determinar posibles aplicaciones para las estructuras modulares obtenidas en el proceso creativo, que generen una solución a un problema específico y a su vez presenten un valor diferenciador en su campo por medio de estudios de caso.

1.6 **Metodología**

La metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto de investigación estará aplicada a la biomimética, biónica o bioforma como método de diseño, ya que genera nuevas oportunidades y enlaza diferentes técnicas de diseño como el análisis funcional y herramientas de creatividad, esto permite que el diseño de producto sea más ingenioso y distintivo. La naturaleza puede ser un modelo para la tecnología y por lo tanto puede ser fundamental para sentar las bases

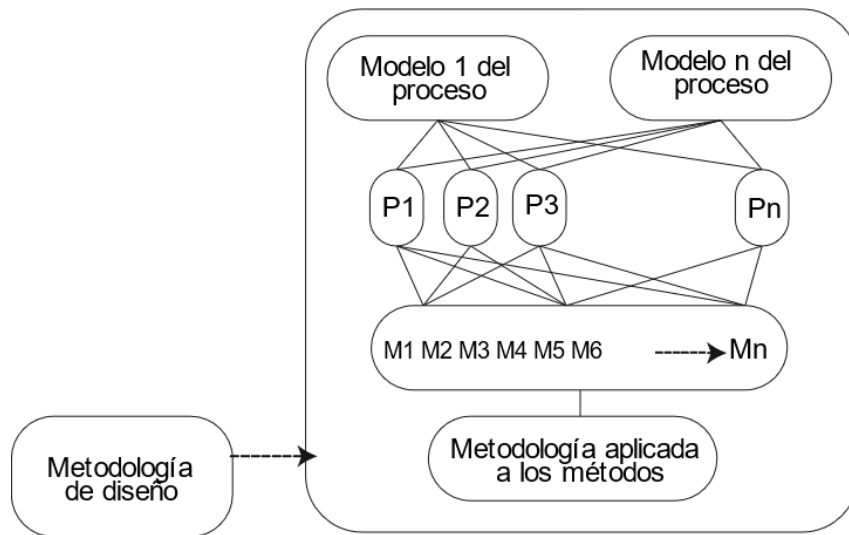
para el desarrollo de nuevos productos (Drachler 2003)⁷, estableciendo funciones innovadoras que muestra analogías extraídas de la naturaleza.

Metodología indirecta

La metodología indirecta es un proceso habitual en la biomimética, dirigido por una solución encontrada, ya que la bio-inspiración influye sobre el diseño, partiendo de estas soluciones naturales para resolver problemas, o de una situación en la que soluciones de la naturaleza sean soluciones de diseño a problemas aun no detectados o conceptos que puedan generar innovación. (Roshko 2010)⁸.

Figura 1

Relación entre los conceptos de modelo, proceso, método y metodología.



Martí, J. (1999). Introducción a la metodología del diseño. [Relación entre los conceptos de modelo, proceso, método y metodología]. Barcelona: Universidad de Barcelona.

Un esquema metodológico ordenado y sistemático que lleve al diseñador desde la investigación biológica y la solución en la naturaleza hasta la definición de un proyecto y solución artificial viables de un sistema técnico, unido a una serie de requisitos que propicien la toma de

decisiones pertinentes durante su implementación, este texto tiene como objetivo dar las condiciones bajo las cuales es posible definir este procedimiento, a través de un modelo básico de trabajo y diseñar con ello bio-estructuras modulares para una implementación a diferentes aplicaciones, en búsqueda de ideas válidas y aplicables. Por eso es necesario conocer dónde se enmarca el proyecto de diseño, la relación con el ser vivo y las características observadas en este, proporcionando resultados en forma de principios básicos o de funcionamiento. Además, algunas soluciones pueden ser válidas para distintos productos, como el ejemplo de las escamas de los reptiles y sus aplicaciones, un ser vivo puede tener varios principios o conceptos biológicos, de los cuales uno puede ser la solución para el proyecto de diseño.

Los procesos pueden corresponder a la interacción de varios modelos metodológicos, para así ser aplicados en diferentes etapas de un proyecto específico que se esté desarrollando, la adaptación y aplicación de estos métodos a través de un proceso de diseño es lo que se denomina una metodología, es por esto que se abordó la búsqueda de modelos preestablecidos que permitieron la interacción de varios métodos para ser adaptados a la necesidad metodológica para el desarrollo del proyecto.

2 Marco Teórico

2.1 Investigación + creación

Este concepto ha sido fuertemente impulsado desde la red académica de diseño, lo cual se derivó en una categoría del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación - SNCTI Minciencias. Donde los procesos creativos “pueden generar nuevo conocimiento, desarrollo tecnológico e innovación transferible al sector social, cultural y productivo

(especialmente al de las industrias creativas y culturales” la creación se concibe desde diferentes formas tradicionales planteadas desde la ciencia (Estévez et al., 2018)⁹. En estos procesos la experimentación es parte del proceso de desarrollo de producto, que al ser “original e inédito deriva en nuevo conocimiento moviendo las fronteras del conocimiento estableciéndose como una plataforma de innovación y de relacionamiento con diferentes áreas del conocimiento” (Delgado et al., 2015)¹⁰.

2.2 Método directo

Enmarcado dentro del contexto de la biomimética, consiste en tomar como punto de partida el establecimiento de un problema el cual se desea abordar, para posteriormente establecer fuentes de inspiración y búsqueda de posibles soluciones para definir un problema.

Este método comprende una serie de pasos lógicos preestablecidos: partiendo de la definición del contexto, identificación de las funciones, integración, descubrimiento de los modelos naturales, abstracción de características, planteamiento de ideas, emulación, y finalmente testeado o medición.

2.3 Metodología

La metodología es parte del análisis y la crítica de los métodos de investigación. Según la RAE es la ciencia del método o conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal; es decir, que la metodología representa la manera de organizar el proceso de la investigación, de controlar sus resultados y de presentar posibles soluciones a un problema que lleva a la toma de decisiones.

2.4 Método

Según la RAE es el modo de decir o hacer con orden de cómo se debe proceder. El método es el camino que conduce al conocimiento, un método en tanto proceso conceptual abstracto carece

de sentido si no se expresa por medio de un lenguaje y se aplica prácticamente para la transformación de la realidad.

2.5 Método indirecto

El método indirecto enmarcado en el contexto de la biomimética establece como base, las soluciones naturales, de las cuales puedan ser extraídas características, para la generación de conocimientos y posterior aplicación para la solución de problemas específicos.

El método comprende una serie de pasos establecidos de la siguiente manera: El descubrimiento de modelos naturales, la abstracción de características biológicas, la identificación de funciones, la definición de un contexto, el planteamiento de ideas, la integración, la emulación y finalmente el testeado o medición.

2.6 Bioforma

Se entiende por bioforma la extracción de características, apariencia, configuración, estructura y organización de sistemas naturales.

2.7 Biomimesis o Biomimética

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

Según *The biomimicry Institute* (2015) la biomiméesis también conocida como biomimética es la práctica de aplicar las lecciones provenientes de la naturaleza, la aprehensión y la emulación de estrategias utilizadas por seres vivos con la intención de generar soluciones sostenibles.

La biomimética presenta tres niveles de aproximación que son:

Abstracción formal de la naturaleza.

Análisis y funcionamiento de un ser vivo.

Estudio a nivel micro celular del funcionamiento de las partes que integran un ser vivo.

“La naturaleza no hace nada superfluo, nada inútil, y sabe sacar múltiples efectos de una sola causa”. Nicolás Copérnico (1473-1543).

Figura 2

Los cardos como fuente de inspiración para la creación del velcro



La Vanguardia. (2016). Biomimesis, los inventos de la naturaleza [Imagen]. Recuperado de <https://www.lavanguardia.com/natural/20160524/402013701495/biomimesis-inventos-naturaleza.html>

2.8 Estructuras modulares

El universo fue concebido a partir de los principios más mínimos, partiendo desde la partícula, hasta su totalidad, casi siempre siguiendo un patrón geométrico que se puede encontrar en las estructuras naturales. La variedad de formas que se observan proviene de la configuración armónica de dichas estructuras.

Las estructuras modulares son estructuras que se relacionan con una serie de figuras semejantes, generalmente son una malla geométrica, dichas partes o figuras reciben el nombre de módulos, que al ser configurados y ordenados pueden generar grandes estructuras de una mayor complejidad.

Se pueden distinguir dos tipos de estructuras modulares:

Las estructuras modulares simples, que están formadas por la repetición de una sola forma.

Las estructuras modulares que están compuestas por pequeños módulos de formas variadas.

2.9 **Estereomicroscopia**

Es la actividad de observación realizada con la ayuda de los microscopios estereoscópicos que permiten examinar especímenes bajo la luz transmitida (diascópica) y la luz reflejada (episcópica). Generalmente se combinan los dos tipos de fuentes de luz para tomar ventaja y revelar mejor las características del sujeto observado.

Existen tres técnicas de iluminación:

Oblicua: utilizada para la observación de sujetos que son casi transparentes o incoloros. Se obtiene mayor contraste y claridad visual.

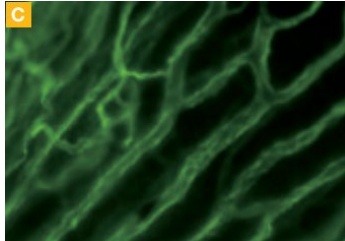
De campo oscuro: Para este tipo de iluminación se requiere de una base especializada que contiene un espejo reflectante y un escudo de luz, estos actúan para dirigir un cono de luz en ángulo oblicuo al objeto de observación.

Fluorescente: Aportan numerosas ventajas al explorar los límites máximos de sensibilidad y resolución. La aplicación de marcadores fluorescentes conjugada con anticuerpos también permite la visualización de imágenes de células vivas.

Los estereomicroscopios tienen objetivos de larga distancia que permiten observar muestras de mayor tamaño. Generalmente los aumentos máximos que ofrecen los estereomicroscopios llegan hasta 180x o 200x combinando oculares y objetivos adicionales.

Figura 3

Vasos sanguíneos subcutáneos del ratón (zoom 11,5x)



ICTS Lab. (s.f). estereomicroscopio SZX10/SZX16 [Imagen]. Recuperado de <https://www.ictsl.net/downloads/szx10szx16.pdf>

2.10 Microscopia SEM

El microscopio electrónico de barrido (scanning Electron Microscope) es la tecnología que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar la imagen. Una de las características principales es la gran profundidad de campo, que se traduce en un enfoque más grande de la muestra, y a su vez produce imágenes de alta resolución.

Al momento de la preparación la muestra generalmente se recubre por una capa de carbón una capa delgada de metal, como el oro por sus propiedades conductoras y posteriormente es barrida con los electrones que viajan a través del caño. Un detector mide las cantidades de electrones enviados que arroja la zona de la muestra y es capaz de mostrar imágenes en tres dimensiones. La resolución media está entre los 4-20 nm.

3 Recursos de investigación

3.1 Artrópodos

Entre todos los grupos de organismos pluricelulares los artrópodos representan el filo más numeroso. En la actualidad hay más de 1.300.000 especies descritas dentro de este grupo, en su

mayoría perteneciente al subgrupo insectos donde se encuentran aproximadamente entre 941.000 a 1.000.000, que representa casi el 80% de todas las especies animales conocidos.

Los artrópodos hacen parte de diferentes ecosistemas como lo son marinos, terrestres, aéreos y de agua dulce.

Tabla 1

Clasificación de los artrópodos

Subfilo	Características generales	Clase	Características
Trilobitomorpha	Extinto, cabeza compuesta de 5 segmentos, antenas y ojos compuesto, cuerpo ovalado, 3 lóbulos.		
Chelicerata	Cuerpo dividido en cefalotórax y abdomen, sin antenas, cuatro pares de patas.	Merostomata	Poseen branquias en forma de libro en la parte inferior, prosoma cubierto por caparazón dorsal, espina terminal alargada.
		Arachnida	Principalmente terrestre, posee pulmones o tráqueas, (abdomen) segmentado o no segmentado externamente y unido de forma amplia o estrecha al prosoma; los apéndices prosomales consisten en 1 par de quelíceros, 1 par de pedipalpos y 4 pares de patas.
		Pycnogonida	Marino, tronco estrecho, abdomen reducido, cabeza con probóscide, palpos y patas portadoras de huevos (generalmente 4 pares), sin órgano respiratorio de gas.
Crustáceos	Principalmente acuáticos, cabeza con 2 antenas, un par de mandíbulas y 2 pares de maxilares, tronco variable pero comúnmente cubierto por caparazón, 2 ojos compuestos, principalmente marinas, pero muchas especies de agua dulce.		
Myriapoda	Principalmente terrestre, apéndices segmentados no ramificados, un par de antenas, un par de mandíbulas, 1 o dos pares de maxilares, poseen tráqueas.	Chilopoda	Alargado, muchos segmentos de tronco, cada uno posee un par de patas, 2 pares de maxilares, ojos ocelos simples. 5mm a 30 cm. 3000 especies vivas.
		Symphyla	Par de mandíbulas, 2 pares de maxilares, 12 segmentos de tronco con patas, 8mm. Alrededor de 160 especies vivas.

Hexapoda	Diplopoda	Alargado, tronco con muchos diplosegmentos, cada uno con 2 pares de patas, un solo maxilar, ojos simples, 2mm a 28 cm, 10.000 especies vivas.
	Paupoda	Antenas ramificadas, par de maxilares, 9-11 segmentos de tronco con patas, 0,5 a 1,5 mm. 500 especies descritas.
	Insecta	Cuerpo compuesto por cabeza, tórax y abdomen, ojos simples y usualmente un par de ojos compuestos, 2 pares de maxilares, tórax de 3 segmentos, suelen tener alas, abdomen de 11 segmentos sin apéndices en el adulto, 0,25mm a 33 cm. Al menos 1 millón de especies.
	Entognatha	

Nota. adaptado de www.britannica.com/animal/arthropod/Classification

3.1.1 *Lepidópteros (mariposa)*

Son un orden de insectos holometábolos (desarrollo que sucede en las fases de embrión, larva, pupa e imago (adulto)). Casi todos estos insectos son siempre voladores y son aquellos que comúnmente se conocen como mariposas, aunque la mayoría de las más conocidas son las especies diurnas, la mayor variedad se presenta dentro de las especies nocturnas.

Este grupo de insectos representa el segundo orden con la mayor variedad de especies entre los insectos, se estima que cuenta con aproximadamente 165.000 especies, distribuidas entre 127 familias y 46 sub familias.

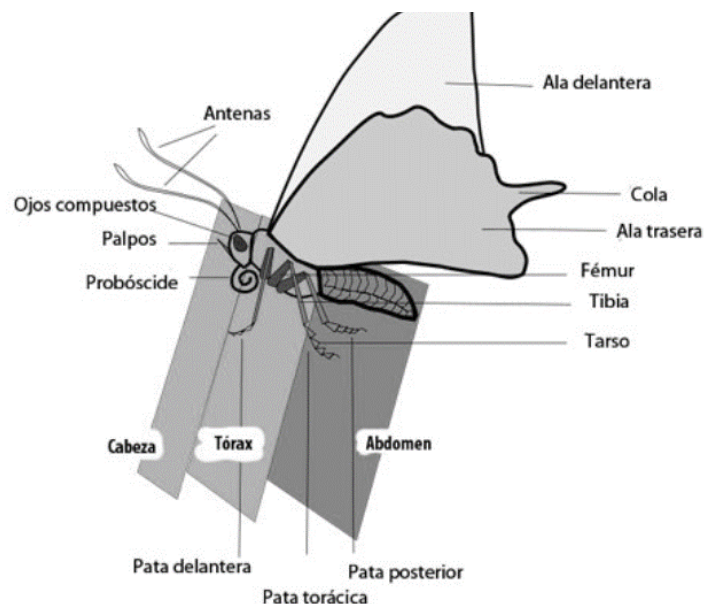
De este tipo de insectos es característico su ciclo vital en el que sufren una metamorfosis completa: inicia su ciclo como huevo, del que posteriormente surge una larva de diversos colores que crecerá y dará lugar a la pupa o crisálida, donde se produce la metamorfosis y desencadenará en la formación de una mariposa adulta o imago.

3.1.1.1 **Características de los lepidópteros.** Los lepidópteros se diferencian de otros grupos de insectos por presentar en la mayoría de casos un revestimiento escamoso parcial del cuerpo y en la totalidad de sus alas. Los adultos poseen un aparato bucal succionador lamedor y las larvas uno masticador, lo que conduce a regímenes alimenticios diferentes y por lo tanto organizaciones internas y formas de vida diferentes.

3.1.1.2 **Morfología de la mariposa.** Al igual que los demás insectos, las mariposas en su fase adulta poseen un esqueleto externo por numerosas placas de quitina. Su cuerpo está dividido en tres secciones: cabeza, el tórax y abdomen, como se observa en la figura 4.

Figura 4

Morfología mariposa



Asturnatura.com (s.f.). Morfología de los Lepidópteros [Imagen]. Recuperado de <https://www.asturnatura.com/articulos/lepidopteros-mariposas/morfologia.php>

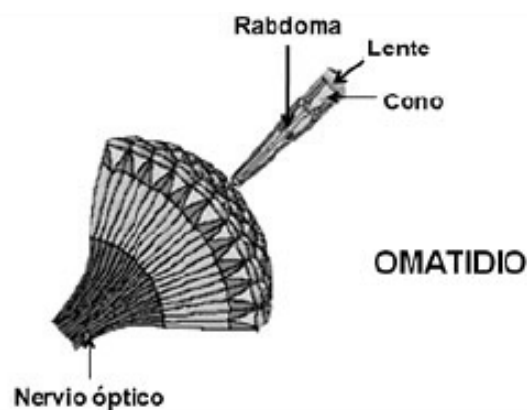
3.1.1.2.1 Cabeza

Ojos

Las mariposas poseen un par de ojos esféricos compuestos, cada uno de los cuales contiene aproximadamente 17.000 omatidios, receptores de luz individuales con su propio lente, que en trabajo conjunto producen una vista en mosaico del ambiente circundante.

Figura 5

Esquema del ojo



González, G. (2020). La visión de las abejas [Imagen]. Recuperado de <http://colmenafeliz.blogspot.com/2020/06/la-vision-de-las-abejas.html>

El omatidio está compuesto de una cornea y un cono. En la parte posterior de cada cono hay una varilla hacia el interior por donde viaja la luz para alcanzar un grupo de entre 2-6 células sensoriales, de las cuales cada una es sensible a una parte particular del espectro visual.

Se estima que el campo visual es de alrededor de un centímetro hasta 200 metros, es enfocado por la mariposa, el cerebro de esta puede detectar eficazmente la distancia de un depredador pues con un pequeño movimiento de su cabeza, la cantidad de luz que golpea a cada receptor cambia y la vuelve extremadamente eficiente para detectar movimiento y medir las distancias.

Partiendo de la imposibilidad que tienen los insectos de parpadear, los ojos de las mariposas y polillas están protegidos por los palpos labiales, que actúan como filtros para el polvo. Dentro del género *satyrine lethe* tienen una densa capa de “pelos” en sus ojos.

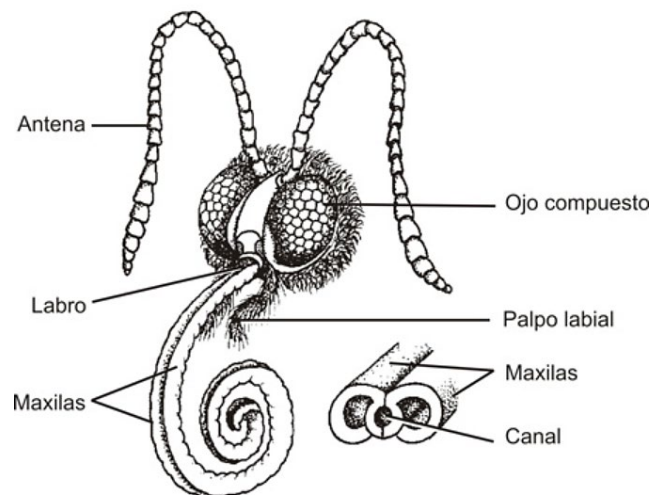
Antenas

Entre los ojos emergen un par de antenas segmentadas. En las mariposas monarcas estas antenas están cubiertas por más de 16.000 sensores olfativos, algunos de estos en formas de escamas (aproximadamente 13700 son sensibles a las feromonas sexuales y olor a la miel) y otros en forma de pelos.

En la base de las antenas se encuentra ubicado el órgano de Johnston, cubierto de células nerviosas llamadas escolopidios, que son sensibles al estiramiento y son utilizados para la detección de la posición de las antenas que son afectadas por el viento y la gravedad, así que son utilizadas para detectar la orientación y el equilibrio durante el vuelo y permiten a la mariposa ajustar la dirección y velocidad de vuelo.

Figura 6

Esquema de cabeza



Asturnatura.com (s.f.). Morfología de los Lepidópteros [Imagen]. Recuperado de <https://www.asturnatura.com/articulos/lepidopteros-mariposas/morfologia.php>

Palpos

En la parte frontal de la cabeza sobresalen los palpos labiales, que son estructuras cubiertas de sensores olfativos, similar a los encontrados en las antenas, tórax, abdomen y patas. Algunos biólogos argumentan que además de las funciones olfativas de los palpos también prestan funciones protectoras a la probóscide. Otras discusiones sugieren que pueden servir como filtros de polvo para proteger la superficie de los ojos.

Probóscide

La probóscide, que se asemeja a una "lengua" es una estructura tubular de alimentación, cuando se encuentra en reposo esta permanece apretada contra la cabeza gracias a la contracción muscular y su mecanismo hidráulico. Sin embargo, cuando la mariposa se dispone a alimentarse del néctar de una flor o similar, la probóscide se despliega para expandirse en el centro de la planta¹¹. Este órgano está compuesto de canales de cesárea que se encuentran interconectados, y cuando se unen forman un tubo. Este tubo tiene la capacidad de enrollar para ser almacenado o extenderse para permitir al insecto que penetre profundamente las flores para su alimentación. En caso de obstrucción con fluidos pegajosos, las dos secciones se pueden desacoplar y limpiar.

3.1.1.2.2 Tórax. El tórax está compuesto por tres segmentos del cuerpo que se encuentran fusionados, formando una cavidad quitinosa que contiene y protege los músculos de vuelo y también actúa como un punto de anclaje para las patas que están constituidas por fémur, tibia y tarso, este último generalmente termina en un par de uñas que sirven para sujeción, las patas también tienen células gustativas que le ayudan a encontrar la planta apropiada para la puesta de huevos.

La tibia de cada pierna tiene un órgano subgenua que detecta y amplifica pequeñas vibraciones que alertan al animal del acercamiento de posibles aves o animales.

Abdomen

En el abdomen se encuentra el sistema digestivo, es aparato de respiración y un corazón tubular largo además de los órganos sexuales. El exoesqueleto abdominal está compuesto por segmentos formados de quitina y unidos por tejidos flexibles que permiten que el abdomen se doble.

Pies

Las mariposas poseen estructuras similares a pelos, llamadas pelos gustativos en los pies, los cuales le permiten sentir el dulzor, en comparación, la sensibilidad es unas 200 veces mayor que la de la lengua humana (Shuker, 1970, p. 33).¹²

Espiráculos

En los lados de cada segmento del abdomen se encuentran agujeros microscópicos a través de los cuales entra y sale el aire del cuerpo, las aperturas a voluntad de estos hacen que el aire se introduzca en pequeños sacos pulmonares y luego sea expulsado.

3.1.1.2.3 Alas. Las alas de las mariposas están formadas por dos capas de membranas que se alimentan por una serie de venas tubulares. Estas venas también intervienen en el proceso de respiración y termorregulación. Cada mariposa tiene un diseño determinado que la permite diferenciarse del resto de la población de mariposas, de hecho, sus venas sirven para agrupar taxonómicamente las especies.

Si bien aparece una amplia variedad de estructuras específicas en esta topografía de la superficie del ala, todas comparten un conjunto matemático similar de proporciones en términos

de tamaño y espaciado de las protuberancias asociadas con la super hidrofobicidad, es decir, la textura del ala y su gran área de superficie repele el agua y la suciedad gracias a una microestructura hidrofóbica, dando al ala una superficie autolimpiable¹³.

Otra estructura que puede ser encontrada son los giroides los cuales tienen la forma de una pila de boomerangs con tres hojas, cada una apuntando en direcciones alternas. El resultado es similar a un ventilador o un molinete. Estas estructuras tridimensionales son ligeras y resistentes, se encuentran en muchos sistemas sintéticos y biológicos, según Saranathan a WordsSideKick.com, ya que "Residen en compartimentos especializados de células vegetales y animales que han evolucionado durante millones de años de selección para una función óptima¹⁴ .

Los dos pares de alas se insertan en los anillos torácicos medio y posterior, estas están constituidas de finas membranas enlazadas y reforzadas por una red de nervios o venas. La superficie está recubierta por millones de escamas imbricadas y dispuestas en una sola dirección. Las escamas son realmente placas quitinosas muy pequeñas y delgadas con un pedicelo que las fija a la membrana de las alas. Estas escamas están recubiertas por una capa cerosa que repele el agua, otra característica ventajosa que poseen las estructuras desmontables en las alas, es la facilidad de escapar de telarañas o depredadores pues sus escamas se pueden desprender fácilmente al aletear vigorosamente (Eisner, 2005, p. 218-220)¹⁵. En las alas también es posible observar estructuras a nanoescala, responsables de producir un color intenso, con patrones repetidos de cutícula y espacio aéreo, estas estructuras fotónicas producen colores característicos mediante la manipulación de ciertas frecuencias de luz.¹⁶

Escamas

Las membranas de las alas son transparentes, pero están cubiertas parcial o totalmente por una capa de escamas de diminutos colores, cada una de ellas está compuesta por una placa plana que surge de una sola celda en la superficie del ala.

En algunas especies de mariposas las escamas de las alas ayudan a regular el calor corporal mejora la termorregulación mediante el uso de una estructura de panal para mejorar los pigmentos negros que se encuentran en las alas.¹⁷

Las escamas presentes en las alas proporcionan elevación, ayudando a que el aire fluya suavemente sobre el ala cuando el insecto está en vuelo, se ha determinado que estas escamas proporcionan un 15% más de 'sustentación' a la mariposa y también mejoran su rendimiento de deslizamiento (Slegers et al., 2017)¹⁸.

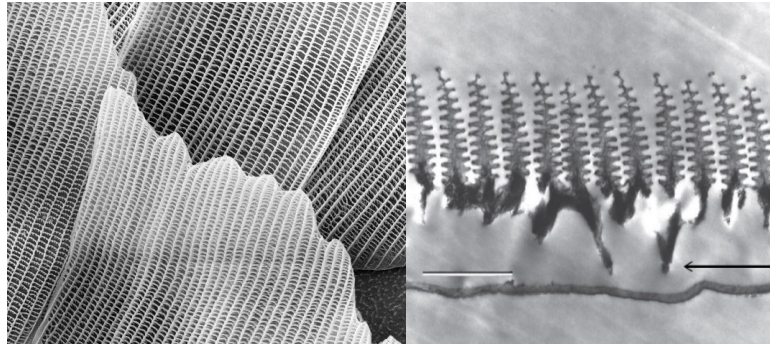
Existen tres tipos básicos de escamas:

Escamas pigmentarias: En su mayoría son planas. Su color es el resultado de la presencia de melaninas, pterinas y otros pigmentos de origen químico, los cuales son tomados en su mayoría de alimentos consumidos en etapa de larvas. Las escamas están dispuestas en filas ordenadas, cada fila consta de escamas de cobertura pigmentadas y estructurales.

Escamas estructurales: Producidos por la propia forma de las escamas que reflejan y difractan la luz que incide directamente sobre su estructura, es el caso de mariposas que presentan colores reflejos azules o verdes. En el caso de la luz de difracción se divide en bandas más claras o más oscuras después de atravesar una red de rejillas microscópicas dentro de las escamas. Por otro lado, la refracción es donde la luz se divide en sus colores como resultado de atravesar las crestas prismáticas en la superficie de la escama.

Casi todas las mariposas y polillas tienen una mezcla de escamas pigmentarias y estructurales, estas combinaciones permiten producir cualquier color, sumado a esto tienen un patrón ultravioleta oculto al ojo humano, que solo puede ser detectado por otras de su misma especie. En algunas mariposas las escamas de las alas ayudan a regular el calor corporal mediante el uso de una estructura de panal para mejorar los pigmentos negros que se encuentran en las alas.

19

Figura 7*Sección transversal escama de mariposa*

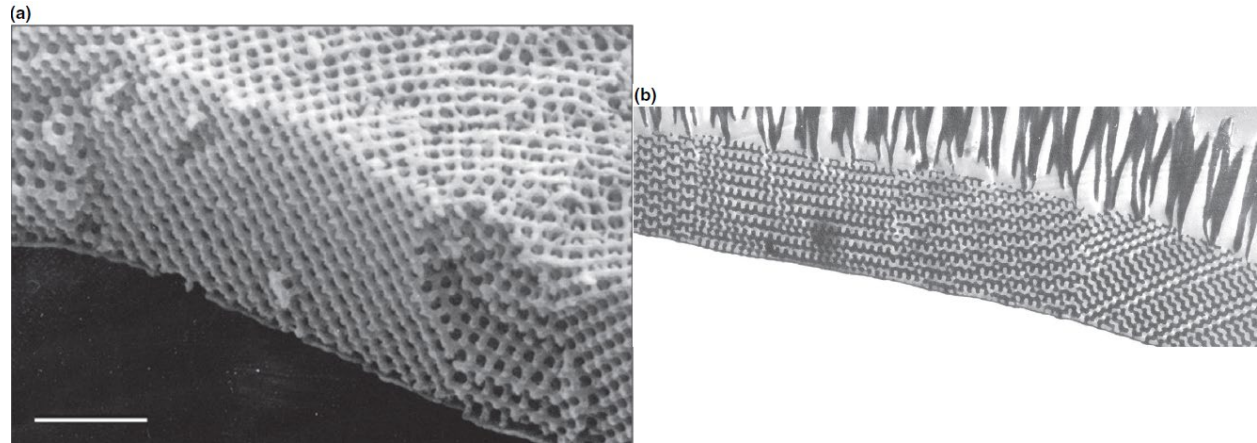
Nota. Barra de escala $\frac{1}{4}$ 1 mm. Las capas horizontales paralelas de cutícula (con un espaciado regular de 120 nm) y los espacios de aire entre ellos son responsable de la intensidad del color azul reflejado. Adaptado de libro Chapman (p. 798).

Cabe resaltar que las múltiples capas unidimensionales es el principal origen de la mayoría de los colores estructurales en los insectos, también hay ejemplos de otras estructuras que presentan una función óptica y estructural de orden tridimensional.

Los filamentos de la cutícula se interconectan periódicamente en las tres dimensiones, formando una estructura distinta con una constante de celosía a una escala de 200 a 30 nm.

Figura 8

Estructura tridimensional presente en escamas



Nota. Estructura presente en las escamas de la mariposa tomada con microscopio electrónico de barrido.

Adaptado de libro Chapman (p.801).

Las escamas de las alas aportan al camuflaje frente a los murciélagos depredadores, ya que su forma irregular y difusa evita que el sonar de los murciélagos los vea con claridad, lo que les da un contorno difuso en el área de la sonda (Bodanis, 1992, p. 169) ²⁰.

3.1.2 *Díptera (mosca)*

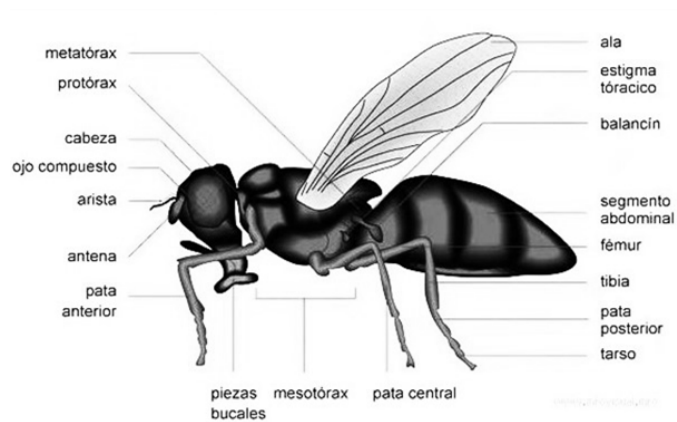
Los dípteros son un orden de insectos neópteros que se caracterizan por la reducción de sus alas posteriores, solo poseen dos alas membranosas, se conocen aproximadamente 160.000 especies.

3.1.2.1 características generales. Son insectos holometabolos lo que quiere decir que tienen un desarrollo que atraviesa cuatro etapas: huevo, larva, pupa y adulto. Los huevos típicos pueden ser puestos solos o en grupos. Se caracterizan por pertenecer al grupo de los neópteros que son aquellos insectos que tienen la capacidad de abatir sus alas sobre el abdomen.

3.1.2.2 Morfología de la mosca. Al igual que el resto de los insectos las moscas poseen un cuerpo que se encuentra dividido en tres partes: cabeza, tórax y abdomen.

Figura 9

Morfología de la mosca



infovisual. (s.f). Morfología de la mosca [Imagen]. Recuperado de <https://infovisual.info/es/biologiaanimal/mosca>

Cabeza

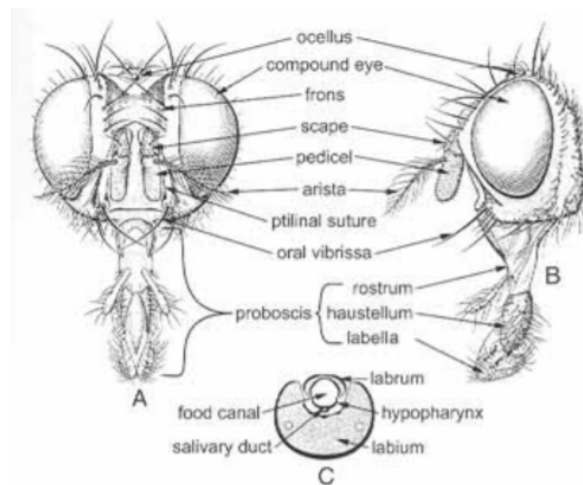
Según la especie la forma de su cabeza puede variar entre triangular, redonda o alargada, las moscas tienen dos ojos grandes, cada uno de ellos consta de miles de ojos internos que apuntan en varias direcciones, y estos ojos se denominan omatidios. De esta forma, pueden captar la imagen global como si fuera un mosaico²¹, este par de ojos compuestos se encuentran en la parte delantera

de la cabeza, los ojos del macho generalmente son de mayor tamaño y en ocasiones se tocan entre ellos, también reducen la adherencia por rejillas corneales que disminuyen el área de contacto²².

En la parte superior se encuentra ubicada la frente y los ocelos, posee un par de antenas bien desarrolladas que pueden ser plumosas, pectinadas o filamentosas, generalmente son de un tamaño reducido con ocho o menos segmentos. La microscopía a través de rayos X de alta resolución permite observar la succión de la mosca en una gota de agua con sacarosa, la cual depende de la viscosidad del fluido absorbido y también podemos ver la hidrodinámica²³. En la cavidad oral poseen un par de ganchos bucales, que pueden extenderse y retraerse, útiles para el movimiento, la excavación y la apertura de tejidos para alimentarse. Los tímpanos de una mosca pueden ayudar a localizar a su huésped a través del sonido gracias a la forma de balancín de las membranas y a su audición direccional²⁴.

Figura 10

cabeza y piezas bucales de una mosca muscida



Insectomania.org. (s.f.). Morfología de la mosca negra [Imagen]. Recuperado de <https://www.insectomania.org/moscas-negras/morphology-wce.html>

Torax

Esta dividido en tres partes que reciben el nombre de protorax, mesotorax y metatorax. Cada uno de estos posee un par que patas, de las tres partes anteriormente mencionadas el mesotórax es la que mas espacio ocupa y la que se encuentra mas desarrollada. La mosca posee papilas gustativas no solo en la zona bucal, sino también en sus patas. Esta característica permite que cuando están de pie se vuelven más sensibles a los azúcares cuando la mosca tiene necesidad de alimentarse (Shuker, 2021, p. 33)²⁵. En su parte superior se puede observar dos espiraculos que cumplen la funcion respiratoria

Las alas son membranosas y fuertes y generalmente suelen encontrarse en pares. Disponen de una estructura bien desarrollada que les permite a estos insectos levantar hasta el doble de su peso. Una mosca aterriza en un techo volando hacia arriba en un ángulo de aproximadamente 45 ° con sus patas delanteras extendidas; tan pronto como se hace contacto, la mosca da volteretas sobre sus otros cuatro pies. (Foy, 1983, p. 13)²⁶. Sus patas presentan vellosidades y además poseen almohadillas que cuenta con una sustancia pegajosa que le permiten adherirse fácilmente a las superficies lisas²⁷.

Una de las principlaes características de las alas es su venación, que esta distribuida entre venas longitudinales que terminan formando celdas. Por otro lado poseen también un segundo par de pequeñas alas llamadas halterios que prestan la función de giroscopio y ayudan a mantener la estabilidad durante el vuelo, estos halterios comienzan a partir del metatorax.

Finalmente en el tórax se encuentran las patas con una estructura típica de las patas de otros artrópodos. La mayoría de casos está compuesto por cinco segmentos y al final del tarso se encuentran unas pequeñas garras que están adecuadas para la sujeción al sustrato.

Abdomen

La forma y la división del abdomen varía significativamente entre cada especie, puede estar dividido en 10, 5, 3 segmentos que además pueden tener formas cortas y anchas, hasta estrechas y largas. Cada uno de estos segmentos está constituido por placas llamadas terguito y esternito.

El macho posee un aedagus o rgano intro transmisor, y la hembra la terminalia esta modificada en estructura tubular u oviposito.

3.1.3 Gryllidae (Grillo)

Los grillos son una clase de insecto artrópodo, en la orden ortóptera. Por su facilidad de adaptación al medio ambiente, se encuentran en toda el área terrestre a nivel global. Su nombre Acheta proviene de la palabra griega cantante y del latín domesticus que significa domesticado, aludiendo al comportamiento de estar cerca a los humanos, siendo su hábitat natural en distancias cortas de las casas hogareñas, en especial en jardines con zonas verdes, debajo de piedras, troncos, pastos entre otros, siendo insectos nocturnos. Los grillos son omnívoros y se alimentan de material orgánico como plantas, hongos y plántulas, pese a que estos insectos son considerados una plaga doméstica, no causan daño en ningún entorno, sin embargo, cuando se agrupan en manada pueden alimentarse de plantas debido a la alta demanda de alimento y competencia.

3.1.3.1 Características generales. Los grillos pertenecen a la categoría de insectos hemimetábolos, los cuales se caracterizan porque en su desarrollo larval usualmente no sufren cambios drásticos en su cuerpo. Cada etapa de evolución es similar a la otra, solo se puede observar un cambio en la etapa de adulto alcanzando la madurez sexual y en algunas clases de grillos se puede desarrollar alas, su tamaño alcanza una longitud de dos a cinco centímetros, caracterizados por tener antenas largas y patas traseras grandes.

La acheta domesticus o grillo doméstico pertenece a una familia Gryllidae, siendo esto común en todas las especies tener cuerpos compactos, abdómenes redondeados y patas traseras largas. Los grillos son muy activos, gracias a su estructura y fuerza en las patas traseras pueden llegar a saltar muy lejos o alto. En el ciclo de vida subadulto pueden saltar unos treinta centímetros de distancia, y en el ciclo de adulto les gusta volar especialmente a las hembras.

3.1.3.2 Ciclo de vida. Al ser un hemimetábolos y ortópteros, realizan una metamorfosis simple el llegar a su estado adulto, esto significa que realiza varias mudas de exoesqueleto permitiendo ir creciendo. El ciclo de vida de los grillos se limita a cuatro etapas: la primera etapa inicia cuando la hembra pone el huevo, con un tiempo de 10 días para eclosionar.

Del huevo sale una ninfa o micro grillo con un tamaño aproximado de 10 milímetros, en esta etapa el insecto pasa por un cambio de seis mudas para completar su desarrollo, pasando de pequeño a mediano, cambiando su exoesqueleto y el desarrollo de órganos como por ejemplo sus ojos, con un tiempo de cuarenta y cinco días, para la etapa final de adulto y su séptima muda se encuentran sus órganos sexuales y su alar cubriendo todo el abdomen finalizando en espinas, alcanzando una longitud de tres centímetros aproximado para los machos y las hembras pueden ser unos milímetros más larga porque desarrolla un apéndice en el abdomen para depositar los huevos bajo tierra.

Esta fase tiene un tiempo aproximado de cuarenta días, en los que también el insecto se reproduce, la hembra puede colocar aproximadamente 200 huevos durante su fase adulta, en el cortejo el macho evoca un canto frotando ligeramente sus alas, emitiendo una melodía, por sus órganos timpánicos es audible para ser escuchado sin dificultad, llamando la atención de las hembras y alejando a otros machos.

Figura 11

Ciclo de vida del grillo



1.1.1.1 Morfología del grillo

La morfología de los grillos pertenece a los artrópodos traqueales, tienen tres segmentos principales que componen la anatomía: la cabeza, el tórax y el abdomen. Estas secciones son importantes para las diversas tareas del grillo como el movimiento, la respiración, la alimentación y reproducción de manera eficiente.

La cabeza está diseñada para ser lo suficientemente ligera como para permitir mover con facilidad, también encontramos sus dos ojos compuestos, oídos y antenas comprenden los principales órganos sensoriales. Sus dos ojos se utilizan para ver el entorno e identificar posibles peligros o alimentos, mientras tanto los sentidos del tacto y el olfato se atribuye a las antenas. En términos táctiles, las antenas del grillo están cubiertas de pequeñas estructuras llamadas sensilas que son sensibles al tacto y al movimiento, las sensilas le permiten al grillo detectar la textura y la

forma de los objetos que están en contacto con sus antenas, lo que le permite la exploración y la detección de alimentos.

Las antenas juegan un papel importante en el sentido olfato, en un estudio de 2016, Hillier y colaboradores investigaron sobre los genes y las proteínas involucrados en la percepción de olores en los grillos, encontrando que las antenas contienen una gran cantidad de receptores olfatorios, clave en la detección de feromonas y otros compuestos químicos²⁸, esto es particularmente significativo para los grillos machos, que utilizan feromonas para detectar la presencia de las hembras y para comunicarse con otros machos, lo cual es crucial para la comunicación y la supervivencia de la especie. Además de los órganos sensoriales, la cabeza del grillo también contiene su boca y sus mandíbulas, que utiliza para alimentarse.

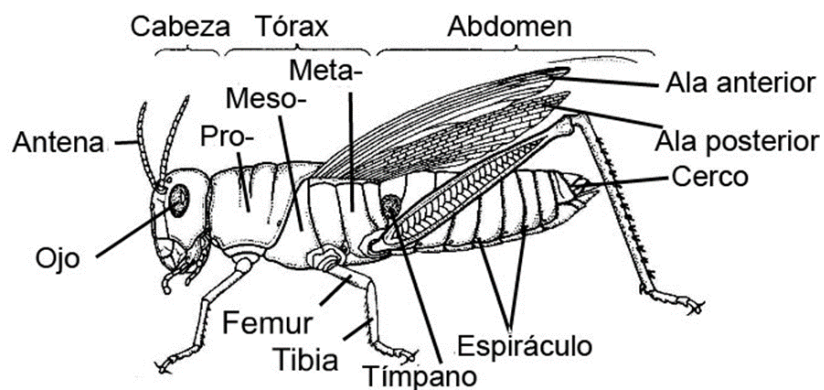
El tórax es la segunda sección del cuerpo, en el 2012, Burrows y Sutton investigaron los músculos del tórax del grillo y cómo se coordinan para el movimiento de las patas y las alas, encontrando que la coordinación de los músculos era esencial para el movimiento preciso de las patas y las alas²⁹. El tórax está compuesto por tres segmentos: el protórax, el mesotórax y el metatórax. Cada segmento tiene un par de patas, lo que significa que los grillos tienen seis patas en total, estos se utilizan para caminar y saltar. Se puede observar que en los segmentos mesotórax y el metatórax, tienen cada uno un par de alas en la parte posterior del tórax y se utilizan para poder volar. El tórax del grillo en algunas especies se puede usar como un resonador para amplificar su canto, este canto se produce en los machos al frotar las alas contra sus patas delanteras, y el tórax puede actuar como una caja de resonancia que amplifica el sonido. Jafari en el 2017 investigó sobre la resistencia mecánica del tórax del grillo, encontrando que el tórax es resistente a la compresión, lo que les permite soportar impactos y deformaciones durante el vuelo y otros movimientos rápidos, permitiendo realizar movimientos precisos y rápidos³⁰.

En cuanto a los oídos del grillo, se encuentran en sus patas delanteras y son estructuras muy sensibles que le permiten detectar el sonido, siendo esto importante ya que utilizan sus canciones para atraer a las hembras y poder reproducirse.

Por último, tenemos el abdomen del grillo, es la parte más larga del cuerpo y contiene los órganos internos. En el extremo del abdomen, los grillos tienen dos cercos, que se utilizan para detectar vibraciones y para la comunicación entre individuos de la misma especie.

Figura 12

Anatomía externa del grillo



Asturnatura. (s.f.). Anatomía externa del insecto [Imagen]. Recuperado de <https://www.asturnatura.com/temarios/biologia/insectos/morfologia-externa>.

3.1.4 Anisópteros (libélula)

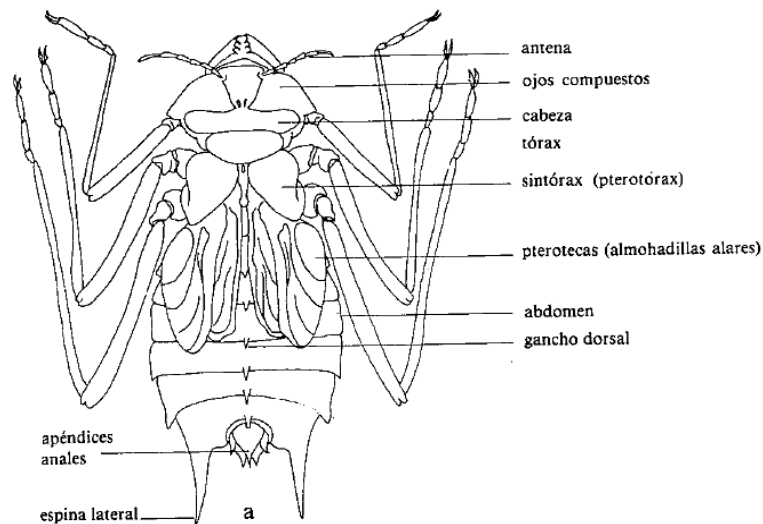
Los anisópteros se conocen coloquialmente con el nombre de libélulas. Son insectos paleópteros lo que quiere decir que no pueden plegar sus alas sobre el abdomen, se caracterizan principalmente por sus grandes ojos, dos pares de alas de color transparente y su abdomen estrecho y alargado.

3.1.4.1 Características de los anisópteros. Se caracterizan por tener una estructura corporal que les aporta una capacidad de vuelo diferenciador frente a los demás insectos, estos son capaces de regular la velocidad, mantenerse suspendido en un punto o incluso volar en reversa. Aparte de ser los únicos insectos que presentan una estructura genital secundaria.

3.1.4.2 Morfología de la libélula. Los odonatos como el resto de los insectos tienen el cuerpo dividido en tres partes, cabeza, tórax y abdomen.

Figura 13

Característica estructural de la libélula



Arango, A. (1982). Características estructurales de anisoptera [Imagen].

Cabeza

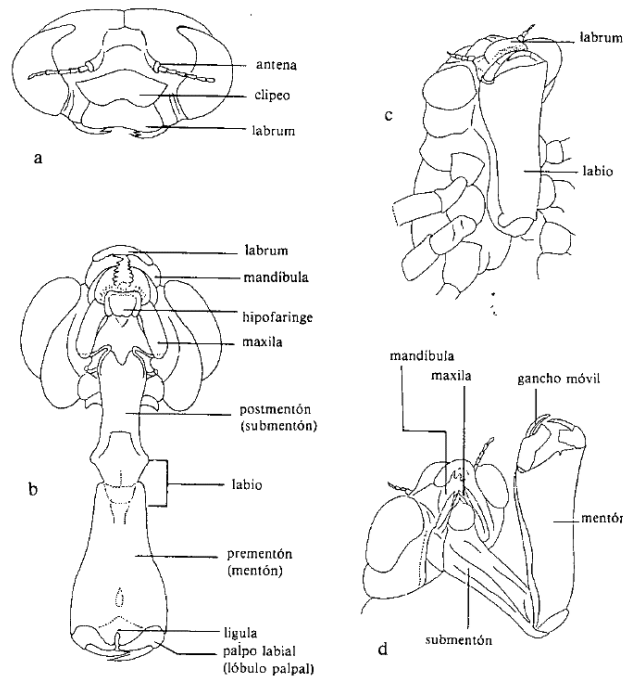
En estos insectos la cabeza es de gran tamaño y supera en volumen al tórax, posee en su aparato bucal con mandíbulas provistas de denticulos puntiagudos, característica especial que da el nombre al grupo al que pertenece. La mayoría de los insectos tienen múltiples puntos, los micropelos, que conectan la cabeza y el cuello. Esto mantiene la cabeza estable y crea fricción

para detener temporalmente la cabeza y protegerla de daños, pero restringe el rango de movimiento y reduce la visibilidad.³¹

Los ojos muestran un notable desarrollo y puede llegar a ocupar casi la totalidad de la cabeza, mientras que las antenas son cortas y poco desarrolladas de aproximadamente 7 segmentos o artejos, considerando que en los odonatos el sentido de la vista es predominante.

Figura 14

Estructura cabeza de un odonato



Nota. Estructura de la cabeza de un odonato a y b: *Anax* c y d: *Aeschna* (a y b tomados de Snodgrass, 1954, c y d, de Wesenberg – Lund, 1980)

El vértex es considerablemente pequeño como consecuencia la posición de los ojos y su gran frente, dejando un pequeño espacio para el acople de las antenas y ocelos. En este y en la frente se encuentran vellosidades que cumplen una función sensorial. Bajo la frente se encuentra el Clípeo una estructura semicircular que junto con el labro forman una cubierta que protege el aparato masticador.

Los ojos de estos insectos llegan a tener hasta 30.000 facetas oculares en cada ojo, lo que lo convierte en uno de los sistemas mas especializados y así permitir captar gran cantidad de luz y desarrollar una visión de alta calidad, se destaca también que la disposición de los ojos junto a la movilidad de la cabeza permite a estos insectos tener un rango de vision de casi 360°.

Tórax

El tórax de los odonatos se encuentra dividido en protórax y sintórax, En la parte dorsal el protórax y el estuche de las alas son de valor taxonómico.

El *protórax* es un segmento que se encuentra situado junto a la cabeza donde se encuentra el pronoto.

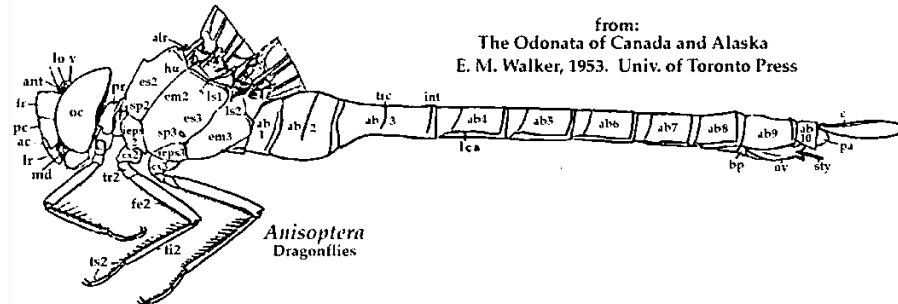
El *sintórax* es una estructura que surge de la combinación de dos segmentos (mesotórax y metatórax) y es allí donde se alojan los músculos alares. Se encuentran los escleritos laterales, se distinguen los pistemos y los epimeros. En la parte superior del tórax se observan unas suturas organizadas paralelamente conocidas como sutura humeral, que separan el mesoepisterno, la sutura mesometapleuraleal que divide al mesotórax del metatórax y finalmente la metapleuraleal, que es la que secciona el metaepistemo del metaepimero.

Abdomen

Todos los ejemplares de los odonatos poseen 10 segmentos abdominales pueden ser cilíndricos y aplanados más un undécimo vestigial, las espinas laterales y protuberancias dorsales son de valor taxonómico, a cada lado de los segmentos se pueden apreciar ocho aberturas estigmáticas.

Figura 15

Abdomen de odonato



Laurent, JP. (2019). Iberian Odonata. [Imagen]. Recuperado de <https://iberianodonataucm.myspecies.info/node/7>

En el primer segmento se encuentra la unión entre el abdomen y el tórax teniendo generalmente un tamaño bastante reducido.

En el caso del macho a la altura del noveno segmento, se encuentra una abertura genital, mientras que el órgano a diferencia de todos los insectos que se localiza en la zona terminal, este está situado en la parte inferior del segundo y tercer segmento. Este órgano está constituido por una vesícula seminal, algunas estructuras que funcionan como ganchos para retener a la hembra y un pene o edeago.

Por otro lado, en el caso de las hembras tienen bien desarrollada la genitalia primaria que se encuentra situado entre el octavo y noveno segmento, generalmente el abdomen de la hembra es un poco más corto y ancho en comparación al del macho, su aparato reproductor está constituido por un aparato ovopositor que permite insertar los huevos en la vegetación.

En el último segmento del abdomen se encuentra los apéndices anales, tanto en hembras como machos en este segmento presentan dos apéndices denominados coroides.

Alas

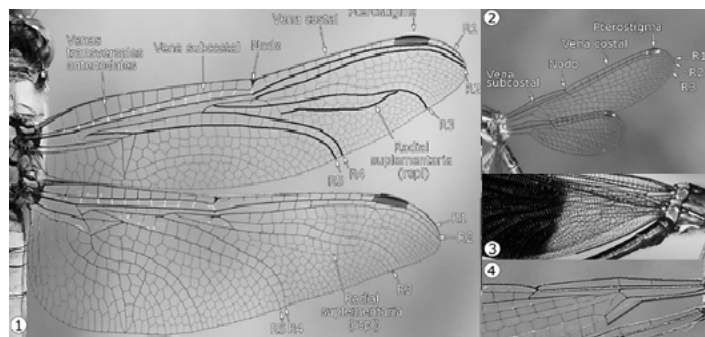
Las alas de las libélulas son estructuras alargadas y membranosas que están recorridas por un número de venas por las cuales circula la hemolinfa y con ello aportan rigidez a la estructura, estas alas tienen importancia desde el punto de vista taxonómico pues su incapacidad para plegar las alas las ubica dentro de los paleópteros, pues siempre tiene sus alas perpendiculares a su cuerpo.

Las alas tienen una consistencia hialina, membranosa y altamente nervada, se observa un angostamiento pronunciado en la base de las alas, respecto a sus alas se cuentan dos subórdenes los Anisoptero los cuales mantienen sus alas horizontalmente cuando están en estado de reposo y cuyo par de alas posteriores son más anchas en la base y por otro lado los Zygoptera, que en estado de reposo mantienen sus alas plegadas de forma vertical al cuerpo y su par de alas posteriores son de igual forma y tamaño (González, 1997)³².

La distribución de las venas es longitudinal, transversal y posee reticulación secundaria, a diferencia de otros insectos, la base de las alas no está unida al tórax por escleritos, pero posee movimientos altamente coordinados.

Figura 16

Morfología alar de una libélula



Nota. Morfología alar simplificada de una libélula *Orthetrum brunneum* y de un caballito *Lestes virens*. 3-4. Diferencia de la base del ala de los caballitos de la familia Calopterygidae (*Calopteryx xanthostoma*) y resto de familias (*Chalcolestes viridis*). Imagen: José Manuel Moreno-Benítez. 292288

Las alas de las libélulas ofrecen un vuelo altamente eficiente y características de ligereza debido a una serie de materiales adaptables que forman una estructura compuesta muy compleja y un sistema de alas altamente eficiente y confiable con características únicas de torsión, flexibilidad, velocidad mejorada y equilibrio de sustentación, así como peso ligero y tamaño reducido³³.

Estructura alar

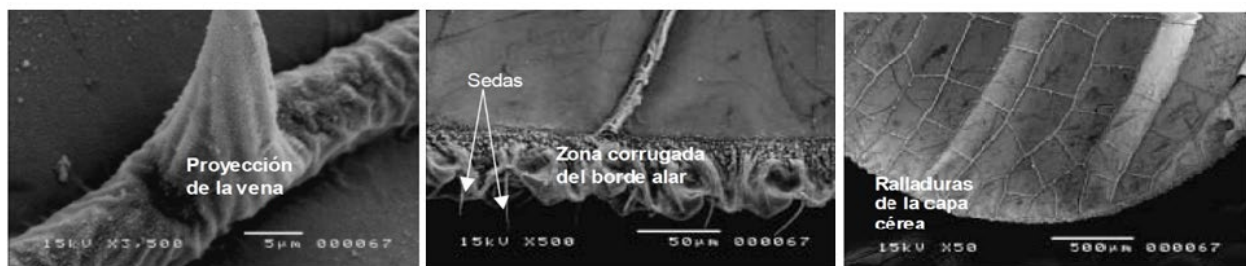
Con la ayuda de microscopio electrónico de barrido se revelan la presencia de estructuras en forma de picos sobre la vena alar, igualmente sucede con los bordes del ala que poseen una estructura corrugada con algunas sedas, se sabe que esta sustancia cerosa solo ocurre una vez en la vida de la libélula, por lo que se crean ralladuras que reflejan la historia individual de cada animal, por lo tanto, entre más vieja es la libélula mayor cantidad de ralladura presentara (Gorb et al., 2000)³⁴.

Las alas de una libélula la ayudan a acelerar rápidamente debido a su funcionamiento asincrónico. Las libélulas aletean y lanzan sus alas a una velocidad de aproximadamente 30 veces por segundo, creando torbellinos.³⁵

Una posible función de esta sustancia es la de repeler la humedad pues es bien conocido que las hembras de esta especie depositan sus huevos en zonas húmedas como cuerpos de agua.

Figura 17

Detalle microscópico ala de una libélula



Barrera, H. (1994). Detalles observados en las alas con la técnica de microscopía electrónica de barrido [imagen].

Músculos de las alas

Los músculos de la libélula se asemejan a la de los vertebrados, poseen fibras musculares compuestas de actina y miosina, pero en vez de estar unidas al hueso, estos penetran en la cutícula y se insertan directamente en la epicutícula, se pueden observar dos tipos de nervios, el responsable de la contracción rápida y por otro lado el de contracción lenta. Estos músculos pueden llegar a ser contraído entre 100 a 200 veces por segundo (Wigglesworth, 1978)³⁶, en este tipo de seres vivos estos músculos representan aproximadamente el 25% de su peso total, y les permiten a las libélulas viajar grandes distancias sin fatigarse, los músculos de las alas contienen seis tipos de moléculas de troponinas T que afecta directamente la contracción y por ende mejora la capacidad de vuelo (Fitzhugh & Marden, 1997)³⁷.

La potencia aerodinámica en las alas de la libélula se ve gastada cuando las alas se reducen y mueven fuera de fase, y la fuerza aumenta cuando las alas se mueven en fase.³⁸

Los músculos están dispuestos en columnas verticales que deforman la caja del tórax a medida que se contraen y así logran mover las alas articuladas con ellas, los músculos y las alas no están unidas directamente entre ellas, si no que el músculo se encuentra unido a la parte superior de la caja torácica donde está unida el bode de las alas (Corbet, 1999)³⁹.

Para dar finalizada la actividad relacionada a la recolección de datos de cada animal, se determinaron las características biológicas que representen una potencial aplicación en soluciones a diversos problemas y se enumeran a continuación, junto a las partes directamente relacionadas y la acción específica que estas realizan.

Tabla 2

Matriz de estrategias biológicas

Estrategia Biológica	Parte involucrada	Acción
Las alas de muchas mariposas no están pigmentadas. Obtienen su color manipulando físicamente la luz.	Alas	Manipular, Proteger
Estructuras similares a pelos llamadas pelos gustativos en los pies.	Patas	Degustar
Las alas permiten escapar de las telarañas, por las escamas.	Alas	Proteger
Las escamas de las alas proporcionan elevación, ayuda a que el aire fluya suavemente sobre el ala	Alas	Elevar
Las escamas de las alas ayudan a la termorregulación.	Alas	Termo regular
Superficies hidrófobas debido a su composición y microestructura de superficie.	Alas	Auto limpiar
Las escamas de las alas hacen que la luz se difracte e interfiera.	Alas	Manipular
Las escamas de las alas ayudan a camuflarse del sonar.	Alas	Camuflar
PROBÓSCIDE Estructura para captar líquidos, se separa para su limpieza, y filtra sólidos para absorber solo nutrientes líquidos.	Boca	Filtrar, alimentar
Estructuras livianas y resistentes tridimensionales en sus alas, conocidas como gyroids.	Alas	Proteger, Resistir
Las almohadillas para los pies se adhieren a superficies verticales.	Patas	Adherir
Flotación en aguas turbulentas.	Cuerpo	Flotar
Antenas direccionales.	Cabeza	Palpar
Estructura mecánica de salto.	Patas	
Su canto genera una ilusión acústica en el oído humano.	Tórax	
alas traseras membranosas que son fácilmente plegables.	Alas	Plegar
Camuflaje.	Cuerpo	Camuflar
El canto de los grillos es en realidad una estridulación, debido al raspado	Patas	Sonar, atraer

de las alas anteriores y de las patas posteriores.		
Las microestructuras protegen del daño. (Disposición de micrópilos en la cabeza).	Cabeza	Proteger
La estructura del ala permite una rápida aceleración.	Alas	Acelerar
La microestructura sumado a los biocompuestos ofrece un vuelo eficiente.	Alas	Volar
La aerodinámica de las alas de la libélula.	Alas	Volar, acelerar
Las rejillas corneales reducen la adherencia	Ojos	Reducir
Los tímpanos proporcionan una audición direccional.	Oidos	Oír
Acrobacias utilizadas para aterrizar.	Cuerpo	Aterrizar
campo de visión de 360°	Ojos	Ver, captar
Las moscas cuentan con una sustancia pegajosa en la almohadilla de sus patas que les permiten adherirse fácilmente a las superficies lisas.	Patas	Adherir
la hidrodinámica de la succión de alimentos en las moscas.	Boca	Succionar
probar la comida utilizando sus patas.	Patas	Probar

4 Proceso Metodológico

4.1 Matriz de priorización

Como siguiente paso, posterior a la revisión bibliográfica de la morfología y características principales de los artrópodos seleccionados para el desarrollo de este trabajo, se realizó una matriz que permitió visualizar de forma ordenada las estrategias biológicas que posee cada uno de estos insectos con el fin de realizar una selección de características que puedan ser aptas para desarrollar la abstracción correspondiente y sea acorde a los objetivos principales de este proyecto.

Es fundamental tener claridad respecto al concepto de valor, relacionado con lo positivo de las cosas, estos tienen tres atributos particulares, son ambivalentes (que pueden tener dos valores

distintos), son cualitativos (depende de la función valorativa de cada persona), y por último pueden ser ordenados jerárquicamente (puede establecerse una importancia en una escala determinada).

La matriz de priorización es una herramienta que se utiliza para evaluar distintas opciones respecto a criterios de interés particular de un problema (Canive, T. 2018). Esta matriz en el caso particular proporcione un instrumento para evaluar una lista de criterios seleccionados y jerarquizados por el equipo de trabajo según el valor dado por los mismos.

Como primer paso para el establecimiento de la matriz de selección planteada a continuación, se establecen 5 criterios diferentes con un valor determinado según jerarquización establecida:

- Viabilidad de emulación de estructuras tridimensionales a nivel macroscópico: relacionado directamente a la posibilidad de convertir y emular las imágenes encontradas en estructuras tridimensionales que puedan generar un valor y cumplir una función.
- Observación de estrategias biológicas a través de imágenes microscópicas: la capacidad que tiene el equipo de trabajo de observar las estrategias a través de imágenes bidimensionales tomadas con técnica de microscopia SEM.
- Valor diferenciador para relación analógica de mayor calidad en aplicaciones estructurales: está relacionado con la competencia y la propuesta de valor.
- Potencial de extracción de relación analógica en aplicación estructural: referente a la posibilidad de establecer una analogía directa entre la estrategia biológica observada y la capacidad de ser recreada en una estructura funcional.
- Capacidad analógica entre la relación función/forma: referente a la estrecha relación entre función observada y la posterior aplicación formal a nivel macroscópico.

Los anteriores criterios fueron valorados con un porcentaje respectivo dependiendo del valor concedido por el equipo de trabajo, y posteriormente se enfrentaron las estrategias biológicas frente a estos mediante una calificación en escala numérica comprendida de 1 a 5 donde: 1 (deficiente), 2 (malo), 3 (aceptable), 4 (bueno) y 5 (muy bueno).

Fue igualmente importante poseer claridad de los diferentes niveles de abstracción biológica pues con base en esto se realizó el diagnóstico correspondiente y se identificaron las estrategias biológicas que permitan una menor incertidumbre y una oportunidad para el cumplimiento de los objetivos propuestos⁴⁰.

Abstracción formal: Relacionada a la inspiración y obtención de formas partiendo de partes fisiológicas propias de un objeto de estudio.

Abstracción funcional: Relacionada con la imitación y posterior implementación de características funcionales observadas en el objeto de estudio con posterior aplicación en la solución de un problema o desarrollo de un producto.

Abstracción de proceso: Relacionada con la reproducción de un proceso encontrado en la observación de un objeto de estudio.

Abstracción sistémica: Relacionado a la imitación de un sistema encontrado en la naturaleza.

Tabla 3

Matriz de selección estrategias biológicas

Animal	Estrategia biológica o función	Viabilidad de emulación de estructuras tridimensionales a nivel macroscópico	Observación de estrategias biológicas a través de imágenes microscópicas	Valor diferenciador para relación analógica de mayor calidad en aplicaciones	Potencial de extracción de relación analógica en aplicación estructural	Capacidad analógica entre la relación función/forma	Total
		20%	30%	20%	15%	15%	
Mariposa	Las alas de muchas mariposas no están pigmentadas. Obtienen su color manipulando físicamente la luz.	2,5	4	4	4,5	1	3,33
	Estructuras similares a pelos llamadas pelos gustativos en los pies.	2	1,5	1	2	2	1,65
	Las alas permiten escapar de las telarañas, por las escamas.	4	4	2,5	3	1	3,10
	Las escamas de las alas proporcionan elevación, ayuda a que el aire fluya suavemente sobre el ala	4,5	4	4	4,5	4	4,18
	Las escamas de las alas ayudan a la termorregulación.	4,5	3	4,5	4	4	3,9
	Superficies hidrófobas debido a su composición y microestructura de superficie.	1	1	4	2	2,5	1,98
	Las escamas de las alas hacen que la luz se difracte e interfiera.	4	4,5	2	2	1	3,00
	Las escamas de las alas ayudan a camuflarse del sonar.	4	1	3	1	1	2,00
	PROBÓSCIDE Estructura para captar líquidos, se separa para su limpieza, y filtra sólidos para absorber solo nutrientes líquidos.	4	3	2,5	1	4	2,95
	Estructuras livianas y resistentes tridimensionales en sus alas, conocidas como gyroids.	4,5	4	4	4,5	4,5	4,25
Grillo	Las almohadillas para los pies se adhieren a superficies verticales.	4	3	2	3	2	2,85
	Flotación en aguas turbulentas.	3	1	3	3,5	2	2,33

	Antenas direccionales.	3	2	3	1	2,5	2,33
	Estructura mecánica de salto.	4	4,5	3,5	4	4,5	4,13
	Su canto genera una ilusión acústica en el oído humano.	1	1	3	2	1	1,55
	alas traseras membranosas que son fácilmente plegables.	4	4	3	1,5	3,5	3,5
	Camuflaje.	1	1	2	2,5	1	1,43
	El canto de los grillos es en realidad una estridulación, debido al raspado de las alas anteriores y de las patas posteriores.	1	3	2,5	3,5	4	2,73
	Las microestructuras protegen del daño. (Disposición de micrópilos en la cabeza).	4	4,5	3,5	4	4	4,05
Libélula	La estructura del ala permite una rápida aceleración.	4,5	4	3,5	4	4	4,00
	La microestructura sumado a los biocompuestos ofrece un vuelo eficiente.	4	2,5	3	3	4	3,2
	La aerodinámica de las alas de la libélula.	3	2	2	3,5	3,5	2,65
Mosca	Las rejillas corneales reducen la adherencia	3	2,5	3,5	3	3	2,95
	Los tímpanos proporcionan una audición direccional.	3	2	3	4	4	3,00
	Acrobacias utilizadas para aterrizar.	1	1	2	3	3,5	1,88
	campo de visión de 360°	2	4	2,5	3	4	3,15
	Las moscas cuentan con una sustancia pegajosa en la almohadilla de sus patas que les permiten adherirse fácilmente a las superficies lisas.	1	1	2,5	2	1	1,45
	la hidrodinámica de la succión de alimentos en las moscas.	3	3,5	3	3	2	3,00
	probar la comida utilizando sus patas.	4	3,5	3	3	3	3,35

Nota. Información adaptada de <https://asknature.org/idea/>

En la anterior tabla se puede observar los valores recolectados por medio de una jerarquización del grado de priorización en importancia obtenida por el equipo de trabajo, estableciendo un puntaje mínimo de 4,0 para la selección y continuación de dicha estrategia para

la siguiente fase, las estrategias seleccionadas están enumeradas a continuación con su respectivo puntaje:

Tabla 4

Estrategias biológicas seleccionadas de la matriz de priorización

Estrategia Biológica seleccionadas	Animal	Puntaje
Las escamas de las alas proporcionan elevación, ayuda a que el aire fluya suavemente sobre el ala	Mariposa	4,25
Estructuras livianas y resistentes tridimensionales en sus alas, conocidas como gyroids.	Mariposa	4,18
Estructura mecánica de salto	Grillo	4,13
Las microestructuras protegen del daño. (Disposición de micrópilos en la cabeza).	Libélula	4,05
La estructura del ala permite una rápida aceleración.	Libélula	4,00

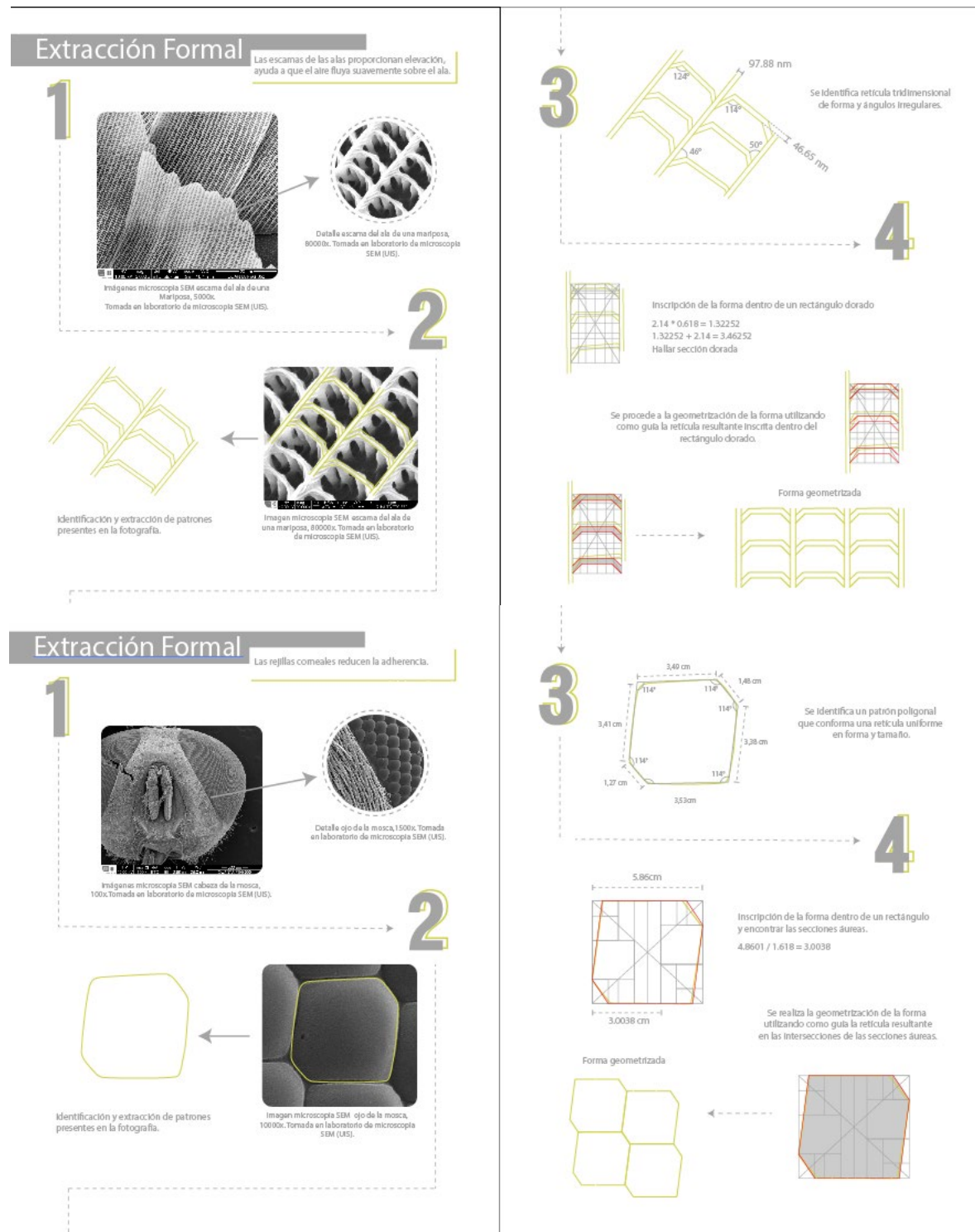
4.2 Geometrización

En los proyectos de diseño enfocados al uso del método indirecto de la biomimética, posterior a la investigación y delimitación de estrategias, se continuo con la observación para el análisis morfológico y la compresión geométrica de las estrategias filtradas. Para esta fase se identificaron las imágenes tomadas en microscopia SEM que proporciono fotografías que no pueden ser percibidas por el ojo humano y a través de estas permitan visualizar las estrategias biológicas y faciliten la obtención y generación de estructuras, es importante resaltar que cada muestra posee características específicas que permiten la observación de las estrategias, ya sea el uso de diferentes aumentos o el tipo de vistas que puede ser apreciada.

Así mismo se desarrolló una guía de geometrizado (Apéndice A) para establecer un orden de observación para la creación de formas controladas que posteriormente fueron evaluadas y utilizadas en la siguiente actividad.

Figura 18

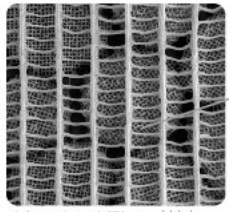
Proceso de geometrización



Extracción Formal

Estructuras livianas y resistentes tridimensionales en sus alas, conocidas como gyroids.

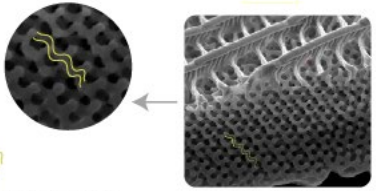
1



Imágenes microscopía SEM escama del ala de una mariposa.

Detalle escama de corte transversal donde se aprecian estructuras porosas triplante periódicas llamadas gyroids.

2



Identificación y extracción de patrones presentes en la fotografía.


Imagen microscopía SEM corte transversal escama del ala de una mariposa.

Adaptado de "Butterfly gyroid nanostructures as a biomimetic template for structural membranes" (p.2), por B.W.H. & A. Jones, M. Saito, S. Ito, M. Hoshino, 2012, Science Advances

Extracción Formal

Las micro estructuras protegen del daño. (Disposición de micropelos en la cabeza).

1



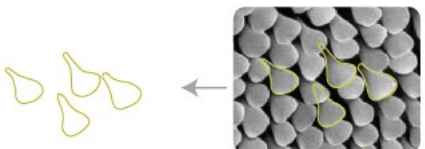
Imágenes microscopía SEM cabeza de libélula, 10x

Gschmatsdar, S. and Cabeza de libélula, SEM. [Imagen] Getty Images. <https://www.gettyimages.com/photos/32171103> y <https://www.gettyimages.com/photos/32171103> (Accessed 13 February 2022).

Imagen microscopía SEM, Detalle vellosidades presentes en la parte posterior de la cabeza y cuello.

Wife, R., and Dragonfly head. [Imagen disponible en: <https://www.gettyimages.com/photos/32171103> y <https://www.gettyimages.com/photos/32171103> (Accessed 13 February 2022)].

2




Identificación y extracción de patrones/formas presentes en la fotografía.

Imagen microscopía SEM, vellosidades presentes en la cabeza

Adaptado de "Evolution of the dragonfly head as a biomimetic template for structural membranes" (p.2), por G. Jones, M. Saito, S. Ito, M. Hoshino, 2012, Science Advances

3




Se identifica retícula triplemente periódica, simétrica y repetitiva. Las estructuras gyroides están dadas en función de la siguiente fórmula:

$$\text{Sen } (x) \text{ Cos } (y) + \text{Sen } (y) \text{ Cos } (z) + \text{Sen } (z) \text{ Cos } (x) = 0$$

Curvatura presente acotable en una función

4



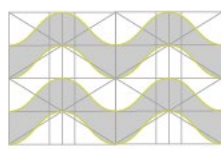
Inscripción de la forma dentro de un rectángulo dorado

$$2.4 * 0.618 = 1.4832$$

$$1.4832 + 2.4 = 3.8832$$

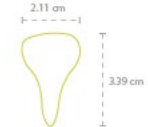
Hallar sección dorada

Inscribir la forma dentro del rectángulo dorado basado en la función correspondiente.



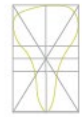
Retícula uniforme de gyroide en vista lateral

3



La forma mantiene una proporción de aumento de 1.6 veces mas alto respecto al ancho de la misma.

4



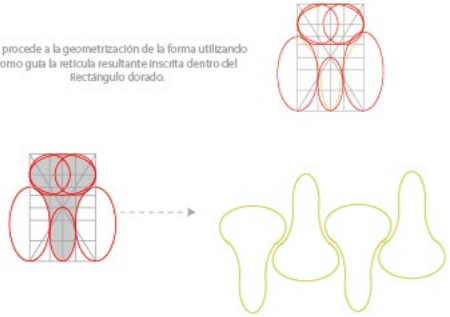
Inscripción de la forma dentro de un rectángulo dorado

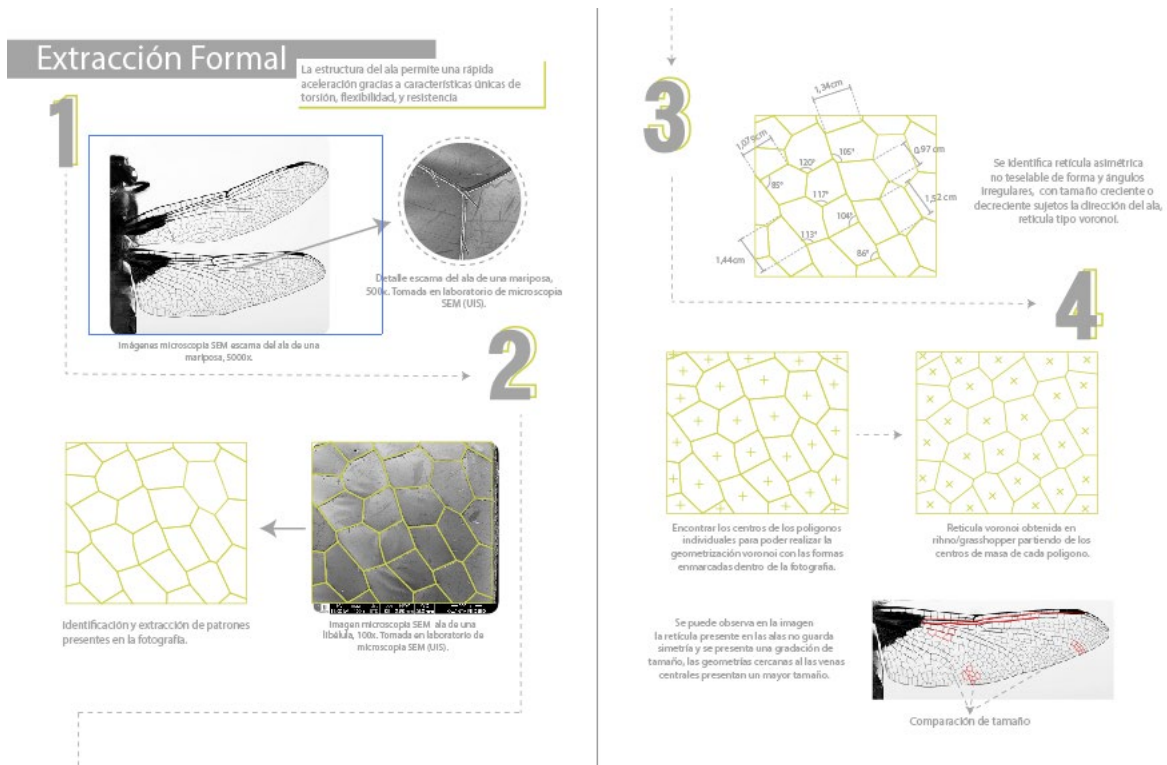
$$2.4 * 0.618 = 1.4832$$

$$1.4832 + 2.4 = 3.8832$$

Hallar sección dorada

Se procede a la geometrización de la forma utilizando como guía la retícula resultante inscrita dentro del rectángulo dorado.





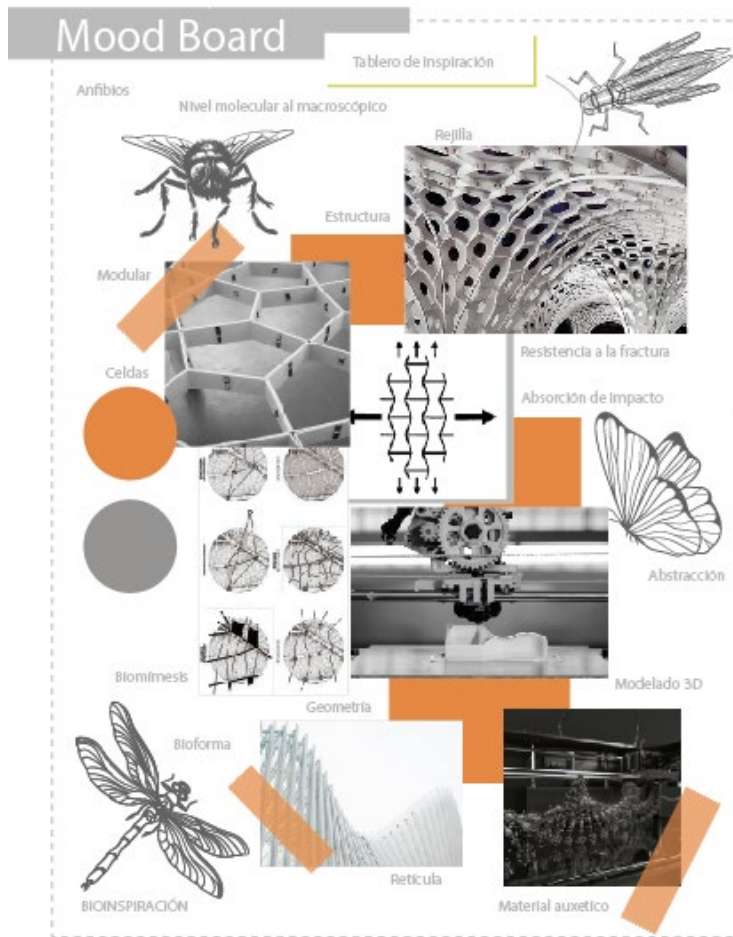
4.3 Moodboard

Este proceso creativo de diseño involucro la exploración de ideas y el abordaje de un mecanismo estratégico que se considera pertinente para dar continuidad con el proyecto en mención, y con ello se hace referencia al Moodboard, siendo esta una herramienta visual que permite recopilar y organizar la dirección estética y conceptual del proyecto. En la selección de esta herramienta se tomó como referente teórico el artículo "Mood Boards and Their Role in Design Thinking", en el cual se describe el Moodboard como una herramienta visual que se utiliza en la fase inicial del proceso de diseño para organizar y presentar ideas de diseño, colores, texturas y otros elementos visuales. Por otra parte, Watson enfatiza que los Moodboards son una parte importante en el diseño, permitiendo experimentar con diferentes opciones de diseño y explorar nuevas ideas. (Watson, 2019). A continuación, se pudo observar que, a partir de la investigación

del tema objeto de estudio, la búsqueda constante de inspiración y selección de imágenes, se identificó la viabilidad de elaborar la siguiente herramienta visual.

Figura 19

Moodboard



A través del análisis, la recopilación de temas y selección de imágenes, se creó el *Moodboard* el cual representa visualmente las características claves de algunos temas exploratorios. Es así que con la conjugación de la geometrización de imágenes microscópicas de los artrópodos seleccionados y la auxética, se espera obtener el mayor beneficio en el desarrollo de formas innovadoras con las amplias posibilidades explicativas que esto representa.

Es destacable como la accesibilidad de tecnologías como el modelado e impresión 3d logran contribuir al desarrollo y materialización de estructuras complejas como son las estructuras auxéticas, ya que permiten la proyección para la creación de configuraciones, dando así cabida a una amplia exploración de posibilidades constructivas que favorecen una mejor incorporación entre la bioforma, biomimesis, y estructuras auxética, y que a su vez disminuyen drásticamente las limitaciones y bloqueos creativos.

4.4 Auxética y relación de Poisson

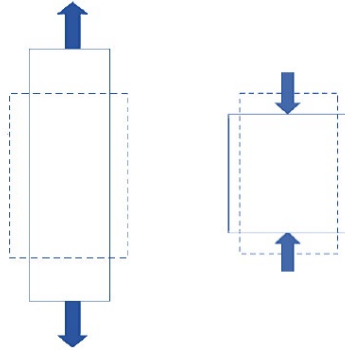
La relación de Poisson de un material es una constante de inestabilidad adimensional que depende de la dirección de una carga aplicada y describe la relación entre la deformación transversal negativa y la deformación longitudinal de un cuerpo sometido a una carga de tracción. Proporciona una forma universal de comparar el rendimiento estructural de materiales reales homogéneos y no homogéneos. Esta constante elástica se asumió implícitamente como positiva. Esto significa que, cuando un material es estirado en una dirección, se contrae en la dirección opuesta. Este mismo comportamiento también lo sufren a la inversa, es decir, cuando el material sufre una compresión.

El coeficiente de Poisson es un cociente de las deformaciones transversal y longitudinal de la forma:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{Trans}}{\varepsilon_{Long}}$$

Figura 20

Coefficiente de Poisson positivo



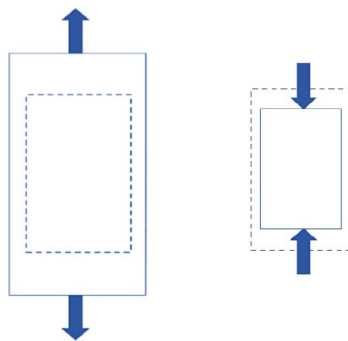
Jiménez, R. (2017). Coeficiente de poisson positivo [Imagen]. (pag. 9). Recuperado de

<https://core.ac.uk/download/pdf/288499843.pdf>

Aunque esta regla es lo común establecido, existen algunos casos en la naturaleza en los que algunos materiales muestran un coeficiente de poisson negativo, como por ejemplo algunos cristales a escala microscópica, o grafito pirolítico. Este fenómeno se traduce en que cuando un material se estira en un eje, este aumentará de tamaño en su eje opuesto, de igual forma sucede a compresión, donde se comprimirá en el eje de la aplicación de la carga, así como también sufrirá una contracción en el eje opuesto.

Figura 21

Coefficiente de Poisson negativo



Jiménez, R. (2017). Coeficiente de poisson negativo [Imagen]. (pag10). Recuperado de

<https://core.ac.uk/download/pdf/288499843.pdf>

4.4.1 Tipos de estructuras Auxeticas

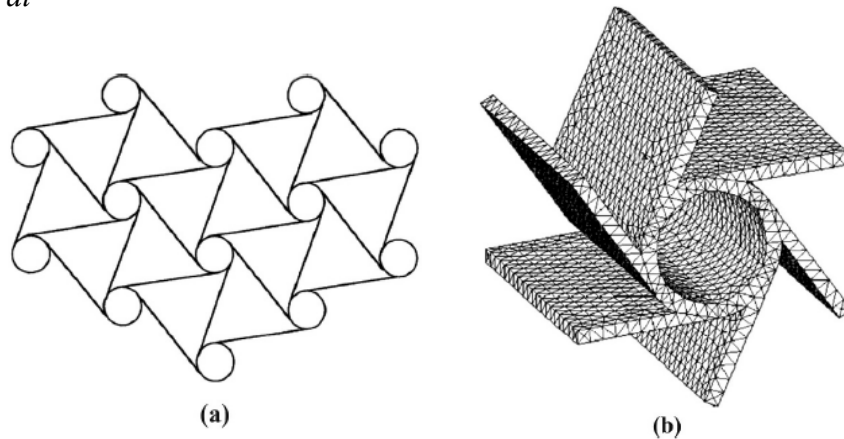
En los últimos años se han estudiado numerosas estructuras auxeticas, ya sean bidimensionales como tridimensionales. Pueden ser clasificadas en:

4.4.1.1 Estructuras quirales. Este tipo de estructura se caracteriza por estar formada por un núcleo central al cual están unidos sus ligamentos, para desarrollar un comportamiento auxetico, estos ligamentos se enrollan o desenrollan rodeando al núcleo central a medida que es aplicada una fuerza en determinada dirección.

El coeficiente de poisson de este tipo de estructura ronda el -1, mantenido una relación equivalente en la deformación trasversal como longitudinal a la fuerza. Este tipo de estructuras solo pueden ser construidas con un núcleo con 3,4 o 6 ligamentos, ya que con un numero diferente de ligamentos no es posible repetir la estructura de forma periódica y teselable.

Figura 22

Estructura quiral



Nota. (a) Estructura quiral 2D. (b) representación 3d de celda unitaria estructura quiral. Jiménez, R. (2017).

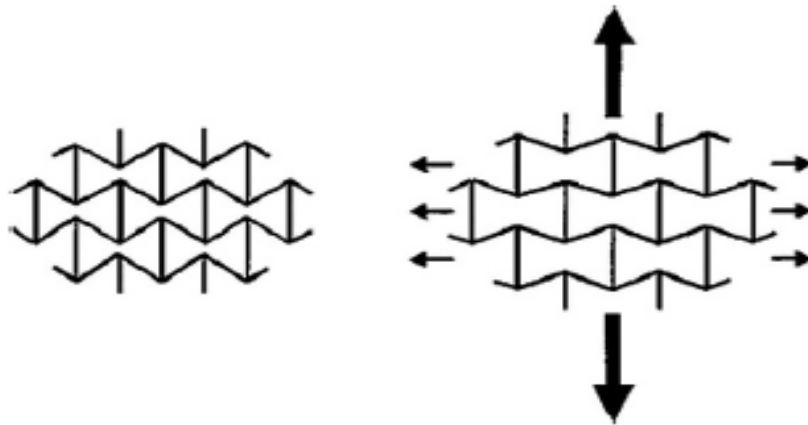
Estructura quiral [Imagen]. (pag10). Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/288499843.pdf>

4.4.1.2 Estructuras reentrantes. Este tipo de estructura consiste en formas, principalmente hexagonales, donde dos de los vértices se han introducido en dirección al interior con el objetivo forzar una deformación controlada. Estas estructuras se deforman debido a la flexión de los lados interiores, lo que permite un comportamiento auxético, ya sea en pruebas a tensión o compresión.

Dependiendo de parámetros como el ángulo o la rigidez del material, se podrá alcanzar un mayor o menor comportamiento auxético.

Figura 23

Estructura reentrante



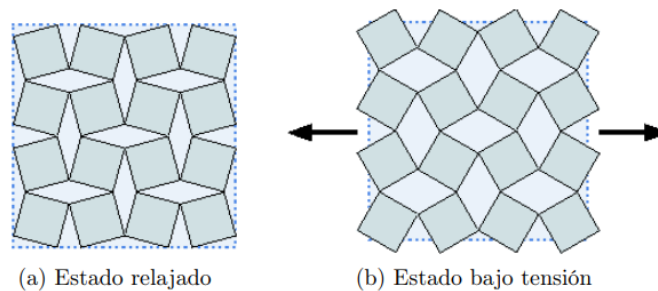
Jiménez, R. (2017). Representación básica de estructura reentrante tipo panal auxético [Imagen]. (pag. 11).

Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/288499843.pdf>

4.4.1.3 Unidades rotatorias. Este tipo de estructuras presentan un comportamiento auxético a través de la repetición de polígonos y figuras sencillas que se unen mediante bisagras o uniones semi rígidas que permitan un movimiento de rotación de las distintas unidades alrededor de las uniones, de tal forma que se produce un empaquetamiento o des empaquetamiento dependiendo del sentido en el que se aplique el esfuerzo.

Figura 24

Unidades rotatorias



Jiménez, R. (2017). Estructura auxética de cuadros rotatorios [Imagen]. (pag. 12). Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/288499843.pdf>

4.4.2 Principales características

Resistencia a la abolladura: cuando se aplica una fuerza a un material auxético isotrópico, se observa una contracción local, hay un flujo de material que se acumula debajo y crea un área de material más denso con mayor resistencia a la abolladura. De esta manera los materiales auxéticos presentan mayor resistencia a la abolladura en comparación con materiales convencionales.

Resistencia al corte: los materiales auxéticos son más resistentes a las fuerzas de corte en comparación con los materiales “normales”. Cuando la relación de poisson disminuye, el valor del módulo de corte lo hace, y en consecuencia la resistencia aumenta.

Resistencia a la fractura: los materiales que poseen una relación de poisson negativa tienen una mejor resistencia a la fractura, tienen una baja propagación de grietas, y se necesita más energía para expandirlos.

Absorción acústica: las espumas auxéticas tienen una capacidad de absorción superior, la estructura auxética juega un papel relevante en la atenuación de las vibraciones acústicas. Su desempeño más relevante los las frecuencias por debajo de los 1500 Hz.

Permeabilidad Variable: Debido al comportamiento de contracción y expansión de las espumas auxéticas, se puede decir que tienen una permeabilidad variable puesto que la variación de las dimensiones su estructura funciona como poros que se dilatan y contraen.

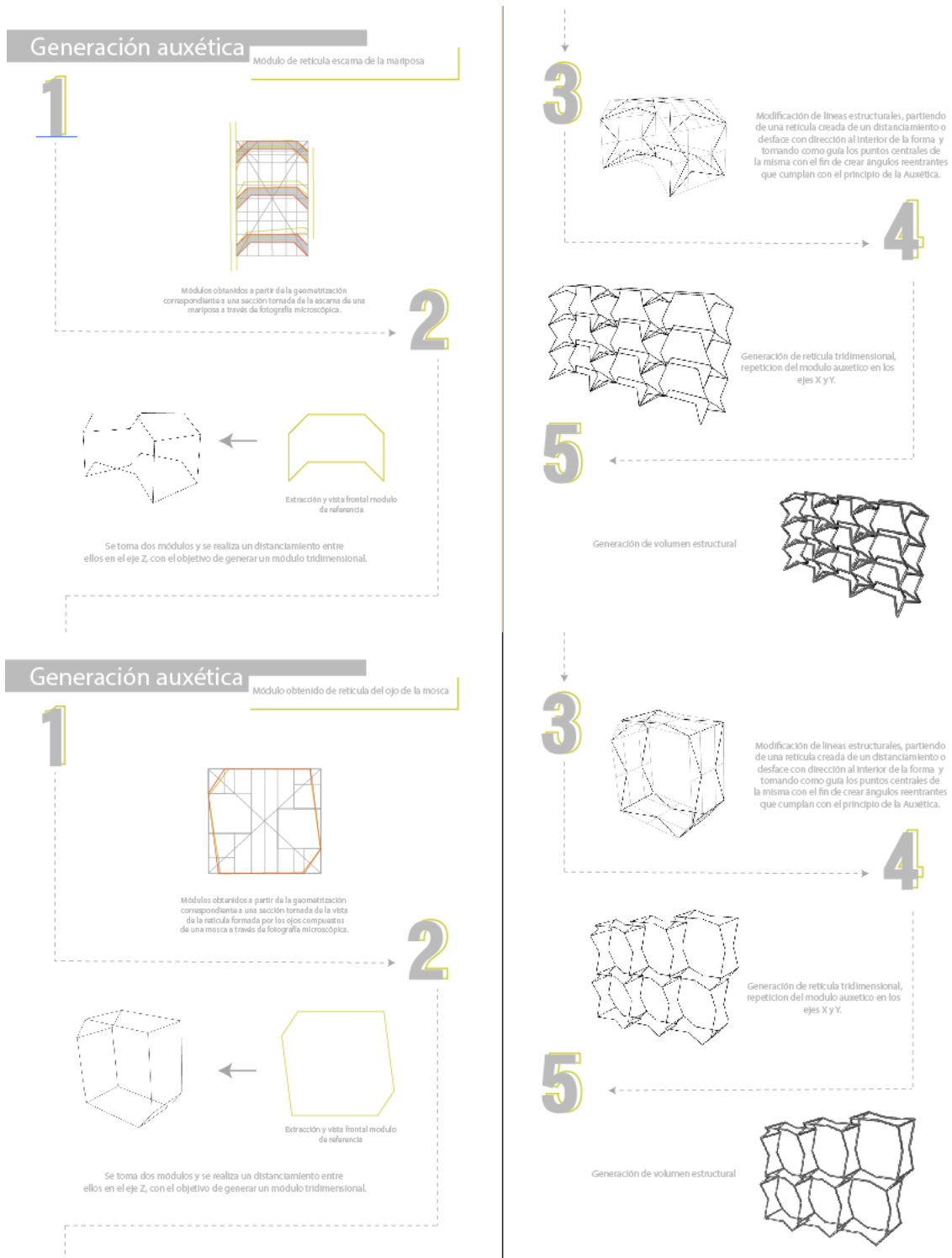
4.5 Generación auxética tridimensional

Para continuar en la ejecución del proceso creativo, y posterior a la delimitación del concepto que será abordado, se retomó la geometrización bidimensional anteriormente creada con el fin de establecer un proceso de generación tridimensional de estructuras que puedan cumplir con los requisitos del concepto en cuestión.

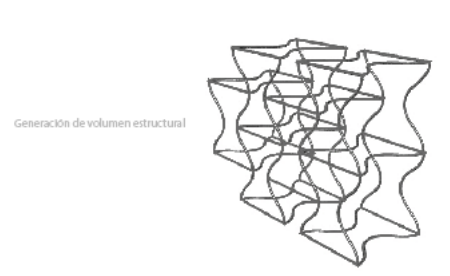
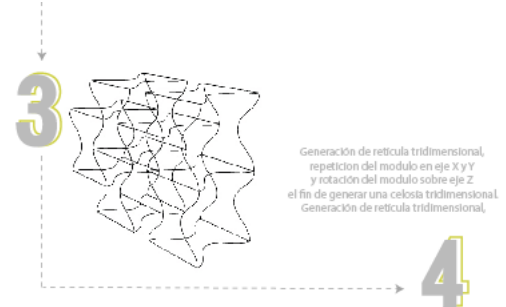
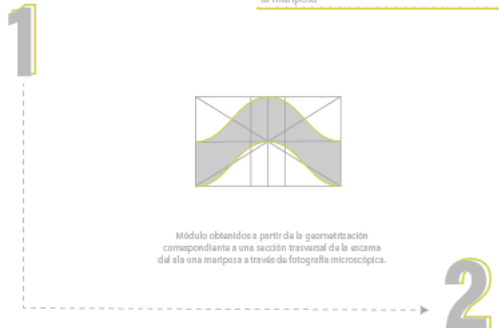
Es importante resaltar que dicho proceso de generación tridimensional, se centró en la generación de estructuras reentrantes que posteriormente fueron evaluadas para determinar si realmente pueden ser consideradas dentro del campo de la auxética.

Figura 25

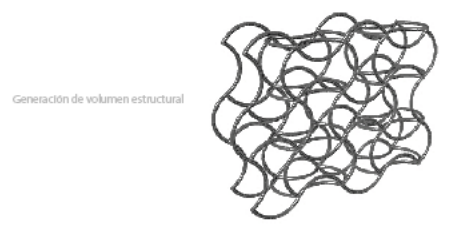
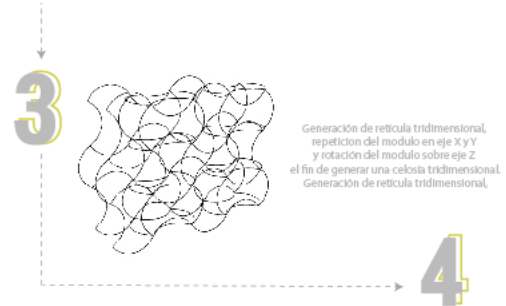
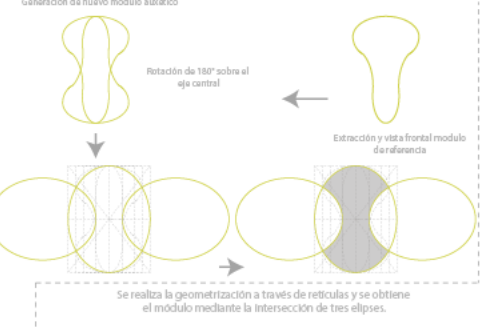
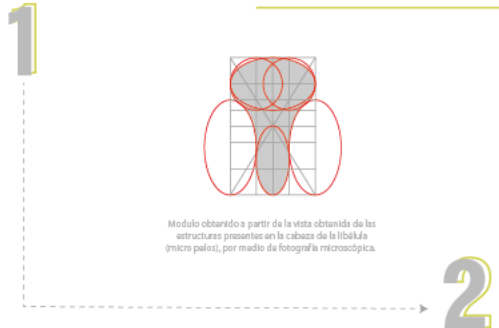
Generación de estructuras auxética

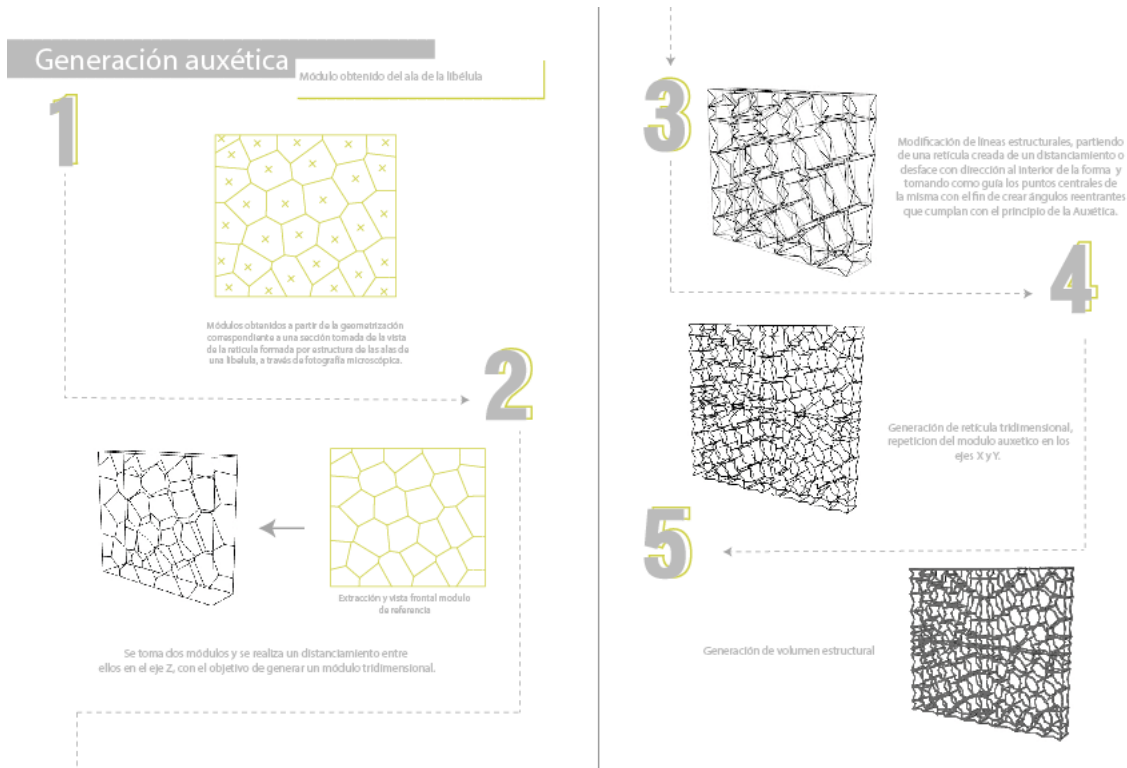


Generación auxética Módulo obtenido de sección trasversal, ala de la mariposa



Generación auxética Módulo obtenido de estructura presente en la cabeza de la libélula



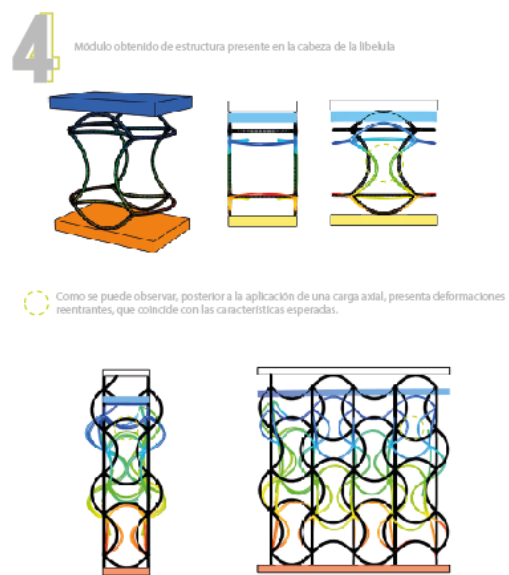
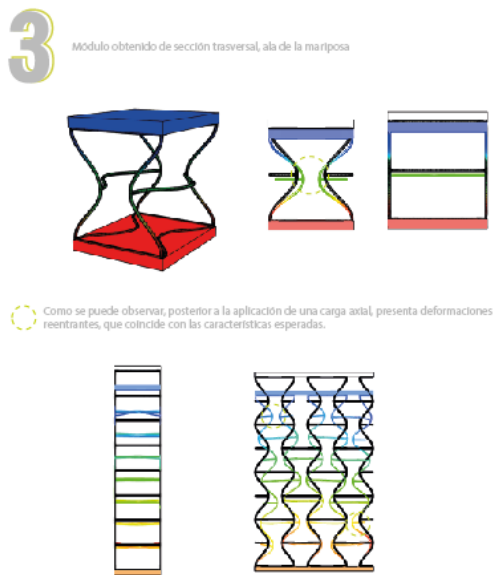
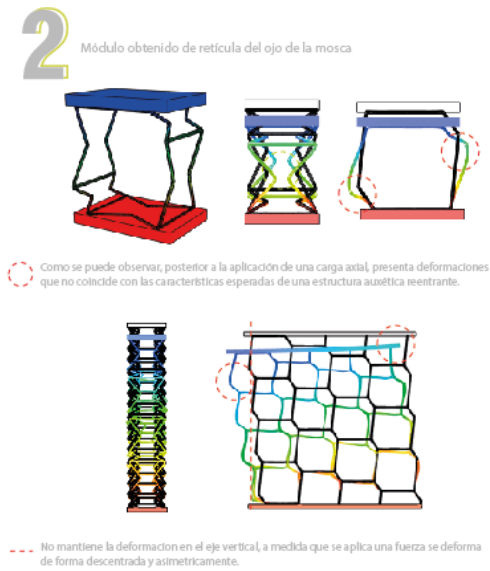
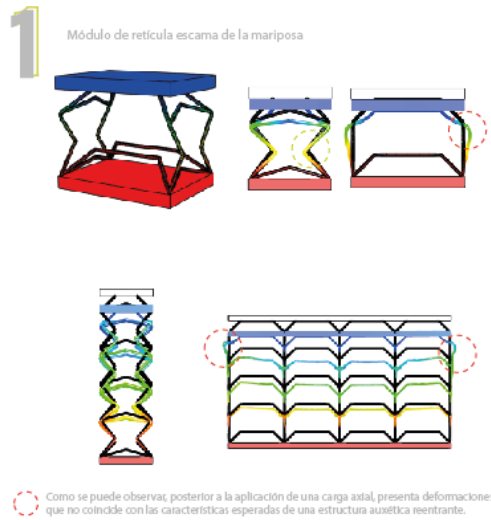


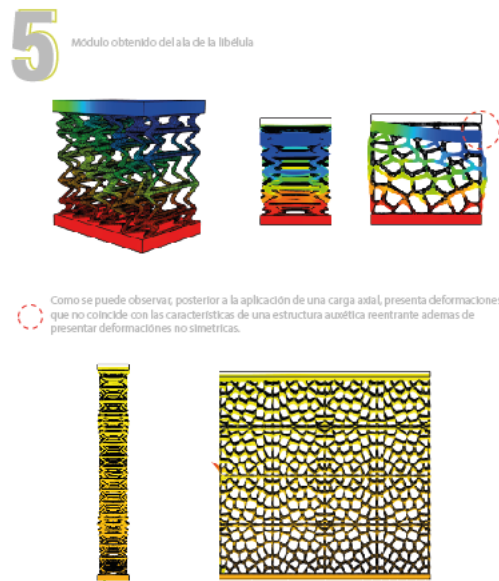
4.6 Evaluación y selección de estructura

Con el único propósito de determinar si las cinco estructuras obtenidas dentro del apéndice C, realmente cumplieron con las características necesarias para ser consideradas dentro del campo de la auxética, se realizó una simulación de cargas axiales; en este caso en el eje Z, con la ayuda del plug-in *scan and solve* dentro de Rihnoceros, y posteriormente se comprobó si las deformaciones de las estructuras presentan una deformación reentrante y simétrica esperada o no, siendo estos dos criterios los factores determinantes para descartar o dar continuidad a las estructuras para el correcto desarrollo del proceso, esto incluido en el apéndice D.

Figura 26

Simulaciones de cargas axiales





Como se puede observar en la figura 26, posterior a las cargas axiales las estructuras se deforman de cierta manera, y permite determinar la viabilidad como estructuras auxéticas, a continuación, en la siguiente tabla se resume el resultado general:

Tabla 5

Resultado deformación cargas axiales

Numero de estructura	Deformación reentrante	Deformación simétrica
1	No	Si
2	No	Si
3	Si	Si
4	Si	Si
5	No	No

Como se observa en la tabla 5, las únicas estructuras que cumplen con los dos criterios son las estructuras número 3 y 4, es así que son las seleccionadas para continuar en el proceso, y las demás, por tanto, quedan descalificadas.

Teniendo en cuenta la información anterior se procede a seguir ejecutando el estudio con las estructuras 3 y 4, las cuales presentan un comportamiento auxético.

Se ejecuta el estudio en el software ANSYS con los siguientes parámetros:

Volumen del objeto que impacta la estructura: 5670,97 mm³

Velocidad de impacto: 2777 mm/s

Tiempo de ejecución: 0,0015 s

Material de estructura: Poliuretano termoplástico (TPU)

Material de objeto de impacto: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Al concluir la simulación se pudo extraer la gráfica de energías, en la cual se pudo determinar el porcentaje de disminución de energía cinética en un tiempo determinado, y de esta manera establecer cuál estructura presentó un mejor rendimiento frente a un potencial impacto.

Figura 27

Simulación de impacto en estructura

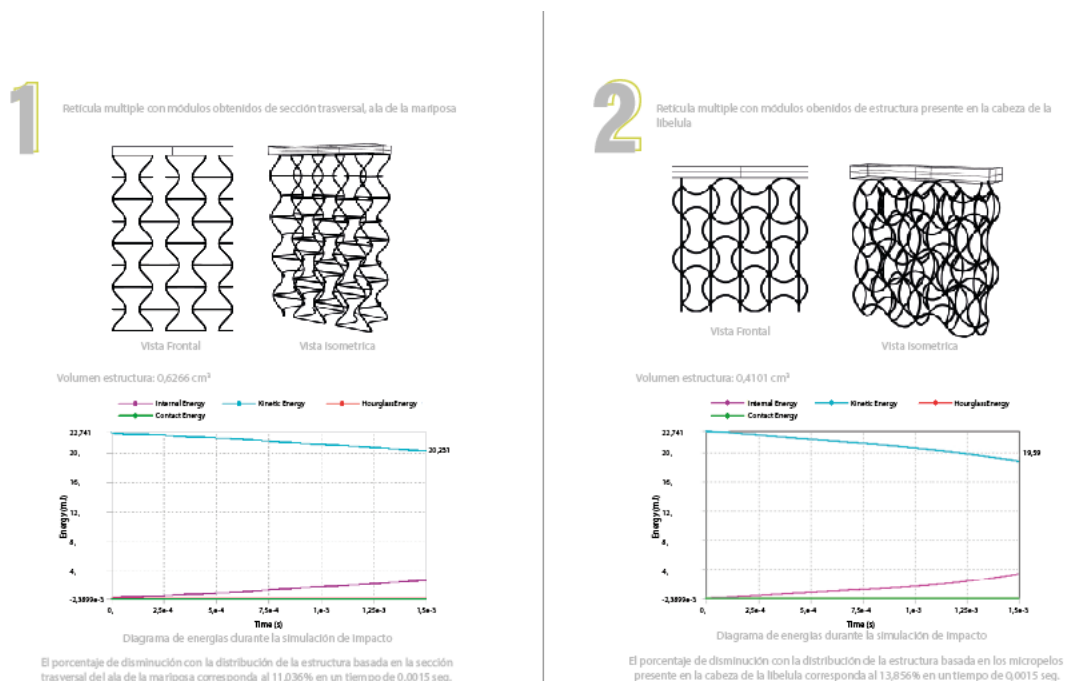


Tabla 6*Resultado porcentaje disminución energía cinética*

Numero de estructura	Porcentaje de Disminución	Tiempo	Masa Gr
1	11,037%	0,0015 s	0,7339
2	13,856%	0,0015 s	0,5083

Nota. Para el cálculo de la masa se tiene en cuenta la densidad del Tpu: 1,21 g/cm³

Si bien la diferencia entre los porcentajes de reducción de energía cinética no es grande, puede deberse al tiempo de ejecución que se ve mermado por las capacidades computacionales del equipo donde fue ejecutado el estudio, pero aun así se puede deducir que la mejor disposición de estructura frente a un potencial impacto es la estructura que corresponde a la retícula obtenida de las vellosidades presentes en la cabeza de la libélula, que en un tiempo de 0,0015 seg y con los demás parámetros mencionados anteriormente, presenta una reducción de energía de 13,856%, a esto sumado que la estructura en mención presenta un 30,73% menos de masa que la estructura número 1, es así que se dará continuidad al proceso con esta única estructura.

4.7 Lluvia de ideas

La creación de esta herramienta se le atribuye al publicista Alex Osborn, quien se presume que basándose en la estructura física y mental del cerebro la cual se divide en la razonable y la creativa, analizó que la búsqueda de ideas creativas por un grupo de individuos brindó una mayor eficiencia creativa que cuando cada sujeto abordaba un tema de manera independiente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pudo plantear que la lluvia de ideas es una técnica de gran impacto para generar nuevos planteamientos y soluciones innovadoras, creativas y eficientes dando plena libertad de expresión a los diferentes puntos de vista. En esta técnica, todas las ideas son relevantes e importantes ya que los planteamientos permiten explorar nuevas posibilidades y

perspectivas ante los posibles inconvenientes que se puedan presentar en un proyecto investigativo estimulando y potencializando la creatividad.

Como resultado de las cinco estrategias biológicas seleccionadas en la sección 4.1 y la teoría de las estructuras auxéticas identificadas en la sección 4.4, se desarrolló la lluvia de ideas por el equipo investigativo, elaborando el siguiente esquema con aquellas propuestas que se consideraron que aportaron más relevancia al desarrollo del proyecto y brindar una categorización de las mismas.

Tabla 7

Generación de ideas

Lluvia de ideas	Categoría según aplicación
Estructura tipo celosía para edificaciones	Amueblamiento
Contenedores (embalaje) ventilado	Amueblamiento
Mejoramiento de férula de milgram	Medicina
Coquilla protectora de testículos	Deporte
Prótesis lumbar de disco	Medicina
Soporte lumbar (tipo faja)	Medicina
Mobiliario urbano	Amueblamiento
Collarín cervical	Medicina
Plantilla para talón	Podología
Patinaje casco y rodilleras	Deporte
Suela de zapato	Podología
Plantilla para uso de persona con espolón Calcaneó	Podología
Plantilla para puntos de presión general del pie	Podología
Sistema pasivo atenuador de impacto vial	Amueblamiento
Elementos de protección boxeo (cabezal)	Deporte
Máscara de protección de impacto para deportista	Deporte

A partir de esta lluvia de ideas, fue viable concluir que se cuenta con una amplia gama de posibilidades en temas de diseño en los que se pueden aplicar la creatividad y la innovación teniendo resultados eficientes y de manera rápida. Los planteamientos con mayor relevancia que surgieron incluyen estructuras para edificaciones, dispositivos para la generación de energía, soluciones en problemáticas de salud, equipamiento de protección personal en deportes de impacto, mobiliario urbano, entre otros. La diversidad de estas ideas demuestra que el diseño es un campo amplio sin limitaciones en la generación de soluciones que aportan al desarrollo industrial. Además, la lluvia de ideas es una herramienta útil para generar una gran cantidad de ideas de forma rápida y colaborativa.

El análisis de la lluvia de ideas permitió identificar y preseleccionar 16 planteamientos, que posteriormente por su similitud en cuanto a patrones, tendencias y funcionalidad fueron categorizados en 4 principales campos de aplicación (Medicina, deporte, podología y amueblamiento). Con lo anterior se evidencia un avance significativo al lograr establecer un marco de referencia común para contrastar las ideas relevantes visualizando la eficiencia y eficacia de esta fase del proyecto.

4.8 Proceso analítico jerárquico

El proceso analítico jerárquico es una técnica para la toma de decisiones complejas que se utiliza después de la lluvia de ideas, el cual busca analizar y comparar los diferentes planteamientos preseleccionados con la finalidad de unificar criterios objetivos y subjetivos. A través de este proceso, se estableció una jerarquía de criterios y alternativas y se asignó un peso a cada uno de ellos para posteriormente realizar una evaluación sistemática al comparar las alternativas en función de los criterios establecidos. El resultado es una clasificación de las alternativas en orden de preferencia, lo que ayuda a tomar una decisión informada y basada en datos puntuales.

Los criterios seleccionados para llevar a cabo el proceso analítico jerárquico son:

Tiempo de desarrollo: Tiempo necesario para desarrollar la idea, desde la concepción hasta la implementación final.

Novedad de idea: Evalúa la originalidad e innovación de la idea en comparación con otras soluciones existentes en el mercado.

Complejidad: Cantidad de recursos (técnicos, financieros, humanos) que serían necesarios para llevar a cabo la idea. Una idea muy compleja puede ser difícil de implementar debido a la cantidad de recursos necesarios.

Costos: evalúa el costo de implementar la idea, desde los costos directos (materiales, mano de obra) hasta los costos indirectos (marketing, publicidad, etc.).

Tabla 8

Matriz comparación de criterios

Matriz de comparación de criterios									
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Matriz Normalizada				Ponderación
Criterio 1	1	1/5	3	7	0,154	0,115	0,409	0,438	0,2791
Criterio 2	5	1	3	5	0,772	0,577	0,409	0,313	0,5176
Criterio 3	1/3	1/3	1	3	0,051	0,192	0,136	0,188	0,1419
Criterio 4	1/7	1/5	1/3	1	0,022	0,115	0,045	0,063	0,0613
Total	6,5	1,7	7,3	16,0					

Después de tener definidos los criterios en la matriz de comparación de los mismos, se evidencio la importancia de cada criterio donde se obtuvo los siguientes porcentajes de acuerdo con el nivel significativo de relevancia:

Criterio De Novedad: Porcentaje de relevancia del 52%

Criterio De Tiempo De Desarrollo: Porcentaje de relevancia del 28%

Criterio De Complejidad: Porcentaje de relevancia del 14%

Criterio De Costos: Porcentaje de relevancia del 06%

Tabla 9

Matriz de Prioridades en la categoría de deporte

	Idea 1	Idea 2	Idea 3	Idea 4	Priorización	
Idea 1	0,50	0,20	0,54	0,54	0,35	2
Idea 2	0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	4
Idea 3	0,26	0,65	0,19	0,23	0,45	1
Idea 4	0,16	0,08	0,19	0,16	0,12	3
Ponderado	0,28	0,52	0,14	0,06		

De acuerdo a los criterios evaluados, en la categoría de deporte se obtuvo un porcentaje del **45%** para el planteamiento de *elementos de protección de boxeo (casco)* siendo este el porcentaje más representativo en comparación con los demás planteamientos, por lo cual se preselecciona para avanzar en la siguiente fase. Ver apéndice F; Deporte.

Tabla 10

Matriz de prioridades en la categoría medicina

	Idea 1	Idea 2	Idea 3	Idea 4	Priorización	
Idea 1	0,48	0,10	0,32	0,55	0,27	1
Idea 2	0,28	0,30	0,07	0,24	0,26	2
Idea 3	0,19	0,30	0,15	0,16	0,24	3
Idea 4	0,05	0,30	0,46	0,05	0,24	3
Ponderado	0,28	0,52	0,14	0,06		

Referente a los criterios evaluados, en la categoría de medicina se obtuvo un porcentaje del **27%** para el planteamiento de *mejoramiento de férula de milgram*, siendo este el porcentaje más representativo en comparación con los demás planteamientos, aun cuando los porcentajes no superaron una diferencia superior al **2%**, por lo cual se preselecciona para avanzar en la siguiente fase. Ver apéndice F: Pestaña “Medicina”.

Tabla 11*Matriz de prioridades en la categoría podología*

	Idea 1	Idea 2	Idea 3	Idea 4	Priorización	
Idea 1	0,50	0,20	0,55	0,56	0,36	1
Idea 2	0,05	0,52	0,14	0,06	0,31	2
Idea 3	0,14	0,08	0,26	0,26	0,13	4
Idea 4	0,31	0,20	0,05	0,12	0,20	3
Ponderado	0,28	0,52	0,14	0,06		

Conforme a los criterios evaluados, en la categoría de podología se obtuvo un porcentaje del **36%** para el planteamiento de *diseño de plantilla para talón*, siendo este el porcentaje más representativo en comparación con los demás planteamientos, por lo cual se preselecciona para avanzar en la siguiente fase. Ver apéndice F; Podología.

Tabla 12*Matriz de prioridades en la categoría de amoblamiento*

	Idea 1	Idea 2	Idea 3	Idea 4	Priorización
Idea 1	0,06	0,39	0,12	0,07	0,24
Idea 2	0,12	0,15	0,56	0,26	0,21
Idea 3	0,26	0,07	0,26	0,42	0,17
Idea 4	0,56	0,39	0,06	0,26	0,38
Ponderado	0,28	0,52	0,14	0,06	

Según los criterios evaluados, en la categoría de amueblamiento se obtuvo un porcentaje del **38%** para el planteamiento de *sistema pasivo atenuador de impacto vial*, siendo este el porcentaje más representativo en comparación con los demás planteamientos, por lo cual se preselecciona para avanzar en la siguiente fase. Ver apéndice F; Amoblamiento.

Tabla 13

Matriz de prioridades final

	Idea 1	Idea 2	Idea 3	Idea 4	Priorización	
Idea 1	0,56	0,39	0,21	0,29	0,41	1
Idea 2	0,06	0,07	0,21	0,19	0,09	4
Idea 3	0,26	0,15	0,52	0,48	0,26	2
Idea 4	0,12	0,39	0,05	0,04	0,25	3
Ponderado	0,28	0,52	0,14	0,06		

Teniendo en cuenta los 4 planteamientos preseleccionados por su alto porcentaje de comportamiento y de los porcentajes de criterios evaluados en el anexo 1, se procedió a realizar de nuevo el proceso analítico jerárquico, en el cual se obtuvieron los siguientes porcentajes:

Elementos de protección de boxeo (casco): 41%

Diseño de plantilla para talón: 26%

Sistema pasivo atenuador de impacto vial: 25%

Mejoramiento de férula de milgram: 9%

Con lo anterior se evidencia, que después de someter a evaluación los criterios en cuando a tiempo de desarrollo, complejidad, novedad y costos, el planteamiento con mayor actividad de porcentaje para continuar el proyecto investigativos es con Elementos de protección de boxeo (casco). Ver apéndice F; Final.

4.9 Exploración temática

El boxeo es un deporte de contacto en el que dos oponentes luchan entre sí usando solo los puños enguantados, golpeando la parte superior del cuerpo del oponente, generalmente en un ring de boxeo hecho para ese propósito específico.

Ha sido parte del programa olímpico desde 1904.

Si bien tradicionalmente se ha considerado un deporte exclusivamente para hombres, el reconocimiento de los derechos de las mujeres ha ayudado a que el deporte prospere en las últimas décadas en la práctica femenina.

4.9.1 Riesgos de la práctica

El boxeo, así como otros deportes de combate como son por ejemplo el kickboxing, judo, entre otros, difieren de otras disciplinas deportivas porque la cabeza es un lugar lícito de contacto, a diferencia de otras actividades donde el contacto con esta parte es incidental y pueden conllevar a lesiones neurológicas, laceraciones, entre otras (Tsharni et al., 2008).⁴¹

Por otro lado, en un estudio realizado por Gregory H. Bledsoe se obiene como resultado general que la tasa de incidencia de lesiones fue de 17,1 por 100 combates. La laceración facial representó el 51 % de todas las lesiones, seguida de lesiones en la mano (17 %), lesiones en los ojos (14 %) y lesiones en la nariz (5 %). Los boxeadores masculinos fueron significativamente más propensos que las boxeadoras a recibir lesiones. (Bledsoe et al., 2005)⁴².

4.9.2 Cabezal de Boxeo

El traumatismo craneal repetido que experimentan los boxeadores puede conducir al desarrollo de la demencia pugilística o La encefalopatía traumática crónica (Roberts et al., 1990)⁴³. Es una degeneración progresiva de las neuronas causada por varios traumatismos craneoencefálicos; Aun así entidades como la AIBA (Organización internacional de boxeo)

argumenta que el uso de cabezales de boxeo no tenía suficiente evidencia que realmente protegiera a los boxeadores de conmociones cerebrales y por el contrario ofrece un falso sentido de protección al deportista; de igual forma existen críticos como el especialista Phil Dickinson, doctorado en neurociencia, que rechaza estas afirmaciones pues considera que no se toman diferentes parámetros en los niveles de entrenamiento de los deportistas.

En el estudio denominado “Injuries in Amateur Boxers in the Province of Quebec” (Fréchette et al., 1995)⁴⁴. Se analizaron las lesiones a 212 boxeadores amateur durante competencias en Canadá, y se concluyó que el cabezal de boxeo redujo las lesiones en cabeza y cerebro en un 43% frente a los boxeadores que dimitieron el uso del mismo.

Es así la importancia de recalcar que este tipo de protección es esencialmente para disminuir la cantidad de trauma craneomaxiolo facial, como cortes y contusiones, donde el contorno de ojos y pómulos son los más afectados.

Existen varios tipos de cabezales de protección y estos dependen del nivel técnico y competitivo de cada deportista:

Los cabezales completos cabeza/cara que protegen la barbilla y pómulos, pero que limitan la visibilidad y suelen ser más pesados.

Cabezal abierto, permite una mayor visibilidad, pero solo ofrece protección a la cabeza y orejas y deja al descubierto cara, y mentón.

Otro tipo de cabezal es el que ofrece una barra metálica para proteger la barbilla, es uno de los más utilizados en la práctica del deporte amateur, que disminuye la posibilidad de lesiones de consideración.

Figura 28

Cabecal de Boxeo



Everlast. (s.f.). Cabecal de boxeo [Imagen]. Recuperado de- https://www.deportivoymarcial.com.ar/MLA-615320667-cabecal-con-barra-everlast-elite-casco-boxeo-kick-boxeo-mma-_JM

4.10 Benchmarking

Con el fin de determinar los materiales que componen los cabezales de boxeo, principalmente en el acolchado y que se encuentran actualmente disponibles en el mercado, se hace necesario realizar una indagación y recopilación de datos a través de la web, todo esto con el fin de eventualmente de realizar una comparación de dichos materiales frente a la estructura planteada y determinar el comportamiento de estos frente a un eventual impacto con la ayuda de simulaciones por medio de análisis estático.

Figura 29

Recopilación productos existentes

Benchmarking

Recopilación productos existentes en el mercado

1. Leone Training CS415



Descripción

Cabecal de boxeo y artes marciales para entrenamiento con pómulos. Este cabecal presenta cierre con elástico, cordones y velcro para máxima adaptabilidad. Excelente ventilación y de ajuste cómodo.

Análisis formal

Color Negro/Blanco.

Materia Poliuretano, poliestero (revestimiento) / Eva (acolchado)

Talla M / L

Dimensiones 40x 30x 20 cm

Peso 550 g

<https://eq4posidfitness.com/cabecal-leone-training-cs415/>

Análisis técnico productivo		Análisis Comercial	
Estimación del Costo	Poca información N/A.	Precio comercial	= 88,25 USD\$
Sistemas de producción	Producción batch Sistemas producción modular.	Sistema de empaque	Caja de cartón, para embalaje de productos al detal.
Fuente de energía	Producción Energía Eléctrica y térmica, mecánica.	Distribución	Canal de distribución directo: Venta online Locales físicos
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Con protección para pómulos. - Acolchado lateral para protección de oídos y ranura anti perforación de tímpano. - Cierre de velcro y cordón. - Ajustable en parte inferior superior - Forro interior absorbente 	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - El forro interior de tela absorbe el sudor, y aumenta la el mal olor y desgaste - Costo considerablemente más elevado respecto a otras opciones equivalentes - Reducida disponibilidad de tallas

Benchmarking

Recopilación productos existentes en el mercado

2. Schwalbe Airless System



Descripción

Cabecal de boxeo PDX, cuero maya, equipo de cabeza para entrenamiento MMA, Muay Thai Kickboxing, acolchado multicapa.

Análisis formal

Color Negro.

Materia Eva (acolchado) / Polipiel (revestimiento)

Talla M / L

Dimensiones 22,50 x 16 x 22,50 cm

Peso = 400 g

<https://www.schwalbe.com/america/eq4posidfitness-entrenamiento-kickboxing-acolchado-ml-muay-thai-kickboxing-pdx>

Análisis técnico productivo		Análisis Comercial	
Estimación del Costo	Poca información N/A.	Precio comercial	= 42,99 USD
Sistemas de producción	Producción batch	Sistema de empaque	Sistema de embalaje en saco plástico
Fuente de energía	Producción Energía Eléctrica y térmica, mecánica.	Distribución	Canal de distribución directo: Venta online Locales físicos
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - La amortiguación de espuma absorbe de manera uniforme la superficie en toda la superficie. - Amortiguación alrededor de las orejas para reducir el impacto de gancho y depeño. - El diseño ayuda aún más a proporcionar al camino para que el aire fluya, manteniéndote fresco y libre de sudor. - Gancho y buca rápido para un ajuste fácil y cómodo. - Mantiene la cabeza en una posición estable sin obstaculizar los movimientos 	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Solo puede ser ajustado de la parte inferior del mentón - Reduce considerablemente el ángulo de visión - Reducida disponibilidad de talla

Benchmarking

Recopilación productos existentes en el mercado

3. Leone Combat CS410



Descripción

Cabecal de boxeo más vendido de Leone 1947 con protección Anti-shock en la parte superior de la cabeza. Cierre elástico con velcro en el mentón y nuca para un cierre más rápido y total adherencia.

Análisis formal

Color Negro, Blanco

Materia Poliestar (revestimiento) / poliuretano (acolchado)

Talla M / L

Dimensiones 40 x 30 x 20 cm

Peso 450 g

<https://eq4posidfitness.com/cabecal-boxeo-leone-combat-cs410/>

Análisis técnico productivo		Análisis Comercial	
Estimación del Costo	Poca información N/A.	Precio comercial	= 89,60 USD
Sistemas de producción	Producción batch	Sistema de empaque	Caja de cartón, para embalaje de productos al detal.
Fuente de energía	Producción Energía Eléctrica y térmica, mecánica.	Distribución	Canal de distribución directo: Venta online Locales físicos
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Acolchado Anti-shock en la parte superior. - Ajuste con cierre de velcro en el mentón y nuca. - Acolchado lateral para protección de oídos y ranura anti perforación de tímpano. - Forro interior suave, cómodo y antideslizante. 	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - El material de relleno absorbe menos energía, es más blando - No posee protección en pómulos - El forro interior de tela absorbe el sudor, y aumenta el mal olor y desgaste - Costo considerablemente más elevado respecto a otras opciones equivalentes

Benchmarking

Recopilación productos existentes en el mercado

4. VENUM-04356-114



Descripción

Cabecal de boxeo Venum Challenger, con protección de espuma de triple densidad, cierre de velcro posterior.

Análisis formal

Color Café, Blanco con negro

Materia Polipiel (revestimiento), Poliuretano (acolchado)

Talla S / M / L / XL

Dimensiones 30 x 26,39 x 17,70 cm

Peso 460 g

<https://www.venum.com/america/eq4posidfitness-entrenamiento-kickboxing-acolchado-ml-muay-thai-kickboxing-pdx>

Análisis técnico productivo		Análisis Comercial	
Estimación del Costo	Poca información N/A.	Precio comercial	45,82 USD
Sistemas de producción	Producción batch Sistemas producción modular.	Sistema de empaque	Sistema de embalaje en saco plástico
Fuente de energía	Producción Energía Eléctrica y térmica, mecánica.	Distribución	Canal de distribución directo: Venta online Locales físicos
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Protección de la frente, los pómulos y la barbilla - Ultra ligero - Espuma de triple densidad - Cierre de velcro en la parte posterior - Campo de visión bien conservado 	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Solo puede ser ajustado de la parte posterior (circunferencia del cráneo) - No puede ser ajustado en la parte del mentón

Si bien cómo se puede observar en la figura 29 se realiza una recopilación de datos físicos, presunción técnica y comercial, así como sus ventajas y desventajas, para efectos relacionados a lo que concierne en el desarrollo del proyecto, se concluye que los materiales presentes en el acolchado de los cabezales de boxeo son: Etilvinilacetato (EVA); Poliuretano (PU); Polipropileno (PP).

Y es así, con estos materiales en su correspondiente presentación de espuma, serán los evaluados y posteriormente comparado su desempeño frente al impacto con la estructura planteada.

4.11 Simulaciones comparativas

En esta etapa del proyecto se procedió a diseñar y realizar una serie de simulaciones con el objetivo de evaluar los materiales más utilizados para el acolchado en los cabezales de boxeo según lo concluido en la actividad de benchmarking con alternativas de la estructura previamente seleccionada, para determinar el comportamiento de las tensiones, deformaciones y la fuerza transmitida a un cuerpo frente a un impacto teniendo como protección intermedia los materiales y/o estructuras planteadas.

Partiendo de la información resultante de los principales materiales utilizados para el acolchado de cabezales de boxeo, se realizaron tres probetas con espesores: 1 cm, 2 cm y 3 cm para cada material; así como también algunas probetas de la estructura seleccionada con algunas variaciones.

Para esto se tendrán en cuenta las siguientes variables estándar para todas las simulaciones:

Tabla 14*Variables estándar para simulaciones*

	Dimensiones: 20 x 20 x 5mm
Objeto de impacto	Volumen: 1400 mm ³
	Material: Valores hueso de la mano
Velocidad	8888 mm/seg ó 32km/h
Tiempo de ejecución	0,00045 s ó 4,5e-004
	Dimensiones: 20 x 14 x 1 mm
Objeto fijo inferior	Volumen: 280 mm ³
	Material: Valores hueso del cráneo

Nota. La velocidad promedio del golpe de un boxeador equivale a 32 km/h

Finalizada las simulaciones se procedió a organizar los valores máximos que se presentan a lo largo de cada ejecución de Tensiones (Mpa); Deformaciones (mm) y Aceleraciones (m/seg²) para realizar una comparación numérica de los diferentes materiales y estructuras, y determinar cual representa un mejor rendimiento frente a un potencial impacto. Adicionalmente partiendo de los datos correspondientes a la aceleración, se aplicará la siguiente formula:

$$F=pVa^{45}$$

Esta fórmula es una versión simplificada de la ecuación de la segunda ley de Newton, donde se utiliza la densidad del material (p) y el volumen (V) para calcular la masa, que multiplicada por la aceleración máxima (a) dará como resultado la fuerza (N) que experimenta la pieza, y así junto con los valores de tensiones y deformaciones, determinar correctamente que material o estructura representa un mejor desempeño. Es notable destacar que dicha formula es una aproximación, y que existen otros factores como la velocidad o el ángulo de impacto que pueden intervenir en la fuerza total transmitida.

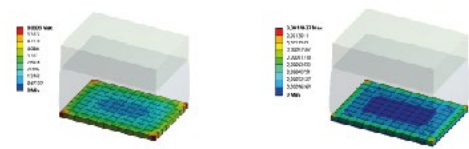
Figura 30

Simulación de impacto

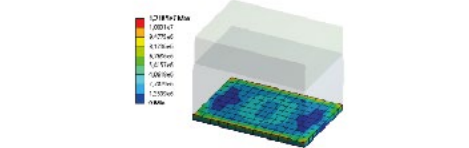


EVA

TENSIONES DEFORMACIONES

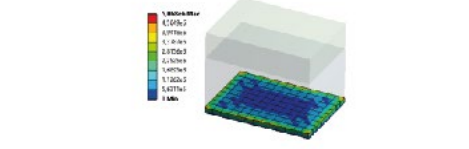


ACELERACIONES



Peso espuma: 2,66 Gr

ACELERACIONES

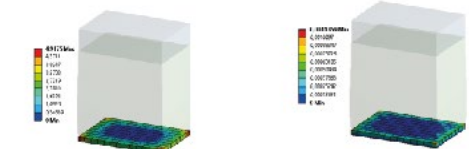


Peso espuma: 1,1171 Gr



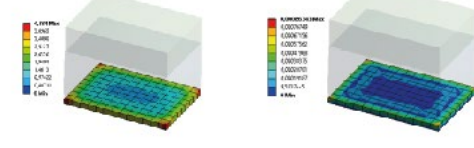
EVA

TENSIONES DEFORMACIONES

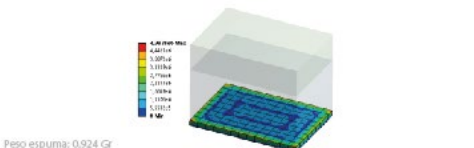


PU

TENSIONES DEFORMACIONES



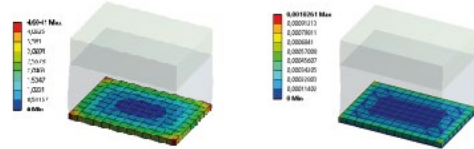
ACELERACIONES



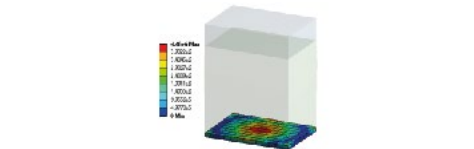
Peso espuma: 0,924 Gr

PP

TENSIONES DEFORMACIONES



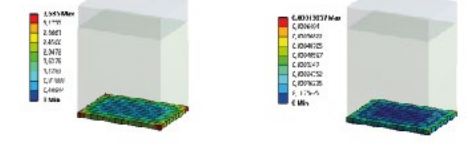
ACELERACIONES



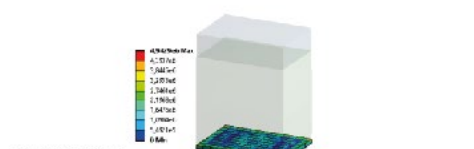
Peso espuma: 5,32 Gr

PU

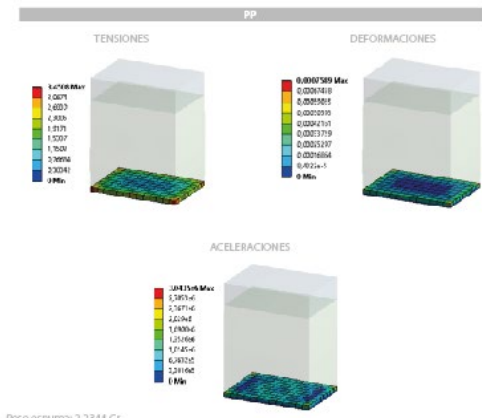
TENSIONES DEFORMACIONES



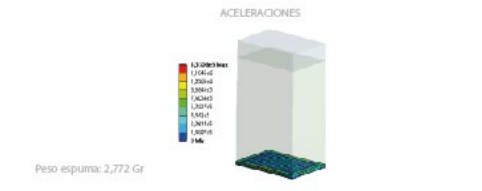
ACELERACIONES



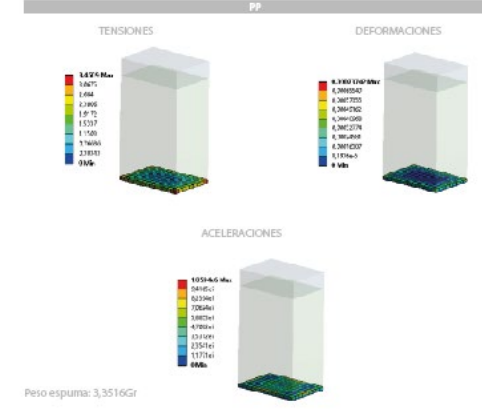
Peso espuma: 1,848 Gr



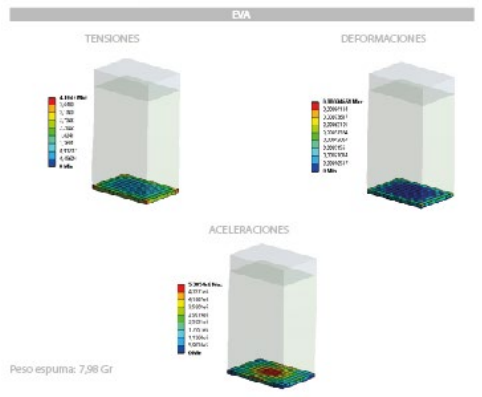
Peso espuma: 2,2344 Gr



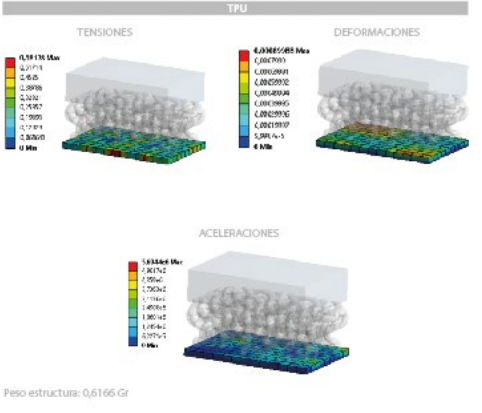
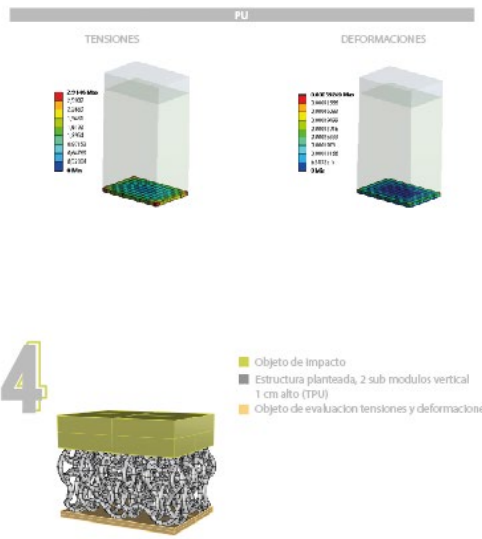
Peso espuma: 2,772 Gr



Peso estructura: 3,3516Gr



Peso espuma: 7,98 Gr



Peso estructura: 0,6166 Gr

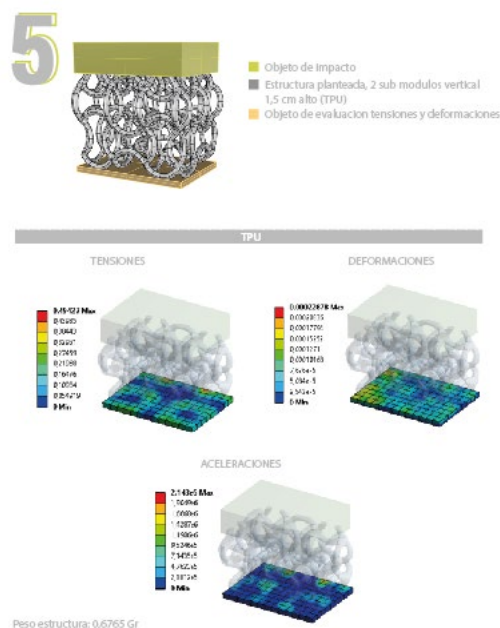


Tabla 15

Resultado de tensiones, deformaciones y aceleración máximas

Estructura	Material	Tensiones Mpa	Deformaciones mm	Aceleraciones m/seg2	Peso Gr
Espuma 1 cm	EVA	6,0605	0,001463	12185	2,66
	PU	4,384	0,0008634	4997,8	0,924
	PP	4,6041	0,0010261	5068	1,1172
Espuma 2 cm	EVA	4,9175	0,0011359	4480	5,32
	PU	3,6885	0,00073057	4942,9	1,848
	PP	3,4508	0,0007589	3043,5	2,2344
Espuma 3 cm	EVA	4,1043	0,0009465	5385,4	7,98
	PU	2,9146	0,0005924	1332,6	2,772
	PP	3,4509	0,0007374	1059,4	3,3516
2 SMV 1 cm	TPU	0,58178	0,00089988	5604,4	0,6166
2 SMV 1.5 cm	TPU	0,49427	0,00022978	2143	0,6765

Nota. Eva (Etilvinilacetato); PU (Poliuretano); PP (Polipropileno); TPU (Poliuretano termoplástico); SMV (sub modulo vertical).

Teniendo en cuenta la formula inicial y los valores de volumen y densidad del objeto fijo inferior, se procede al cálculo de fuerza total experimentada, posterior al impacto y teniendo como protector intermedio las diferentes espumas y estructuras evaluadas.

Tabla 16

Cálculo de fuerza total experimentada durante el impacto

F=pVa	Material	Aceleraciones m/seg ²	Volumen objeto inferior m ³	Densidad objeto inferior kg/m ³	Fuerza (N)
Espuma 1 cm	EVA	12185	0,00000028	2000	6,8236
	PU	4997,8			2,798768
	PP	5068			2,83808
Espuma 2 cm	EVA	4480			2,5088
	PU	4942,9			2,768024
	PP	3043,5			1,70436
Espuma 3 cm	EVA	5385,4			3,015824
	PU	1332,6			0,746256
	PP	1059,4			0,593264
2 SMV 1 cm	TPU	5604,4	3,138464		
2 SMV 1.5 cm	TPU	2143	1,20008		

Nota. Los valores de volumen y densidad aplican igual para todos los cálculos.

Como se observa en la tabla 15, en la recopilación de datos se pudo determinar que entre los tres materiales evaluados que componen el acolchado de los cabezales de boxeo, el que presenta un mejor rendimiento en cuanto a minimizar la transmisión tensiones y minimizar la deformación del objeto que se desea proteger, es la espuma de poliuretano, aunque con valores muy similares a la espuma de polipropileno en sus diferentes presentaciones.

Por otro lado, como se observa en la tabla 16, y continuando con la comparación de los materiales empleados en los productos existentes, se pudo determinar por medio de la comparación

de la fuerza resultante transmitida, la espuma de polipropileno en su presentación de 3 cm, presenta un mejor rendimiento.

Retomando nuevamente la información de la tabla 15 pero con el propósito de analizar las disposiciones y tamaños de la estructura planteada, se observa que la estructura con una mayor mitigación en la transmisión de tensiones tanto como las deformaciones, es la correspondiente a la compuesta por dos sub módulos en dirección vertical, y una altura de 1,5 cm.

Es así que, realizando una comparación, la estructura planteada “2 SMV 1.5 cm” frente a la espuma de polipropileno de 3cm, presenta una reducción del 85,67 % en los valores máximos de tensión, así como un 68,83% menos en valores correspondientes a la deformación.

En cuanto a los valores correspondientes a la fuerza total transmitida si bien la estructura no presenta una mejoría notable, es importante considerar dos aspectos importantes, primero que la estructura presenta un 79,81% menos de masa, respecto a la espuma de 3cm de polipropileno, igualmente destacar y remitir la comparación del comportamiento de las estructuras en los gráficos de las aceleraciones correspondientes, donde se puede apreciar en mayor medida el comportamiento en función del código de color.

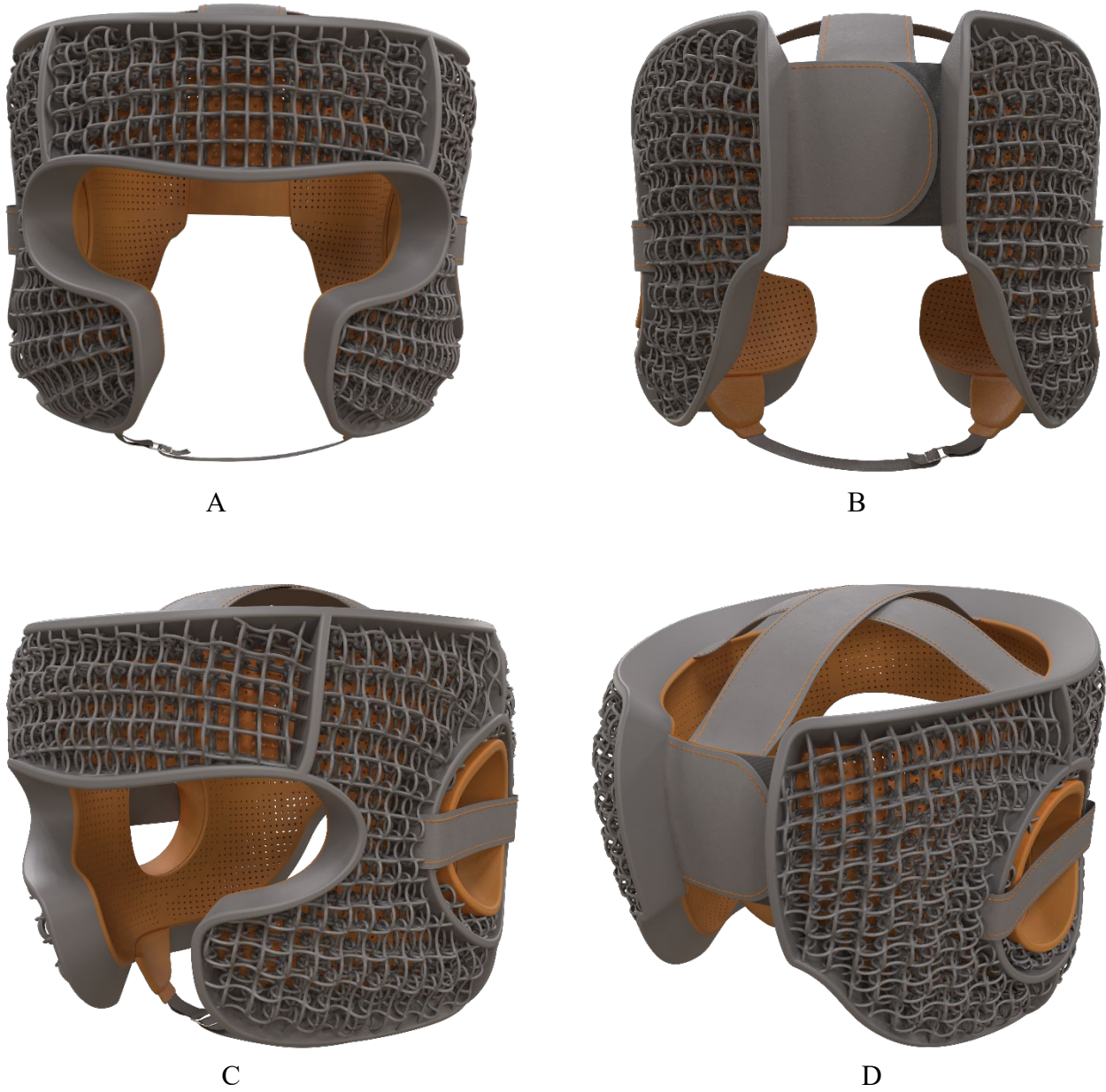
4.12 Emulación tridimensional

4.12.1 Modelado 3D

Con la finalidad de lograr una visualización cercana de lo que podría ser la aplicación de la estructura resultante de la actividad anterior, se realizó un modelado tridimensional en el software rihnoceros y posteriormente una renderización con ayuda del motor de renderizado corona render en 3ds Max.

Figura 31

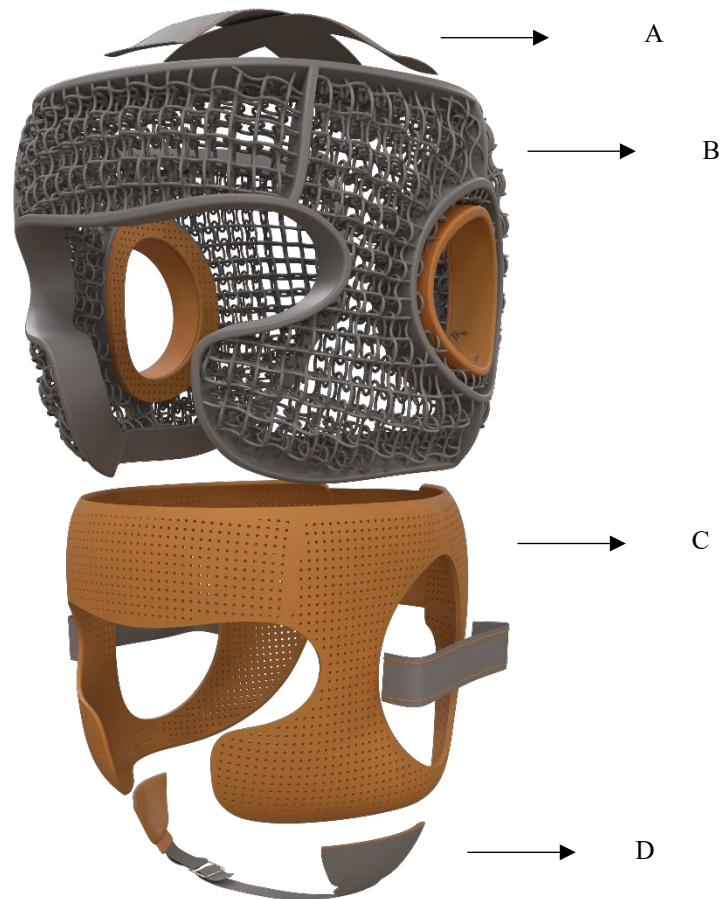
Vistas modelo 3d



Nota. A. Vista Frontal; B. Vista posterior; C. Vista isométrica; D. Vista isométrica posterior

Figura 32

Vista explosionada modelo 3d



Nota. A. Ajuste superior; B. Estructura auxética; C. Capa interior eva; D. Ajuste mentón

4.12.2 Prototipado rápido

El prototipado es una técnica utilizada para la creación de prototipos de manera rápida, es un proceso iterativo que permite diseñar y construir prototipos de diferentes calidades en corto tiempo, el objetivo principal fue evaluar diferentes características y generar posibles soluciones a los inconvenientes que se puedan presentar en el proceso, y así optimizar los tiempos y la utilización de recursos en el proceso del desarrollo de productos.

Figura 33

Impresión 3d Tpu



Nota. En color azul se observa la estructura correspondiente al módulo obtenido de estructura presente en la cabeza de la libélula y en color blanco la obtenida partiendo del módulo generado de la sección transversal del ala de la mariposa.

El objetivo principal de esta primera impresión que se realizó en Tpu fue tener un acercamiento al material y el comportamiento de este con el tipo de estructura que se venía planteando, es así que se realizó la impresión de las estructuras correspondientes a las construidas con los módulos obtenidos de la sección transversal del ala de la mariposa, y los correspondientes a la estructura presente en la cabeza de la libélula.

Esta impresión se realizó en una impresora de filamento de baja calidad, si bien el resultado no fue el esperado, pues como se observa la estructura presenta un diámetro de “tubería” reducida y el programa predeterminado de esta impresora genera excesivo material residual, como material de apoyo. Da pie al rediseño de la estructura y a tener en cuenta variables como diámetros y organización controlada de apoyos que permitir una impresión más aceptable y limpia.

Figura 34

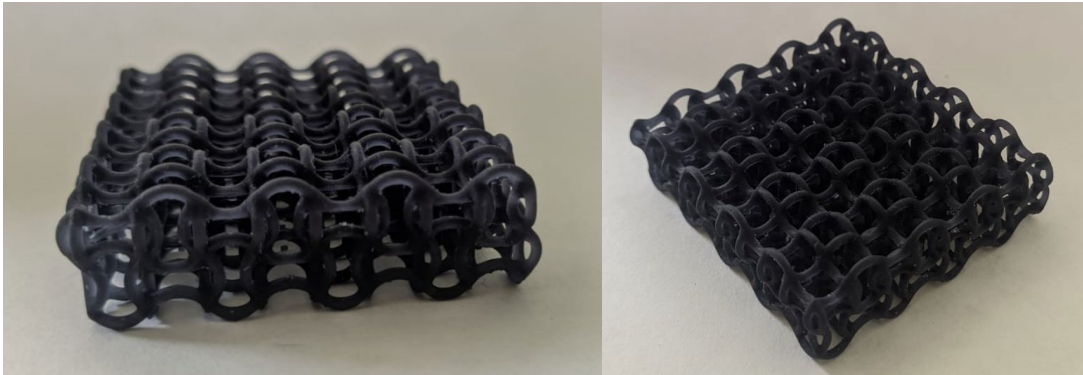
Impresión 3d en resina flexible



Posterior a la selección de la estructura resultante de los módulos obtenidos de la estructura presente en la cabeza de la libélula, se determinó viable la impresión tridimensional en un tamaño de 5 x 5 x 5 cm, en este caso en resina flexible shore 50 y con tecnología de estereolitografía (SLA), donde ya finalizada, permitió físicamente la confirmación del comportamiento propio de una estructura auxética, en donde aplicando una presión en la parte superior puede verse como presente deformaciones reentrantes.

Figura 35

Impresión 3d resina flexible 70A



Con base al comportamiento y la aplicación seleccionada, se realizó la impresión de la estructura que se encuentra presente en el renderizado la cual se puede observar en la figura 35 con escala real y el material que presenta las propiedades más cercana al TPU, que en este caso es la resina flexible Shore 70A, esto debido a la recomendación de las personas expertas en la impresión 3D las cuales manifestaron realizar la impresión en tecnología SLA para optimizar el tiempo y la seguridad de la misma por su forma compleja.

Conclusiones

La bioforma y la biomimesis representan una fuente inagotable de inspiración para diseñadores, puesto que la naturaleza en su proceso evolutivo de adaptación al medio, han desarrollado estructuras y formas complejas de crear por el ingenio humano sin tener un referente claro, pero que sin duda resultan ser eficientes, funcionales y con una belleza estética admirable que aportan significativamente en la evolución del diseño industrial a nivel global. Siendo un camino hacia la excelencia creativa y el desarrollo de productos que no solo satisfacen las necesidades presentes, sino que también consideran el legado que dejaremos a las generaciones futuras.

La metodología indirecta se presenta como una herramienta valiosa para la elaboración de esta estructura auxética en el desarrollo del proyecto. Esta metodología permite abordar el diseño de manera sistemática y creativa, basada en la observación e investigación inicial, fomentando la creatividad, la exploración de alternativas, el prototipado y las evaluaciones, hasta la obtención de un resultado final eficiente, cuestionando y comprendiendo el porqué de las estructuras, conceptos y funciones observadas, despertando la curiosidad y el estímulo de la búsqueda de soluciones que se fundamentan en principios sólidos.

Si bien cómo se puede observar en las simulaciones comparativas (apéndice H) en términos generales la estructura auxética presentada tiene un comportamiento superior a los materiales existentes en el tema específico tratado, existen variables que en otras condiciones podrían presentar variaciones, es así que, ante un posible caso, debería realizarse un rediseño en cuanto a espesor y material, que puedan eventualmente cumplir con las necesidades requeridas. Ya que

algunos materiales impresos pueden ser menos duraderos o tener propiedades mecánicas inferiores en comparación con los materiales tradicionales utilizados en el mercado y se hace necesario la realización de pruebas de resistencia que garanticen que las estructuras auxéticas impresas cumplan con las necesidades requeridas.

Otro aspecto importante es la viabilidad de la utilización de tecnologías 3D para la producción a gran escala, principalmente los relacionados en la adquisición de la tecnología inicial, por lo que se hace necesario realizar un análisis de costos detallado para determinar si la inversión se traduce en beneficios económicos a largo plazo. Es fundamental evaluar las opciones de materiales más sostenibles y buscar prácticas de impresión 3D que minimicen el impacto ambiental, como el reciclaje de materiales y el uso de energías renovables.

Es importante destacar que para efectos relacionados con el presente proyecto se acoto en un tema específico que cumpliera con necesidades de tiempo y recursos, en consecuencia, se deja abierta la posibilidad a la futura utilización de esta estructura tridimensional como base de futuros proyectos o actividades de mayor complejidad basados en la evidencia del buen comportamiento de la misma, en este caso, frente a un potencial impacto.

Referencias bibliográficas

-
- ¹ Simberg, A. (1964). Los obstáculos de la creatividad. Recuperado de https://www.academia.edu/16569442/Los_obstáculos_de_la_creatividad_Alvin_L_Simberg_GMC
- ² Esquivas, M. T. (2004). Creatividad: definiciones, antecedentes y aportaciones. Recuperado de http://www.revista.unam.mx/vol.5/num1/art4/ene_art4.pdf
- ³ Revista de divulgación científica del Jardín Botánico de la Universidad de Valencia. (11 de agosto de 2013) Biomimética: aprender de la naturaleza para desarrollar tecnologías. Recuperado de <https://mitreyelcampo.cienradios.com/biomimetica-aprender-de-la-naturaleza-para-desarrollar-tecnologias/>
- ⁴ Capra Fritjof (2008). La ciencia de Leonardo. La naturaleza profunda de la mente del gran genio del Renacimiento.
- ⁵ López Forniés. I. (2012), Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético. Zaragoza, España, prensa de la universidad de Zaragoza.
- ⁶ Jerry A. POWELL. (2011). Lepidoptera: Morphology. Berkeley, University of California. P. 559–567.
- ⁷ Drachsler, K. mit einer neuen systematik schneller zu innovationen. Recuperado de: http://w3.ipa.fhg.de/PresseMedien/interaktiv/interaktiv_2003_01.pdf
- ⁸ ROSHKO, T. (2010) The Pedagogy of Bio-Design: Methodology Development. Vol 138. doi: 10.2495/DN100491
- ⁹ Estévez, H. A. B., Cabanzo, F., Delgado, T. C., Salgar, Ó. H., Soto, A. S. N., & Salamanca, J. (2018). Apuntes sobre el debate académico en Colombia en el proceso de reconocimiento

-
- gubernamental de la creación como práctica de generación de nuevo conocimiento, desarrollo tecnológico e innovación. Cuadernos de Música, Artes Visuales y Artes Escénicas, 13(1), 281-294.
- ¹⁰ Delgado, T. C., Beltrán, E. M., Ballesteros, M., & Salcedo, J. P. (2015). La investigación-creación como escenario de convergencia entre modos de generación de conocimiento. *Iconofacto*, 11(17), 10-28.
- ¹¹ AskNature. 2016. Proboscis Unwinds: Insects. [online] Recuperado de: <https://asknature.org/strategy/proboscis-unwinds/>.
- ¹² Shuker, K. P. N. (1970). *The Hidden Powers of Animals: Uncovering the Secrets of Nature*. Marshall Editions Ltd.
- ¹³ AskNature. 2020. Wing Surface Self-cleans: Insects. [online] Recuperado de: <https://asknature.org/strategy/wing-surface-self-cleans/>
- ¹⁴ Wordssidekick. 2020. Fuente De Relucientes Colores De Alas De Mariposas Reveladas. [online] Wordssidekick. Recuperado de: <https://es.wordssidekick.com/source-of-shimmering-butterfly-wing-colors-revealed-920>
- ¹⁵ Eisner, T. (2005). *For Love of Insects*. Fecha de publicación: 31/10/2005.
- ¹⁶ AskNature. 2016. Butterfly wing scale photonics. [online] Recuperado de: <https://asknature.org/idea/butterfly-wing-scale-photonics/>
- ¹⁷ AskNature. 2020. The scales of the wings help thermoregulation. [online] Recuperado de: <https://asknature.org/strategy/wing-scales-aid-thermoregulation/>
- ¹⁸ Slegers, N., Heilman, M., Cranford, J., Lang, A., Yoder, J., & Habegger, M. L. (2017). Beneficial aerodynamic effect of wing scales on the climbing flight of butterflies. *Bioinspiration & Biomimetics*. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa551d>

-
- ¹⁹ AskNature. 2020. Wing Scales Cause Light to Diffract and Interfere: Insects. [online]
Recuperado de: <https://asknature.org/strategy/wing-scales-cause-light-to-diffract-and-interfere/>
- ²⁰ Bodanis, D. (1992). *The Secret Garden: Dawn to Dusk in the Astonishing Hidden World of the Garden*. Simon & Schuster.
- ²¹ Miriam Zazo. 2018. ¿Cuántos ojos tiene una mosca? [online] Tienda animal. Recuperado de:
<https://www.tiendanimal.es/articulos/cuantos-ojos-tiene-una-mosca/>
- ²² AskNature. 2016. Corneal Gratings Reduce Adhesion: Insects. [online] Recuperado de:
<https://asknature.org/strategy/corneal-gratings-reduce-adhesion/>
- ²³ Universidad Nacional de Rosario. 2016. Hidrostática Hidrodinámica [online] Física.
Recuperado de:
<https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/5672/740116%20FISICA%20Hidrost%C3%A1tica-Hidrodin%C3%A1mica.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- ²⁴ AskNature. 2016. Eardrums Provide Directional Hearing: Insects. [online] Recuperado de:
<https://asknature.org/strategy/eardrums-provide-directional-hearing/>
- ²⁵ Shuker, K. P. N. (2021). *The Hidden Powers of Animals: Uncovering the Secrets of Nature*.
- ²⁶ Foy, S. (1983). *The Grand Design: Form and Colour in Animals*.
- ²⁷ AskNature. 2018. Adhesive Foot Pads Self-clean: Insects [online] Recuperado de:
<https://asknature.org/strategy/adhesive-foot-pads-self-clean/>
- ²⁸ Carde, R. T., & Willis, M. A. (2005). Navigational strategies used by insects to find distant, wind-borne sources of odor. *Journal of Chemical Ecology*, 31(4), 913-929.
- ²⁹ Burrows, M., & Sutton, G. (2012). Inter-leg coordination in the control of walking speed in insects. *Journal of Experimental Biology*, 215(9), 1425-1438.

-
- ³⁰ Jafari, F., Darvizeh, A., Dirks, J. H., & van Leeuwen, J. L. (2017). Compressive resistance of the locust and cricket tibia and its implications for insect bipedalism and comparative biomechanics. *Royal Society Open Science*, 4(3), 160802.
- ³¹ AskNature. 2020. Leg Senses Sound Strength and Direction: Insects [online]. Recuperado de: <https://asknature.org/strategy/microstructures-protect-from-damage/>
- ³² González, E. (1977). Contribución al estudio de la subfamilia Libellulinae (Odonata: Libellulidae) del estado de Veracruz. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Disponible en <https://repositorio.unam.mx/contenidos/221217>
- ³³ AskNature. 2016. MicrostructureOffers Efficient Flight: Insects. [online] Recuperado de <https://asknature.org/strategy/microstructure-offers-efficient-flight/>
- ³⁴ Gorb, N.; KeseL, A.; Berger, J. (2000). Microsculptureof the wing surface in Odonata: evidence for cuticular wax covering. *Arthropod Structure and Development*, Vol 29, Pag 129-135. [https://doi.org/10.1016/S1467-8039\(00\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S1467-8039(00)00020-7)
- ³⁵ AskNature. 2016. Wing Structure AllowsRapid Acceleration: Insects. [online] Recuperado de: <https://asknature.org/strategy/wing-structure-allows-rapid-acceleration/>
- ³⁶ Wigglesworth, V. 1978. Fisiología de los insectos. Acribia.España. pag 121-151.
- ³⁷ Fitzhugh, G.; Marden, J. 1997. Maturational changes in troponin T expression, calcium sensitivity,and twitch contraction kinetics in dragonfly flight muscle. *Journal of Experimental Biology*,vol 200, pag 1473-1482. <https://doi.org/10.1242/jeb.200.10.1473>
- ³⁸ AskNature. 2016. Wing Structure AllowsRapid Acceleration: Insects. [online] Recuperado de: <https://asknature.org/strategy/wing-structure-allows-rapid-acceleration/>

-
- ³⁹ Corbet, P. 1999. Dragonflies behavior and ecology of Odonata. Comstock Pub. Associates. New York. pag. 383-424.
- ⁴⁰ Pacheco, A. (2013) Biomimética aplicada al diseño industrial (tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- ⁴¹ Tsharni, R; Paulm R; Peter, A. (2008). Neurologic injuries in boxing and other combat sports. *Neurologic clinics*, Vol 26, pages 257-270. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0733861907001272>
- ⁴² Bledsoe, G; Li, G; Levy, F. (2005). Injury Risk in Professional Boxing. *Southern Medical Journal*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/7472412_Injury_Risk_in_Professional_BoxingZ
- ⁴³ Roberts, GW; Allsop, D; Bruton, C. (1990). The occult aftermath of boxing. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* Vol 53, pages 373-378. Available at: <https://jnnp.bmj.com/content/53/5/373>
- ⁴⁴ Fréchette, F; Beaulieu, L; Rossignol, M; Beaulieu, P; Cusson, M; Boulianne, M; Côté, F. (1995). Injuries in Amateur Boxers in the Province of Quebec, Vol 19, pages, 251-260. Available at: <https://link.springer.com/journal/40279>
- ⁴⁵ Monsálvez, B. (2021). Análisis numérico de un casco de protección fabricado de material compuesto frente a impacto de baja velocidad considerando parámetros anatómicos. [Trabajo final de grado en ingeniería mecánica]. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/171259/Monsalvez%20%20Analisis%20numerico%20de%20un%20casco%20de%20proteccion%20fabricado%20de%20material%200compuesto%20frente%20a%20....pdf?sequence=1>