

ALAS DE AVIÓN OPTIMIZADAS INSPIRADAS EN DRYMOEA VELITERNA (LEPIDOPTERA: GEOMETRIDAE) (DRUCE, 1885)

Felipe Mac Allister

Estudiante del Gimnasio Campestre

Martín Pardo

Estudiante del Gimnasio Campestre

Martha C. Gómez Tobar

Directora Centros de Estudios en Ecología.
Gimnasio Campestre

Correspondencia para los autores:

mcgomez@campestre.edu.co

Recibido: 21 de marzo de 2023

Aceptado: 5 de mayo de 2023



RESUMEN

La biomimesis es la rama de la ciencia que se dedica al estudio de la naturaleza con el fin de crear inventos en beneficio de la humanidad. Bajo el marco de la biomimesis, la presente investigación se ocupó de optimizar las alas de los aviones, al emular la microestructura de las escamas de las alas de *Drymoea veliterna*; polilla hallada y capturada en el Gimnasio Campestre, en Bogotá, Colombia. Para ello, se desarrolló la metodología de diseño en espiral propuesta por el instituto de biomimesis 3.8. Estas alas optimizadas pueden ayudar con la prevención de formación de hielo durante el vuelo; la evacuación de agua; y mejorar la aerodinámica, al hacer que el aire en la parte superior de las alas circule a mayor velocidad, disminuyendo la presión. El diseño propuesto deberá ser analizado en un contexto de ingeniería aeronáutica para determinar su eficiencia, factibilidad y posibles modificaciones.

Palabras clave: biomimesis, *Drymoea veliterna*, optimización de alas, investigación y creación

SUMMARY

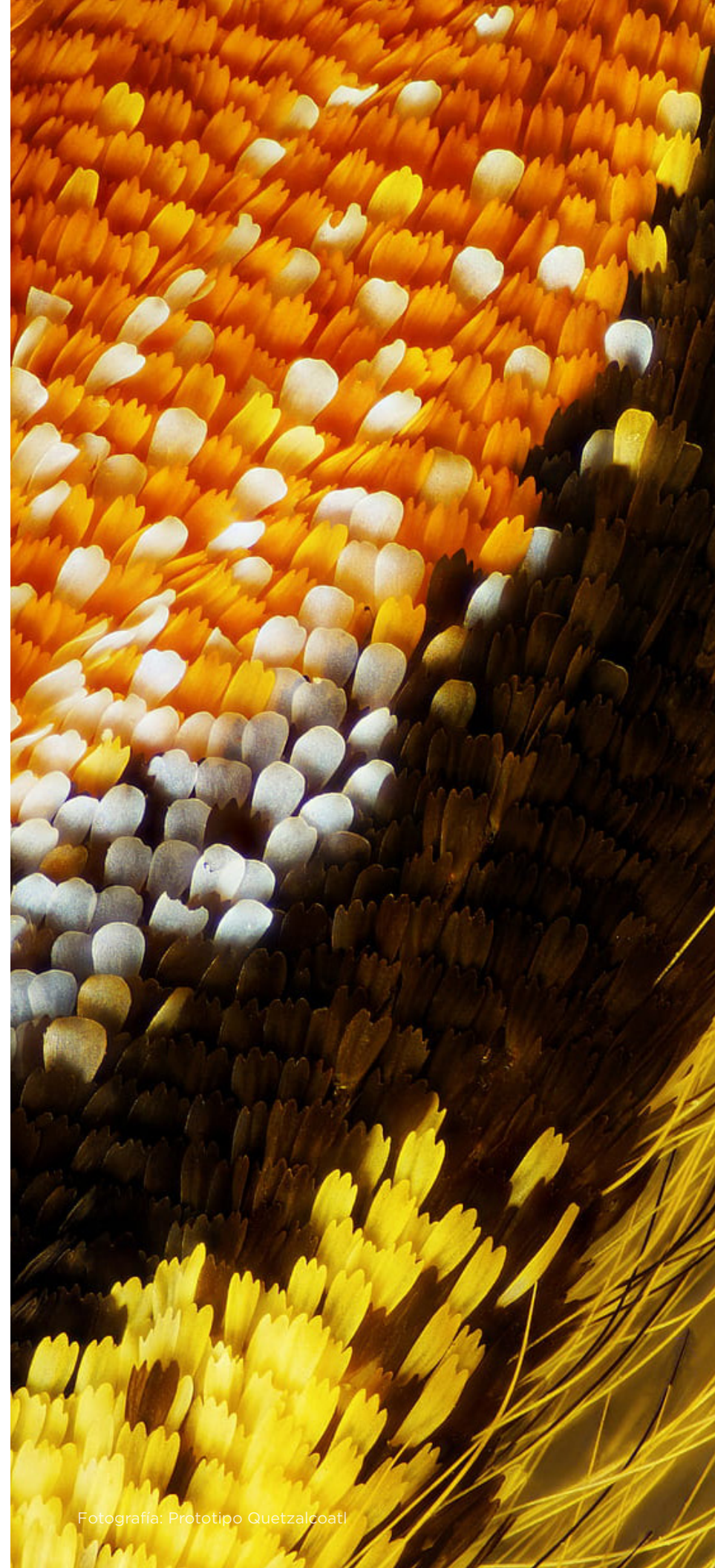
Biomimicry is a branch of science that focuses on the study of nature to create inventions that improve humanity in a certain aspect. With the approach of biomimicry, the present investigation optimized plane wings by emulating structures seen on the scales of *Drymoea veliterna*; a moth found and captured in the Gimnasio Campestre, in Bogota, Colombia. For the development the methodology proposed by García et.al was adopted under the focus of creative research. The virtual 3D model of the wing was constructed in the programs Rhinoceros 3D and Blender. The optimized wings can help with reducing the formation of ice, the evacuation of water, and improve the aerodynamics of the wings, by improving airflow in the upper part, thus increasing speed, and reducing pressure. The proposed design should be analyzed under an engineering context to determine its precise efficiency, and possible modifications.

Key words: Biomimicry, *Drymoea veliterna*, wings optimization, and creative research

INTRODUCCIÓN

La biomimesis es una rama de la ciencia relativamente nueva, fue introducida por primera vez por Janine Benyus en su libro *Biomimicry innovation inspired by nature* (1997). La rama estudia la naturaleza como inspiración para crear inventos en beneficio de la humanidad. Benyus describe a la naturaleza como: modelo, medida y mentor. La biomimesis toma los modelos de la naturaleza, ya sea de un organismo o ecosistema, para imitarlos o inspirarse en estos diseños con el fin de resolver problemas del humano. También, es capaz de determinar el estándar ecológico para juzgar las innovaciones de los humanos, ya que la naturaleza sabe qué funciona, qué es apropiado, y qué prospera. Por último, introduce un nuevo acercamiento, proponiendo una era en la que no se extrae, pero se aprende de la naturaleza y sus años de evolución (Aziz & El Sherif, 2016; Benyus, 2013; Gamage & Dayarathne, 2012).

La biomimesis tiene un rango de acción amplio, haciendo que esta se logre implementar en diferentes contextos e incluso áreas de estudio. Se han evidenciado casos en donde la naturaleza se toma como inspiración para crear modelos, ecológicamente sostenibles, en campos como el diseño o la arquitectura. También se reconoce el término de 'biodiseño' el cual es utilizado frecuentemente en el área de la biomedicina, donde se utilizan procesos químicos, físicos o estructuras para poder desarrollar soluciones a los humanos tales como prótesis (El-Zeiny, 2012; Gamage & Dayarathne, 2012).



Fotografía: Prototipo Quetzalcoatl

Janine Benyus fundadora del Instituto de Biomimética propone tres niveles de aproximación al estudio biomimético:

- Organismo-forma: la escala es el organismo y por lo general, las estrategias de la naturaleza se emulan en la forma de las estructuras a nivel macroscópico, microscópico y nanoscópico.
- Función y comportamiento: en este nivel se consideran los mecanismos de funcionamiento.
- Ecosistemas: en este nivel se pretende llegar a imitar la interacción e integración de los elementos del ecosistema, como un sistema más complejo y holístico.

Asimismo, el Instituto de biomemética propone la metodología diseño en espiral que consiste en una serie de etapas que se desarrollan de acuerdo con dos diferentes caminos (ver figura 1):

Del reto a la biología: se parte de un problema específico y se buscan inspiraciones o inventos creados en la naturaleza para dar solución a dicho problema.

De la biología al reto: el invento de la naturaleza da origen a la solución de problema específico

MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del proyecto se adaptó y aplicó la metodología, biomimética diseño en espiral, propuesto por el Instituto de biomimesis 3.8 de lo biológico al reto (Figura 1). El estudio consistió observar generalidades y particularidades de las polillas, con especial atención en *Drymoea veliterna* con el fin de optimizar un desarrollo tecnológico inspirado en alguna de las características de esta polilla.

Descubrir

Se realizó una consulta sobre de las características generales de las polillas con énfasis en *Drymoea veliterna* con el fin de identificar algún tipo de 'lección' que pueda ser aplicada en la optimización del ala de avión. En el Gimnasio Campestre se capturaron tres ejemplares con jamas. A cada individuo se le hizo el proceso de montaje para su observación, además de identificar aquellas estructuras que podrían ser fuente de inspiración. Para este objetivo se empleó la observación macroscópica y microscópica de *Drymoea veliterna*. La observación macroscópica se realizó en el laboratorio de ecología del Gimnasio Campestre a través de un estereoscopio Carl Zeiss de referencia Stemi DV4. Entre tanto, la observación microscópica, se llevó a cabo en el centro de microscopía de la Universidad de los Andes. Con la técnica de secado a la intemperie y recubrimiento en oro, fueron tomadas las imágenes en el Microscopio de Barrido de Electrones (MBE)- de haz de iones focalizado (Tescan Lyra 3).

Abstraer - Identificar

A partir de imágenes macro y microscópicas, se planteó la pregunta: ¿Para qué le sirven a *Drymoea veliterna* algunas de estas estructuras? Para responder a esta pregunta se realizó una consulta para determinar la relación entre estructuras y funciones.

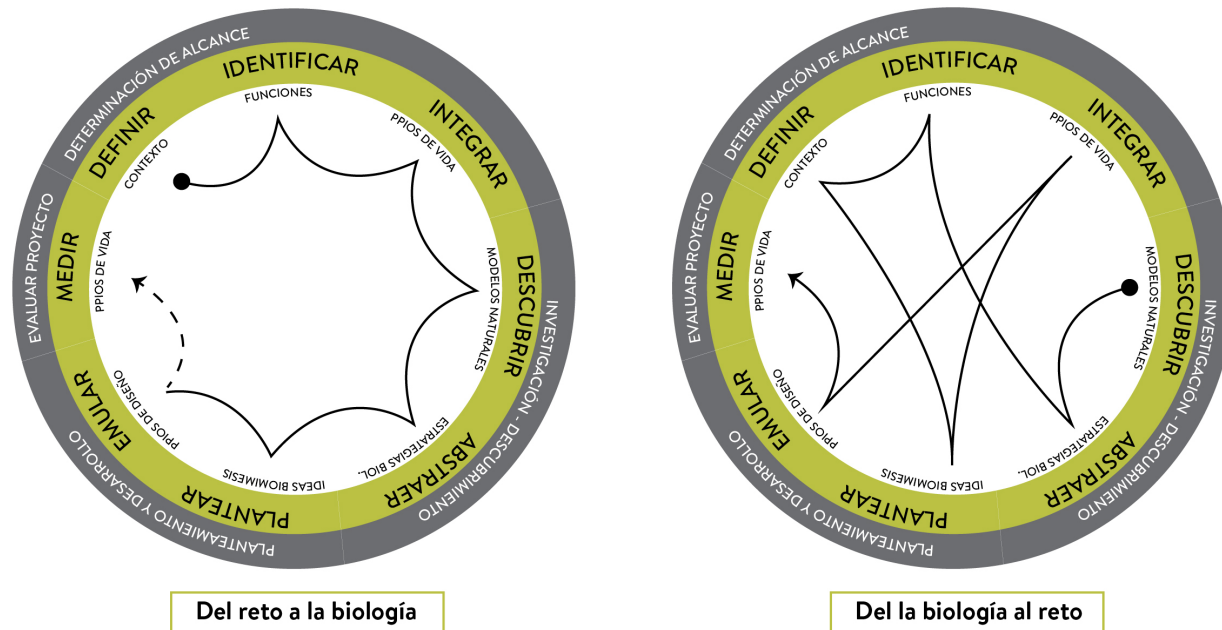


Figura 1. Metodología Diseño en espiral (Figuras tomadas de Jara, 2014, 2020)

Teniendo en cuenta los principios de la biomimesis, se estudió la polilla *Drymoea veliterna* (Lepidoptera: Geometridae) (Druce, 1885), perteneciente a la familia Geometridae y se planteó la siguiente pregunta ¿Cuál estructura de la polilla pueden emularse para optimizar el ala de los aviones Boeing?

Definir - Plantear

En esta etapa se realizó un resumen de todo lo identificado y descubierto en las imágenes para establecer las posibles aplicaciones, relacionando adaptaciones de la polilla y funciones específicas. Se establecieron, además, semejanzas y vínculos con objetos vistos en la cotidianidad, y guiar el camino para el diseño de un producto final.

Integrar - Emular

Una vez se establecieron aplicaciones, semejanzas y vínculos se optó por rediseñar el ala de un avión Boeing 787-8 (figura 2), aeronave que se caracteriza por su bajo consumo de combustible y su gran capacidad para el transporte de pasajeros, entre otras características (Drawingdatabase, 2022). A partir de medidas reales de esta referencia se modeló-emuló un ala a escala, en el programa de modelaje de 3D Blender y el programa de arquitectura Rhinoceros 3D.

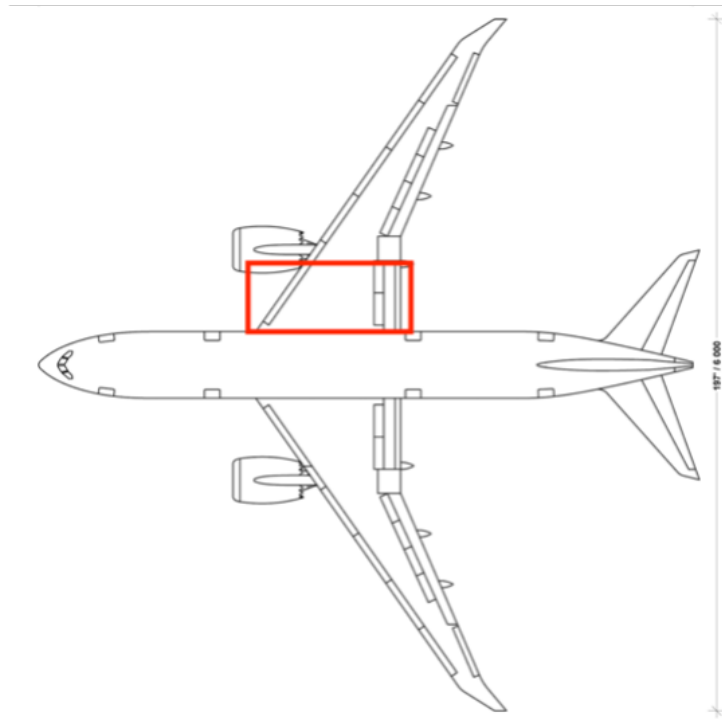


Figura 2. Tomada de Drawingdatabase, 2022. Plano del avión 787-8 tomado como base para el modelaje del ala. La parte circulada en rojo representa la parte específica modelada.

Evaluar

La biomimética sigue los principios de la vida, que nos instruyen a construir de abajo hacia arriba, optimizar en lugar de maximizar, usar la energía libre, aceptar la diversidad, adaptarse y evolucionar, usar procesos y materiales amigables para la vida, entablar relaciones simbióticas y mejorar la biosfera. Estas ideas se resumen en diez principios, que deben considerarse para evaluar el producto final.

Por último, se analizó el modelo con el fin de establecer el grado de emulación de las estructuras de la polilla y las lecciones aprendidas entorno a la biomimesis y su impacto en la sociedad.

DESARROLLO

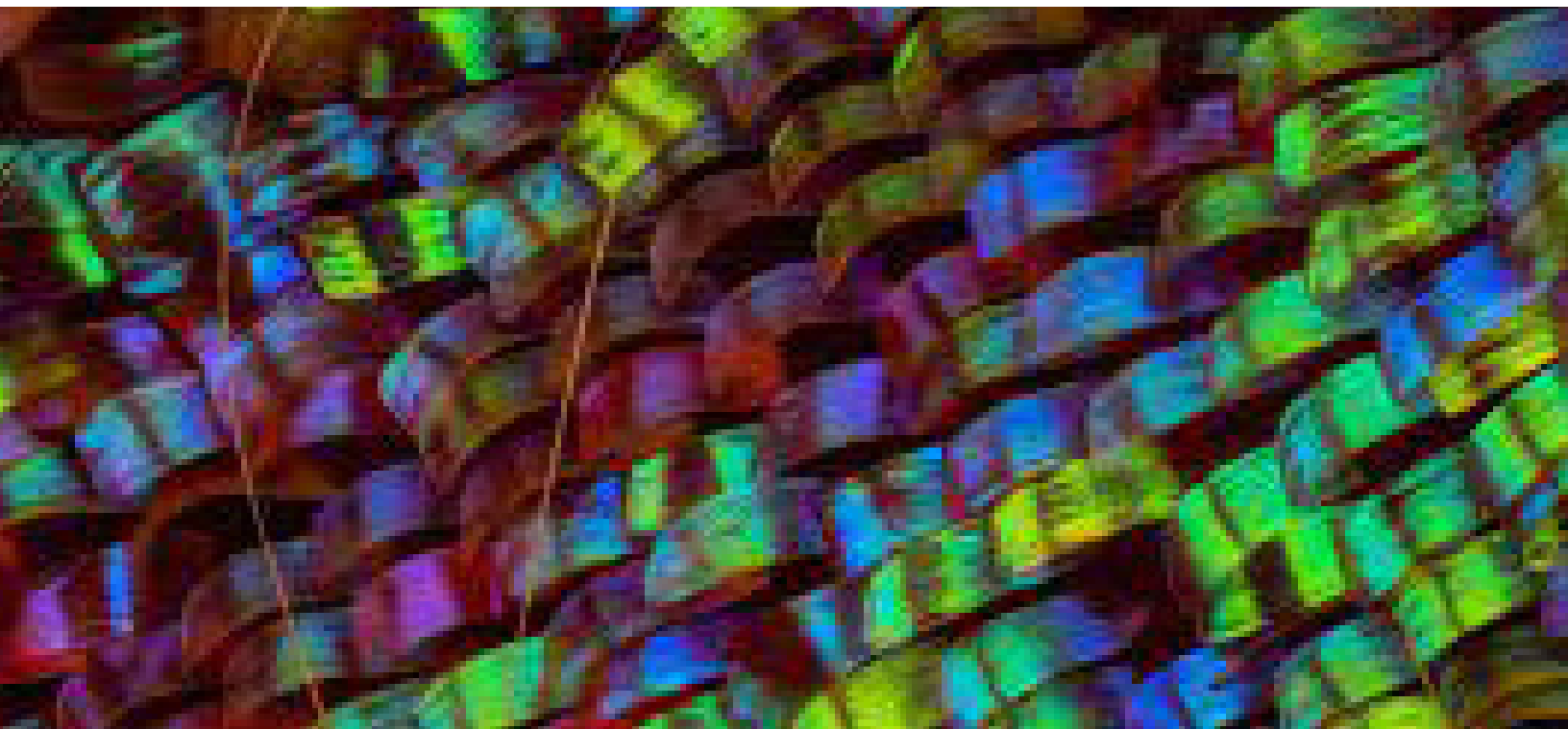
Descubrir

Todas las polillas cuentan con una estructura morfológica muy parecida, es decir que todas cuentan con cabeza, antenas, alas, tórax y abdomen, aunque unas son más grandes que otras cuentan con características bastantes similares lo que lleva a que sus adaptaciones en términos morfológicos sean muy parecidas (Urretabizkaya et al., 2010).

La etapa adulta se caracteriza por tener una cabeza en forma de globo, con ojos grandes compuestos de hasta 27000 omatidios. A veces tienen ocelos que se ubican en la parte superior de los ojos. Las antenas se ubican al lado de sus ojos y, como es el caso de *Drymoea veliterna* su forma clavada o capitada, es decir, puntiaguda. El aparato bucal, tiene una trompa que se encuentra enrollada, y es alarga cuando es necesario absorber un líquido dulce. Este se encuentra en la parte inferior de la cabeza, debajo de los ojos. Su dieta está basada en néctares y demás líquidos (Durán et al., 2014; Urretabizkaya et al., 2010).

El tórax se cubre de pelos, igual que el resto del cuerpo. En el cuerpo se encuentran las patas delgadas y frágiles. En algunas especies puede estar ausente el primer par. Las alas son estructuradas con una consistencia membranosa, cubierta de escamas que no son fácilmente perceptibles al ojo desnudo, ya que dejan ver el color estructural. Los dos pares de alas están presentes en la *D. veliterna*, moviéndose coordinadamente durante el vuelo debido a su sistema de acoplamiento (Bocaz & Parra, n.d.; Urretabizkaya et al., 2010). Las alas de las mariposas y polillas destacan por presentar una de las estructuras tridimensionales más complejas que existen, por la presencia de pigmentos claros y oscuros, y por el arreglo de nanoestructuras de quitina (Figura 3).

En el laboratorio de microscopía electrónica de la Universidad de los Andes se obtuvieron 30 imágenes de las siguientes estructuras: patas, alas, escamas, cabeza, antenas y ojos. A partir de estas imágenes se seleccionaron seis con escamas, alas y ojos. La figura 4 presenta secciones de las escamas que recubren las alas de la polilla. Los canales en las escamas tienen 2 micras de longitud, mientras que los agujeros que están en los canales son de 0.5 micras de diámetro y, las escamas recubren toda el ala, generando una capa encima de la estructura principal. El ojo de la polilla (figura 5) está compuesto por hexágonos regulares adjuntos en sus bases. En las intersecciones de varios hexágonos, sale un pelo que parece una espina.



Abstraer

Los canales en las escamas y su distribución en el ala tienen tres fines: evacuar el agua del ala, evacuar el polvo, y tener un mejor flujo del aire. El primero se cumple a través de los canales, y un recubrimiento hidrofóbico que tiene la estructura. Para evacuar el polvo utiliza los agujeros que se encuentran en los canales de las escamas. Por último, los canales también ayudan a que el flujo de aire sea más eficiente (Anipeda, 2022; Garcia-Barros E & Meneguz M, 2010). Con relación a los ojos, son órganos bien desarrollados, de hecho, los hexágonos son escamas que recubren el órgano sensorial del ojo. Las escamas protegen este órgano ya que es de importancia para la orientación y sentidos de la polilla (Garcia-Barros E & Meneguz M, 2010).

“Usualmente las escamas de las mariposas se disponen en hileras paralelas y cada hilera está compuesta por dos tipos de escamas, unas son más cortas que las otras y se intercalan una a una. Las escamas más cortas están parcialmente recubiertas por las del segundo tipo, que por lo tanto son más evidentes cuando se observan” (Ghiradella, 1998, citado por Jara, 2014).

Por otra parte “cuando observamos las escamas a más de 500 aumentos, cada escama se observa como una pluma, con el extremo agudo terminado en un pedúnculo que encaja en un alveolo de la membrana basal y el otro extremo festoneado con diversos tipos de ondulaciones característica para cada especie” (Monje, 2017).

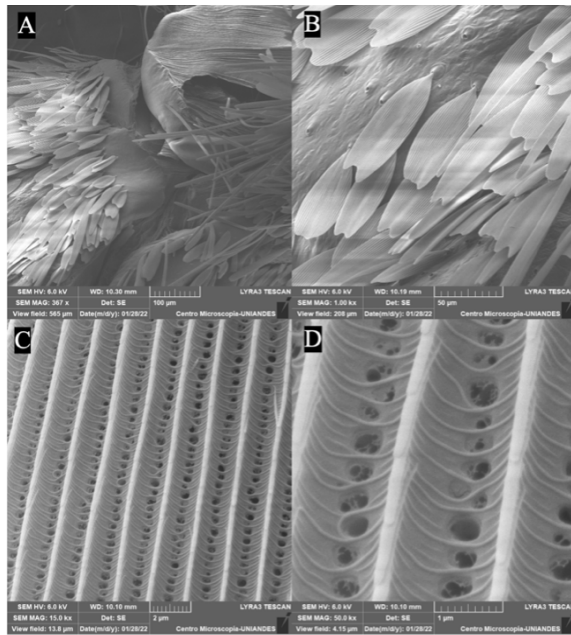


Figura 4 A. La unión entre el torso y el ala de la polilla. B. Escamas que recubren la estructura principal. C. Canales que se presentan en las escamas y agujeros en el mismo. D. Mayor ampliación a los canales presentes en las escamas y sus agujeros.

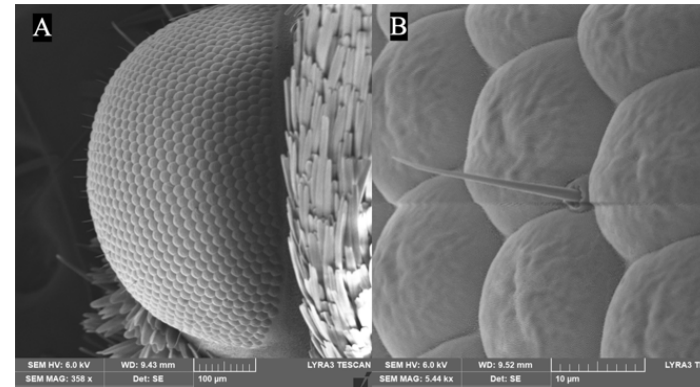


Figura 5. A. muestra la estructura general del ojo de la polilla. B. Muestra la estructura del ojo más ampliada donde se ven los hexágonos y un pelo sensorial.

La emulación fue la etapa más importante, ya que definió el proyecto en sí. Durante la emulación, el ojo de la polilla inspiró la creación de un domo con hexágonos que pudiera recolectar agua y utilizarla como refrigerante interno. Otra idea fue la creación de un casco protector con mejor aerodinámica que se inspira en los canales de las escamas de la polilla. La tercera propuesta fue la optimización de un ala de avión con base en los canales de las escamas.

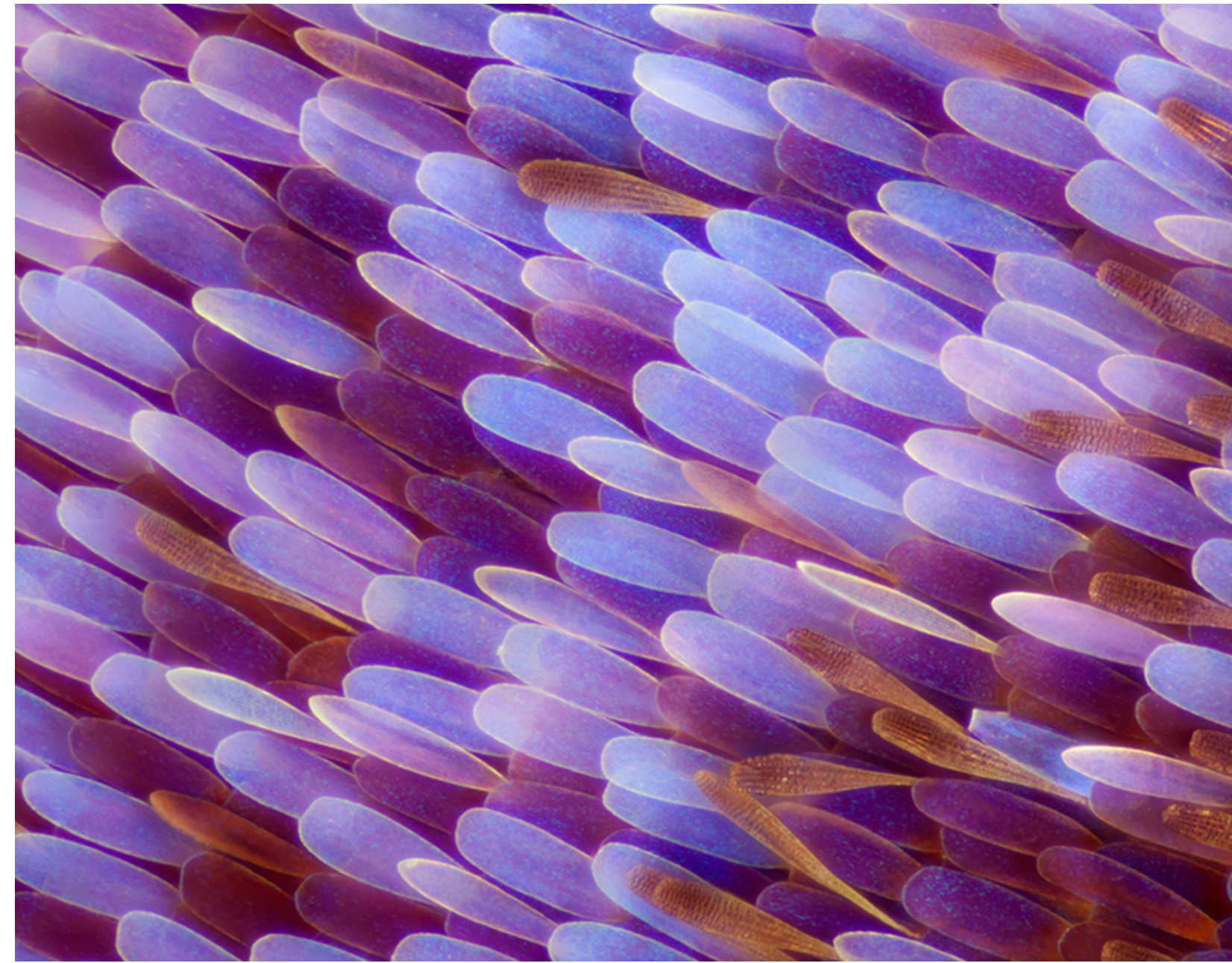
Luego de un examen detallado de las tres propuestas se eligió el modelo del ala de avión optimizada, ya que presentaba una alta relación con el contexto de la biomimesis, la posibilidad de optimizar un modelo existente y su trascendencia.

Integrar - Emular

En cuanto a la integración y la emulación se elaboró una tabla sintetizando el posible invento o innovación con las estructuras seleccionadas como fuente de inspiración (tabla 1).

INVENTO	ESTRUCTURA
Ala optimizada de avión	Canales en las escamas de las alas
Domo de recolección de agua	Ojos de la polilla con polígonos, y canales de evacuación de agua de las escamas
Casco de protección	Líneas y curvatura de las escamas para mayor aerodinamicidad

Tabla 1. Columna 1 contiene el nombre del invento, la columna 2 muestra bajo que estructuras se inspiró el mismo.



La figura 6 presenta el ala emulada del avión Boeing 787-8, y el cambio de textura de la parte superior de una superficie lisa a una corrugada producida por los canales, los cuales son de aproximadamente 0.5mm y recorren la parte superior a lo ancho del ala. Es decir que van desde la parte que corta el aire por primera vez, alargándose hasta el final del ala donde el aire termina su recorrido. Así, el aire viaja a través de los canales, y el agua puede salir del ala de manera eficiente. Los canales van unidos unos a los otros tal como se ve en las escamas de *Drymoea veliterna*, con un espacio de 0.25mm entre cada canal. El objetivo de estos canales será que el agua logre drenarse de manera más eficiente, además de un flujo de aire mejorado, proponiendo un diseño más aerodinámico

El modelo virtual tiene unas medidas aproximadas de 25cm de ancho por 35cm de largo que representa solo una sección del ala a una escala de 1:20 metros. Sin embargo, los canales es el único componente que no estará a escala. Esto es para aproximar el material y la textura en el modelo y a la escala real.

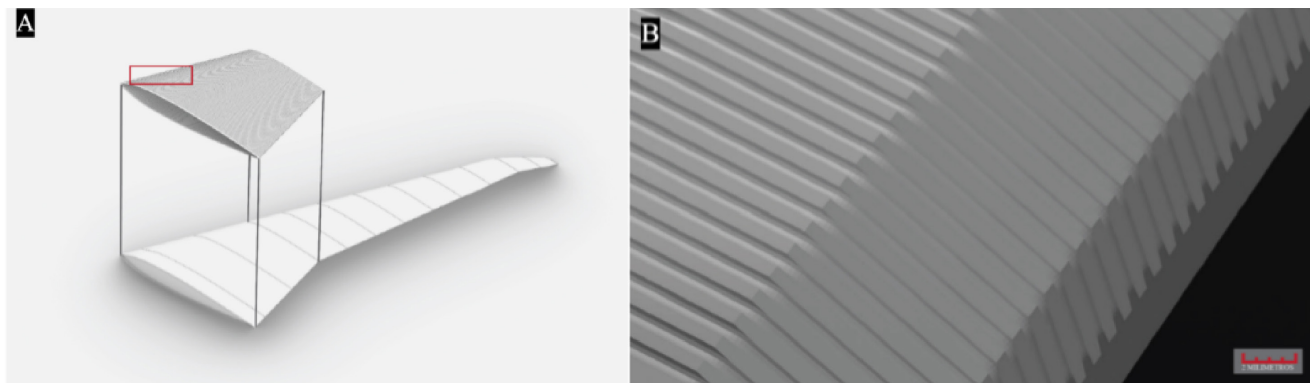


Figura 6. A. sección modelada con la textura con base en el ala del avión Boeing 787-8, la parte encasillada en rojo es la parte a la que le hace un acercamiento la imagen B. B. Detalle de los canales con escala. A la derecha microfotografía de los canales de *Drymoea veliterna*.

Otras consideraciones

Uno de los objetivos de la biomimesis es el desarrollo de inventos que hagan procesos humanos más eficientes y/o solucionen problemas con base en la naturaleza (Benyus, 1997; García et al., 2012; James Hargroves & Harrison Smith, 2006). Este proyecto propone la optimización de un sistema usado comúnmente por el humano, y podría ayudar a reducir el impacto ambiental del mismo a través de la reducción de gases, teniendo como fuente de inspiración algunas estructuras y adaptaciones de *Drymoea veliterna*.

El objetivo principal del diseño de las alas es el de optimizar el vuelo de un avión, para hacerlo aerodinámico, además de prevenir el congelamiento de éstas a bajas temperaturas o evitar que quizás el hielo se acumule en ellas. El modelo propone una estrategia para evitar acumulación de hielo en el ala, y mejorar el deshielo, el cual se logra a través del calor y la aplicación de líquidos que evitan la formación de hielo (Airlanded, 2022).

Además de lo anterior, es relevante mencionar que, el modelo propone, no solo evitar la formación del hielo, sino también el sobrecalentamiento del avión y sus motores, esto ayudaría a reducir la cantidad de accidentes por este tipo de incidentes, como el ocurrido con el vuelo 5022 de Spanair, el cual ocurrió debido a una falla en el motor del avión a causa de un sobrecalentamiento (La Vanguardia, 2008).



Las alas se han usado de diversas formas a través de la historia. En estas se aplican cuatro fuerzas en simultáneo en cualquier momento de vuelo. La fuerza más relacionada con el proyecto es la fuerza de sustentación que es generada por las alas, y opone a la gravedad, haciendo que avión se eleve. Dicha fuerza se explica con base en el principio de Bernoulli. Este dice que una sustancia (tal como el aire), a mayor velocidad, genera menor presión y viceversa. El ala, entonces, hace que el aire pase por la parte superior a mayor velocidad que en la parte posterior, de esta manera se crea más presión en la parte de abajo, que crea la fuerza de sustentación: impulsando el avión hacia arriba y contrarrestando la gravedad. Es por esto, que encontrar maneras que el aire vaya más rápido en la parte superior es crucial, así se reduce la cantidad de fuerza contraria a la de sustentación, producida por el viento en la parte superior del ala. Al tener mayor velocidad en la parte superior, se genera un ala más eficiente, ya que se necesita menos combustible para generar la misma cantidad de fuerza de sustentación en el ala (National Aeronautics and Space Administration, 2019a; Qin & Duan, 2017). La forma del ala tradicional cuenta con una superficie sustentadora (forma general de un ala), pues como se observa en la figura 7, se tiene un eje de simetría. El ala se hace más delgada conforme se desplaza la mirada hacia la derecha para cambiar la velocidad del aire. La parte que primero corta el aire es sustancialmente más gruesa que el extremo opuesto. Razón por la cual se tomó como modelo del ala de diseño propuesto (Sadraey, 2012).

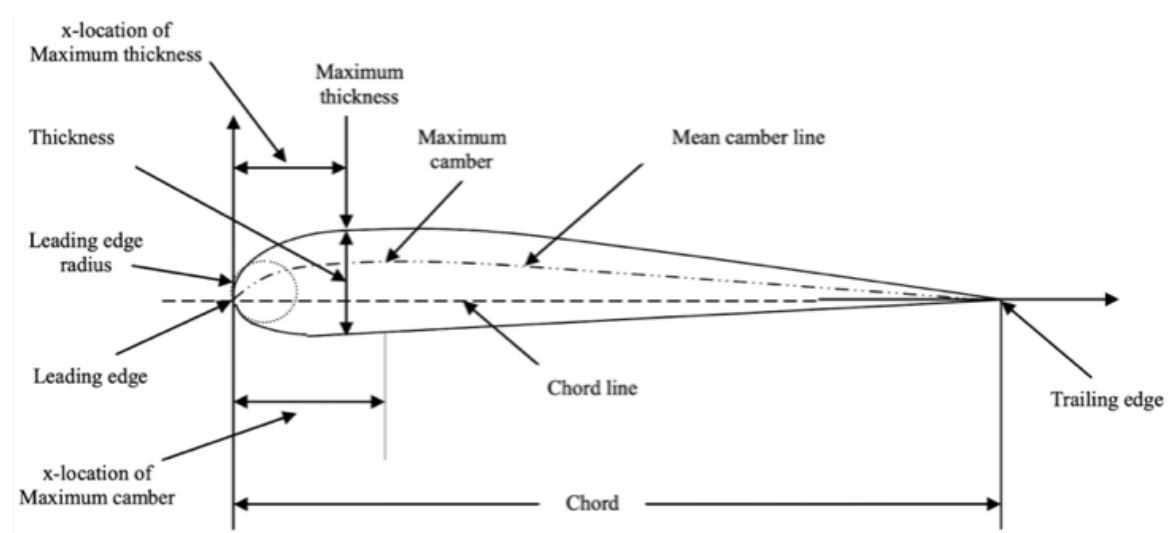


Figura 7. Tomada de Sadraey, 2012. Demuestra la forma tradicional de un ala con sus partes estructurales.

Según el análisis de *Drymoea veliterna*, los canales en sus escamas ayudan al flujo de agua y aire en la misma (Anipeda, 2022; Garcia-Barros E & Meneguz M, 2010). Al implementar este modelo en el ala, se podría mejorar el flujo del aire, haciendo que transite más rápido en la parte superior, aumentando la velocidad, y disminuyendo la presión generada en esta sección. De esta manera el ala podrá tener una eficiencia mayor, posiblemente reduciendo el gasto de combustible porque no se necesita tanto poder para generar la misma fuerza de sustentación.

Por lo general, los aviones tienen una serie de extensiones en la parte frontal y dorsal. Estas extensiones salen de la misma en momentos de despegue y aterrizaje, con el fin de aumentar el área superficial del ala y generar más fuerza de sustentación, teniendo más control del avión (National Aeronautics and Space Administration, 2019b). Por lo mismo, es necesario aclarar que los canales del ala se alinearían a las partes retráctiles de la misma, para poder asegurar que el camino del agua no interrumpa, y se evacue más rápido, al igual que el flujo de aire.

Los lepidópteros son insectos que cuentan con escamas en sus alas, estas tienen varias funciones y le sirven como adaptaciones a su entorno. Estas escamas sirven a los lepidópteros como método de aislante térmico. Además de lo anterior estas le ayudan a los insectos a repeler el agua y el polvo del aire para que así estos no interfieran con su vuelo. Esto lo logran debido a la presencia de canales llenos de cera dentro de sus escamas, que proporcionan un corredor para el agua y polvo que se encuentran al volar (Garcia-Barros E & Meneguz M, 2010; Museo Nacional de Historia Natural, 2016).

Un invento como esta cobra relevancia en el contexto actual debido al cambio en la forma de transportarnos, siendo por aire la forma más rápida de movernos de un país a otro o de una ciudad a otra. A lo largo de los años, desde la creación de la máquina voladora de DaVinci la humanidad ha buscado el mejor modo para movilizarse por aire, hasta llegar al diseño actual de las alas de un avión. Estas tienen como propósito principal el mantener el avión volando y ser lo más aerodinámicas posibles para que así este pueda tener un vuelo estable (Ruiz et al., 2019).

Aunque estas mejoras son importantes, tal vez la que cobra relevancia mencionar es la posibilidad de disminuir la contaminación que emiten los aviones, esto debido a que la aviación actualmente contribuye al 2% de la contaminación por gases de efecto invernadero (Guzmán, 2019; Marks, 2016). Esto no solo por el uso de combustibles fósiles sino también por los procesos involucrados en el deshielo de las alas del avión. Por último, otro aspecto a tener en cuenta al optimizar el ala y cambiar su diseño es considerar un posible cambio de material que valdría la pena ser investigado. Incluso pensar en una disminución de material para su construcción, o utilizar un material menos contaminante. Se debe examinar la resistencia e incluso la capacidad de soportar temperaturas bajas al volar, lo que podría mejorar exponencialmente la dificultad de algunos países para viajar a temperaturas muy bajas o cuando existan cualquier tipo de tormentas (Marks, 2016).

Este diseño propuesto deberá ser analizado bajo un contexto de ingeniería aeronáutica para determinar su eficiencia, factibilidad y posibles modificaciones.

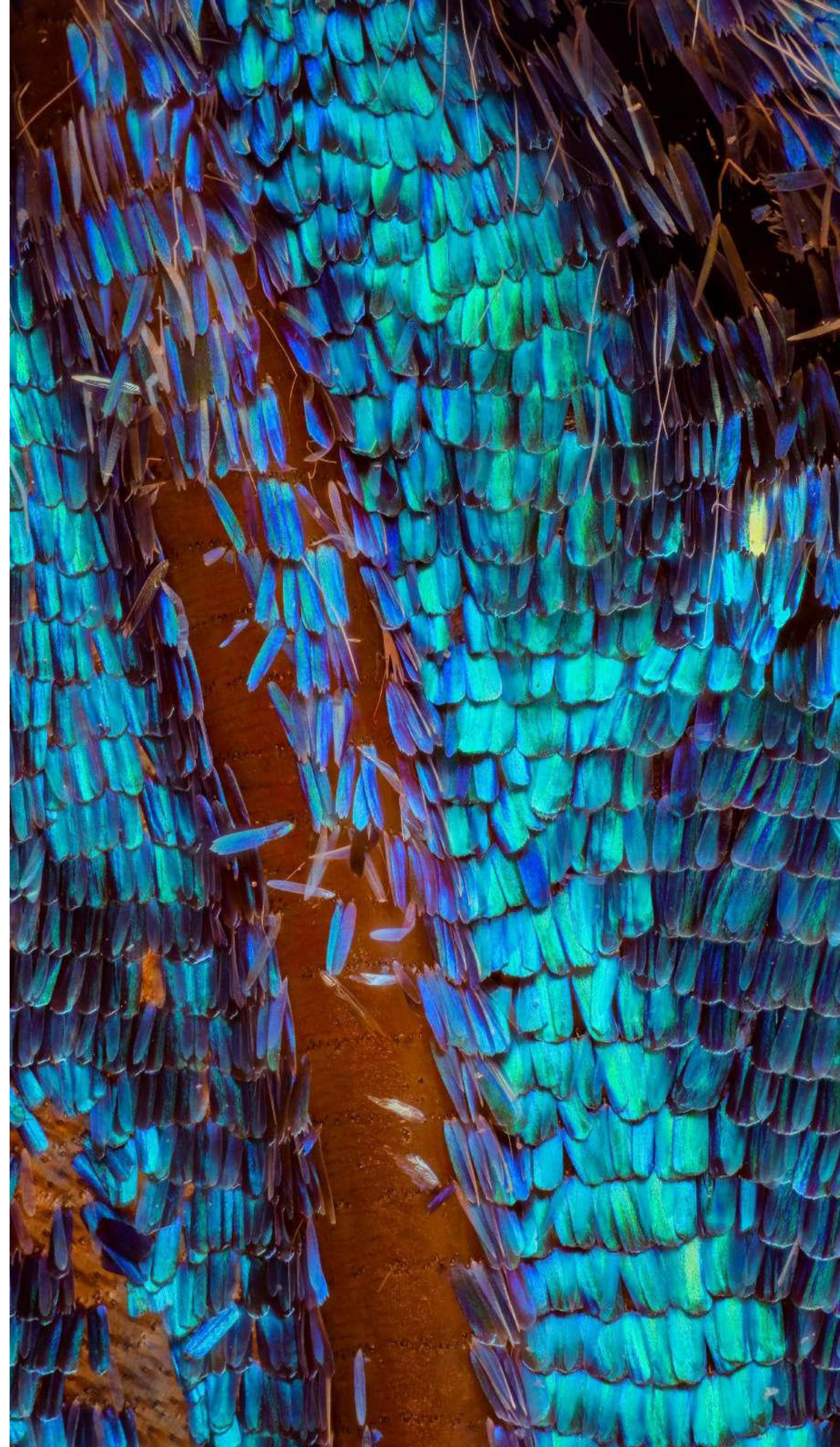


- 1. Usa solo la energía que necesita y que encuentra disponible libremente.**
Utiliza combustible fósil.
- 2. Reutiliza todos los materiales.**
N.A. El diseño está dirigido al rediseño.
- 3. Es resiliente, se adapta a cambios.**
El prototipo siendo una mejora tecnológica. Hay que aclarar que todo tipo de modificación a estas aeronaves deben someterse a distintas pruebas que incluyen el túnel del viento.
- 4. Optimiza en vez de maximizar.**
Si. Parte de lo que ya existe y se concentra en la optimización de una estructura, pues su diseño está inspirado a su vez en la estructura nanomicroscópica de las escamas de las mariposas. insecto.
- 5. Premia la cooperación.**
Al tratarse de un diseño de optimización tecnológico, requiere de la participación de ingenieros de distintas áreas, así como diseñadores.
- 6. Funciona basada en información.**
Toma en cuenta información de la estructura de las escamas de la mariposa, sin embargo, se requiere incorporar el conocimiento experto de la ingeniería aeronáutica.
- 7. Usa química y materiales que son seguros para la vida.**
Si. El metal en los aviones no es tóxico para las personas.
- 8. Construye usando recursos abundantes.**
Si. El metal-hierro
- 9. Está localmente sintonizada y responde oportunamente.**
Es un diseño aplicado a nivel local y global.
- 10. La forma sigue a la función.**
Su forma está acorde a la función de hacer más eficiente el vuelo de los aviones..

CONCLUSIÓN

La biomimesis ciencia que estudia la naturaleza con el fin de crear un invento, o en este caso optimizar uno, permitió analizar las microestructuras que presenta *Drymoea veliterna* en sus alas que les permite repeler el agua y el polvo del aire y transferir estas funciones a una aeronave. Dado lo anterior, se puede decir que la polilla, aunque es un insecto considerado plaga, puede inspirar mejoras y otros inventos tecnológicos como lo es la optimización de un ala de avión, entre otras ideas.

A esta investigación hay que añadirle en un futuro el estudio estricto de la optimización del invento propuesto, porque lo elaborado en este proyecto fue una idea de diseño más que una idea fundada en datos y pruebas científicas que demostraran al 100% su factibilidad y aplicabilidad. Por todo esto, es esencial que la siguiente investigación incluya temas como aerodinámico total del avión con las alas, resistencia del aire a diferentes temperaturas, velocidades y estados de vuelo (aterrizaje, turbulencia, despegue), capacidad de retención de agua en el ala, cantidad de aire que fluye por esta y cuanto tarda en enfriar un motor sobrecalentado. Estos puntos y otros son necesarios para apara verificar la factibilidad y viabilidad de la propuesta.



AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a Juan Zambrano, por su apoyo al dar una mirada desde la matemática y los aspectos analíticos de las imágenes de microscopía electrónica. A Gabriela Mac Allister y Nicolás Rosal por su generosa ayuda en la construcción del modelo virtual, y orientación en cuanto a los programas de diseño. Por último, a el Gimnasio Campestre y la Universidad de los Andes por facilitarnos instalaciones y oportunidades para completar el proyecto.

Para futuras investigaciones, cobra especial valor la posibilidad de continuar con el desarrollo y socialización del prototipo del videojuego, puesto que varias características que fueron planteadas en el GDD no se lograron desarrollar en su totalidad en el prototipo. Adicionalmente, el videojuego es un formato que permite iteraciones de versiones futuras en donde se expanda el alcance y profundidad del mismo, permitiendo el uso de tecnologías o técnicas de desarrollo más avanzadas a las que fueron utilizadas para este prototipo. Para finalizar, el prototipo podría desarrollarse en su versión 2.0 como para convertirse en una versión que incluso se pueda publicar y comercializar.

LISTA DE REFERENCIAS

Airlanded. (2022). ¿Sabías qué pasa cuando se acumula hielo en las alas de un avión? | AirLanded. Airlanded. <https://airlanded.com/2020/01/20/sabias-que-pasa-cuando-se-acumula-hielo-en-las-alas-de-un-avion/>

Anipeda. (2022). ¿Cómo son las alas de las mariposas? - Guía básica con funciones y usos. Anipeda. <https://www.anipedia.net/mariposas/alas-mariposas/>

Aziz, M. S., & el Sherif, A. Y. (2016). Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 707-714. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.015>

Benyus, J. A. (2013). BIOMIMICRY. https://biomimicry.net/b38files/A_Biomimicry_Primer_Janine_Benyus.pdf

Benyus, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. https://www.academia.edu/38300413/Janine_M_Benyus_Biomimicry_Innovation_Inspired_by_Nature_2002_Harper_Perennial_1_

Bocaz, P. A., & Parra, L. E. (n.d.). Revisión y bionomía del género *Syncirsodes* Butler 1882 (Lepidoptera: Geometridae). 2005. Retrieved March 23, 2021, from <https://www.redalyc.org/pdf/3699/369944273007.pdf>

Drawingdatabase. (2022). Boeing 787-800 Blueprint - Download free blueprint for 3D modeling. <https://drawingdatabase.com/boeing-787-800/>

Druce, H. (1885). Descriptions of new Species of Lepidoptera Heterocera, chiefly from South America. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 53(3), 518-536. <https://doi.org/10.1111/J.1469-7998.1885.TB07859.X>

Duran, L. C. H., Medina, G. E. F., & Quintero, L. S. F. (2014). Mating Opportunities in *Sangalopsis veliterna* Females: Costs and Benefits. *Journal of Insect Science*, 14. <https://doi.org/10.1673/031.014.112>

El-Zeiny, R. M. A. (2012). Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 50, 502-512. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.054>

Gamage, A., & Dayarathne, R. (2012). (PDF) LEARNING FROM NATURE: TOWARDS A RESEARCH-BASED BIOMIMICRY APPROACH TO ECOLOGICALLY SUSTAINABLE DESIGN (ESD). In Conference: Sustainability through biomimicry: Discovering a world of solutions inspired by nature. https://www.researchgate.net/publication/315835803_LEARNING_FROM_NATURE_TOWARDS_A_RESEARCH-BASED_BIOMIMICRY_APPROACH_TO_ECOLOGICALLY_SUSTAINABLE_DESIGN_ESD

García, R., Amparo, J., Peña, M., & Hernández, L. (2012). Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza. *Investigación y Ciencia*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67424409007>

García-Barros E, & Meneguz M. (2010, September). Estructura de las escamas ventrales de las alas de *Coenonympha Hübner*, [1819], con especial referencia a *C. pamphilus* (L., 1758) y su morfotipo *lyllus* (Esper, 1805) (Lepidoptera: Nymphalidae). *Shilap*. <https://www.redalyc.org/pdf/455/45526096002.pdf>

Guzmán, S. M. (2019, May 24). La contaminación que producen los aviones, en 12 datos. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/destinos/la-contaminacion-que-producen-los-aviones-en-12-datos>

Hernandez, C. D. (2011). ESTUDIO DE LA BIOLOGÍA, COSTOS Y BENEFICIOS DEL SISTEMA DE APAREAMIENTO DE *Sangalopsis veliterna* (LEPIDÓPTERA: GEOMETRIDAE).

James Hargroves, K., & Harrison Smith, M. (2006). Innovation inspired by nature: Biomimicry Climate Change Adaptation Guidance Document for Institutional Investors View project Cleantech innovation for the 21st Century View project. <https://doi.org/10.1071/EC129p27>

Jara Valle, J. M. (2014). Bosko-inspirado en la naturaleza, para transformar comunidades.

La Vanguardia. (2008, August 21). Spanair admite el "calentamiento excesivo" de un motor, pero defiende el despegue del avión. *La Vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/sucesos/20080821/53524419730/spanair-admite-el-calentamiento-excesivo-de-un-motor-pero-defiende-el-despegue-del-avion.html>

Marks, P. (2016, January 29). Cómo pueden cambiar las alas de los aviones para hacerlos más eficientes - BBC News Mundo. BBC. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/01/160127_vert_fut_aviones_forma_alas_yv

Monje (17 de febrero de 2017). Alas de mariposas. LuisMonje.com. Fotografía científica. <https://www.luismonje.com/alas-de-mariposa/>

Museo Nacional de Historia Natural. (2016). Las escamas de los lepidópteros. Museo Nacional de Historia Natural. <https://www.mnhn.gob.cl/noticias/las-escamas-de-los-lepidopteros>

National Aeronautics and Space Administration. (2019a). Bernoulli's Principle. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/bernoulli_principle_k-4.pdf

National Aeronautics and Space Administration. (2019b). Parts of an Airplane. NASA. <http://www.nasa.gov>

Qin, R., & Duan, C. (2017). The principle and applications of Bernoulli equation. *Journal of Physics: Conference Series*, 916(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/916/1/012038>

Ruiz, Á., Enrique, L., & Soriano, N. (2019). Optimización estructural de un ala de aeronave con perfil super crítico. Universitat Politecnica de Valencia.

Sadraey, M. (2012). Chapter 5 wing design. 13-20. http://wpage.unina.it/fabrnico/DIDATTICA/PGV_2012/MAT_DID_CORSO/09_Progetto_Ala/Wing_Design_Sadraey.pdf

Urretabizkaya, N., Vasicek, A., & Saini, E. (2010). script-tmp-inta_lepidopteros. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.