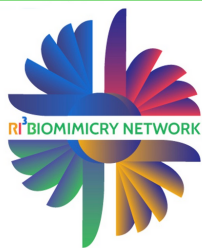
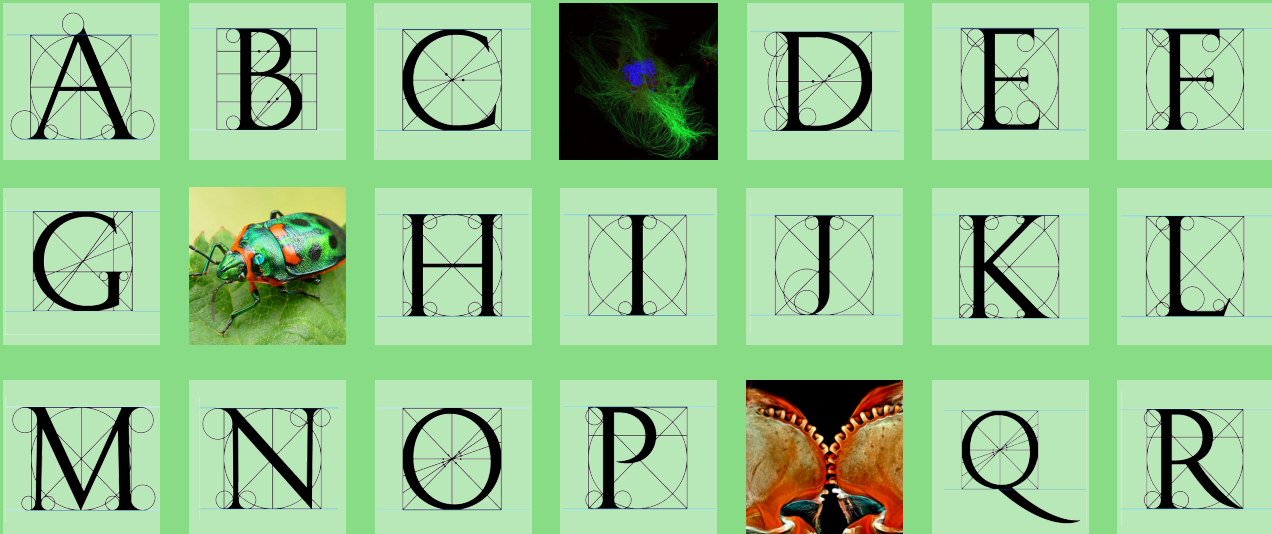


# TESAURO DE BIOMÍMESIS

ESTUDIOS TRANSDISCIPLINARES EN ARMONÍA CON LA NATURALEZA

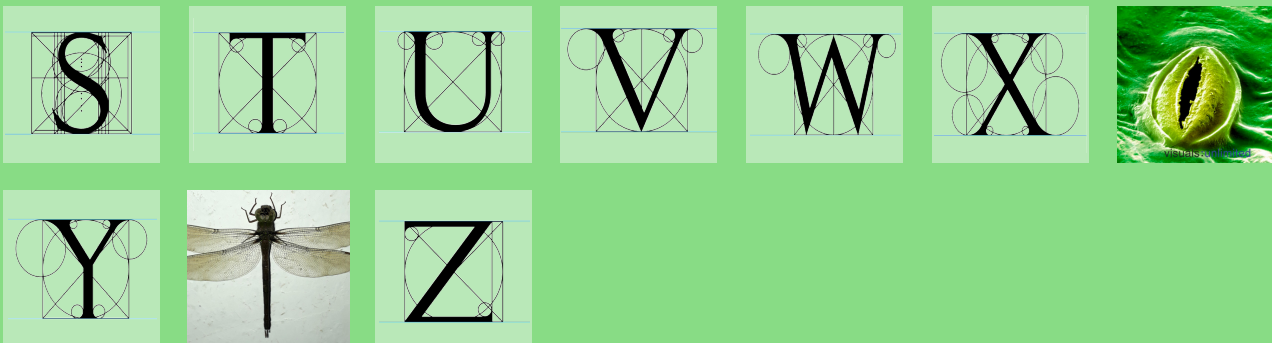
Tomo I



RED INTERNACIONAL,  
INTERUNIVERSITARIA E  
INTERINSTITUCIONAL  
DE ESTUDIOS SOBRE  
BIOMÍMESIS

## EDITORES

Hernando Bernal Zamudio  
Javier Collado Ruano  
Caterine Mele  
José Claudio Rocha  
Carmen Sanfrancisco Millán  
Daniel Edgardo Vedoya



# TESAURO DE BIOMÍMESIS

Estudios Transdisciplinarios en Armonía con la Naturaleza

## Diseño de tapa:

María Alejandra Vedoya

## Maquetación:

Arq. Víctor H. Cabrera



## EDITORES

Hernando Bernal Zamudio

Javier Collado Ruano

Caterine Mele

José Claudio Rocha

Carmen Sanfrancisco Millán

Daniel Edgardo Vedoya

ABRIL 2022

ISBN: 978-84-09-40465-0





## Volumen 1 del Tesouro de: “Biomimesis. Ciencia holística y transdisciplinar en armonía con la Naturaleza”

### Directores:

- **Hernando Bernal Zamudio**, Biomimetic Sciences Institute (BSI) & Asociación Amassunu para el impulso de la Interculturalidad y la Biomimesis, Universidad del País Vasco, España
- **Luísa Margarida Cagica Carvalho**, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal
- **Javier Collado Ruano**, Universidad Nacional de Educación del Ecuador
- **Gloria Marlene Díaz Muñoz**, Universidad Externado de Colombia
- **Carmen Sanfrancisco Millán**, Biomimetic Sciences Institute (BSI). España
- **Claudia Inés Rivera Cárdenas**, Universidad Nacional Autónoma de México
- **José Claudio Rocha**, Universidad del Estado de Bahía, Brasil
- **Daniel Edgardo Vedoya**, Universidad Nacional del Nordeste Argentina

### Comité Científico:

- **Ívan Dávila Velandia**, Universidad Nacional de Colombia
- **Luísa Margarida Cagica Carvalho**, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal
- **Josep Antoni Gary**, Naciones Unidas (Ginebra), Suiza
- **Claudia Inés Rivera Cárdenas**, Universidad Nacional Autónoma de México
- **Ibone Ametzaga Arregi**, Universidad del País Vasco /Euskal Herriko Unibertsitatea /UPV/EHU).
- **Iker Bandiola Etxaburu**, Universidad del País Vasco /Euskal Herriko Unibertsitatea /UPV/EHU)
- **Jesús María Blanco Ilzarbe**, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea /UPV/EHU).
- **Vincent Blok**, Universidad de Wageningen, Holanda.
- **Vania Susana Calle Quispe** Universidad San Mayor de Andrés, Bolivia
- **Javier Collado Ruano**, Universidad Nacional de Educación, Ecuador
- **Armando Contreras Hernández**, Instituto de Ecología México (INECOL). México
- **Fernando Antônio Carvalho Dantas**, Universidad Federal de Goias, Brasil
- **Gloria Marlene Díaz Muñoz**, Universidad Externado de Colombia
- **Henry Dicks**, University of Leeds (Reino Unido) & University Jean Moulin Lyon 3 (Francia)
- **Manuel Quirós Galdón**, Naturesperius.



## Volumen 1 del Tesouro de: “Biomimesis. Ciencia holística y transdisciplinar en armonía con la Naturaleza”

### Comité científico:

- **Oscar Iván García Rodríguez**, Laboratoire d'Anthropologie Sociale, Francia
- **Tirso Antonio Gonzales Vega**, Universidad del Pacífico, Lima, Perú & Proyecto Andino de Tecnologías Campesinas (PRATEC), Perú.
- **Vanessa Hanson de Oliveira**, Fundación Mapas, Brasil
- **Antonio Jiménez Luque**, Universidad de San Diego, Estados Unidos de Norte América.
- **Erika Llanos Risso**, Universidad Amazónica de Pando, Bolivia
- **Caterina Mele**, Politécnico de Turin, Italia
- **Jairo Ricardo Mora Delgado**, Universidad del Tolima, Colombia
- **Álvaro Pio Gómez Olaya**, Universidad del Valle
- **David Sánchez Ruano**, Instituto Tecnológico de Monterrey, México
- **Jorge António Erick Sainz Cardona**, Universidad San Mayor de Andrés, Bolivia.
- **Unai Tamayo Orbeagozo**, Universidad del País Vasco /Euskal Herriko Unibertsitatea /UPV/EHU)

### Comité de Diseño Artístico y Comunicación:

- **Jeison Andrés Bernal Cañón**, Biomimetic Sciences Institute (BSI)
- **Ricardo Contreras Aguará**, Instituto de Ecología México
- **Iván Dávila Velandia**, Universidad Nacional de Colombia
- **Serena Pisano**, Museo de Roma, Italia
- **Ludovica Rossi**, Arquitecta
- **Manu Vb Tintiré**, Artísta, Bélgica y Cataluña, España.
- **Manuel Quirós Galdón**, Naturesperius.

### Comité de Traducción:

- **Diana Carolina Riaño**, Asociación Amassunu, Universidad del País Vasco
- **Caterina Mele**, Politécnico de Turín, Italia
- **José Claudio Rocha**, Universidad del Estado de Bahía, Brasil
- **Ludovica Rossi**, Arquitecta.



LETRA	AUTORES - TÍTULO	PÁG.
	<b>CRÉDITOS</b>	I
	<b>COMITÉ EDITORIAL</b>	III - IV
	<b>PRÓLOGO</b>	01-04
	Bernal Zamudio, H.- Collado Ruano, J.- Mele, C.- Rocha, J.-Sanfrancisco Millán, C.- Vedoya, D.	
	<b>PRÓLOGO</b>	05-06
	Josep Antoni Garí	
<b>A</b>	<b>Aplicaciones biomiméticas en dispositivos de captación de energías marinas</b>	09-24
	<b>Biopolímeros y sus aplicaciones en diferentes áreas</b>	27-41
<b>B</b>	<b>Biomimesis y música. La armonía rítmico -espacial</b>	43-54
	<b>Biomimética</b>	55-67
	<b>Ciencia, creatividad y educación: caso de estudio de la Biomimesis en el Caribe colombiano</b>	71-81
<b>C</b>	<b>Ex-nihilo, conexión con la Bioinspiración</b>	83-95
	<b>Cerebro humano e inteligencia artificial</b>	97-108
<b>D</b>	<b>Desarrollo Humano Sostenible (DHS)</b>	111-123
	<b>Garantizar la sostenibilidad en la práctica del diseño biomimético</b>	125-135
<b>E</b>	<b>Economía Ecológica</b>	139-147
	<b>Elementos de las tierras raras y sus aplicaciones en Biomimesis</b>	149-162
	<b>Comprensión científica de las emociones musicales a partir de la física del timbre</b>	163-174
	<b>Etnodesarrollo</b>	175-186
	<b>La economía circular y la circularidad en la economía</b>	187-199



# TESAURO DE BIOMÍMESIS

## ÍNDICE

LETRA	TÍTULO	PÁG.
F	Fabricación biomimética de materiales fotónicos derivados de celulosa, quitina y quitosano	203-213
	Flexión Activa. Sistemas bio-inspirados en los movimientos de las plantas	215-229
H	Gran Historia	233-242
I	Imágenes biomiméticas para entender sistemas complejos	245-254
	Identificación ritual	255-265
L	Liderazgo Biomimético	269-277
	Liderazgo espiritual holístico: Perspectivas indígenas para ir más allá de la religión y el ámbito organizativo	279-289
M	El metabolismo Social	293-304
N	La Naturaleza como reguladora de la composición química atmosférica	307-316
	Los números primos nunca dejan de asombrar	317-328
O	Organizaciones socioambientales biomiméticas	331-339
R	La Red Internacional de Estudios sobre Biomimesis en Armonía con la Naturaleza	343-354
	Resiliencia y Biomimética, una relación de reciprocidad	355-364
S	EL SUMAK KAWSAY	367-375
	Simbiosis	377-391
T	Territorialidad	395-402



## Aplicaciones biomiméticas en dispositivos de captación de energías marinas

Izquierdo, U<sup>1\*</sup>  
Jesús María Blanco Ilzarbe<sup>2</sup>  
Bidaguren, Iñigo.<sup>3</sup>  
Esteban, G.A<sup>4</sup>  
Peña, A<sup>5</sup>  
Albaina, I<sup>6</sup>  
Manuel Soto López<sup>7</sup>  
Guzmán Díez Díez<sup>8</sup>

### Resumen

El estudio de la Naturaleza como fuente de inspiración ha dado como resultados el diseño de distintos captadores de energía proveniente del mar. El presente documento aúna los dispositivos marinos basados en la Biomimesis, centrándose en aquellos cuyo comportamiento favorece la captación de energía (Zhang and Aggidis, 2018a). Finalmente, como la piel de los tiburones está formada por minúsculas espículas que permiten romper la capa límite del fluido disminuyendo la resistencia al avance del escualo (Díez, Soto and Blanco, 2015), se detallará la aplicación objeto de estudio en los sistemas de absorción de energía de los tanques de olas (*wave flumes*), que son dispositivos de laboratorio que permiten reproducir a escala los fenómenos de generación de oleaje.

### Palabras clave

Capa límite, energías marinas, espículas dérmicas, tanque de olas.

### Summary

---

<sup>1</sup> Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 (48013) Bilbao, Basque Country, Spain.

<sup>2</sup> Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 (48013) Bilbao, Basque Country, Spain.

<sup>3</sup> Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 (48013) Bilbao, Basque Country, Spain.

<sup>4</sup> Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 (48013) Bilbao, Basque Country, Spain.

<sup>5</sup> Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 (48013) Bilbao, Basque Country, Spain.

<sup>6</sup> Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 (48013) Bilbao, Basque Country, Spain.

<sup>7</sup> Department of Zoology and Animal Cell Biology, Faculty of Science and Technology, University of the Basque Country (UPV/EHU), Sarriena s/n (48940) Leioa, Basque Country, Spain; Research Centre for Experimental Marine Biology and Biotechnology (PIE-UPV/EHU), Areatza s/n, (48620) Plentzia, Basque Country, Spain

<sup>8</sup> Marine Research Division (AZTI) Txatxarramendi Ugarteia s/n (48395) Sukarrieta, Basque Country, Spain.

The study of nature as a source of inspiration has resulted in the design of different energy harvesters from the sea. This paper brings together marine devices based on biomimicry, focusing on those whose behaviour favours energy harvesting (Zhang and Aggidis, 2018a). Finally, as the skin of sharks is formed by tiny spicules that allow breaking the fluid boundary layer decreasing the resistance to the shark's advance (Díez, Soto and Blanco, 2015), the application under study will be detailed in the energy absorption systems of wave flumes, which are laboratory devices that allow reproducing wave generation phenomena at scale.

### **Key words**

Boundary layer, marine energies, dermal spicules, wave flume.

### **Introducción**

El uso de la Biomimesis en el campo de las tecnologías marinas es un ámbito que ha acompañado al desarrollo del conocimiento en el área de la hidrodinámica y la hidráulica desde su inicio. Ya desde tiempos del Renacimiento en el siglo XVI se identifican los primeros estudios relacionados con la reducción de la resistencia al avance mediante cuerpos fuselados o aerodinámicos emulando la forma de los animales marinos (por parte de Leonardo da Vinci) (Fish, 2011). Esta asociación de la innovación en tecnología marina con el comportamiento del mundo animal marino ha sido continua desde entonces y en múltiples aspectos como pueden ser los sistemas de sensoria (ecolocalización y electrorecepción), mecanismos de control de presión y flotabilidad, estrategias de reducción de consumo energético (diseño fusiforme), diseño estructural o mecanismos de estabilidad y maniobra. Especial atención ha recibido en los últimos tiempos el campo de la propulsión donde se desean obtener sistemas eficientes que reproduzcan los mecanismos hidrodinámicos ejecutados por las criaturas marinas que ya están adaptadas al medio en el que viven (Lamas and Rodriguez, 2020).

Dentro de los fenómenos físicos que afectan a la interacción de estructuras marinas con el fluido se encuentra la formación y comportamiento de la denominada capa límite que explica la elevada velocidad de algunos animales marinos (Fernandez-Waid *et al.*, 2019). Este comportamiento puede ser modificado voluntariamente mediante el accionamiento y posicionamiento de espículas o placas mecánicas que emulan el comportamiento de la piel con escamas en diferentes especies marinas (Díez, Soto and Blanco, 2015) para conseguir el objetivo perseguido (p. ej. maniobrabilidad, aceleración, reducción de consumo energético).



La capa límite es la región especial del fluido cercana a la superficie sólida donde se ponen de manifiesto grandes esfuerzos viscosos y elevados gradientes de velocidad. Es allí, en la capa límite, a escala microscópica, donde la interacción de las escamas o espículas de la piel de las especies marinas con el fluido, provoca la generación de fuerzas macroscópicas como la resistencia al avance (arrastre o “*drag*”) en la dirección de desplazamiento del cuerpo en estudio y la sustentación (“*lift*”) en la dirección perpendicular a la del desplazamiento.

Las alternativas habituales para estudiar el comportamiento de la capa límite y el campo de flujo externo asociado en función de la morfología (escamas) de la superficie sólida son, por un lado, la Mecánica de Fluidos Computacional (siglas en inglés CFD), donde se resuelven de manera numérica las ecuaciones diferenciales de transporte básicas de la dinámica de fluidos en un dominio computacional discretizado mediante el uso de potentes computadoras, obteniéndose como resultado las variables físicas características en cada nodo discreto del dominio espacial (p. ej. velocidad, presión, esfuerzo viscoso tangencial). Por otro lado, se emplea la experimentación en laboratorio, donde normalmente se ensayan modelos o maquetas de dispositivos construidos a escala reducida en un ambiente controlado representativo del fenómeno a escala real mediante la comparación de los grupos adimensionales relevantes del fenómeno (habitualmente números de Reynolds, Froude y Keulegan-Carpenter en aplicaciones marinas).

El resultado de la interacción entre cuerpo sólido y medio fluido en la capa límite dentro del ámbito del flujo externo da lugar a las fuerzas macroscópicas anteriormente mencionadas de arrastre y sustentación. La fuerza de arrastre  $F_d$  (“*drag*”) es la fuerza alineada con la dirección del movimiento del cuerpo, y se puede evaluar mediante la siguiente expresión:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A U_\infty^2 \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $A$  es un área característica del cuerpo (puede ser el área mojada para cuerpos fusiformes o el área transversal máxima perpendicular a la dirección del movimiento en cuerpos romos),  $U_\infty$  es la velocidad de desplazamiento del cuerpo sólido respecto del fluido no perturbado y  $C_d$  es el coeficiente adimensional de arrastre.

De manera análoga la fuerza de sustentación  $F_L$  (“*lift*”) es la fuerza perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo, que se puede evaluar mediante la expresión:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A U_\infty^2 \quad (2)$$

que contiene los mismos parámetros que la fuerza de arrastre más el coeficiente adimensional de sustentación  $C_L$  en lugar del coeficiente de arrastre.

Los coeficientes de sustentación  $C_L$  y arrastre  $C_d$  tienen una dependencia directa de la geometría del cuerpo, la morfología superficial (rugosidad) así como del comportamiento de la capa límite (si esta es laminar o turbulenta y si tiene posibilidad de desprendimiento), además del grado de relevancia relativo de las fuerzas viscosas respecto de las inerciales dado por el grupo adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{U_\infty L}{\nu}, \quad (3),$$

donde  $L$  es una longitud característica del cuerpo sólido y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

Por otro lado, una acreción o anclaje de invertebrados marinos sobre la superficie sólida en los cascos de embarcaciones y estructuras fijas a gran escala (“*biofouling*”) puede provocar una rugosidad desmesurada que incremente la fuerza de arrastre por fricción viscosa dentro de la capa límite turbulenta. En la misma línea, la adición de rugosidad artificial puede favorecer la disipación de energía transportada por el oleaje, cuando este sea el efecto final deseado.

Adicionalmente, está extendida la inserción voluntaria de generadores de vórtices (“*vortex generators*”) en álabes de turbomaquinaria con el objeto de energizar la capa límite aportando cantidad de movimiento y retrasando su desprendimiento. Esta aplicación consigue mejorar el rendimiento de la maquinaria (Errasti *et al.*, 2019; Galera *et al.*, 2019).

Todo ello da lugar a la variación del comportamiento dinámico de las estructuras que interaccionan con el fluido en movimiento, como por ejemplo las olas del mar o las corrientes marinas. Interesará, por tanto, caracterizar con la mayor precisión posible la influencia de la Biomimesis sobre el valor de estos parámetros de diseño en las aplicaciones de captación de energías marinas.

## 1. Aplicaciones de la Biomimesis en dispositivos de captación de energías marinas

A la hora clasificar los dispositivos en los que se han aplicado desarrollos biomiméticos, pueden diferenciarse entre aquellos sobre los cuales se aplica buscando la mejora de una propiedad en concreto (como puede ser la reducción del *drag*) o, en los que el propio dispositivo (geometría o funcionamiento) se basan en imitar algún aspecto de la Naturaleza. Dentro de esta última clasificación, pueden a su vez diferenciarse entre aquellas aplicaciones que imitan la función desarrollada, el comportamiento, la forma y el movimiento, tal y como es clasificada en (Zhang and Aggidis, 2018b).

Cuando se persigue la mejora de una propiedad o característica fluidodinámica, el propósito es aumentar el rendimiento de un dispositivo en cuestión actuando sobre alguno de los parámetros clave en los que se basa su funcionamiento. Las actuaciones más comunes son aquellas en las que las fuerzas de arrastre desempeñan un papel relevante para la extracción de energía, y, por tanto, reduciéndola se podría aumentar el rendimiento del dispositivo en cuestión. Sirva de ejemplo las aplicaciones en las que se generan superficies basadas en recubrimientos rugosos como la piel de tiburón mencionada anteriormente, para favorecer el desplazamiento de un dispositivo, así como los desarrollos llevados a cabo para su síntesis (Zhang *et al.*, 2017; Munther *et al.*, 2018; Chien *et al.*, 2020; Cunming Yu, Mengfei Liu, Chunhui Zhang, 2020; Stratakis *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020). Sin embargo, existen otro tipo de aplicaciones como las basadas en la forma de las aletas pectorales de las ballenas jorobadas. Si bien la mayoría de las ballenas y demás cetáceos tienen aletas con el borde delantero liso, en el caso de la ballena jorobada el borde tiene una serie de protuberancias llamadas tubérculos. Dichas protuberancias canalizan el agua y la dividen en múltiples vórtices, o remolinos, creando turbulencia. Este “efecto tubérculo” le da a la ballena mayor impulso, lo cual le permite girar las aletas en ángulos más pronunciados, y reduce la resistencia al agua, que es un importante beneficio en vista de lo largas que son las aletas (casi un tercio de la longitud del cuerpo de la ballena). Esta característica ha sido empleada en turbinas que extraen energía de la corriente de las mareas (*tidal turbines*) en aplicaciones en energía mareomotriz, demostrando que se retarda el desprendimiento de la capa límite y que los ratios *drag/lift* aumentan (Shi *et al.*, 2016; Shi, Atlar and Norman, 2017) tal y como puede observarse en la Figura 1.

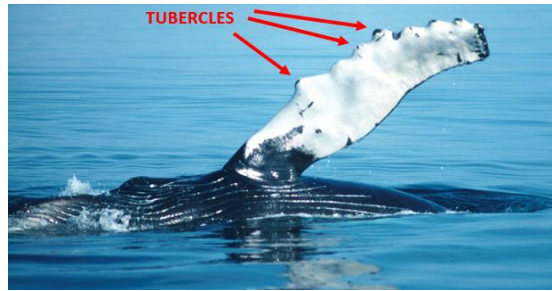


Figura (1): Izquierda: Imagen del rotor de una turbina tidal (Shi, Atlar and Norman, 2017) y Derecha: aleta de una ballena jorobaba (SMYTH, 2016).

En la imagen de la izquierda de la Figura 2 se muestra otra de las aplicaciones que es conocida por su nombre comercial, el bioWAVE. Se trata de un sistema de conversión de energía de las olas (*wave energy converter*, WEC), inspirado en el movimiento y reorientación de plantas de algas marinas. Fue desarrollado por una empresa australiana que lo diseñó no solo para poder moverse hacia adelante y hacia atrás como las algas marinas, sino también para que pueda permanecer en el fondo marino, paralelo al propio fondo, en condiciones de tormenta.

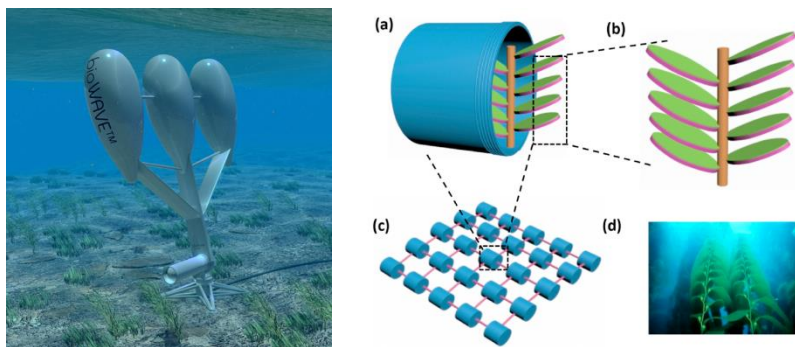


Figura (2): Izquierda: sistema WEC denominado bioWAVE (The Biomimicry Institute, 2018). Derecha: (a) detalle de una unidad de nanogenerador triboeléctrico (c) red de un sistema, y (b-d) alga sobre la que se basa su diseño (Wang et al., 2019).

La imitación de las algas también ha sido fuente de inspiración por otros investigadores usando un nanogenerador triboeléctrico (TENG) para convertir energía mecánica en energía eléctrica mediante el nanogenerador acoplado e inducción electrostática (Wang *et al.*, 2019). Esta aplicación, mostrada en la imagen de la derecha de la *Figura 2*, se fundamenta en la posibilidad de diseñar estrategias de conversión de energía de las olas que sean ligeras, pequeñas y fáciles de implementar para generar energía eléctrica de manera efectiva a partir de la energía del agua a baja frecuencia, en lugar de los generadores electromagnéticos tradicionales.

Los ciempiés son artrópodos pertenecientes a la clase *Chilopoda*. Tienen numerosas patas que soportan la mayoría de los segmentos corporales (a excepción del primer y de los dos últimos segmentos) y se caracterizan porque cada par de patas es ligeramente más largo que el inmediatamente anterior, lo que les permite no chocarse cuando se mueven de forma rápida. Los ciempiés sirvieron de inspiración para la aplicación WEC conocida como Centipod WEC (ver Figura 3), aunque en este caso, la longitud de cada extremidad es la misma. Este sistema se compone principalmente de una columna vertebral, boyas, componentes para la extracción de energía (*power take-off*, PTO) y líneas de fondeo. La generación de electricidad se lleva a cabo con la ayuda de generadores que son impulsados por el movimiento vertical de las boyas sometidas al efecto del oleaje. (Dehlsen Associates, 2016).

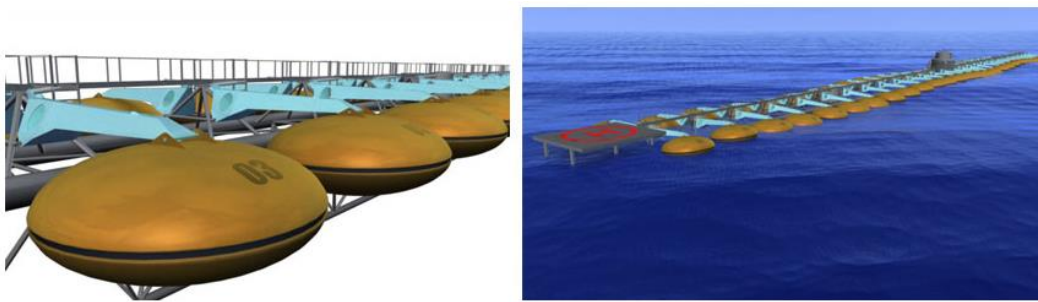


Figure (3): Sistema Centipod (Technologies, 2012). Izquierda: detalle de las boyas. Derecha: imagen general del sistema completo.

También fue diseñado y probado el WEC conocido como Oyster por la empresa *Aquamarine Power Ltd*, Figura 4, para ser utilizado en aguas intermedias (entre 10 y 15 metros de profundidad y a una distancia de 500 metros de la costa) y capturar la energía del oleaje cercano a la costa. Este sistema se basa en el comportamiento de las propias ostras cuando estas se abren y se cierran y consta de una estructura similar a una placa o aleta de grandes dimensiones instalada en el fondo marino que bascula con la fuerza al interactuar con el oleaje.



Figura (4): WEC Oyster 800. Detalle del equipo (izquierda) e imagen de la instalación en el mar (REUK, 2020).

El WEC conocido como Pelamis fue la primera máquina de energía undimotriz en generar electricidad e inyectarla a la red eléctrica. El Pelamis fue diseñado por *Ocean Power Delivery Ltd* por medio de imitar la forma de las serpientes marinas subfamilia de la familia Cobra, ver Figura 5. El Pelamis es un dispositivo offshore flotante semi sumergido, que generalmente consta de 4 ó 5 secciones tubulares, unidas por articulaciones que le permiten doblarse en dos direcciones (perpendicular y tangencialmente a las olas) (Pelamis, 2018). Está anclado al fondo marino y se sitúa en la dirección de propagación de las olas. A medida que las olas atraviesan sus secciones, éstas se doblan activando el PTO hidráulico.

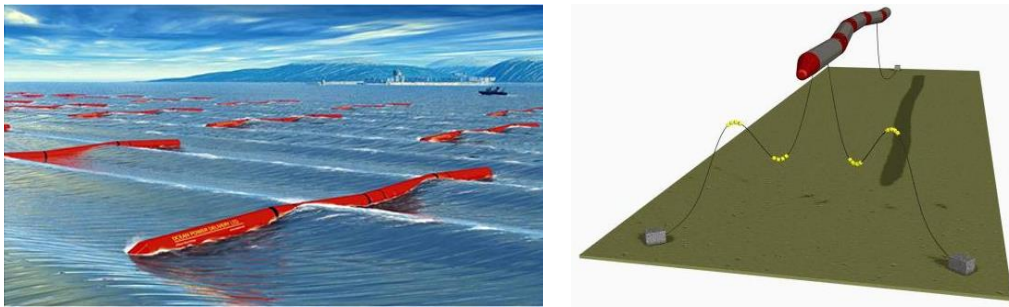


Figura (5): Izquierda: Sistema Pelamis. Imagen del prototipo en la superficie del mar , Derecha: detalle del sistema completo, incluido las líneas de fondeo (Blackledge *et al.*, 2013).

## 2. Aplicaciones específicas de la biomimética aplicada a la piel del tiburón

Han sido varias las aplicaciones basadas en imitaciones del comportamiento de la piel de los tiburones. Las más significativas relacionadas con las energías marinas se basan en aplicaciones orientadas a la disminución de la bioincrustación (*biofouling*, acreción o anclaje de invertebrados marinos) y aquellas relacionadas con la disminución de las fuerzas de arrastre.

El *biofouling* es un fenómeno que puede afectar a cualquier estructura que esté sumergida en ambiente marino. Se trata de un proceso complejo que comienza con la formación de un *biofilm* (microbios y microalgas), seguido de un asentamiento de miles de organismos marinos como algas, moluscos y otras especies. Este fenómeno ya era conocido por las consecuencias que conlleva a nivel ecológico y económico en barcos, buques, boyas o, en general en los entornos industriales costeros y acuiculturas. Por ejemplo, en embarcaciones, este efecto puede suponer hasta un incremento de la fuerza de resistencia por fricción de hasta el 60%, con el consiguiente efecto en el consumo de combustible (Satheesh, Ba-akdah and Al-sofyani, 2016). En la actualidad, son cada vez más las estructuras y dispositivos que se instalan en el mar con el

objetivo de extraer la energía proveniente de fuentes de energía renovable ofrecidas por estos entornos marinos. El *biofouling* presenta un reto de gran relevancia sobre las estructuras que soportan elementos diseñados para la extracción de energía, como pueden ser las turbinas de viento (flotantes ó cimentadas), dispositivos flotantes basados en el principio de la columna de agua oscilante (*oscillating wáter column*, OWC) o cualquier otro tipo de dispositivo diseñado para tal fin (Ahamed, Mckee and Howard, 2020). Las estructuras de eólica offshore cimentada y flotante están sometidas a la interacción con el medio ambiente marino como el oleaje y las componentes bióticas del mar que posibilitan la aparición del *biofouling*. Cuando se desarrolla este fenómeno en el casco de estructuras flotantes, como las mostradas en la Figura 6, pueden provocar una modificación efectiva de la geometría de la carena y un incremento de la fuerza de oposición al avance proveniente del incremento de la rugosidad de la superficie sólida que interacciona con el fluido en su movimiento relativo (Yang *et al.*, 2017).



Figura (6): Izquierda: crecimiento marino observado en una boya (Campos *et al.*, 2021), Centro: en un monopilote y Derecha: en una estructura tipo jacket (Buck and Langan, 2017).

Además, el fenómeno de *biofouling* afecta negativamente la integridad estructural de estructuras sumergidas; los estudios paramétricos de Heaf (Heaf, 1979) han demostrado una carga aumentada (aumento del peso de las estructuras) y una reducción de la vida a fatiga de plataformas cimentadas al crecer con el tiempo el espesor del crecimiento marino. En definitiva, son varias las maneras en las que el crecimiento marino puede afectar a estructuras marinas: ocultando la estructuras, haciendo las inspecciones más difíciles y subiendo los costes; aumentando la corrosión y la fatiga a corrosión; incrementando las cargas hidrodinámicas, por una parte, incrementando las dimensiones de los componentes estructurales debido a los estratos adicionales de crecimiento y, por otra, aumentando la rugosidad de las superficies. Eso aumenta al riesgo financiero de los proyectos de energías en el mar ya que, por último pero no

menos importante, el *biofouling* también puede afectar la supervivencia de las líneas de fondeo (R.G.J. Edyvean, 1987) (Steven Gueguen, 2016).

Para mitigar este efecto, existen varias aplicaciones basadas en el desarrollo de *biofilms* que se diseñan teniendo como referencia las características de organismos marinos como esponjas o algas, con el objetivo de ser impregnados sobre los cascos y evitar de ese modo el crecimiento marino, (Satheesh, Ba-akdah and Al-sofyani, 2016). También existen aplicaciones similares, desarrolladas como superficies basadas en la piel de tiburón, como es el ejemplo de la superficie de la piel de tiburón Mako (Zhang *et al.*, 2017; Chien *et al.*, 2020). Las escamas de estos tiburones se denominan dentículos dérmicos o escamas placoideas y presentan una estructura similar a la de un diente con una cavidad interna donde se encuentra la pulpa, irrigada por pequeños vasos y rodeada de dentina cubierta de esmalte. Constan de una placa ósea basal, fuertemente fijada a las capas más internas de la piel, y una parte externa formada por una corona con una o varias espinas orientadas hacia la parte posterior (Mota, 1977). Las características de este tipo de escamas fueron analizadas por microscopía electrónica de barrido (SEM, *scanning electron microscopy*) dado que presentan diferencias dependiendo de su ubicación en el escualo. En concreto, la piel de este escualo ha servido de inspiración habiendo sido caracterizada con el objetivo de poder reproducirla y utilizarla en aplicaciones relacionadas con la reducción de la resistencia al avance (Díez, Soto and Blanco, 2015; Fu, Yuan and Bai, 2017; Yu et al, 2020).

### **2.1. Nueva aplicación objeto de estudio**

Una de las aplicaciones que no ha sido identificada en bibliografía por los autores, trata de imitar este tipo de piel para aumentar la resistencia al avance. Es decir, si bien las investigaciones llevadas hasta el momento se basan en reducir la turbulencia y con ello la resistencia al avance, la orientación de estas escamas en sentido opuesto a la circulación de un fluido aumentaría la resistencia al avance del fluido, disipando en mayor medida la energía del mismo. La aplicación más directa, y la que los autores estudiarán en ensayos futuros, se llevaría a cabo en las superficies de los sistemas de extinción de oleaje que disponen los tanques de olas experimentales. La estructura de los tanques de olas, *wave flumes*, generalmente se divide en tres zonas: la de generación de olas, la de propagación y la de extinción. La zona objeto de interés es la zona de extinción, que se corresponde con el extremo del canal contrario a la generación.



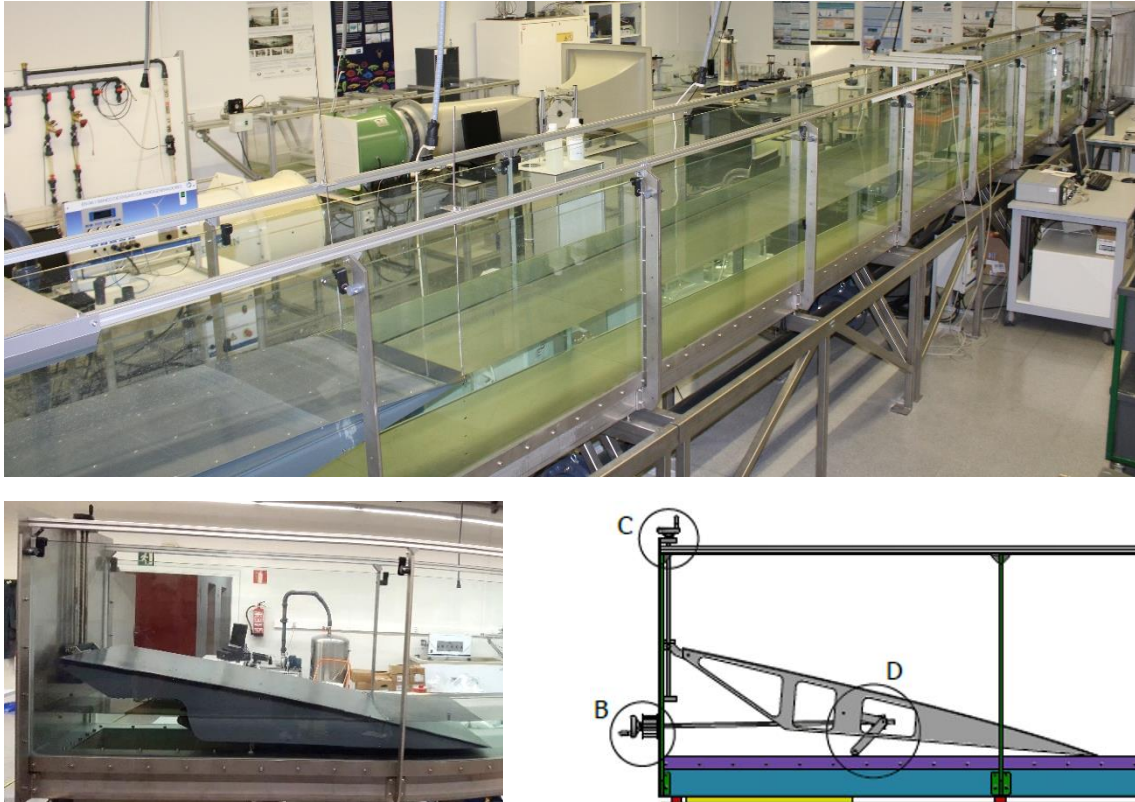


Figura (7): Arriba: tanque de olas del Departamento de Ingeniería Energética de la UPV/EHU. Generador de tipo pistón y sistema de extinción pasivo de tipo parabólico. Dimensiones: 12.5 x 0.6 x 0.7 m (largo x ancho x alto). Abajo - izquierda: detalle del sistema de extinción. Abajo - derecha: detalles de diseño que permiten posicionar el sistema de extinción en cuanto a altura e inclinación.

Existen dos tipos de sistemas de absorción, activos y pasivos. Mientras que en los sistemas activos no tendría lugar dicha aplicación, la mayoría de los tanques de olas disponen de elementos pasivos dada su simplicidad en el diseño, el montaje y su bajo coste. Si bien existe una gran variedad de elementos pasivos que pueden ser utilizados como sistemas de extinción (Ouellet and Datta, 2017), se ha demostrado que los más eficaces a la hora de disipar la energía del oleaje generado son aquellos de tipo perfil parabólico. El sistema de extinción instalado en el tanque de olas del Departamento de Ingeniería Energética de la UPV/EHU (imagen superior de la Figura 7), es un sistema de tipo pasivo, con una longitud efectiva de 1.5 m y una altura de 20 cm (imagen inferior de la Figura 7).

Se han llevado a cabo ensayos para evaluar el coeficiente de reflexión,  $K_r$ , a diferentes profundidades, ( $h$ , de 0.3, 0.4, and 0.5 respectivamente), periodos ( $0.636 < T < 1.526$ ), alturas de ola ( $0.010 < H < 0.064$ ), ángulos del sistema de extinción ( $3 < \alpha < 17$ ) y posiciones de los extremos de la playa ( $y_1, y_2$ ) para oleaje regular definido por la Teoría lineal de Airy (Airy, 1845) y no lineal de Stokes de orden 2 (Stokes, 1847). El coeficiente de reflexión indica la fracción del oleaje incidente que no ha sido disipado por el sistema de extinción y que, por tanto, es reflejado en sentido contrario al oleaje incidente (G.A. Esteban *et al.*, 2020). Este fenómeno es indeseable porque afecta de manera significativa al oleaje incidente, provocando la alteración del oleaje resultante a lo largo del tanque de olas. Los resultados más significativos del estudio recientemente llevado a cabo se muestran en la Figura 8, donde se representa la dependencia de los parámetros característicos del oleaje en función del coeficiente de reflexión calculado.

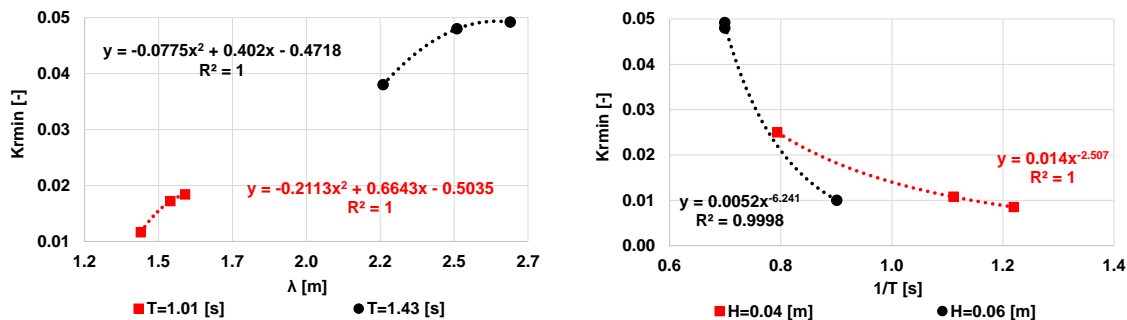


Figura (8): Izquierda: variación del coeficiente de reflexión en función de la longitud de onda para valores constantes del periodo de ola. Derecha: variación del coeficiente de reflexión en función del periodo a igualdad de altura de ola.

De la Figura 8 se puede obtener como conclusión que, el sistema de extinción permite disipar la práctica totalidad de la energía del oleaje incidente, si bien, a medida que el periodo o la longitud de onda aumentan, el valor del coeficiente de reflexión también lo hace. Por tanto, se abre un abanico de oportunidades a la hora de abordar este mismo estudio con elementos que puedan adherirse a la propia superficie del sistema de extinción, como la piel del tiburón marrajo (*Isurus oxyrinchus*), con el objetivo de generar una rugosidad que permita disminuir significativamente el coeficiente de reflexión.

### 3. Reflexiones y oportunidades futuras

Esta puesta en común de aplicaciones biomiméticas en dispositivos de captación de energías marinas pretende poner en valor la Biomimesis en el área de la hidrodinámica y la hidráulica. Para ello, se ha detallado el fenómeno físico de la formación de la capa límite, siendo esta la región en la que se generan las fuerzas de *drag* y *lift*. En relación a los propios dispositivos de captación de energía, se han descrito aplicaciones biomiméticas sobre turbinas tidal, el sistema bioWAVE, una unidad de nanogenerador triboeléctrico, el sistema Centipod, el Oyster y los Pelamis. A continuación, se han detallado aplicaciones específicas de la biomimética basadas en la imitación de la piel de tiburón, así como los problemas (el *biofouling*) que este tipo de aplicaciones podrían ayudar a mitigar o resolver en dispositivos marinos. Finalmente, se ha descrito una nueva aplicación a desarrollar en los sistemas de extinción de los tanques de olas, basada también en la imitación de la piel de tiburón.

#### Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo recibido sobre los Grupos de Investigación del Gobierno Vasco (IT1314-19) y de la Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea (GIU19/029), así como al Joint Research Laboratory on Offshore Renewable Energy (JRL-ORE).

### 4. Referencias bibliográfica

Ahamed, R., Mckee, K. and Howard, I. (2020). ‘Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems : *A review*’, *Ocean Engineering* 204: 107248.

Airy, G. B. (1845). *Tides and waves*. Vol. 5. Edited by William Clowes and Sons. London: Encyclopaedia Metropolitana.

Blackledge, J. *et al.* (2013). ‘Estimation of Wave Energy from Wind Velocity’, *Engineering Letters* 4: 158-170.

Buck, B. H. and Langan, R. (2017). *Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean*. published by Springer Nature, Switzerland.

Campos, R. M. *et al.* (2021). ‘Impact of heavy biofouling on a nearshore heave-pitch-roll wave buoy performance’, *Applied Ocean Research* 107: 102500.

Chien, H. *et al.* (2020). ‘Colloids and Surfaces B : Biointerfaces Inhibition of bio fi lm

formation by rough shark skin-patterned surfaces’, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 186: 110738.

Cunming Yu, Mengfei Liu, Chunhui Zhang, *et al.*, (2020). ‘Bio-inspired drag reduction: From nature surfaces’, *Giant* 2: 100017.

Dehlsen Associates, L. (2016). Advanced Controls for the Multi-pod Centipod WEC device. URL (Consulted January 2021): <https://www.osti.gov/servlets/purl/1237967/>.

<https://litoraldegranada.ugr.es/el-litoral/el-litoral-sumergido/fauna/cordados-2/vertebrados/peces/>.

Díez, G., Soto, M. and Blanco, J. M. (2015). ‘Biological characterization of the skin of shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* and preliminary study of the hydrodynamic behaviour through computational fluid’, *Journal of Fish Biology*: 1–15.

Errasti, I. *et al.* (2019) ‘Source Term Modelling of Vane-Type Vortex’, *Energies* 12: 605.

Fernandez-waid, P. *et al.* (2019). ‘Morphological Characterization and Hydrodynamic Behavior of Shortfin Mako Shark (*Isurus oxyrinchus*) Dorsal Fin Denticles’, *Journal of Bionic Engineering* 16: 730-741.

Fish, F. E. (2011). ‘Biomimetics and Marine Technology: An Introduction’, *Marine Technology Society Journal* 45: 1–13.

Fu, Y. F., Yuan, C. Q. and Bai, X. Q. (2017). ‘Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces’, *Biosurface and Biotribology* 3: 11–24.

Esteban G.A. *et al.* (2020). ‘Experimental study of reflection in a parabolic wave dissipation system for a 2D wave flume’, *DYNA*.

Galera, L. *et al.* (2019). ‘A triangular vortex generator modeling on a DU97-W-300 airfoil by a source term model’, Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part A- *Journal of Power and Energy* 233: 635–645.



Lamas, M. I. and Rodriguez, C. G. (2020). 'Hydrodynamics of Biomimetic Marine Propulsion and Trends in Computational Simulations', *Journal of Marine Science Engineering* 8: 1–27.

Motta P J (1977). 'Anatomy and functional morphology of dermal collagen fibers in sharks', *Copeia* 3: 454–464.

Munther, M. *et al.* (2018). 'Applied Surface Science Microfabricated Biomimetic placoid Scale-Inspired surfaces for antifouling applications', *Applied Surface Science* 453: 166–172.

N.J. Heaf (1979). '11th Annual Offshore Technology Conference', in *The effect of marine growth on the performance of fixed offshore platforms in the North Sea*. Houston.

Ouellet, Y. and Datta, I. (2017). 'A survey of wave absorbers. A survey of wave absorbers. Revue des amortisseurs a houle', 1686 (April).

R.G.J. Edyvean (1987). 'Biodeterioration problems of North Sea oil and gas production – a review', *Int. Biodeterior*, 23 (4): 199–231.

Reuk, T.R.E. 'Oyster Wave Power' (2020) REUK. URL (Consulted January 2021):

<http://www.reuk.co.uk/wordpress/wave/oyster-wave-power/>

Satheesh, S., Ba-akdah, M. A. and Al-sofyani, A. A. (2016). 'Natural antifouling compound production by microbes associated with marine macroorganisms — A review', *Electronic Journal of Biotechnology* 21: 26–35.

Shi, W. *et al.* (2016). 'Cavitation observations and noise measurements of horizontal axis tidal turbines with biomimetic blade leading-edge designs', *Ocean Engineering* 121: 143–155.

Shi, W., Atlar, M. and Norman, R. (2017). 'Detailed flow measurement of the field around tidal turbines with and without biomimetic leading-edge tubercles', *Renewable Energy* 111: 688–707.

Smyth, T. (2016). 'Biomimicry 2016'. URL (Consulted January 2021):

<https://biomimicry2016.wordpress.com/2016/04/18/humpback-whales-stall-reduction/>.

Steven Gueguen (2016). *Risk assessment of marine energy projects*.

Stokes, G. (1847). *On the Theory of Oscillatory Waves*. Transactio.

Stratakis, E. *et al.* (2020). ‘Laser engineering of biomimetic surfaces’, *Materials Science & Engineering R* 141: 100562.

Technologies, E. (2012). ‘Centipod wavepower’. URL (Consulted January 2021):  
<http://www.ecomerittech.com/centipod.php>.

The Biomimicry Institute (2018). ‘bioWAVE’. URL (Consulted January 2021):  
<https://asknature.org/idea/biowave/>.

Wang, N. *et al.* (2019). ‘Kelp-inspired biomimetic triboelectric nanogenerator boosts wave energy harvesting’, *Nano Energy* 55: 541–547.

Yang, S. *et al.* (2017), ‘Biofouling on mooring lines and power cables used in wave energy converter systems - Analysis of fatigue life and energy performance’, *Physics Procedia* 65: 166–177.

Zhang, H. and Aggidis, G. A. (2018a) ‘Nature rules hidden in the biomimetic wave energy converters’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 97: 28–37.

Zhang, H. and Aggidis, G. A. (2018b). ‘Nature rules hidden in the biomimetic wave energy converters’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 97: 28–37.

Zhang, Y. *et al.* (2017). ‘Influence of biomimetic boundary structure on the antifouling performances of siloxane modified resin coatings’, *Colloids and Surfaces A* 528: 57-64.

Zhao, W. *et al.* (2020). ‘Progress in Organic Coatings Preparation and drag reduction performance of biomimetic coatings derived from gelatin-3, 4-dihydroxyhydrocinnamic acid gels’. *Progress in Organic Coatings* 139: 105442.



# TESAURO DE BIOMÍMESIS

## VOLUMEN 1- TESAURO

“Estudios Transdisciplinarios en Armonía con la Naturaleza”

*Red Internacional, Interuniversitaria e Interinstitucional de estudios  
sobre Biomimesis RI3BIOMIMICRY NETWORK*

