

## Prefacio

En las conferencias públicas sobre energías marinas es fácil captar la atención de los oyentes con esta cita de Victor Hugo<sup>1</sup>: “Piensa en el movimiento de las olas, el flujo y reflujo, el ir y venir de las mareas. ¿Qué es el océano? Una gran fuerza perdida. ¡Qué estúpida es la tierra! ¡No usar el océano!”. Ahora bien, esta cita comienza con una evocación del movimiento de las olas, que refleja la fascinación que todos sentimos por una expresión tan directa del potencial energético del océano; pero la tarea de recuperar esta energía es tan difícil como fascinante es la impresión que el océano genera en un espectador al borde de la playa. El libro escrito por Aurélien Babarit constituye una reflexión indispensable sobre este vasto campo descifrado por inventores, oceanógrafos, mecánicos y economistas.

Este libro está diseñado con el espíritu de servir de material didáctico, lo suficientemente detallado como para proporcionar a los estudiantes de posgrado un enfoque global y sintético de los convertidores de energía del oleaje y de las olas; que también tiene como objetivo aportar conocimientos básicos a los ingenieros que aspiran desarrollar nuevos sistemas y que deban evaluar rápidamente una solución propuesta para un nuevo dispositivo o para su implantación en un lugar determinado. A lo largo de la presentación, encontramos observaciones que subrayan las inferencias del sentido común físico que debe ser desarrollado en los estudiantes, pero también, las advertencias sobre los resultados, a veces poco intuitivos, que un ingeniero experimentado debe conocer, ya que son producto de trabajos teóricos que datan de décadas, o provienen de los recientes desarrollos exitosos.

En el primer capítulo, encontramos los fundamentos físicos para la evaluación de la reserva energética de olas y oleajes, con un repaso de la teoría lineal, que provee

---

1. En *Quatre-vingt-treize*, “Le cachot”, 1874.

el orden de magnitud de la potencia disponible, evoca las limitaciones que uno encuentra en la práctica en aguas poco profundas; en el mar cruzado temido por los navegantes, y describe el progreso de la oceanografía en términos de medición y predicción de estos fenómenos. Para la generación de la energía undimotriz, la estimación solo se completa si se detalla el coste de la conversión que proporcionan los elementos del mercado, de acuerdo con el costo nivelado de energía (*Levelized Cost Of Energy o LCOE*): el valor de comparación con todas las demás formas de energía.

La historia del sector es abundante porque tiene siglos de antigüedad. El segundo capítulo contiene algunas anécdotas muy instructivas sobre los ensayos y errores, tanto de los pioneros como de los desarrolladores contemporáneos. Se debería alentar a los desarrolladores, entre los futuros lectores de este libro, a que compartan sus opiniones mucho más de lo que lo han hecho hasta el momento. El panorama mundial muestra una atracción creciente y, a pesar de las quiebras notorias, apunta a una renovación que inspirada en métodos de ingeniería basados en la innovación estructurada y en la gestión de proyectos basada en puertas de decisión (*stage gating*), debería contribuir a alcanzar etapas concluyentes en el desarrollo de los sistemas de conversión de energía de las olas.

El tercer capítulo aborda un ejercicio, intrínsecamente difícil, (que yo llamaría “taxonomía” en referencia a la biodiversidad) de describir y clasificar los diferentes conceptos de potencia de las olas. Se trata de un conjunto formado por un cimiento o anclaje de elementos en movimiento relativo que conducen a la elección de un sistema de conversión eléctrica directo o indirecto (aire comprimido, hidráulica). Esta descripción es esencial para comprender cómo el diseñador garantiza el justo equilibrio entre la confiabilidad (que se trata, en la mayoría de los casos, de “supervivencia”) y un dimensionamiento que no conduzca a costes excesivos, no solo en la inversión inicial (CAPEX), sino también en los gastos de operación (OPEX) mediante diferentes estrategias de mantenimiento inducidas por un sistema flotante o fijado en el fondo.

En el último capítulo, el texto proporciona un marco teórico para la evaluación *a priori* del desempeño, mediante el establecimiento de límites superiores de producción, y ofrece las recomendaciones necesarias para una evaluación práctica. La eficacia está relacionada con la noción del tamaño de un dispositivo multicuerpo asociado a las características locales de las olas y el oleaje. En este sentido, llegamos al resultado más práctico del libro, a saber, cómo disponer de argumentos para la evaluación rápida de la idoneidad de un sistema a ser instalado en un lugar de operación. Se trata de primeros pasos alentadores para una reflexión esencial del futuro de la energía de las olas. Esta reflexión también debe tener en cuenta los

diferentes paradigmas de funcionamiento: una instalación aislada, o una conectada a una red global que permita aprovechar las ventajas estratégicas de incluir a las olas en una combinación de energías renovables.

En resumen, un libro informativo con buenos argumentos y un método científico que ¡debe generar muchas vocaciones!

Dr. Yann-Hervé DE ROECK  
Director de France Énergies Marines

## Introducción

En el siglo XXI, las energías renovables han experimentado un crecimiento espectacular. En 2016, la capacidad instalada en energía eólica en el mundo alcanzó la cifra de 487 GW, mientras que en 2001 era apenas de 24 GW. En energía solar fotovoltaica, llegó a 295 GW (en 2001 fue apenas 1,6 GW). Estos indicadores son un buen augurio para la urgente necesidad de transformar nuestro sistema energético.

La energía de las olas es otra fuente de energía renovable. A diferencia de la energía eólica o solar, aquella aún no se ha aprovechado. Esto no se debe a la falta de intentos. En los últimos cuarenta años, inventores, ingenieros e investigadores han ideado muchos sistemas para recuperar la energía de las olas. A pesar de que todos estos esfuerzos no han conducido a una solución tecnológica satisfactoria, el resultado ha sido una abundante literatura científica y tecnológica, así como numerosas y diversas lecciones aprendidas de dichas experiencias.

Para los no iniciados, esta proliferación de investigaciones podría ser un obstáculo. En este libro, nos proponemos hacer una síntesis y plantear una discusión sobre los conceptos básicos y nociones de la energía de las olas, con el fin de facilitar la comprensión del tema. Por lo tanto, este trabajo está dirigido a estudiantes, investigadores, desarrolladores, empresarios y responsables de la toma de decisiones interesados en adquirir una visión global y conocer los elementos esenciales de este campo. Este es el producto de quince años de investigación y siete años de experiencia en la enseñanza del tema, especialmente, en las cátedras impartidas a los estudiantes de ingeniería de segundo y tercer año de la École Centrale de Nantes.

Este libro consta de cuatro capítulos y dos apéndices. Los capítulos 2, 3 y el primer apéndice son accesibles a un amplio público. Los capítulos 1, 4 y el segundo apéndice son más técnicos y requieren un mínimo de conocimientos matemáticos.

En el primer capítulo, examinaremos el potencial de la energía de las olas desde la perspectiva de los recursos energéticos y del mercado de la electricidad. Un primer objetivo es establecer ideas sobre las características y el orden de magnitud del recurso a explotar. En particular, veremos que, aunque la reserva de energía es considerable, su magnitud es menor que el consumo mundial de energía y, por lo tanto, no puede constituir una solución predominante para un sistema energético con bajas emisiones de carbono. Otro objetivo es sensibilizar al lector, en caso necesario, sobre las limitaciones económicas a las que se enfrentan todas las tecnologías para la producción de electricidad a partir de fuentes renovables.

En el segundo capítulo, proponemos una perspectiva histórica sobre la recuperación de la energía de las olas. De hecho, un aspecto notable de este tema es el gran número de invenciones que se han generado. Un primer objetivo de este capítulo es, por tanto, permitir al lector, que puede ser un principiante y que está familiarizado con el concepto de un sistema de recuperación de energía de las olas, aprender del pasado y compararlo con sistemas que han sido probados. Además, esta visita a la historia de la energía de las olas demostrará que, si bien es cierto que algunos proyectos de demostración de centrales undimotrices<sup>1</sup> han fallado en forma significativa, un gran número de proyectos se ha completado exitosamente. De esta manera, queremos demostrar al lector que el problema de la energía de las olas no es técnico –sí, es posible recuperar la energía de las olas para producir electricidad a partir de ella– sino económico: ¿cómo recuperar la energía de las olas a un coste aceptable?

A pesar de que los diferentes principios de funcionamiento de las centrales eléctricas de energía undimotriz son mencionados en el segundo capítulo, hemos optado por reservar las presentaciones detalladas para el tercer capítulo. Debido a la proliferación de instalaciones desde principios de los años 2000, creemos que existe el riesgo de que el lector se pierda un poco entre todos los conceptos al final del segundo capítulo. Volviendo a los principios de funcionamiento y a las diferentes clasificaciones posibles de las centrales eléctricas de olas, mostraremos que constituyen guías de lectura especialmente útiles para orientarse entre tanta

---

1. En este libro, utilizaremos ya sea “central undimotriz” o “sistema undimotriz” como términos genéricos para describir un sistema de recuperación de energía de las olas. Cabe señalar que, en la literatura, también podemos encontrar el término generador eléctrico por oleaje (*wave energy converter* en inglés).

información. En la segunda parte de este tercer capítulo, presentaremos nuevas tendencias que pueden conducir a avances tecnológicos disruptivos.

En el cuarto capítulo, examinamos el desempeño energético de las centrales eléctricas undimotrices. Como con cualquier sistema energético, es instructivo cuantificar su eficiencia, es decir, la relación entre la energía absorbida y la energía disponible. Primero, lo abordamos desde un punto de vista teórico, luego comparamos estos resultados teóricos con los rendimientos energéticos que se han observado en máquinas en condiciones realistas. Por último, dado que en términos absolutos el criterio decisivo es el coste de la energía, concluimos con los resultados de un estudio que compara una selección de centrales de energía undimotriz desde el punto de vista técnico-económico.