

# Trabajo Fin de Máster

## Máster Universitario en Ingeniería Industrial

### Estado del arte de la tecnología de generación eléctrica oceánica

Autor: Alejandra Espejo Sabariego

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

**Dpto. Ingeniería Energética. Grupo Termotecnia**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

# **Estado del arte de la tecnología de generación eléctrica oceánica**

Autor:

Alejandra Espejo Sabariego

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena  
Profesor Titular de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética. Grupo Termotecnia  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster: Estado del arte de la tecnología de generación eléctrica oceánica

Autor: Alejandra Espejo Sabariego

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal



*A mi madre*

*A mi familia*

*A Jose Manuel*

*A mis amigos*



# Agradecimientos

---

En primer lugar, darle mis más sentidos agradecimientos Francisco Javier Pino por haberme dado la oportunidad de realizar con él este Trabajo Fin de Máster que pone el broche final a esta etapa de estudios. Gracias por toda tu atención y tiempo dedicado para la consecución del mismo. Sin ti no habría sido posible.

Muchas gracias a todas las personas que confiaron en que este día llegara, a los que se fueron y a los que aún siguen dándome todo su apoyo. Gracias a mis amigos, a los de siempre, a los que nunca fallan, a los que están en las buenas y en las malas, en las duras y en las maduras; y a los conocidos en este periodo que se han convertido en una parte imprescindible de mi vida. Gracias a mis compañeros de trabajo, por todos los momentos compartidos y vuestro apoyo y ánimo más sincero.

Gracias a Jose Manuel por todas tus palabras llenas de comprensión y entendimiento en los momentos más difíciles, pero sobre todo gracias por tus bromas, chistes y la alegría que pones en todo lo que haces. Gracias por sacarme una sonrisa y mil carcajadas a cada momento.

Por último, pero no menos importante, darle las gracias a mi familia. Gracias a mi tito Manolín, a mi tita Isa, a mis primos Jose, Isabel y Guillermo. Gracias a mis abuelos quienes desde pequeña me enseñaron los valores de la constancia, perseverancia y a seguir mis sueños y no rendirme antes las adversidades. Gracias a mi hermana, mi mitad, mi complemento.

En especial, gracias a la mujer de mi vida, mi madre. Gracias por toda tu dedicación, esfuerzo y sacrificio a lo largo de toda tu vida, sin ti no hubiese llegado hasta aquí. Gracias por tu amor incondicional.

*Alejandra Espejo Sabariego*

*Sevilla, 2021*



# Resumen

---

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha realizado un estudio de investigación del estado del arte de la tecnología oceánica para generación de electricidad, haciendo una distinción de cada una de sus fuentes de energía y tipos de sistemas de aprovechamiento.

El presente estudio describe las generalidades de la energía oceánica, principios básicos de generación, diferentes tipos de energía oceánica, potencial energético, capacidad instalada en la actualidad, beneficios y barreras de desarrollo tecnológico.

Asimismo, se ha llevado a cabo una profunda investigación de cada una de las fuentes de energía procedentes de los océanos en las que se ha analizado su fundamento teórico para la generación de energía eléctrica y las diferentes tecnologías desarrolladas con el transcurso del tiempo.

Finalmente, para cada una de las fuentes de energía oceánica se ha indagado en las principales centrales de producción energética en el caso de las tecnologías más desarrolladas y los principales proyectos planteados para las tecnologías en vías de desarrollo.



# Abstract

---

In the present Tinal Master Degree's Project, a research study has been carried out on the state of the art of oceanic technology for electricity generation, making a distinction between each of its energy sources and types of exploitation systems.

This study describes the generalities of ocean energy, basic generation principles, different types of ocean energy, energy potential, currently installed capacity, benefits and barriers to technological development.

Likewise, an in-depth investigation has been carried out on each of the sources of energy from the oceans in which their theoretical basis for the generation of electricity and the different technologies developed over time has been analysed.

Finally, the main energy production plants have been investigated for each of the oceanic energy sources in the case of the most developed technologies and the main projects proposed for developing technologies

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>i</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>1 Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2 Generalidades de la energía oceánica</b>	<b>3</b>
2.1 Principios básicos	3
2.2 Tipos de energía oceánica	4
2.3 Potencial energético	5
2.4 Capacidad instalada	6
2.5 Beneficios	6
2.6 Barreras al desarrollo tecnológico	7
<b>3 Energía mareomotriz</b>	<b>9</b>
3.1 Fundamento teórico: generación de mareas	9
3.2 Funcionamiento de las centrales mareomotrices	11
3.2.1 Ciclo de simple efecto	11
3.2.2 Ciclo de doble efecto con turbinas reversibles	13
3.2.3 Ciclos de acumulación por bombeo	14
3.3 Tecnologías de energía mareomotriz	15
3.3.1 Embalses	15
3.3.2 Turbinas	18
3.4 Principales centrales mareomotrices	25
3.4.1 Central Mareomotriz de La Rance (Francia)	25
3.4.2 Central Sihwa Lake (Corea del Sur)	25
3.4.3 Planta Annapolis Royal (Canadá)	26
<b>4 Energía undimotriz</b>	<b>27</b>
4.1 Fundamento teórico: generación de olas	27
4.2 Funcionamiento de los sistemas undimotrices	29
4.3 Tecnologías de energía undimotriz	31
4.3.1 Tecnología de columna de agua oscilante (CAO)	33
4.3.2 Tecnología de movimientos oscilantes	36
4.3.3 Tecnología de desbordamiento	39
4.4 Principales proyectos undimotrices	40
4.4.1 Tecnología de columna de agua oscilante (CAO)	40

4.4.2	Tecnología de movimientos oscilantes	42
4.4.3	Proyectos con tecnología por desbordamiento	46
<b>5</b>	<b>Energía por corrientes marinas</b>	<b>51</b>
5.1	<i>Fundamento teórico: generación de corrientes</i>	51
5.2	<i>Funcionamiento de los sistemas de corrientes marinas</i>	53
5.3	<i>Tecnologías de energía por corrientes marinas</i>	54
5.3.1	Turbina de flujo axial	54
5.3.2	Turbina de flujo vertical	60
5.3.3	Alerones basculantes	63
5.4	<i>Principales proyectos por corrientes marinas</i>	64
5.4.1	SeaGen	64
5.4.2	Hammerfes Strom	65
5.4.3	Parque de generación en Paimpol-Brehat	66
5.4.4	GESMEY	67
<b>6</b>	<b>Energía térmica oceánica</b>	<b>69</b>
6.1	<i>Fundamento teórico: gradiente térmico</i>	69
6.2	<i>Funcionamiento de las tecnologías OTEC</i>	70
6.2.1	Ciclo abierto	71
6.2.2	Ciclo cerrado	72
6.2.3	Ciclo híbrido	74
6.3	<i>Tecnologías OTEC: ubicación y componentes</i>	75
6.3.1	Plantas en tierra firme o cercanas a la costa	76
6.3.2	Plantas montadas en plataformas	77
6.3.3	Plantas flotantes en aguas oceánicas profundas	77
6.3.4	Intercambiadores: evaporadores y condensadores	78
6.3.5	Turbinas	80
6.3.6	Fluido de trabajo	80
6.3.7	Bombas	82
6.4	<i>Principales proyectos OTEC</i>	82
6.4.1	Laboratorio de Energía Natural (Hawai)	82
6.4.2	Otros proyectos de interés	83
<b>7</b>	<b>Energía azul o potencia osmótica</b>	<b>85</b>
7.1	<i>Fundamento teórico: gradiente osmótico</i>	85
7.2	<i>Funcionamiento de una planta osmótica</i>	86
7.3	<i>Tecnologías en energía azul</i>	87
7.3.1	Ósmosis por Presión Retardada (PRO)	89
7.3.2	Electrólisis inversa (RED)	93
7.4	<i>Principales proyectos de energía azul</i>	97
7.4.1	Proyectos con proceso PRO	97
7.4.2	Prototipo del proceso RED	99
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>101</b>
	<b>Referencias</b>	<b>103</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Reservas teóricas de energía oceánica	5
Tabla 3-1. Resumen de las principales centrales mareomotrices en el mundo	26
Tabla 4-1. Resumen de principales proyectos undimotrices	49
Tabla 5-1. Resumen de los principales proyectos de energía por corrientes marinas	68
Tabla 6-1. Clasificación de refrigerantes en función de su grado de seguridad	81
Tabla 6-2. Propiedades de refrigerantes aptos para OTEC	81
Tabla 6-3. Resumen de los principales proyectos OTEC	84
Tabla 8-1. Resumen de la capacidad total instalada de energía oceánica a escala internacional en 2020	101



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Principios básicos del sistema de energía oceánico	4
Figura 2-2. Fuentes de energía oceánica	5
Figura 2-3. Energía oceánica global instalada en 2020 [7]	6
Figura 2-4. Capacidad actual respecto a la capacidad prevista [7]	6
Figura 2-5. Curva de desarrollo de los sistemas de aprovechamiento oceánico [7]	8
Figura 3-1. Generación de la pleamar y bajamar en la Tierra [3]	9
Figura 3-2. Ciclo de las mareas [3]	10
Figura 3-3. Distribución de la amplitud de mareas a nivel mundial [9]	10
Figura 3-4. Tecnología básica de funcionamiento de centrales mareomotrices [1]	11
Figura 3-5. Esquema de funcionamiento de ciclo de simple efecto con embalse único [9]	12
Figura 3-6. Ciclo de simple efecto durante el vaciado del embalse [9]	12
Figura 3-7. Ciclo de simple efecto durante el llenado del embalse [9]	13
Figura 3-8. Esquema de funcionamiento de ciclo de doble efecto con turbinas reversibles [9]	13
Figura 3-9. Ciclo de doble efecto con turbinas reversibles [9]	14
Figura 3-10. Ciclo de acumulación por bombeo [9]	15
Figura 3-11. Embalse de marea en La Rance (Francia)	16
Figura 3-12. Comportamiento de una laguna de marea	17
Figura 3-13. Laguna de marea Tidal Lagoon (Reino Unido)	17
Figura 3-14. Esquema de funcionamiento de una turbina mareomotriz [11]	18
Figura 3-15. Tipos de estructuras para turbinas mareomotrices [12]	19
Figura 3-16. Clasificación de turbinas hidráulicas	19
Figura 3-17. Partes de una turbina de bulbo	21
Figura 3-18. Turbina Straflo	21
Figura 3-19. Turbina tubular	22
Figura 3-20. Turbina de pozo	22
Figura 3-21. Turbina Kaplan	23
Figura 3-22. Esquema de funcionamiento de una turbina Darrieus [14]	24
Figura 3-23. Turbina Savonius	24
Figura 3-24. Central Sihwa Lake	25
Figura 3-25. Planta Annapolis Royal	26
Figura 4-1. Proceso de generación de las olas [17]	27
Figura 4-2. Movimiento de ondas superficiales y movimiento de partículas superficiales [19]	28
Figura 4-3. Energía de las olas [19]	28
Figura 4-4. Altura significativa de las olas en el mundo [17]	29
Figura 4-5. Sistemas de conversión de energía undimotriz en eléctrica [18]	30
Figura 4-6. Etapas de conversión de energía undimotriz [6]	31
Figura 4-7. Clasificación de los convertidores de energía undimotriz de acuerdo con su posicionamiento [19]	

	32
Figura 4-8. Clasificación de los convertidores de energía undimotriz de acuerdo con su tamaño y orientación [19]	32
Figura 4-9. Clasificación de las tecnologías de energía undimotriz	33
Figura 4-10. Principio de funcionamiento de los sistemas de Columna de Agua Oscilante [21]	34
Figura 4-11. Diagrama de funcionamiento de una Turbina Wells [6]	34
Figura 4-12. Diagrama de funcionamiento de una Turbina de Acción [6]	35
Figura 4-13. Diagrama de funcionamiento de una Turbina de Dennis-Auld [6]	36
Figura 4-14. Grados de libertad de los dispositivos de movimiento oscilante	36
Figura 4-15. Estructura básica del sistema de movimiento oscilante [6]	37
Figura 4-16. Diferentes tipos de convertidores de transmisión PTO mecánicos [6]	37
Figura 4-17. Transmisión de convertidores hidráulicos/neumáticos [6]	38
Figura 4-18. Transmisión de convertidores eléctricos lineales [6]	39
Figura 4-19. Estructura básica del principio de funcionamiento de los dispositivos de desbordamiento [6]	39
Figura 4-20. Diagrama de funcionamiento de turbinas hidráulicas [6]	40
Figura 4-21. Mk1	41
Figura 4-22. Might Whale	41
Figura 4-23. LIMPET	42
Figura 4-24. Central en Mutriku	42
Figura 4-25. AquaBuoy	43
Figura 4-26. PowerBuoy	43
Figura 4-27. Prototipo 1:70 de Manchester Bobber	44
Figura 4-28. Dispositivo Pelamis	45
Figura 4-29. Oyster	46
Figura 4-30. Sistema flotante desarrollado por Sweden Sea Power	47
Figura 4-31. Sistema de desbordamiento flotante Wave Dragon	48
Figura 4-32. Sistema de funcionamiento de TAPCHAN	49
Figura 5-1. Principales corrientes marinas en la Tierra	52
Figura 5-2. Esquema general de conversión de energía por corrientes marinas	53
Figura 5-3. Pérdidas en el proceso de conversión de energía cinética a energía eléctrica	53
Figura 5-4. Esquema de turbina de eje horizontal marina [27]	54
Figura 5-5. Turbina KHPS [27]	55
Figura 5-6. Turbina Generador de Marea de Clean Current [27]	55
Figura 5-7. Turbina Underwater Electric Kite	56
Figura 5-8. Turbina Hydroreactor Stream Accelerator [27]	57
Figura 5-9. Turbina Swanturbines	57
Figura 5-10. Tubina Delta Stream	58
Figura 5-11. Turbina Evopod	58
Figura 5-12. Turbina Nereus	59

Figura 5-13. Turbina Solon	59
Figura 5-14. Esquema de turbina de eje vertical marina [27]	60
Figura 5-15. Dispositivo Blue Energy	61
Figura 5-16. Turbina Helicoidal Gorlov	62
Figura 5-17. Turina Kobold	63
Figura 5-18. Diseño de alerón basculante	64
Figura 5-19. SeaGen en Strangford	65
Figura 5-20. Turbina HS1000	66
Figura 5-21. Turbina en el parque de generación de Paimpol-Brehat	67
Figura 5-22. Diseños de turbinas del proyecto GESMEY	68
Figura 6-1. Variación de la temperatura con la profundidad [29]	69
Figura 6-2. Distribución de temperatura en los océanos [29]	70
Figura 6-3. Diagrama de proceso de un sistema OTEC [31]	70
Figura 6-4. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo abierto [31]	72
Figura 6-5. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo cerrado Rankine [31]	73
Figura 6-6. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo cerrado Kalina [31]	73
Figura 6-7. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo cerrado Uehara [31]	74
Figura 6-8. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo híbrido [31]	75
Figura 6-9. Plantas OTEC en tierra firme o cercanas a la costa [31]	76
Figura 6-10. Plantas OTEC montadas en plataformas [31]	77
Figura 6-11. Plantas OTEC flotantes [31]	78
Figura 6-12. Intercambiador de calor para OTEC	79
Figura 6-13. Condensador de contacto directo (ADCC) diseñado por El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos	79
Figura 6-14. Buque Mini-OTEC	82
Figura 6-15. Planta piloto de NELHA	83
Figura 7-1. Procesos de ósmosis [34]	85
Figura 7-2. Mapa de salinidad en los océanos y mares [34]	86
Figura 7-3. Esquema de funcionamiento de una planta osmótica [36]	86
Figura 7-4. Clasificación de la energía de salinidad basada en el tipo de proceso	89
Figura 7-5. Esquema de funcionamiento de centrales eléctricas por ósmosis por presión retardada (PRO) [38]	90
Figura 7-6. Esquema general de una turbina Francis	91
Figura 7-7. Esquema de membranas PRO [37]	92
Figura 7-8. Esquema de funcionamiento de una central por electrólisis inversa (RED) [37]	94
Figura 7-9. Esquema del proyecto SeaHERO en Corea [37]	98
Figura 7-10. Esquema del proyecto Mega-Ton en Japón [37]	99



# 1 OBJETIVOS

---

El principal propósito del presente Trabajo Fin de Máster es realizar una revisión bibliográfica de la tecnología desarrollada en el ámbito de la energía oceánica desde sus inicios hasta la actualidad, abarcando cada una de sus fuentes de energía. Más concretamente, con el presente estado del arte se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- Obtener datos relevantes de la tecnología desarrollada para el aprovechamiento de energía procedente de mares y océanos.
- Describir el estado de desarrollo alcanzado hasta la actualidad a través de las diferentes fuentes de energía.
- Analizar la evolución de esta tecnología en los últimos años.
- Aportar información sobre las tendencias de las tecnologías oceánica a través de las últimas investigaciones llevadas a cabo.

Para ello, se ha estructurado la memoria en 6 bloques diferenciados. En el primero de ellos se hablará sobre las generalidades de la energía oceánica, tipos de energía, potencial y capacidad instalada, entre otros aspectos. Los 5 bloques restantes estarán enfocados en analizar la tecnología de cada una de las fuentes de energía oceánicas, funcionamiento teórico y principales aplicaciones.



## 2 GENERALIDADES DE LA ENERGÍA OCEÁNICA

---

La energía oceánica es aquella energía producida a través del aprovechamiento del recurso hídrico y los grandes cuerpos de agua, y específicamente mediante el beneficio de la energía potencial obtenida por medio de turbinas que se ponen en movimiento debido al paso de agua a través de ellas. [1]

La energía procedente los océanos implica la generación de electricidad a partir de las mareas, las olas, las corrientes, el gradiente de salinidad y el gradiente térmico del mar o del océano. El océano es una enorme fuente de energía renovable con el potencial para satisfacer un porcentaje importante del suministro eléctrico mundial al tratarse de un tipo de energía abundante, geográficamente diversa y renovable.

A diferencia de otras energías renovables, la energía oceánica no se captura de una sola fuente, sino que, en cambio, se almacena en una variedad de formas: la energía de las olas, la energía cinética de las corrientes marinas y de mareas, la energía potencial de las mareas y la salinidad o los gradientes térmicos. Como consecuencia de esta variedad, y de la relativa juventud del sector, el número de conceptos para la conversión de energía oceánica es muy grande. [2]

En adición, la energía oceánica puede servir de palanca al explotar sinergias y transferir conocimiento en otros sectores como la construcción naval, plataformas offshore eólicas, de gas o petróleo e incluso tecnología de dragados.

### 2.1 Principios básicos

Como bien se ha comentado, la energía oceánica o marina hacen referencia a las diversas formas de energía eléctrica renovable que son potencialmente aprovechables. Siguiendo esta línea, existen dos tipos principales de energía oceánica: mecánica y térmica. El principio básico del sistema de energía oceánica depende de la rotación de la Tierra y de la atracción gravitatoria de la Luna creando fuerzas mecánicas, así como de la interacción del Sol al generar gradientes térmicos.

La rotación de la Tierra crea el viento que forma ondas en la superficie del océano, mientras que la atracción gravitacional de la Luna crea mareas y corrientes costeras. En adición, la energía térmica derivada del Sol calienta la superficie del océano, mientras que las profundidades permanecen más frías. En el sistema de energía oceánica, esta diferencia de temperatura permite que la energía se capture y se convierta en energía eléctrica, siendo una forma de sistema de energía renovable. La conversión de energía térmica oceánica requiere de una diferencia de temperatura de al menos 20 °C. [3]

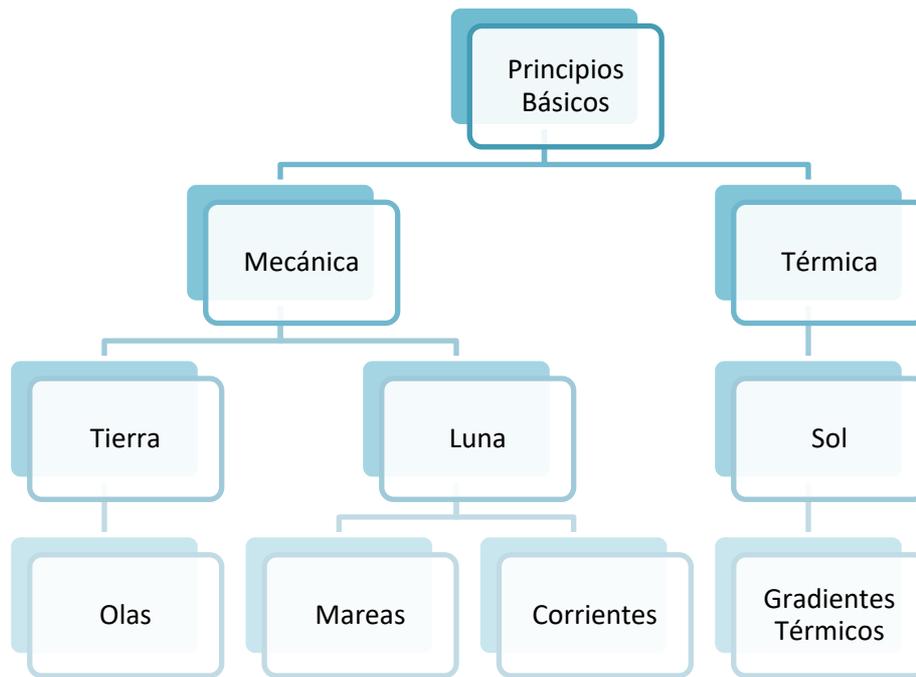


Figura 2-1. Principios básicos del sistema de energía oceánico

## 2.2 Tipos de energía oceánica

En la actualidad, el sistema de energía oceánica es la tecnología más prometedora para el aprovechamiento de energía renovable debido a que el 97 % de los recursos hídricos existentes provienen de los mares y océanos. Una primera división básica se basa en la fuente específica de energía que la tecnología está aprovechando. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía y la Asociación Europea de Energía Oceánica se pueden distinguir las siguientes fuentes de energía procedentes de los océanos y mares [4] [5]:

- Energía mareomotriz: energía que se obtiene mediante el aprovechamiento de las mareas.
- Energía undimotriz: energía que se obtiene del aprovechamiento de las olas en los mares y océanos.
- Energía por corrientes marinas: energía obtenida de las corrientes oceánicas obtenida del aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes marinas.
- Energía térmica oceánica: energía de las diferencias de temperatura a diferentes profundidades o entre la superficie y el fondo marino.
- Energía azul o potencia ósmica: energía de los gradientes de salinidad obtenida por la diferencia de concentración salina entre el agua de mar y el agua de los ríos.

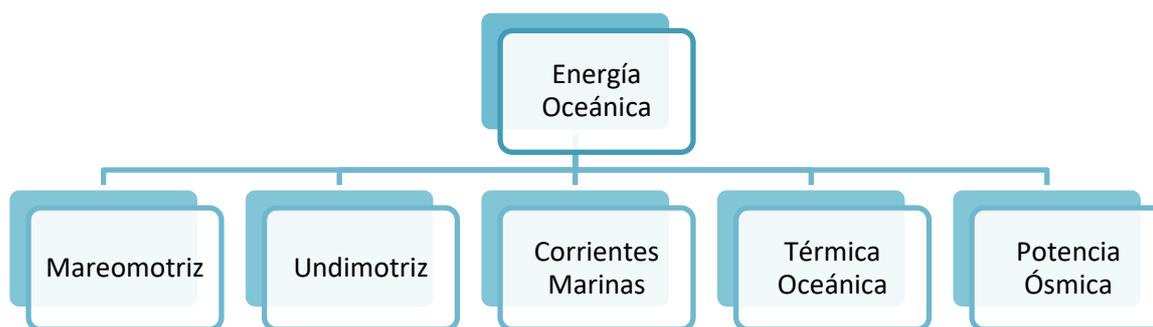


Figura 2-2. Fuentes de energía oceánica

## 2.3 Potencial energético

Los océanos cubren más del 70 % de la superficie terrestre y representan una enorme cantidad de energía en forma de olas, mareas, corrientes marinas y recursos térmicos y osmóticos. Se estima que diariamente ingresan aproximadamente 174 PW provenientes de la radiación solar, de los cuales se calcula que la mitad es absorbida por las placas terrestres y los océanos. Esta energía correspondiente a unos 89 PW/día es alrededor de 20.000 veces la energía consumida por el mundo para el mismo periodo de tiempo.

Actualmente, la energía oceánica es una fuente casi imposible de medir en términos de potencial energético debido a la gran variedad de energías presentes (anteriormente enumeradas). Por ello, aunque la energía oceánica todavía está en una etapa de desarrollo, los investigadores están buscando formas de capturar esa energía y convertirla en electricidad. [3]

El océano es una enorme fuente de energía renovable con el potencial de satisfacer un porcentaje importante de suministro a nivel mundial de electricidad. En la última década se han realizado numerosos estudios para estimar el potencial de energía aprovechable proveniente de los océanos, en concreto, se ha determinado que a nivel mundial el potencial teórico de la Energía Oceánica se encuentra en más de 100.000 TWh/año, siendo el consumo mundial de electricidad aproximado de 16.000 TWh/año.

Se ha estimado que el recurso técnico global explotable con la tecnología actual es del orden de 80.000 TWh/año para la energía procedente de las olas, 50.000 TWh/año para la energía procedente de las corrientes, 800 TWh/año para la energía de las mareas, 2.000 TWh/año para la energía procedente del gradiente salino y aproximadamente de 10.000 TWh/año para la conversión de energía térmica oceánica. [6]

Tabla 2-1. Reservas teóricas de energía oceánica

FUENTE	CAPACIDAD (GW)	GENERACIÓN ANUAL (TWh)
<b>Mareomotriz</b>	90	800
<b>Undimotriz</b>	1.000-9.000	8.000-80.000
<b>Corrientes marinas</b>	5.000	50.000
<b>Térmica oceánica</b>	1.000	10.000
<b>Potencia osmótica</b>	20	2.000

## 2.4 Capacidad instalada

De acuerdo con los datos proporcionados por Ocean Energy System (OES), una asociación intergubernamental de 25 países que opera bajo el mando establecido por la Agencia Internacional de Energía, la capacidad de energía oceánica instalada en 2020 en todo el mundo es de 535 MW, una cifra insignificante en comparación con la capacidad global instalada de todas las energías renovables de 2.600 GW. [7]

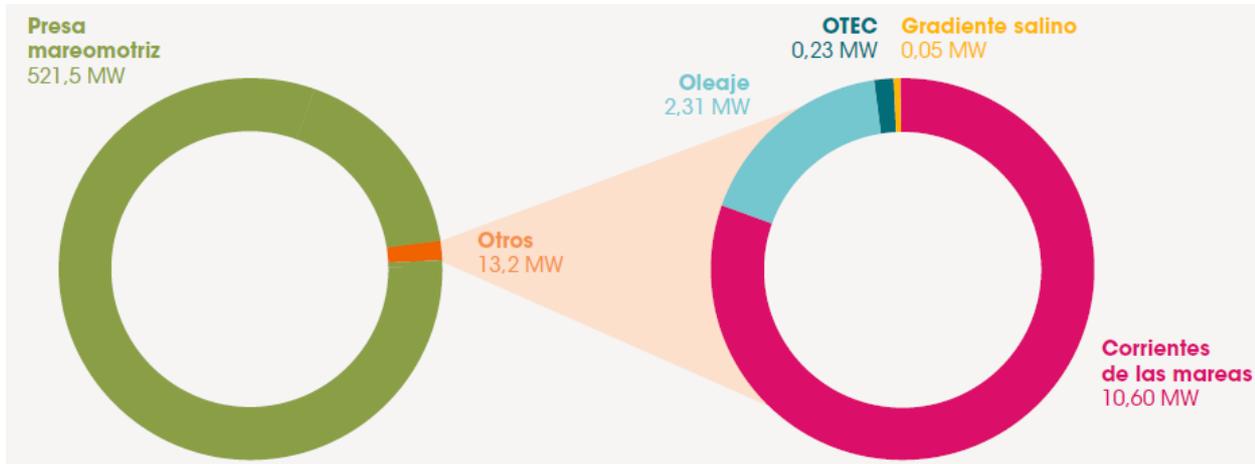


Figura 2-3. Energía oceánica global instalada en 2020 [7]

Como se puede apreciar en la figura anterior, la mayor parte de la capacidad instalada de energía oceánica proviene de la tecnología de presas de mareas con un valor de 521,5 MW, tecnología que domina la producción de energía oceánica en el mundo con tres grandes proyectos en Canadá, Francia y Corea del Sur. Sin embargo, la capacidad instalada más reciente y la tendencia que se prevé en el futuro para la energía oceánica avanza hacia otras tecnologías, como la generación de energía a partir de la corriente de las mareas, seguida de la energía del oleaje y la conversión térmica oceánica (OTEC).

Los proyectos relativos a las corrientes de la marea y el oleaje que se están desarrollando actualmente (excepto la tecnología de rango de mareas), si se materializan, podrían aportar casi 3 GW de capacidad adicional en todo el mundo. La mayor parte de esta capacidad se encuentra en Europa (55 %), seguido de Asia y el Pacífico (28 %) y Oriente Medio y África (13 %). La parte restante se distribuye entre América del Norte (2 %) y América Central y del Sur (2 %). [7]

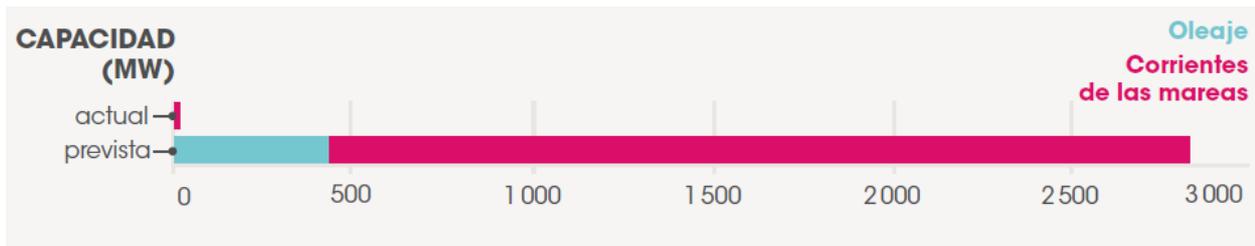


Figura 2-4. Capacidad actual respecto a la capacidad prevista [7]

No obstante, no hay que olvidar que actualmente los proyectos que aprovechan el potencial de la energía procedente de los océanos son en gran parte de carácter investigativo o se encuentran aún en fase de prototipo. La creación y puesta en marcha de las redes de conocimiento y organizaciones que unifican los esfuerzos mundiales por el desarrollo de la energía oceánica ha permitido el avance significativo de los estudios y mapeos del potencial de la energía oceánica.

## 2.5 Beneficios

La energía oceánica comparte con otras fuentes de energías renovables un amplio conjunto de importantes ventajas [2]:

- Es una fuente de energía fiable e inagotable. El poder teórico de la masa de agua del planeta es inmenso e inmediatamente disponible.
- Es benigna para el medio ambiente. Tiene cero emisiones de gases efectos invernadero (incluido el CO<sub>2</sub>) y no producen residuos ni líquidos ni sólidos.
- Creación de empleo y desarrollo económico. Además de las comunidades marítimas directamente afectadas a través de sus necesidades inducidas (construcción, transporte, mantenimiento, control, etc.) la energía oceánica estimula un mercado laboral dinámico estimado en el orden de 10 a 20 puestos de trabajo por MW instalado.
- Aumenta la diversidad y solidez de la cartera de suministro de energía eléctrica. A través de su contribución para aumentar el nivel de la oferta en la cartera de renovables, la energía oceánica proporciona una contribución importante al futuro del suministro de energía.
- Es una fuente de energía viable para áreas remotas. En áreas costeras remotas, incluidas pequeñas islas, la energía oceánica puede ayudar a reducir la dependencia de centrales eléctricas auxiliares (diésel), eliminando así su emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y reduciendo los riesgos ambientales asociados con el transporte del combustible.

En adición, además de este conjunto de beneficios compartidos con la mayor parte de fuentes de energía renovables, la energía oceánica también tiene numerosas ventajas distintivas que la hacen excepcionalmente atractiva:

- Es altamente predecible. Las mareas pueden predecirse con extrema exactitud con siglos de anticipación. Las ondas viajan a grandes distancias y su llegada a un lugar determinado puede predecirse por el seguimiento satélite. Las corrientes y gradientes son datos conocidos. Por lo tanto, con un pronóstico adecuado, la variación de energía oceánica producida puede integrarse de manera más económica en la red eléctrica.
- Tiene una densidad de potencia extremadamente alta. La densidad del agua es ciento de veces mayor que la del aire, lo que resulta en un menor costo de capacidad instalada.
- Está disponible en las proximidades de los principales centros de demanda. Muchos de los principales centros de demanda en todo el mundo se encuentran cerca de la costa, lo que hace que la energía oceánica sea particularmente adecuada para ellos.
- Tiene un impacto visual muy bajo: con pocas excepciones, los dispositivos de energía oceánica están sumergidos, semisumergidos o ubicados en alta mar, minimizando así la contaminación visual.

## 2.6 Barreras al desarrollo tecnológico

Los sistemas de aprovechamiento de energía oceánica se encuentran sujetos a diferentes factores de desarrollo que determinan la etapa en la que se encuentra cada tecnología debido a que las tecnologías de energía oceánica deben lograr una mejora significativa en la confiabilidad y el rendimiento, al tiempo que deben reducir los costos generales para ser competitivas con las tecnologías de energía existentes.

La identificación de las formas en que pueden producirse tales mejoras tecnológicas y reducciones de costos es necesaria y esencial para que la energía oceánica alcance la plena comercialización y contribuya a la combinación energética mundial.

Actualmente, las tecnologías de la energía oceánica se enfrentan a cuatro cuellos de botella principales:

1. Desarrollo tecnológico
2. Problemas económicos y de marketing
3. Dificultades ambientales y administrativas
4. Disponibilidad en red

En este contexto, se ha pedido al Foro de Energía Oceánica que se centre en los tres primeros temas. Sin embargo, los problemas de la red son una preocupación creciente entre las partes interesadas en la energía

oceánica los desarrolladores que buscan acometer proyectos de mayor envergadura (>20 MW).

Hoy en día, las barreras tecnológicas representan el problema más importante que el sector de la energía oceánica debe abordar a corto y medio plazo. Superar los problemas tecnológicos es fundamental para identificar soluciones a otras barreras que ralentizan el desarrollo de este sector.

A pesar del creciente interés demostrado por iniciativas políticas como la Comunicación de la Comisión Europea “Blue Energy”, es necesario actuar para aprovechar el potencial de la energía oceánica en los mares y océanos. Los desarrollos de la energía oceánica avanzan a un ritmo más lento del esperado, aunque se ha producido un desarrollo significativo principalmente con energía de las olas y las mareas, existen otros sectores e industrias maduras que potencialmente podrían ofrecer una oportunidad para la transferencia de conocimiento o tecnología al sector de la energía oceánica. [8]

La siguiente figura muestra la curva de desarrollo de los sistemas de aprovechamiento oceánico en cinco etapas principales: investigación, desarrollo, demostración, implementación y tecnología madura. Durante las primeras dos etapas los costos de la tecnología aumentan considerablemente debido a que la tecnología se encuentra en etapas muy tempranas y requiere de grandes inversiones para su implementación y continuo mejoramiento. Durante la etapa de demostración las tecnologías entran en una etapa precomercial en la cual la tecnología ya se encuentra completamente funcional y puede comenzar a optimizarse, lo que eventualmente reducen los precios de la tecnología. En las últimas etapas de la curva de aprendizaje los costos de la tecnología se estabilizan hasta un punto donde se considera a la tecnología como madura.

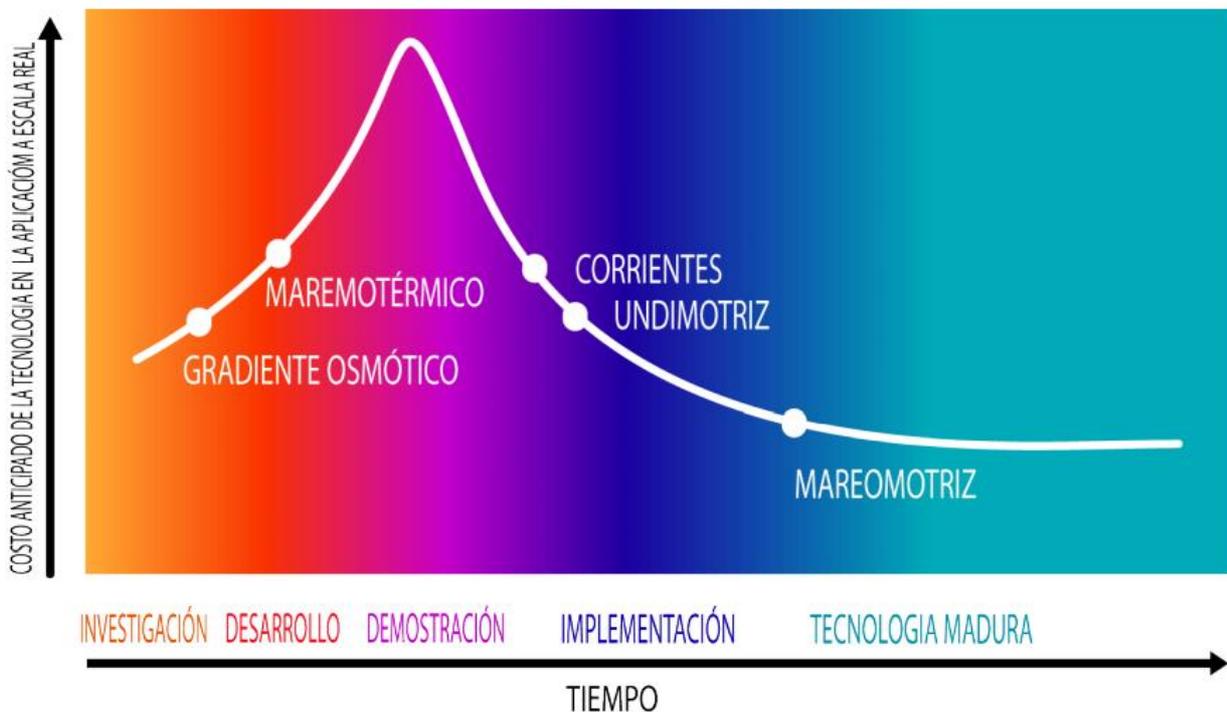


Figura 2-5. Curva de desarrollo de los sistemas de aprovechamiento oceánico [7]

# 3 ENERGÍA MAREOMOTRIZ

La energía mareomotriz es una forma de energía hidroeléctrica que aprovecha el movimiento del agua causado por las corrientes de las mareas o la subida y bajada del nivel del mar causado principalmente por la interacción de los campos gravitacionales del sistema Tierra-Sol-Luna. El método más eficaz de tomar ventaja de estos desplazamientos verticales de agua es a través de embalses de manera que al subir el nivel del mar, la masa de agua queda atrapada por presas.

La energía mareomotriz se produce gracias al uso de generadores de energía, es decir, grandes turbinas submarinas colocadas en áreas con grandes movimientos de marea que se encuentran diseñadas para capturar el movimiento cinético del reflujos y el oleaje de mareas para producir electricidad. [2] [3]

La relación entre la cantidad de energía que se puede obtener junto a su coste económico y ambiental, han sido un impedimento notable hasta ahora para el uso generalizado de este tipo de energía, existiendo pocas centrales que se encuentren en funcionamiento actualmente. [9]

## 3.1 Fundamento teórico: generación de mareas

La energía mareomotriz es la energía disipada por los movimientos de las mareas que se deriva de las fuerzas gravitacionales y centrífugas entre la Tierra, la Luna y el Sol. La cota de las aguas marinas varía alternativamente durante el día. La marea es la constante subida y bajada del nivel del agua del océano. El momento en el que el agua está por encima del nivel medio del océano se denomina pleamar. Llegado a este límite el avance se suspende, la superficie del mar permanece en calma y estacionaria durante ocho o diez minutos. Después las aguas comienzan a retirarse lentamente, el momento en el que el nivel del agua está por debajo del nivel medio se denomina bajamar. En este límite se suspende el descenso y el mar permanece al mismo nivel durante otros ocho o diez minutos, al cabo de los cuales vuelve a comenzar el ascenso.

Las mareas tienen lugar debido a la atracción del agua del océano por la Luna y el Sol. Sin embargo, la fuerza gravitacional de la Luna es 2,2 veces mayor debido a que está más cerca de la tierra. Las oscilaciones son de carácter periódico, produciéndose cada 12 horas y 25 minutos, y cuya intensidad está relacionada con las posiciones relativas que el Sol y la luna tienen con respecto a la Tierra. Cuando la Luna se encuentra sobre el meridiano de un lugar la atracción es mayor, se produce entonces el flujo o ascenso de agua al que corresponde otro flujo en el lado contrario de la Tierra. La hidrosfera o superficie de agua adopta en consecuencia la forma de un elipsoide en cuyos extremos del eje menor se encuentran las bajamares. [10]

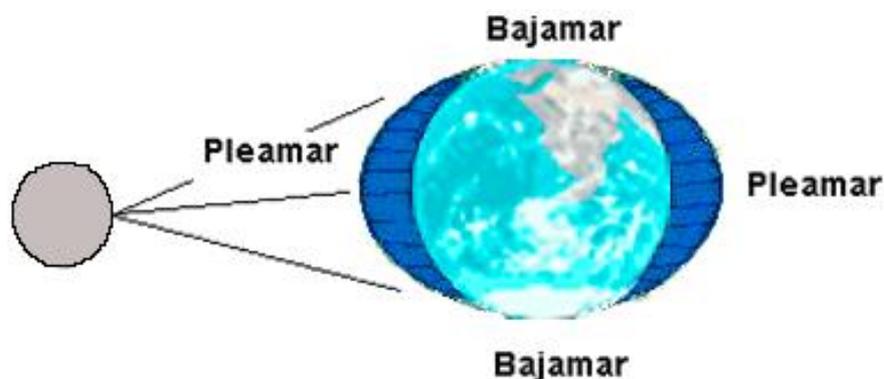


Figura 3-1. Generación de la pleamar y bajamar en la Tierra [3]

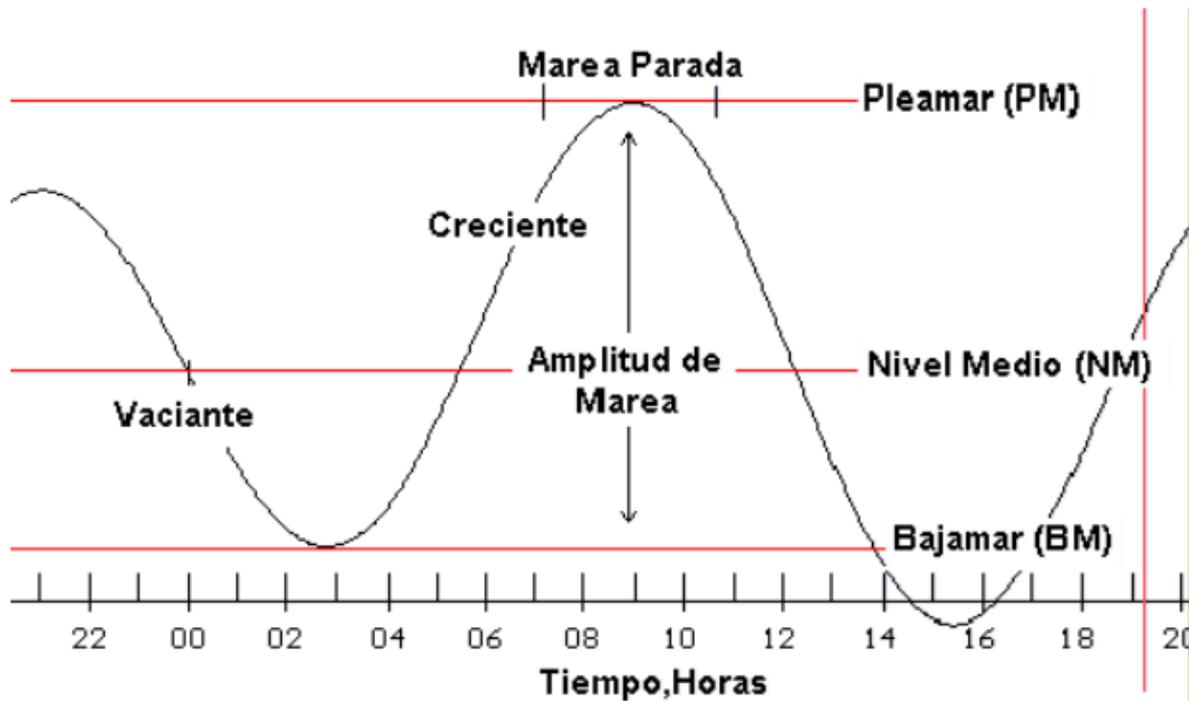


Figura 3-2. Ciclo de las mareas [3]

La altura o amplitud de la marea es la diferencia de nivel entre la pleamar y la bajamar que puede ser casi imperceptible (30 a 50 centímetros) o muy impactante (21 metros). Todos los mares tienen mareas, pero donde el fenómeno es evidente es en los océanos abiertos y específicamente las bahías y estrechos en los cuales se internan las aguas de éstos. Por ejemplo, en Río Gallegos (Argentina) la amplitud de la marea es de 18 metros, siendo dicha diferencia la segunda a nivel mundial en importancia después de la Bahía de Fundy (Canadá). Sin embargo, esta diferencia no significa que haya 18 metros de diferencia de nivel aprovechables a nivel energía mareomotriz, de hecho, la diferencia aprovechable es bastante menos. [9]



Figura 3-3. Distribución de la amplitud de mareas a nivel mundial [9]

## 3.2 Funcionamiento de las centrales mareomotrices

Durante el movimiento oscilatorio del nivel del mar, el agua se puede almacenar durante su ascenso y posteriormente se puede liberar cuando la marea baje. Los ejemplos más claros de viabilidad económica a nivel mundial y que ofrecen los mejores resultados para el diseño y proyecto de una central hidroeléctrica mareomotriz están basados en el almacenamiento de agua en el embalse que se forma al construir un dique, con compuertas y turbinas, en una bahía, río o estuario. Se construye una presa que aísla el cuenco de las mareas del océano y se logra una distinción en el nivel del agua entre el cuenco y el océano. Durante la marea alta, el agua fluye desde el océano hacia el cuenco de marea a través de una turbina de agua. Posteriormente, la unidad de la turbina funciona y produce electricidad, ya que está específicamente acoplada a un generador. De este modo, las partes que componen una centra mareomotriz son el dique, embalse, ducto de la turbina, compuesta de paso de agua y turbina. [3]

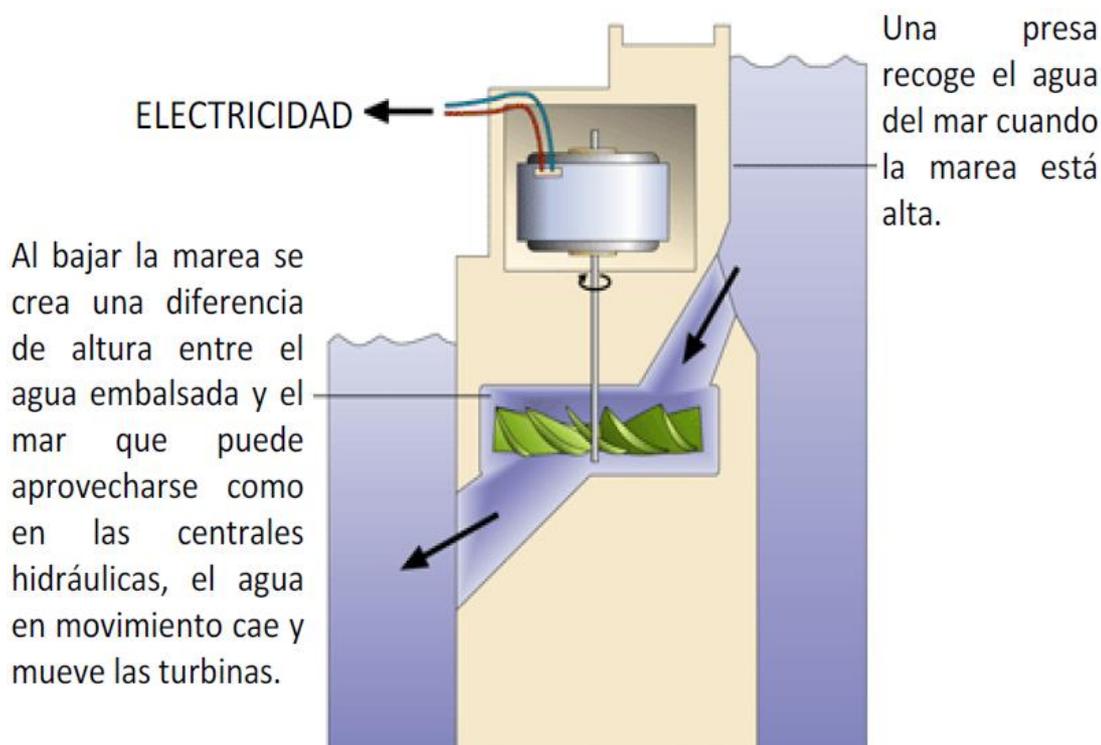


Figura 3-4. Tecnología básica de funcionamiento de centrales mareomotrices [1]

Los sistemas mareomotrices son considerados como los más maduros en términos tecnológicos. Esto es debido a que su aprovechamiento es similar al aprovechamiento hidráulico tradicional y, por lo tanto, no ha presentado grandes variaciones a lo largo de los años. No obstante, las condiciones de los embalses de mareas no son iguales a los embalses de los ríos tradicionales donde las turbinas solo funcionan en un sentido y de manera continua. [11]

Basándose en este principio de funcionamiento básico, en la actualidad hay cuatro métodos para el aprovechamiento de las mareas: ciclo de efecto simple, ciclo de doble efecto con turbinas reversibles, ciclos por acumulación por bombeo y ciclos múltiples.

### 3.2.1 Ciclo de simple efecto

El ciclo de simple efecto fue el primer sistema que se utilizó para la generación de energía mareomotriz. Este método está constituido por un embalse único, siendo los métodos más operativos los siguientes:

- Generación durante el reflujó de la marea (bajamar). El llenado del embalse se efectúa con las compuertas abiertas y el vaciado con turbinaje, siendo este tipo el más eficiente de los dos.
- Generación durante el flujo (pleamar). El llenado del embalse se efectúa con turbinaje y el vaciado con las compuertas abiertas. Es menos eficiente que el anterior; porque el embalse trabaja con niveles más bajos y la capacidad de almacenamiento es menor.

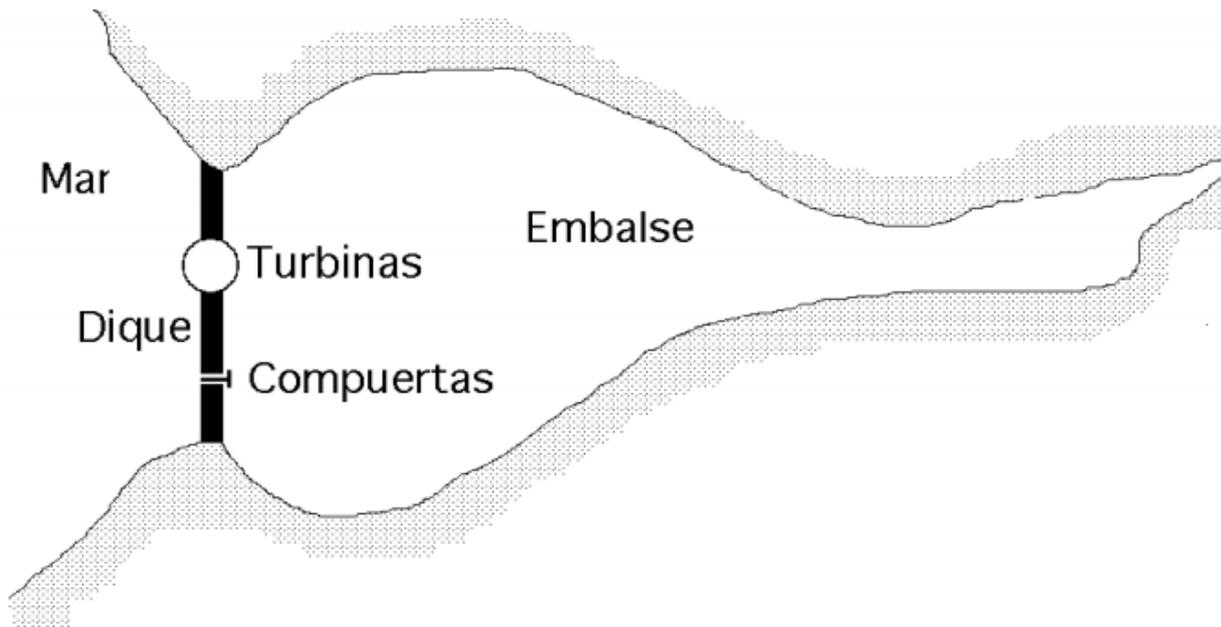


Figura 3-5. Esquema de funcionamiento de ciclo de simple efecto con embalse único [9]

En consecuencia, genera sólo durante la bajamar, vaciándose el embalse, o sólo durante la pleamar, llenándose el embalse. Estas operaciones requieren de una turbina hélice de flujo axial y alta velocidad específica. Durante el vaciado del embalse se opera de la siguiente manera: Cuando sube la marea se abren las compuertas y el embalse se llena. Luego cuando comienza a bajar la marea se cierran las compuertas y se espera un tiempo, del orden de 3 horas, para alcanzar una diferencia de nivel adecuada entre el mar y el embalse. Finalmente, durante 5 ó 6 horas, se hace pasar el agua por las turbinas generando energía eléctrica.

En los ciclos de simple efecto que funcionasen con vaciado del embalse sólo se generaría energía, cada día, durante dos períodos de unas 10 a 12 horas en total, que además se irían produciendo en horas diferentes cada día. Si el turbinaje se realizase durante el llenado del embalse, los tiempos de generación serían menores, del orden de 4 a 5 horas, con tiempos de espera o de bombeo de 3 horas; en total funcionarían entre 8 y 10 horas diarias. Ejemplo de esto son las Centrales de Fundy y Kislay. [9]

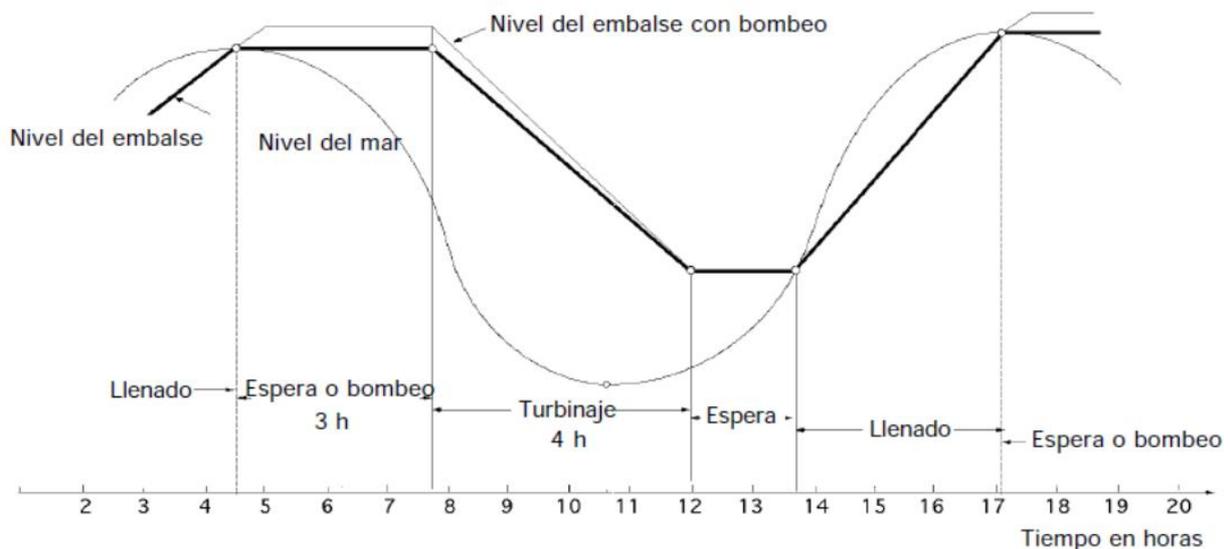


Figura 3-6. Ciclo de simple efecto durante el vaciado del embalse [9]

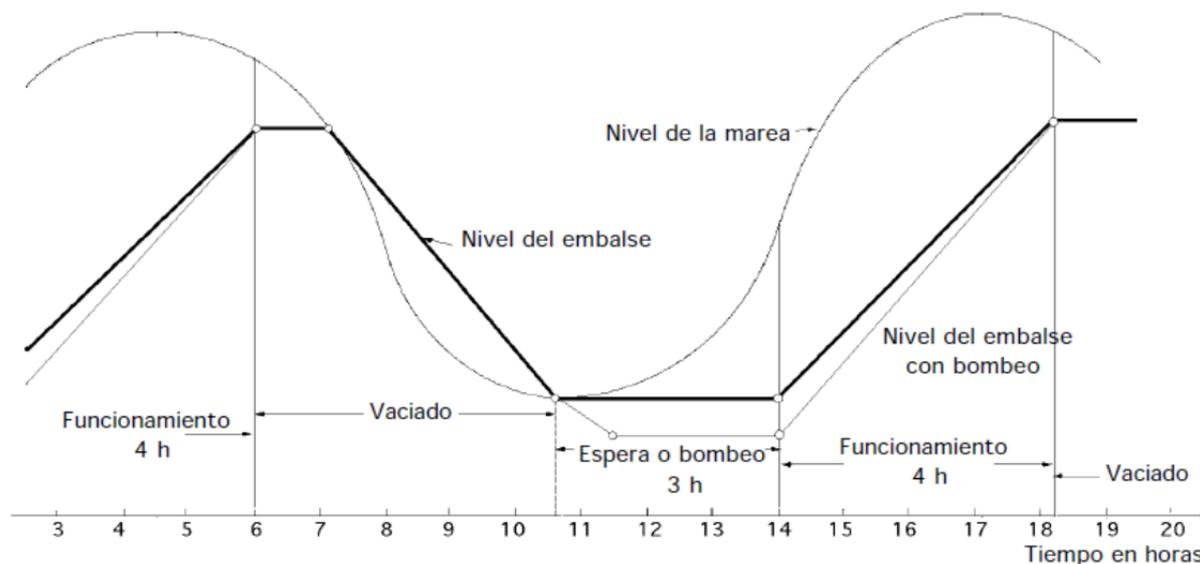


Figura 3-7. Ciclo de simple efecto durante el llenado del embalse [9]

### 3.2.2 Ciclo de doble efecto con turbinas reversibles

La energía utilizable es menor que en el tipo de Simple Efecto debido a que las diferencias de niveles entre el embalse y el mar son menores, reduciéndose el rango de variación del nivel embalsado, y disminuyendo también el rendimiento al no ser posible optimizar las turbinas y el caudal, pero aún así el factor de utilización de la planta es mayor permitiendo obtenerse un 18% más de energía. Esto se debe a que este tipo de generación permite incrementar las horas de turbinaje respecto a los Ciclos de Simple Efecto llevando el tiempo de turbinado aproximadamente a 14 horas diarias. Este tiempo de funcionamiento se compone de 6 a 7 horas por marea con tiempos de espera de entre 3 y 4 horas por marea. Esto se debe a que la generación de energía se efectúa con ambas mareas, lo que exige que las turbinas operen eficazmente con un determinado caudal de agua en cualquier dirección, funcionando tanto durante el llenado, como durante el vaciado del embalse. [9]

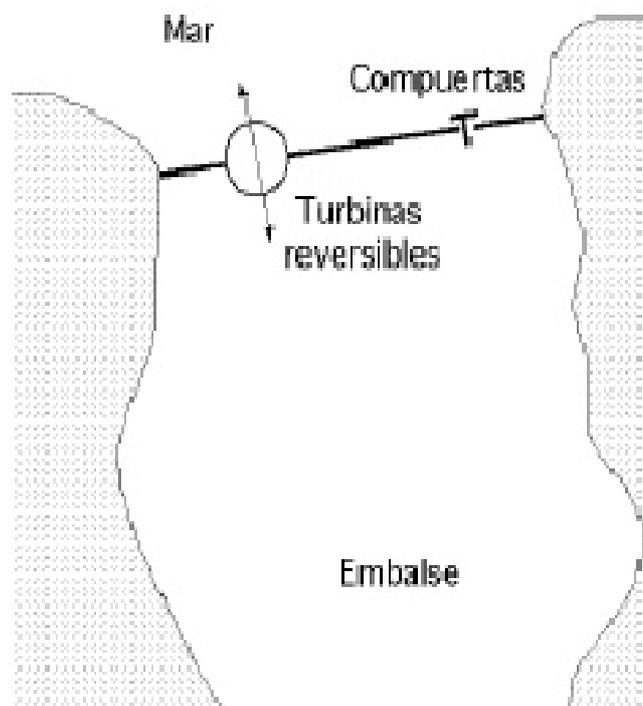


Figura 3-8. Esquema de funcionamiento de ciclo de doble efecto con turbinas reversibles [9]

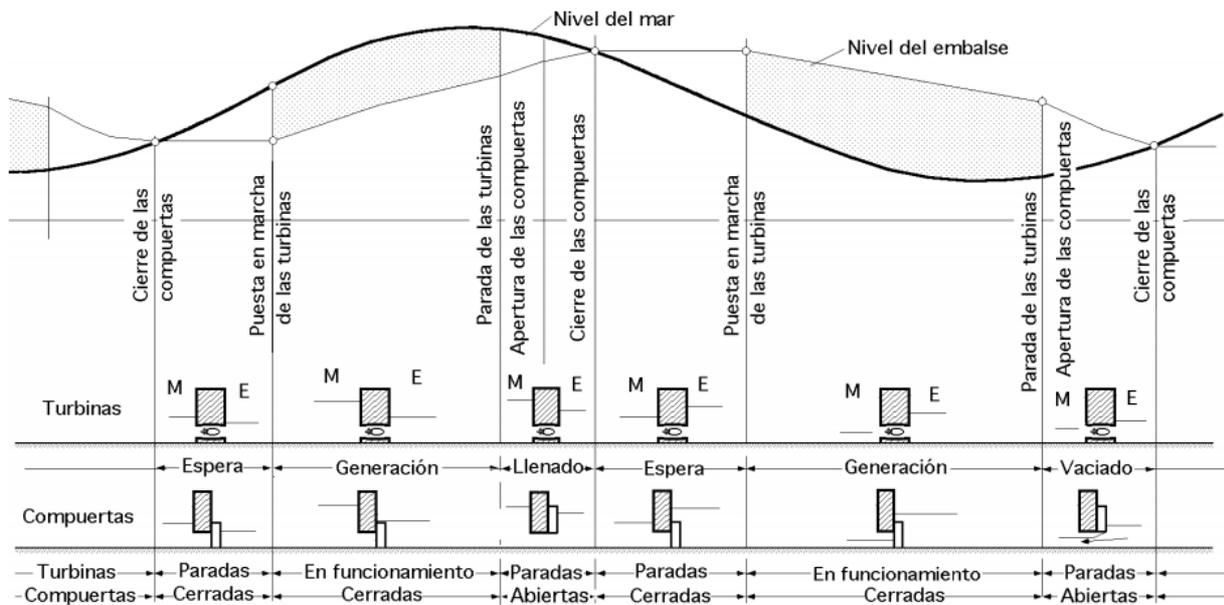


Figura 3-9. Ciclo de doble efecto con turbinas reversibles [9]

### 3.2.3 Ciclos de acumulación por bombeo

Este tipo de ciclos consiste en generar energía con ambas mareas y además disponer de algún tipo de almacenamiento por bombeo, lo que obliga a utilizar turbinas que sean capaces de funcionar no sólo como tales, sino también como bombas, cuando sean accionadas por los alternadores. Este sistema de bombeo-turbinaje permite aumentar la generación en función de las necesidades de la red eléctrica, ya que como bomba pueden impulsar al embalse entre 1 y 2 m por encima del nivel de la pleamar, altura que en el turbinaje directo se transforma en 6 ó más metros, con la consiguiente ganancia de energía, hecho que no sucede en las centrales hidroeléctricas con bombeo. Es decir, cuando el nivel del mar está próximo al del embalse, el llenado de éste se puede acelerar e incrementar bombeando agua del mar, lo que permite que las turbinas puedan funcionar durante el reflujos con mayor carga y más tiempo.

El nivel de generación y la flexibilidad operativa se mejoran, lo que proporciona una mayor eficiencia económica, es decir, permiten un aprovechamiento más racional y rentable de la central, pudiendo llegar el aumento en la generación al 10%.

La central de La Rance en Francia es la primera y única central de potencia en el mundo de este tipo, y en ella se impuso la utilización de una tecnología totalmente nueva en el campo de las turbinas, como fue la de las turbinas bulbo reversibles. Las turbinas tienen un costo mayor, y sería necesario incluir, a veces, un equipo para el arranque de la bomba, ya que, en algunas situaciones, como se ha comprobado en La Rance, no arrancarían por sí solas. [9]

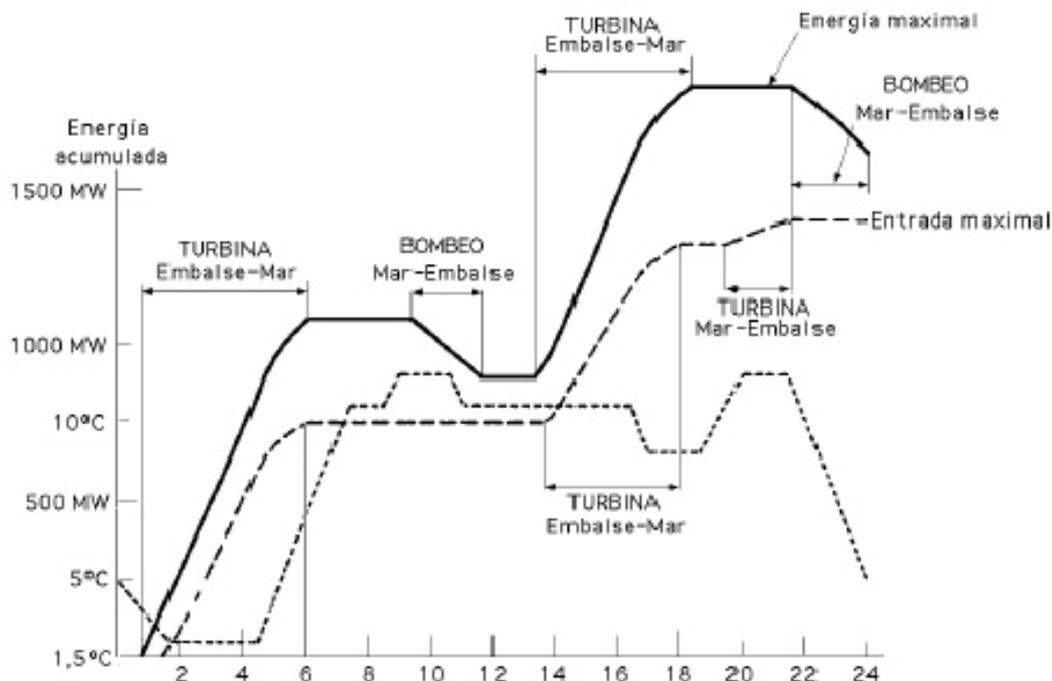


Figura 3-10. Ciclo de acumulación por bombeo [9]

### 3.3 Tecnologías de energía mareomotriz

Debido a las condiciones propias de los embalses de mareas en estuarios, los desarrollos tecnológicos que ha presentado el sistema mareomotriz pueden dividirse en los dos segmentos más importantes de la generación: El embalse y las turbinas.

#### 3.3.1 Embalses

##### 3.3.1.1 Embalses de marea

La tecnología de los embalses tradicionales o de marea consiste en una gran estructura tipo presa construida en la boca de una bahía o un estuario en una zona que experimenta una amplitud superior a 5m. Su comportamiento es igual al de una central hidroeléctrica, a excepción de que las corrientes de las mareas fluyen en ambas direcciones. [10] De este modo, conforme el nivel de agua cambia con las mareas, se desarrolla una diferencia de altura de agua a través de la presa. Las compuertas del dique se abren cuando la marea está subiendo y cuando está en su máximo nivel se cierran creando un espacio cerrado. Luego, se abren dejando pasar el agua a un ritmo que puede ser controlado. El agua fluye a través de la presa hacia las turbinas ubicadas en el interior, las cuales generan energía a su paso. [12]

La configuración de la tecnología de embalse es diferente dependiendo de si se realiza sobre una bahía o en un estuario. En el primer caso, mientras la marea está alta se permite que el embalse se llene y se genera durante el retroceso de la marea, mientras que en un estuario el llenado del embalse no depende de la marea sino del caudal del río, con lo que mayores configuraciones pueden ser diseñadas para aprovechar el recurso durante la marea alta y baja.

El gran problema que genera este tipo de embalses es que tiene un gran impacto medioambiental para las especies que viven en estos hábitats ya que no volverá a ser igual que antes. Solo pueden generar electricidad cuando hay movimiento de las mareas que sería alrededor de 10 horas al día. Por el lado contrario, bueno es que se puede saber cuándo subirá o bajará y planear que otro tipo de energía haga el suministro necesitado. Otros problemas serían el gran coste de la construcción y que solo se pueden situar en lugares adecuados. [12]



Figura 3-11. Embalse de marea en La Rance (Francia)

### 3.3.1.2 Laguna de marea

Este método consiste en encerrar una gran superficie de agua mediante unas barreras. Es bastante parecido a una presa, pero de dimensiones más pequeñas. Se crea una gran masa de agua cuando la marea está alta y luego cuando está baja se deja salir al agua a través de las turbinas.

La ventaja de este método es que el impacto medioambiental es mucho menor que se si construye una presa bloqueando todo el río. Sin embargo, la energía obtenida es bastante pequeña y los costes altos.



Figura 3-12. Comportamiento de una laguna de marea



Figura 3-13. Laguna de marea Tidal Lagoon (Reino Unido)

### 3.3.2 Turbinas

Como se ha evidenciado, el funcionamiento de las centrales mareomotrices está basado en la utilización de turbinas para la generación de electricidad por la energía cinética provocada por las corrientes. La turbina debe generar electricidad en las subidas y bajas de las mareas y aguantar las cargas de la corriente y de su propio peso.

En concreto, la turbina mareomotriz consiste en un conjunto de palas montadas sobre un núcleo denominado rotor. También cuenta con una caja reductora y un generador. La caja reductora se usa para cambiar la velocidad del eje y transmitirla a unas velocidades más adecuadas para el generador. Cambiar la velocidad es una complicación para todo el sistema porque el tamaño de la caja reductora es un factor crítico. Por eso, la distribución de cargas y la duración del patrón en las corrientes marinas deben ser analizadas.

Las palas del rotor se mueven por el efecto hidrodinámico del agua pasando a través de estas. La caja reductora se utiliza para pasar de la velocidad del eje del rotor a la velocidad del generador. Luego, la electricidad que se ha generado es enviada a tierra a través de cables. La turbina está sujeta a una estructura que debe de ser capaz de aguantar las cargas ambientales. [12]

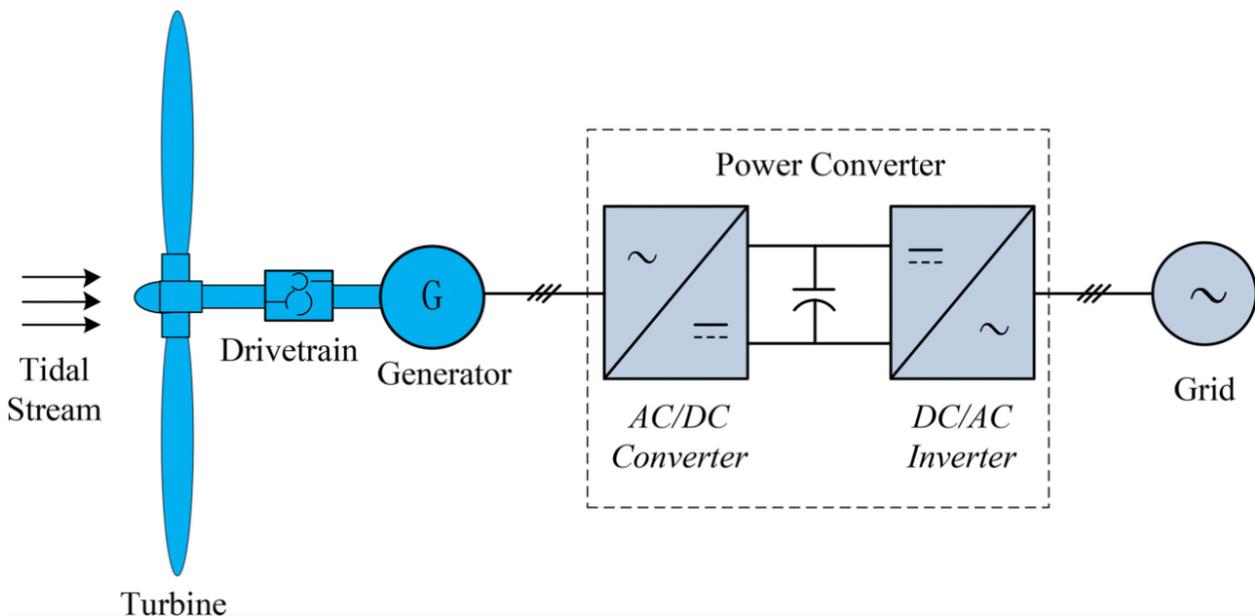


Figura 3-14. Esquema de funcionamiento de una turbina mareomotriz [11]

De acuerdo con el tipo de estructura par soportar las duras condiciones en el ambiente marino, las cargas de las corrientes y el propio peso de la turbina, se pueden distinguir los siguientes tipos [10]:

- Estructura de gravedad: consiste en un pilar y una base de cemento y acero para aguantarla al suelo marino y tener estabilidad.
- Estructura monopila: consiste en una viga hueca de acero con un gran diámetro que está encajada en el suelo marino. La viga se encaja a una profundidad de 20 a 30 metros. La mayor ventaja es que no necesita que haya una preparación y base en el suelo marino como en la de gravedad.
- Estructura trípode: este tipo de estructura está anclada al suelo marino utilizando tres pilares de acero en las tres esquinas que tiene la base. Los pilares se introducen de 10 a 20 metros en el suelo marino dependiendo de las condiciones de este. Las ventajas que tiene esta estructura es que hay una reducción de las cargas estructurales si se compara con otras estructuras y la menor posible corrosión ya que la longitud de los pilares es menor.
- Estructura flotante: Consiste en un artefacto montado en una estructura flotante que está anclado al fondo marino mediante cadenas. Este tipo de estructura es perfecta para situaciones donde el fondo marino es muy profundo.

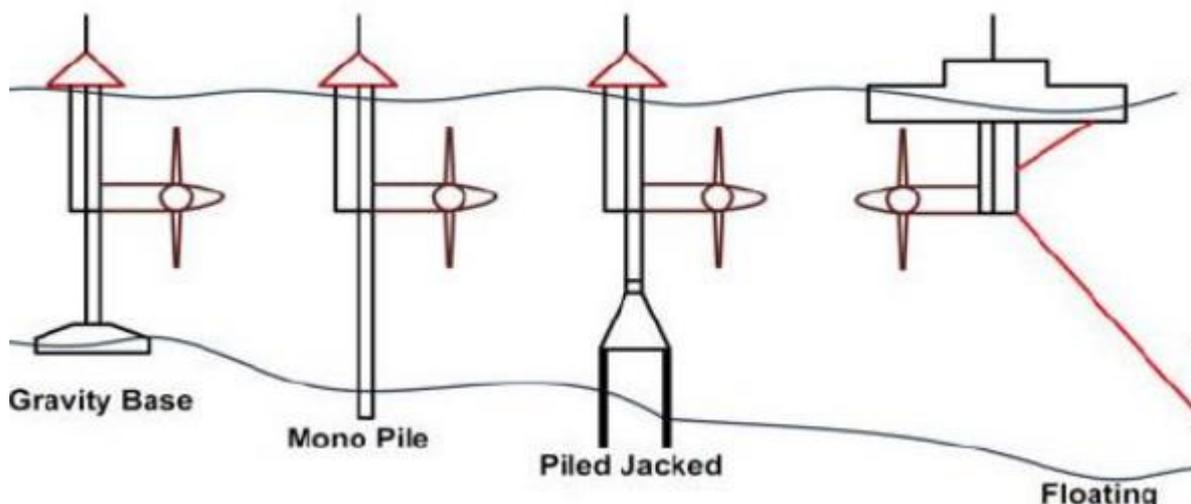


Figura 3-15. Tipos de estructuras para turbinas mareomotrices [12]

En relación al funcionamiento de las turbinas hidráulicas existe una variedad de turbinas que podrían ser utilizadas en energía mareomotriz. Sin embargo, las turbinas de una estación de energía mareomotriz deben funcionar con una carga de agua baja y variable. El hecho de que la altura varíe apreciablemente durante el ciclo de la marea significa que una turbina de palas fijas no funcionará en sus condiciones más eficientes durante la mayor parte del flujo de la marea, en consecuencia, se suele emplear una turbina Kaplan de álabes variables. Como es el caso de la mayoría de las centrales hidroeléctricas de baja altura, las plantas de energía mareomotriz suelen emplear una serie de pequeñas turbinas que corren a lo largo de la presa, ya que pueden explotar la energía disponible de manera más eficaz que una pequeña cantidad de turbinas grandes. [10]

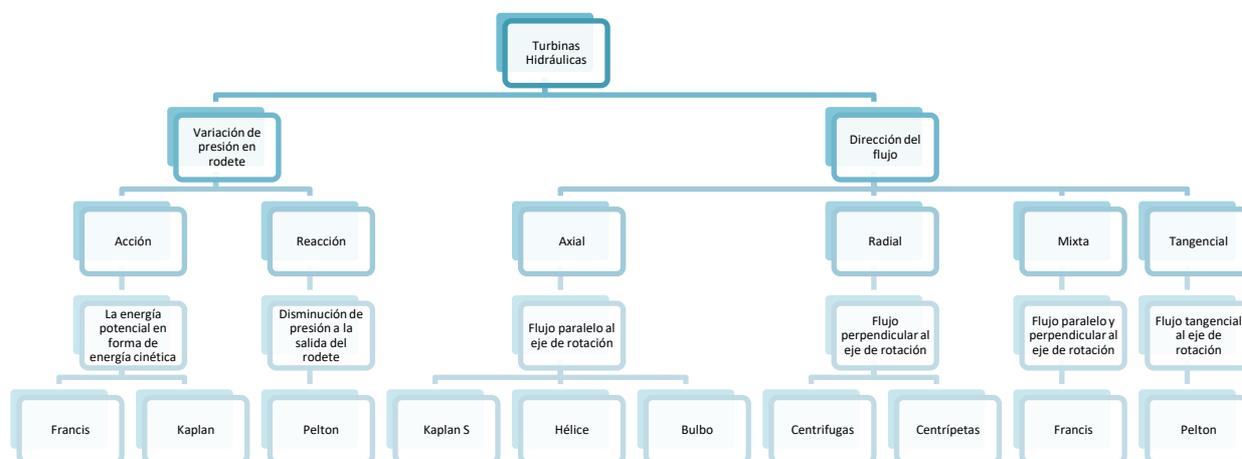


Figura 3-16. Clasificación de turbinas hidráulicas

El diseño de las primeras turbinas para aprovechamiento de energía mareomotriz se encontraba basadas en turbinas eólicas. Es por ello, que en general, las turbinas mareomotrices se dividen en sistemas de eje horizontal y de eje vertical.

- Turbinas de eje de horizontal o Axiales: las palas rotan en un eje que es paralelo a la dirección del flujo. Cuantas más palas tiene, el dispositivo generará un buen par y más estabilidad que si solo tuviese una pala. En contra, cuantas más palas, más pérdidas hidrodinámicas habrá. También, dependiendo de la turbina las palas pueden ser de paso controlable o no.
- Turbinas de eje vertical o Radiales: las palas rotan en un eje que es perpendicular al flujo de agua. Consiste, en que las palas están montadas en verticalmente en un soporte. El mayor problema que generan estas turbinas es que generan un par demasiado grande con cada revolución y no tiene poder para empezar a rotar por si sola. Se pueden reducir estos problemas poniendo las palas de forma elíptica pero su rendimiento será mucho menor comparado a las palas normales.

### 3.3.2.1 Turbina de eje horizontal

La turbina de eje horizontal es uno de los extractores de energía más prometedores para la utilización de la energía de la corriente de marea debido a que estos dispositivos son similares en principio al funcionamiento de las turbinas eólicas convencionales.

Se coloca una turbina en una corriente de marea, lo que hace que la turbina gire alrededor de un eje horizontal. En el plano horizontal, las turbinas de eje horizontal pueden ser fijas o incluir un mecanismo de guiñada. Sin embargo, a diferencia del viento, debido a que los flujos de marea son altamente predecibles y los flujos rectilíneos altamente energéticos son sitios muy buscados para el desarrollo, la mayoría de los dispositivos que se están desarrollando no incluyen un mecanismo de guiñada. Esto tiene la ventaja adicional de reducir la complejidad en un entorno donde la simplicidad es claramente beneficiosa. [13]

Sin embargo, no existe un modelo ampliamente aceptado para describir la estructura de estela de una turbina de corriente de marea. Además, la variación de la velocidad del flujo en las estelas se acompaña de una transformación de energía y apenas se ha investigado hasta la fecha.

Generalmente se espera que una turbina de corriente de marea utilice energía cinética del flujo. Sin embargo, al hacerlo, el nivel de agua del flujo superficial libre debe cambiar ya que es bloqueado por los extractores de energía. [11]

#### 3.3.2.1.1 Turbinas de bulbo

Las turbinas de bulbo son turbinas de flujo axial similares a las turbinas Kaplan, con la diferencia que con su diseño permite aumentar el caudal y potencia específica gracias a una mejor distribución del perfil de velocidades. El objetivo de estas turbomáquinas es operar en centrales de bombeo y turbinado con pequeños desniveles. El generador se encuentra sumergido junto al rodete en el canal de carga, estando el primero alojado en una cámara de acero llamada submarino. Una novedad que incorpora el grupo bulbo es que el eje es paralelo a las líneas de flujo mejorando el rendimiento del rodete, otra novedad es que incorpora el tubo de aspiración en forma de sifón para ciertas construcciones, este sistema únicamente se puede emplear con estas turbinas. Estos sistemas son reversibles pudiendo actuar como bomba o como turbina, esto es posible ya que los alabes están diseñados para permitir la circulación cerrada.

En las turbinas tipo bulbo el alternador queda dentro de la envolvente, por lo que el agua que circula entre esta y la otra pared concéntrica de mayor diámetro, pasa en primer lugar por los canales que forman unas aletas guía fijas, que sirven de soporte estructural, a continuación, por el canal de las aletas guía pivotadas para la regulación, y por último atraviesan un rodete tipo Kaplan.

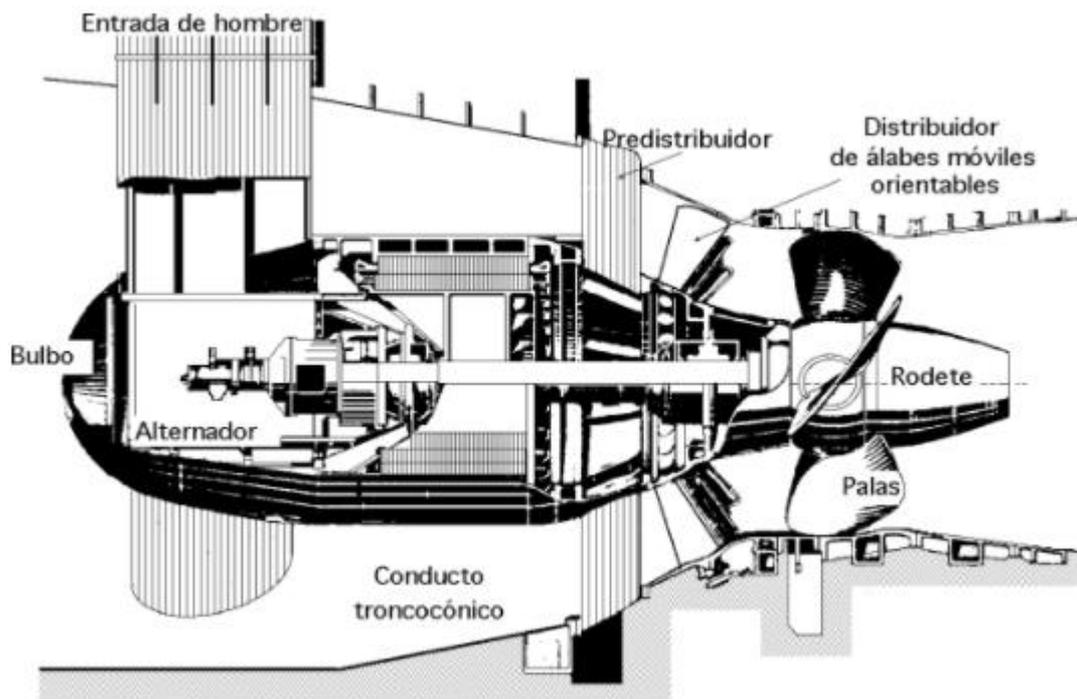


Figura 3-17. Partes de una turbina de bulbo

Este diseño también ha permitido reducir el diámetro de rotor ocupando menos espacio en el dique mareomotriz y, por lo tanto, garantizando un ahorro de construcción civil. Existen tres tipos principales de turbinas del grupo bulbo utilizadas en centrales mareomotrices:

- Turbina Straflo: posee un generador síncrono muy eficiente de ían permanente (enfriamiento del rotor y estator mediante agua). En la actualidad sus palas son ajustables y posee una estructura compacta que le genera una ventaja significativa de reducción de espacio.
- Turbina tubular o turbina de Kaplan S: la turbina se conecta con el generador ya sea directamente o empleado una caja de cambios. Las palas pueden ser ajustadas en función de la necesidad de demanda de energía.
- Turbina de pozo: es una variación de la turbina tipo bulbo. Posee una caja de velocidad con engranaje cónico de ángulo recto para aumentar la velocidad o poleas y correas para generaciones menores. El eje de diseño horizontal es de  $15^\circ$  a  $45^\circ$ , facilitando la inspección, mantenimiento y reparación.

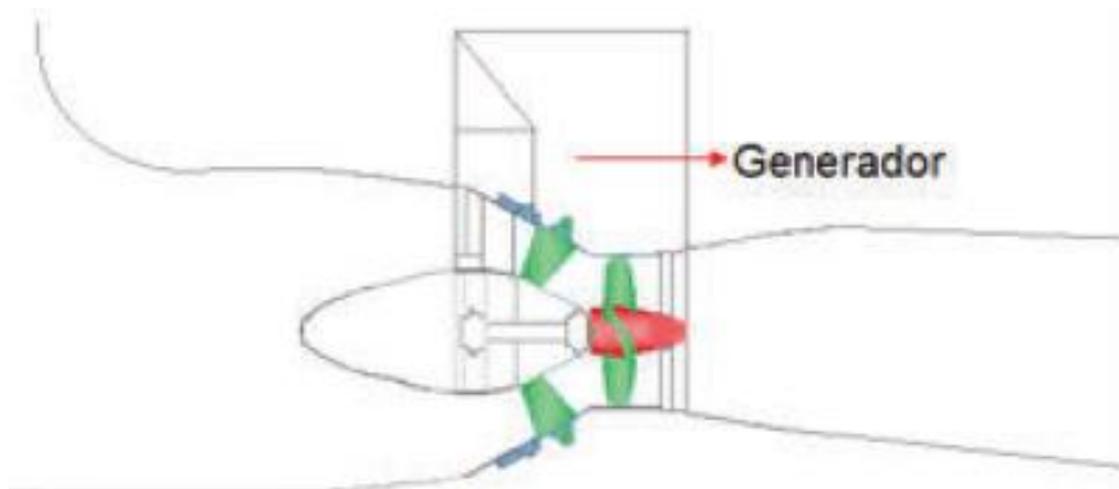


Figura 3-18. Turbina Straflo

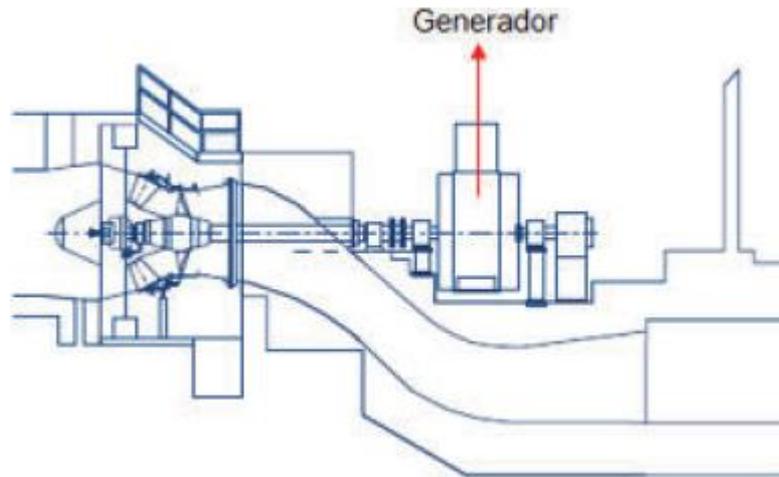


Figura 3-19. Turbina tubular

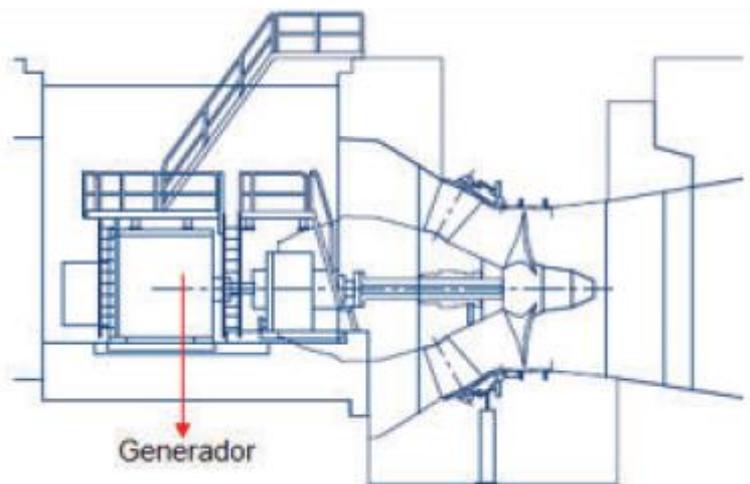


Figura 3-20. Turbina de pozo

### 3.3.2.1.2 Turbinas Kaplan

La importancia de esta turbina reside en su capacidad de operación en saltos de baja altura y elevado caudal, así como la capacidad de regulación tan amplia en condiciones de rendimiento favorable. La tendencia a la construcción de turbinas cada vez más rápidas (según parámetro específico). La turbina Kaplan es una turbomáquina generalmente irreversible, sin embargo, la evolución en el campo de las turbinas bulbo a introducido la Kaplan como sistema reversible, pudiendo operar en ambos sentidos de giro según sea el generador (ó motor). Este uso esta exclusivamente centrado para las centrales de bombeo.

Algunas características de las turbinas Kaplan son, el reducido numero de alabes que mejora la circulación del agua en presencia de grandes caudales. El flujo másico que atraviesa la turbina al ser elevado produce grandes tensiones en la base de los alabes, estos se diseñan con gran robustez por lo que también es elevada su masa; esto motiva en parte que el numero de alabes habitualmente oscile entre 3 y 8. Pero es la circulación del flujo la que determina la cantidad de alabes, la velocidad así como la presión en comparación con saltos de mediana altura resulta reducida, de esta manera para obtener el suficiente momento es necesario alojar una masa de fluido elevada, y por ello el espacio entre alabes debe ser grande para evitar contracciones del fluido que reduzcan el rendimiento.

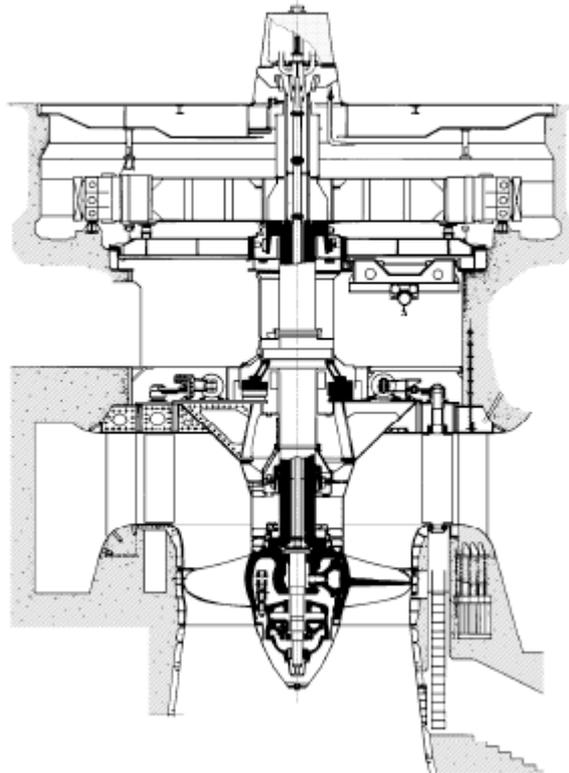


Figura 3-21. Turbina Kaplan

### 3.3.2.2 Turbinas de eje vertical

Las turbinas de eje vertical son similares en principio a las turbinas de eje horizontal, pero con el eje de rotación diferente. Estos dispositivos son más adecuados para regiones donde hay una gran variación en la dirección de las corrientes de marea (por ejemplo, corrientes rotativas) en contraste con los flujos rectilíneos explotados por turbinas de eje horizontal. [13]

El mayor problema que generan estas turbinas es que generan un par demasiado grande con cada revolución y no tiene poder para empezar a rotar por sí sola. No obstante, en los últimos años se ha observado que se puede reducir estos problemas poniendo palas de forma elíptica a pesar de que su rendimiento sea mucho menor en comparación con a las de palas convencionales.

#### 3.3.2.2.1 Turbinas Darrieus

Es una turbina de eje vertical diseñada y patentada en 1931 por el ingeniero francés Georges Darrieus en Estados Unidos. Su mecanismo está formado por dos o tres álabes con forma de perfiles aerodinámicos y un eje central, el cual es perpendicular a la dirección del movimiento del fluido. Esta turbina es capaz de generar un torque elevado con bajos flujos, aunque por el constante cambio en los ángulos de ataque y su inestabilidad derivada de la rotación no ha tenido mucha aplicación práctica.

Mientras la turbina va girando, el ángulo de ataque va cambiando sobre cada perfil, generando fuerzas distintas. El desprendimiento de la capa límite en la base de los perfiles genera un punto de stalling en el cual se presentan inestabilidades. Esta consecuencia afecta de manera directa la estabilidad del giro de la turbina. Este fenómeno provoca un cambio drástico en el torque producido, dificultando su implementación. En su patente, el ingeniero francés Darrieus, detalla también un modelo distinto de la turbina, el cual posee álabes verticales, unidos por una base circular abajo y otra arriba. Este tipo de turbinas siguen siendo investigadas para su uso empírico en el lecho marino.

La turbina Darrieus transforma la energía cinética presente en las aguas en energía mecánica. Emplea la sustentación aerodinámica que se genera en los álabes para hacer que estos se muevan con más rapidez que el fluido ubicado alrededor. Esta turbina es capaz de girar en la misma dirección independiente de la dirección que posea la corriente marina. [14]

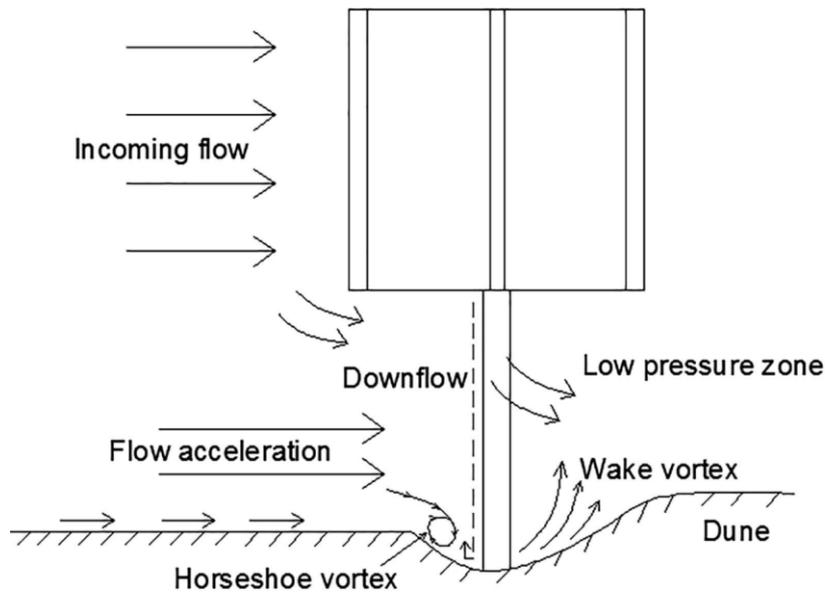


Figura 3-22. Esquema de funcionamiento de una turbina Darrieus [14]

### 3.3.2.2.2 Turbinas Savonius

El modelo del rotor Savonius es el más simple y fue inventado en 1922 por S.J. Savonius. Son dispositivos de arrastre o resistencia, se caracteriza por disponer de dos palas que son las mitades de un cilindro cortadas por una generatriz y desplazadas lateralmente, formando la figura de una S. Debido a la curvatura, las palas experimentan menos resistencia cuando se mueven en contra del fluido que a favor de él y es esta diferencia la que hace que la turbina gire. Tienen la ventaja de no necesitar ser orientadas en la dirección del fluido, soportan mejor la turbulencia y ofrecen un par de arranque que les permite empezar a girar con velocidades bajas. Su construcción es sencilla y su coste es bajo, por el contrario, tienen un bajo rendimiento, su velocidad de giro es reducida. [15]

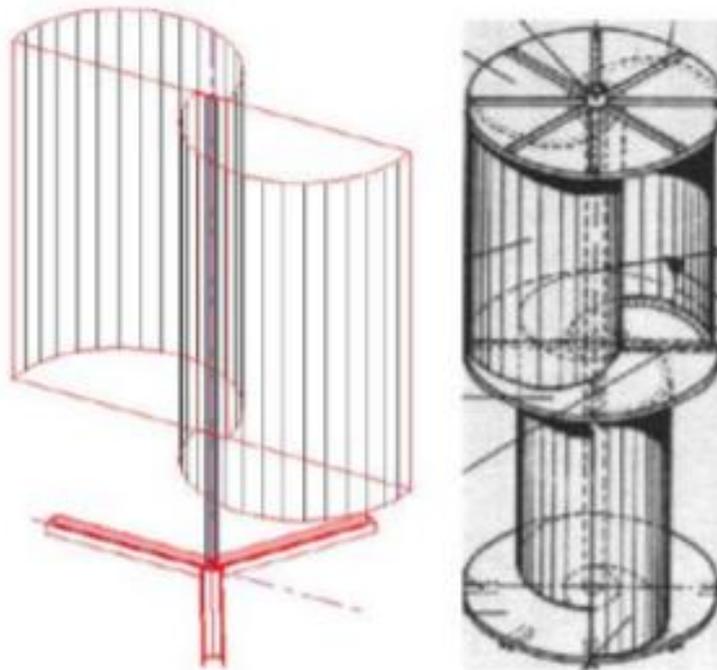


Figura 3-23. Turbina Savonius

### 3.4 Principales centrales mareomotrices

Existen en el mundo pocos lugares donde se den las condiciones óptimas para el aprovechamiento de este tipo de energía marina. La bahía, ría o estuario, deben ser lo suficientemente amplios como para que la cantidad de agua a trasvasar sea grande y la facilidad de construir el dique, contener y cerrar el paso del agua. Estas centrales tan solo pueden ser instaladas en puntos donde la diferencia entre la marea alta y la baja sea de al menos cinco metros de altura.

A continuación, se describen las principales centrales mareomotrices en funcionamiento en el mundo.

#### 3.4.1 Central Mareomotriz de La Rance (Francia)

La planta de energía mareomotriz Rance Tidal se encuentra situada en el estuario del río Rance, en Bretaña, en el norte de Francia. La instalación Rance Tidal fue la primera estación de energía de este tipo construida en el mundo en 1966 y actualmente es una de las más grandes de todo el planeta. La instalación cuenta con una presa y un dique, abarcando una superficie de más de 22 kilómetros cuadrados. Además, tiene instaladas 24 turbinas tipo bulbo de 10 MW de potencia nominal cada una, ofreciendo una capacidad de generación anual de 540 GWh. [16]

#### 3.4.2 Central Sihwa Lake (Corea del Sur)

Con una capacidad de producción eléctrica de 254 MW, la planta de energía mareomotriz Sihwa Lake localizada en el Lago Sihwa a unos 4 km de la ciudad de Siheung, en la provincia de Gyeonggi de Corea del Sur, es la planta de energía mareomotriz más grande del mundo. La energía de la planta es generada en las entradas de marea en la cuenca de 30 km<sup>2</sup> con la ayuda de 10 turbinas de bulbo sumergidas de 25,4 MW, utilizándose ocho tipos de compuertas de esclusa para la salida de agua desde el dique. En la actualidad, la capacidad de generación anual de las instalaciones se sitúan en los 553 GWh. [16]



Figura 3-24. Central Sihwa Lake

### 3.4.3 Planta Annapolis Royal (Canadá)

La planta de energía mareomotriz Annapolis Royal ubicada en la Cuenca de Annapolis, en la Bahía de Fundy en Canadá, cuenta con una capacidad instalada de 20 MW posicionándose como la tercera planta de energía mareomotriz más grande del mundo actualmente en servicio, generando 30 GWh.

Emplea Turbina Straflo, en experimentación desde 1984, de 18 MW y consumo de 400 m<sup>3</sup>/s funcionando en el sentido unidireccional al igual que Sihwa Lake. Sin embargo, no está todavía desarrollada para funcionar como bomba. [16]



Figura 3-25. Planta Annapolis Royal

Tabla 3-1. Resumen de las principales centrales mareomotrices en el mundo

Central	Ubicación	Año de operación	Tecnología	Potencia	Capacidad anual
La Rance	Francia	1966	Embalse de marea Turbina Bulbo	240 MW	540 GWh
Sihwa Lake	Corea del Sur	2015	Embalse de marea Turbina Bulbo	254 MW	553 GWh
Annapoli Royal	Canadá	1981	Embalse de marea Turbina Straflo	20 MW	30 GWh

# 4 ENERGÍA UNDIMOTRIZ

La energía undimotriz es la que aprovecha la energía cinética de las olas en movimiento en los mares y océanos para producir electricidad. Es uno de los tipos de energía renovables con más estudios recientes y presenta enormes ventajas frente a otras energías renovables debido a que se tiene mayor facilidad para predecir condiciones geológicas óptimas que permitan la mayor eficiencia en sus procesos.

Las olas son causadas por el viento que sopla sobre la superficie del océano, existiendo muchas áreas donde el viento sopla con la suficiente fuerza para proporcionar ondas continuas. Esta energía se puede utilizar para hacer funcionar turbinas bien por olas superficiales o por diferentes fluctuaciones de presión entre la capa superior e inferior del mar. [3]

## 4.1 Fundamento teórico: generación de olas

Como se ha comentado, los sistemas undimotrices se basan en el aprovechamiento de la energía potencial de las olas, principalmente gracias a la altura de la cresta y su periodo. Dicha energía potencial es producida por una conversión de energía cinética adquirida ya sea de la propia superficie oceánica o por los vientos.

Las olas son las oscilaciones de las partículas de agua causadas por la fricción del viento sobre ella. Su tamaño es determinado por la velocidad y duración del viento. La fricción con la superficie del agua produce un efecto de arrastre, dando lugar a la formación de rizaduras (arrugas) en la superficie del agua, llamadas ondas u olas capilares, que van de unos milímetros de altura y hasta 1,7 cm de longitud de onda. Cuando la superficie pierde su lisura, el efecto de fricción se intensifica y las pequeñas rizaduras iniciales dejan paso a olas de gravedad. Las fuerzas que tienden a restaurar la forma lisa de la superficie del agua, y que con ello provocan el avance de la deformación, son la tensión superficial y la gravedad. Las ondas capilares se mantienen esencialmente sólo por la tensión superficial, mientras que la gravedad es la fuerza que tensa y mueve las olas más grandes.

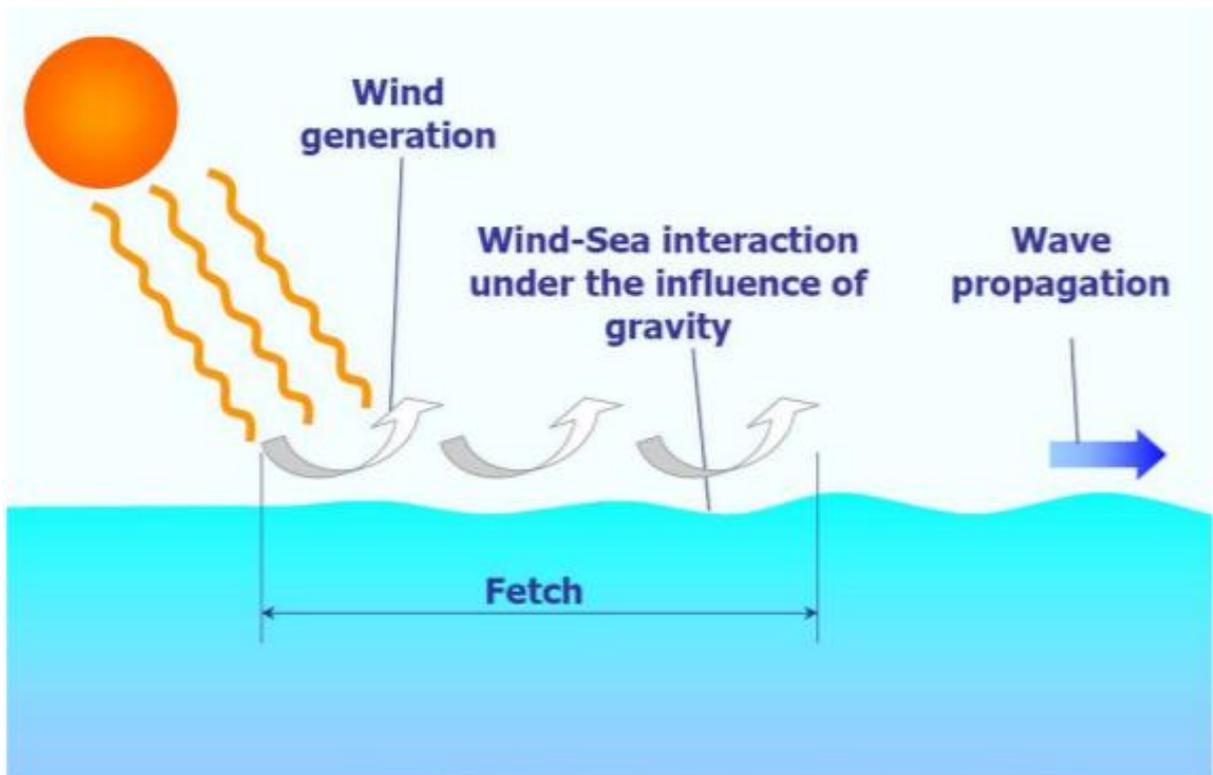


Figura 4-1. Proceso de generación de las olas [17]

Cuanto mayor es la altura de las olas, mayor es la cantidad de energía que pueden extraer del viento, de forma que se produce una realimentación positiva. La altura de las olas viene a depender de tres parámetros del viento que son su velocidad, su persistencia en el tiempo y, por último, la estabilidad de su dirección. Así, los mayores oleajes se producen en circunstancias meteorológicas en que se cumplen ampliamente estas condiciones.

Una vez puestas en marcha, las olas que se desplazan sobre aguas profundas disipan su energía muy lentamente, de forma que alcanzan regiones muy separadas de su lugar de formación. Así, pueden observarse oleajes de gran altura en ausencia de viento. Las olas disipan su energía de varias maneras. Una parte puede convertirse en una corriente superficial, un desplazamiento en masa de un gran volumen de agua hasta una profundidad considerable. Otra parte se disipa por fricción con el aire, en una inversión del fenómeno que puso en marcha las olas. Parte de la energía puede disiparse si una velocidad excesiva del viento provoca la ruptura de las crestas. Por último, la energía termina por disiparse por interacción con la corteza sólida, cuando el fondo es poco profundo o cuando finalmente las olas se estrellan con la costa. [17]

*Surface wave at time "t"*

*Surface particle motion with respect to time*

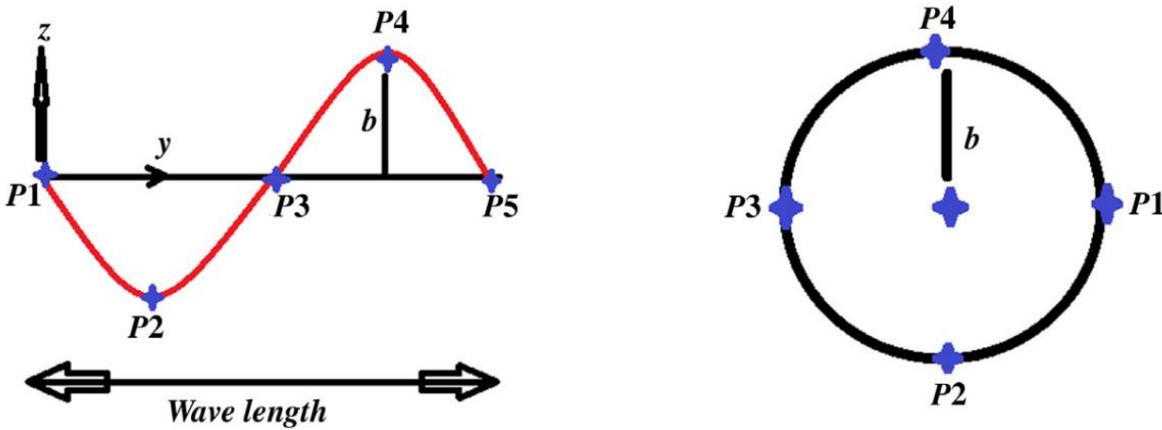


Figura 4-2. Movimiento de ondas superficiales y movimiento de partículas superficiales [19]

La parte más alta de una ola es su cresta, y la parte más profunda de la depresión entre dos olas consecutivas se llama valle. A la distancia entre dos crestas se le denomina longitud de onda ( $\lambda$ ) y a la diferencia de altura entre una cresta y un valle se le llama altura (H) de la ola. La amplitud es la distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud (A) vale la mitad de la altura.

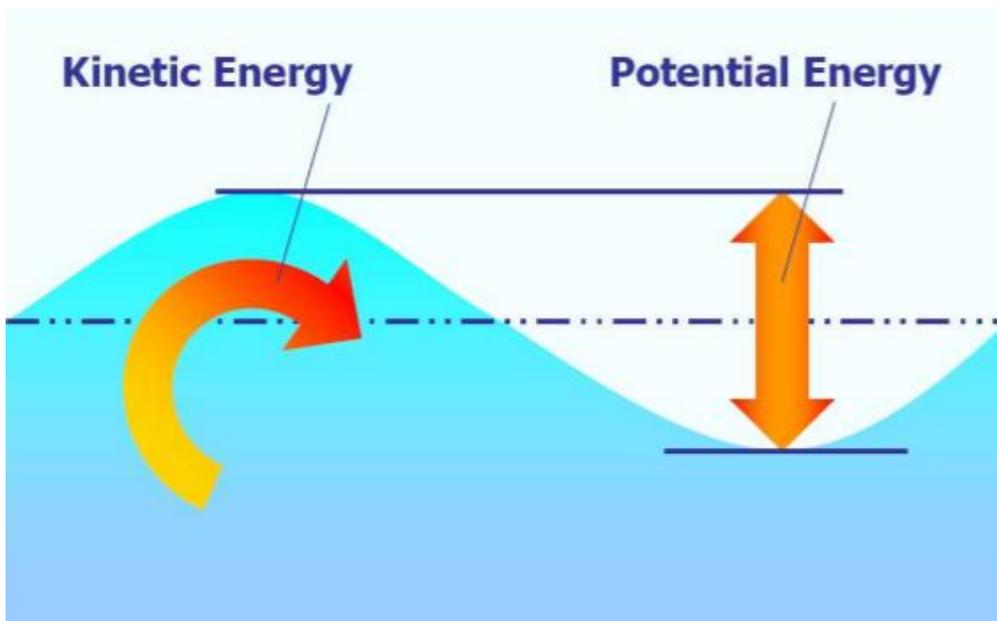


Figura 4-3. Energía de las olas [19]

De acuerdo con las características de las olas, se pueden distinguir hasta seis tipos diferentes de formaciones de olas [17]:

- Olas de oscilación: se representan en toda la superficie del mar y se deben a las variaciones del nivel marino. En ellas el agua no avanza, solo describe un giro al subir y bajar casi en el mismo sitio en el cual se originó el ascenso de la ola.
- Olas forzadas: se producen por el viento y ocasiones pueden ser altas como consecuencia de los huracanes.
- Olas libres: se forman en alta mar sin la presencia de viento, donde puede observarse que las olas “ruedan” por varios kilómetros.
- Olas de traslación: están cercanas a la costa, tocan el fondo, avanzan y colisionan contra el litoral formando abundante espuma.
- Tsumamis: son ondas producidas por el efecto de un maremoto o por una explosión volcánica, donde pueden ocurrir dos situaciones. La primera donde las aguas se hunden en el centro de la perturbación, y la segunda donde estas se levantan explosivamente.

El hemisferio sur del planeta cuenta con el mayor potencial undimotriz, especialmente en las zonas del sur de Chile y Nueva Zelanda, si bien es cierto que estos puntos cuentan con un potencial óptimo para el desarrollo de estos sistemas, los requerimientos de los mismos son considerablemente menores a los presentados en estas locaciones. En términos generales los sistemas se han acomodado a los potenciales que se encuentran en las zonas donde se desarrollan, con lo que un valor prudente para instalación de sistemas undimotrices puede ponerse en los 50 kW/m, equivalentes a una altura significativa de alrededor de los 3 m. [18]

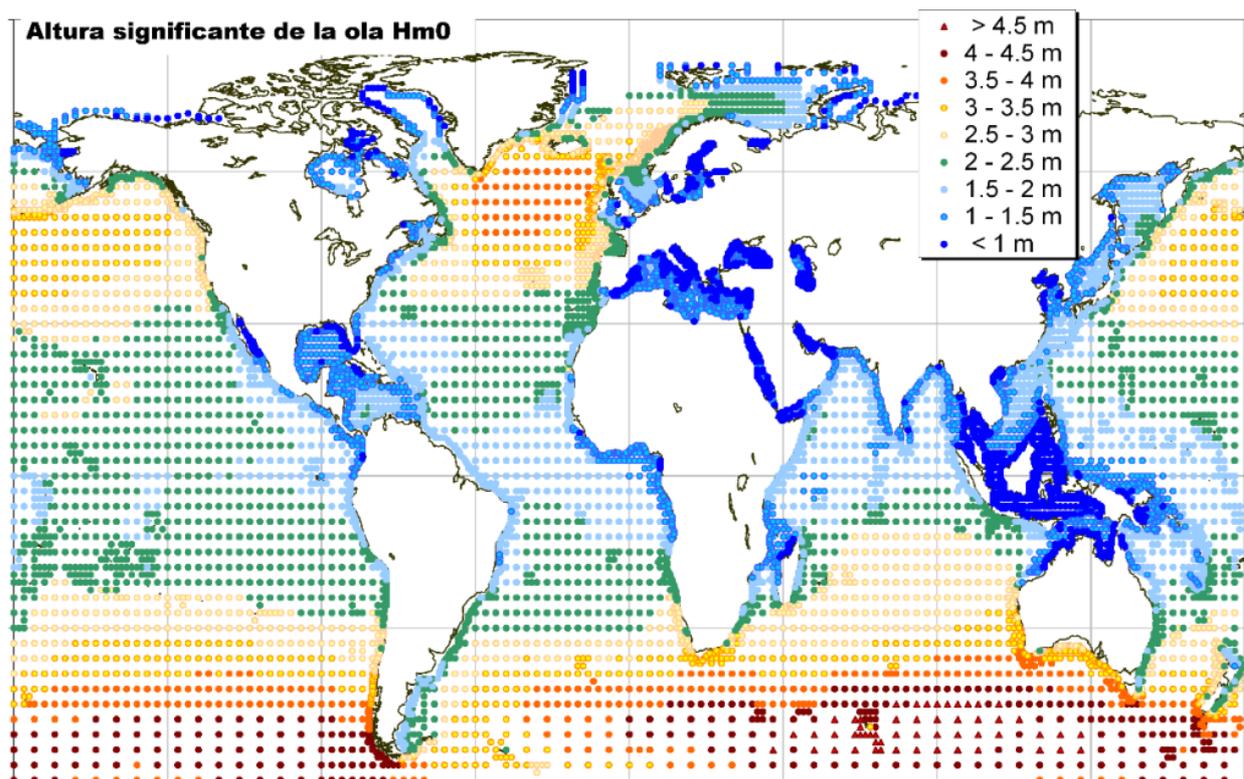


Figura 4-4. Altura significativa de las olas en el mundo [17]

## 4.2 Funcionamiento de los sistemas undimotrices

El funcionamiento de los sistemas undimotrices se encuentra basado en la conversión de energía a partir de tres elementos de las olas: el empuje de la ola, la variación de altura en la superficie y la variación de la presión bajo la superficie.

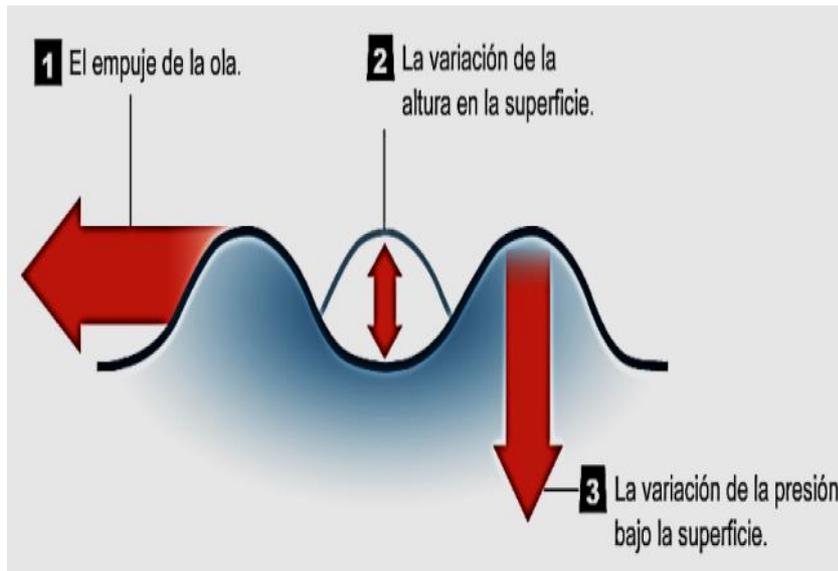


Figura 4-5. Sistemas de conversión de energía undimotriz en eléctrica [18]

El proceso completo de conversión de energía undimotriz generalmente consta de tres etapas de conversión de energía [6]:

1. La conversión de energía primaria es un proceso que pasa de la energía de las olas a la energía mecánica o neumática o potencial.
2. La etapa de conversión secundaria, una conversión de la energía absorbida en energía mecánica útil utilizando la toma de fuerza (PTO) específica.
3. La etapa de conversión terciaria, una conversión adicional de la energía mecánica útil en electricidad mediante la conexión de las tomas de fuerza a los generadores.

Por encima de las tres etapas, los dispositivos de conversión de energía están interrelacionados y son progresivos. Para mejorar la eficiencia general de generación de energía del convertidor de energía undimotriz (WEC), es necesario mejorar la eficiencia de conversión entre varios niveles tanto como sea posible.

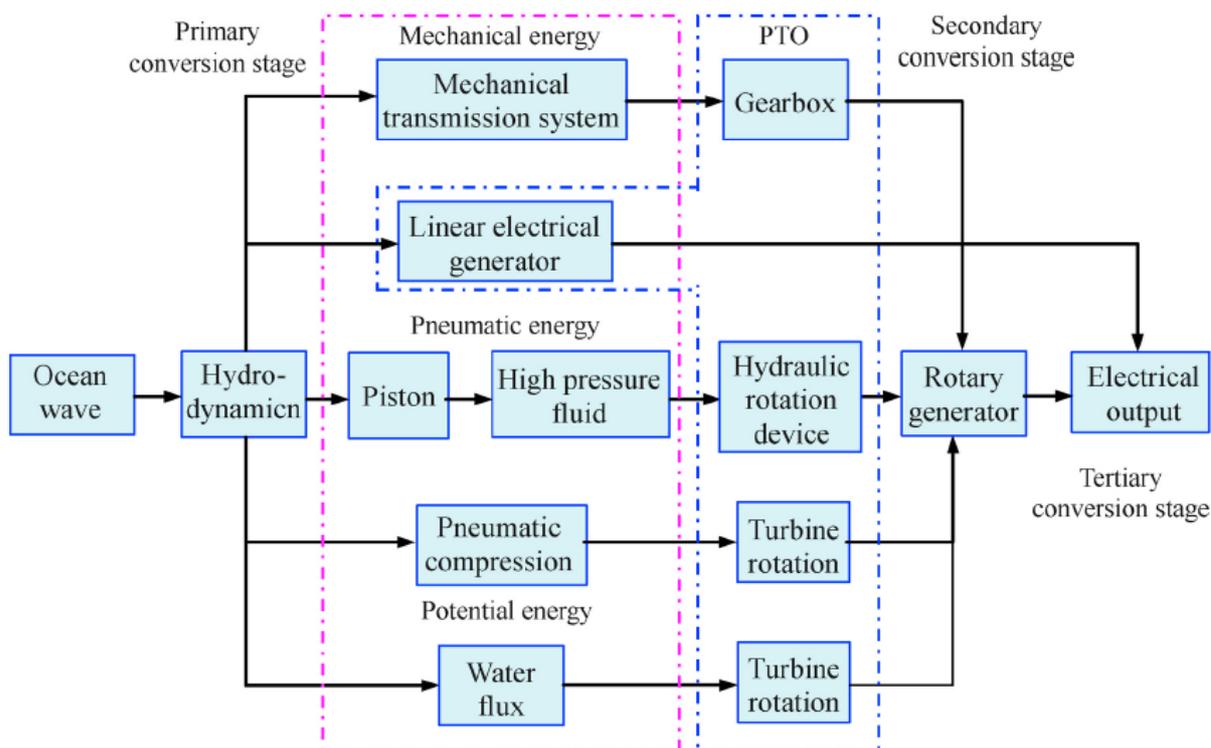


Figura 4-6. Etapas de conversión de energía undimotriz [6]

### 4.3 Tecnologías de energía undimotriz

Como se ha podido comprobar, la altura y el período de las olas cambian continuamente con el movimiento de las olas. Teniendo en cuenta las características aleatorias del movimiento de las olas y la diversidad de métodos de absorción de energía, las profundidades y las áreas marinas de trabajo, los tipos de tecnologías de generación de energía undimotriz son relativamente complejos. Debido a ello, los investigadores clasifican las tecnologías de generación de energía undimotriz desde diferentes perspectivas: métodos de trabajo, ubicaciones de la instalación, formas de salida de energía y características estructurales.

De acuerdo con su ubicación y posicionamiento respecto a la costa, las tecnologías de energía undimotriz se pueden clasificar en tres categorías [19]:

- Onshore: dispositivos ubicados en la costa, en acantilados rocosos, integrados en estructuras fijas como diques rompeolas o sobre el fondo en aguas poco profundas. Estos dispositivos también se conocen como Dispositivos de Primera Generación.
- Nearshore: dispositivos ubicados en aguas poco profundas (10-40m) y distanciados de la costa unos cientos de metros. Estas profundidades moderadas son apropiadas para dispositivos de gran tamaño apoyados por gravedad sobre el fondo o flotantes. Estos dispositivos también se conocen como Dispositivos de Segunda Generación.
- Offshore: dispositivos flotantes o sumergidos ubicados en aguas profundas (50-100m). Estos convertidores son los más prometedores ya que explotan el mayor potencial energético existente en alta mar. Estos dispositivos también se conocen como Dispositivos de Tercera Generación.

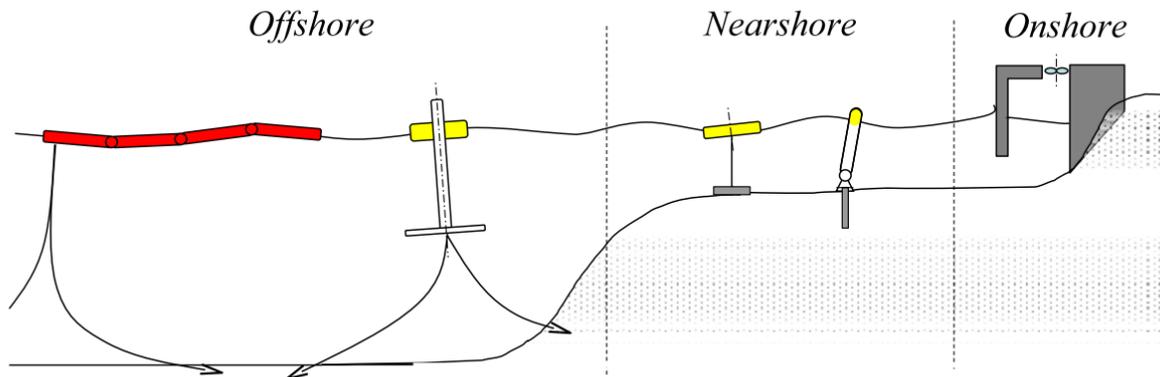


Figura 4-7. Clasificación de los convertidores de energía undimotriz de acuerdo con su posicionamiento [19]

Otra forma de clasificar las tecnologías se basa en la relación entre sus dimensiones generales y la longitud de onda de las olas, así como en la relación entre su orientación y la dirección de propagación. Según tamaño y orientación respecto al oleaje, los dispositivos de captación de energía undimotriz se clasifican en [19]:

- Absorbedores puntuales: se trata de estructuras pequeñas en comparación con la longitud de la ola incidente y de formas cilíndricas, es decir, con simetría axial, por lo que no les afecta la dirección del oleaje. Generalmente se colocan varios absorbedores puntuales agrupados formando una línea. Los absorbedores puntuales suelen basarse en sistemas tipo boya.
- Terminadores o totalizadores: se trata de dispositivos alargados situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola y que pretenden captar la energía de una sola vez.
- Atenuadores o absorbedores lineales: consisten en estructuras alargadas, colocadas en paralelo a la dirección de avance de las olas, de forma que van extrayendo energía de modo progresivo y direccional.

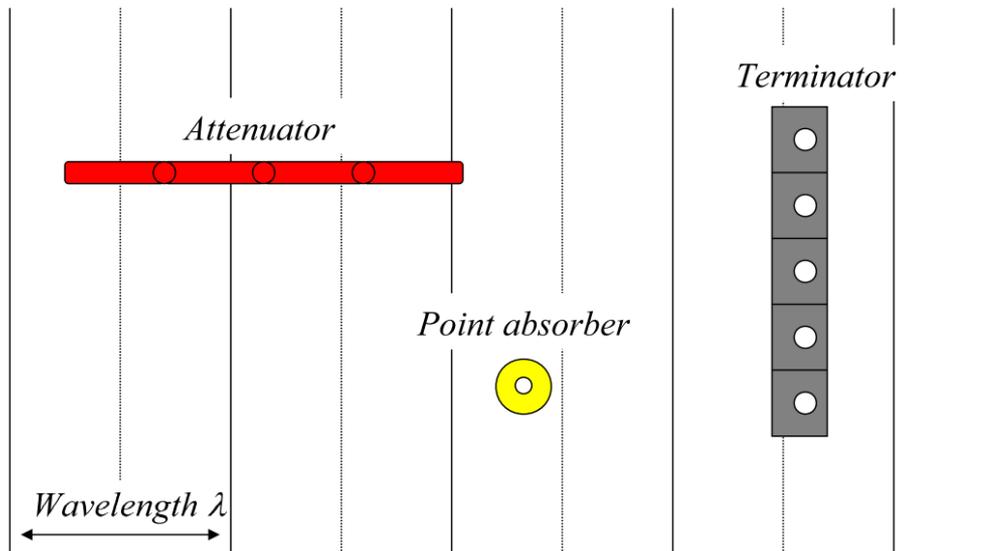


Figura 4-8. Clasificación de los convertidores de energía undimotriz de acuerdo con su tamaño y orientación [19]

Finalmente, según el tipo de captación que empleen los convertidores de energía undimotriz se puede realizar la siguiente clasificación:

- Diferencias de presión, se aprovecha la diferencia de presión creada por el oleaje en un fluido, normalmente aire, distinguiéndose dos fenómenos: columna de agua oscilante y efecto de Arquímedes.
- Cuerpos flotantes, son dispositivos basados en un cuerpo flotante que es movido por las olas. El movimiento oscilatorio aprovechable puede ser vertical, horizontal, de cabeceo o una combinación de ellos.
- Sistema de rebosamiento y/o impacto, son dispositivos en los que las olas inciden en una estructura con el objetivo de aumentar su energía potencial, cinética o ambas. Los sistemas de rebosamiento fuerzan a que el agua pase por encima de la estructura mientras que en los de impacto las olas inciden en una estructura articulada o flexible.

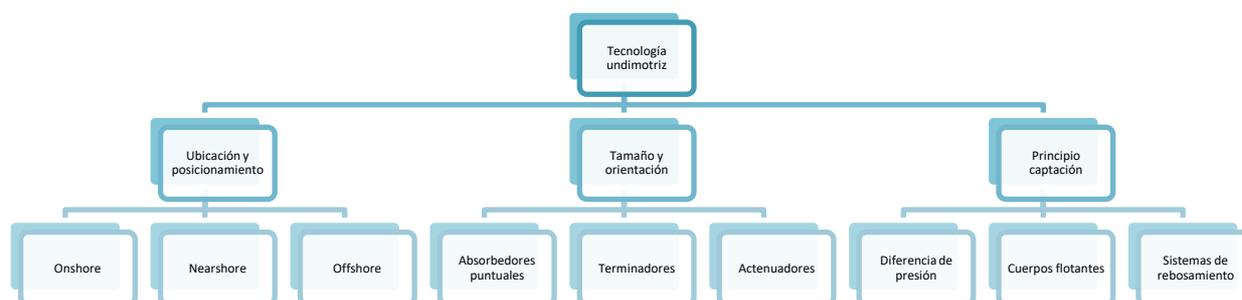


Figura 4-9. Clasificación de las tecnologías de energía undimotriz

#### 4.3.1 Tecnología de columna de agua oscilante (CAO)

Actualmente, los dispositivos de captación de energía undimotriz por columna de agua oscilante están basados en las irregularidades aleatorias de las olas del océano debido al oleaje. Un convertidor de energía de las olas de columna de agua oscilante consiste principalmente en una cámara parcialmente llena de agua y que presenta una superficie de agua interna. Esta cámara se comunica con el océano a través de una abertura submarina. En la parte superior de la cámara se instala otra abertura para asegurar la comunicación con el aire exterior y se coloca una turbina de aire en el orificio.

Cuando las olas entran en la cámara a través de la abertura submarina, elevan el nivel medio del agua. El aire de la parte superior de la cavidad se comprime y busca escapar por el orificio de la parte superior. Cuando las olas retroceden, el nivel promedio en la cámara disminuye, se crea una depresión en la parte superior de la cámara y el aire externo es aspirado hacia adentro. Por tanto, la superficie libre interior se comporta como un pistón líquido, oscilando hacia arriba y hacia abajo, de ahí el nombre del dispositivo. En el orificio se obtiene un flujo de aire alternativo, que se convierte en electricidad a través de una turbina de aire. El movimiento del aire es bidireccional. Por ello, para mejorar la eficiencia del proceso las turbinas se construyen simétricas, garantizando que el perfil de entrada de la corriente sea siempre el mismo [19].

A los sistemas de columna de agua oscilante (CAO) se les suele conocer por sus siglas en inglés como OWC (Oscilating Water Column) y se les puede implementar en la costa o en profundidades de agua de hasta 50 metros, no obstante es ideal para lugares donde existe una fuerte energía de olas, como en la rompiente de olas, defensas costeras, proyectos de recuperación de territorio y escolleras de puertos [20].

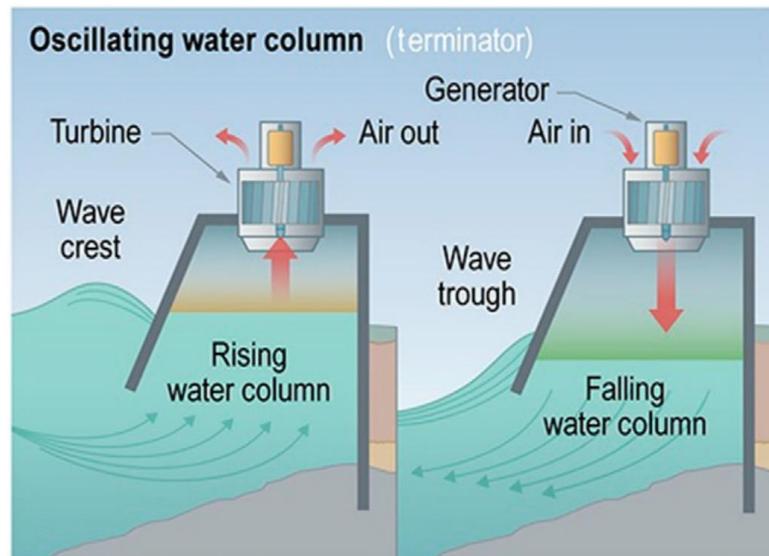


Figura 4-10. Principio de funcionamiento de los sistemas de Columna de Agua Oscilante [21]

Las turbinas unidireccionales tradicionales no son adecuadas para este tipo de tecnología debido a las restricciones de dirección del aire, siendo necesario la utilización de turbinas de aire autorrectificantes para resolver este problema. De este modo, en los sistemas de columna de agua oscilante, el PTO empleado es la turbina neumática, similar en concepto a las turbinas convencionales de gas o vapor, siendo las más empleadas las Turbinas Wells y Turbinas de Acción [6].

#### 4.3.1.1 Turbinas Wells

La turbina más ampliamente utilizada en los dispositivos CAO hasta la actualidad son las Turbinas Wells, concebidas por el profesor A.A. Wells de la Queen University de Belfast en el año 1976. Se trata de una turbina de aire autorrectificable de flujo axial en su estructura, y su par no se ve afectado fácilmente por la dirección del flujo de aire. Por lo tanto, tiene las ventajas de una relación de velocidad aire-aire, alta eficiencia máxima y bajo costo de fabricación [6]. Su principal característica es que, debido a su geometría, siempre gira en el mismo sentido, independientemente del sentido del flujo de aire en la cámara de captura. Los estudios posteriores a su creación han dado lugar a diferentes evoluciones que han ayudado a mejorar sus prestaciones, sacrificando parte de la sencillez del diseño del modelo original [20].

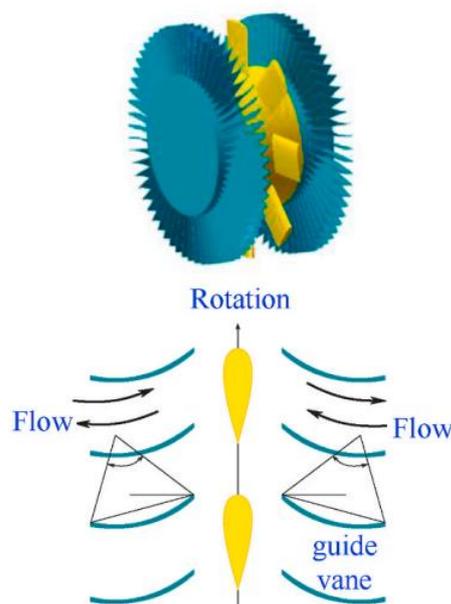


Figura 4-11. Diagrama de funcionamiento de una Turbina Wells [6]

#### 4.3.1.2 Turbinas de Acción

La otra tipología más empleada en dispositivos de Columna de Agua Oscilante es la Turbina de Acción o Turbina de impulso, de estructura similar a las empleadas en las turbinas de vapor, cuyos comienzos se remontanta a finales del siglo XIX. La estructura del rotor es la misma que la turbina de impulso de flujo axial de vapor de una etapa tradicional, y solo un juego de guías. Las paletas se instalan simétricamente en la sección transversal axial del rotor. Tiene ciertas ventajas en la absorción de energía de las olas porque las palas del rotor de la turbina de impulsos autorrectificantes tienen una velocidad más baja y una tensión centrífuga de las palas menor en comparación con la de la turbina Wells. Al igual que en el caso de las Turbinas Wells, las posteriors mejoras han dado lugar a diferentes versiones [6].

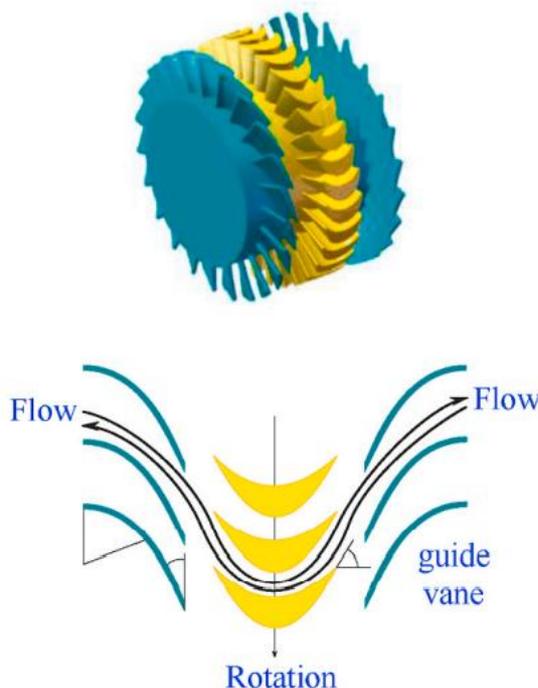


Figura 4-12. Diagrama de funcionamiento de una Turbina de Acción [6]

#### 4.3.1.3 Turbinas Dennis-Auld

La turbina Dennis-Auld fue desarrollada por la Universidad de Sidney a finales de los años 90 con la particularidad de que los perfiles aerodinámicos del rotor no son simétricos. La estructura del rotor es similar a la de una Turbina Wells de paso variable, y la principal diferencia radica en el ángulo escalonado de las palas del rotor, permitiendo modificar la posición de los perfiles respect a la corriente mediante un sistema de tomonería acoplado al rotor que le permite trabajar con el flujo bidireccional, además de ampliar considerablemente el ranto útil de trabajo. Por consiguiente, los bordes de ambos lados de las palas del rotor de la Turbina Dennis-Auld son iguales para cargar el borde de ataque o el borde de salida alternativamente de acuerdo con la dirección del movimiento alternativo del flujo de aire [6].

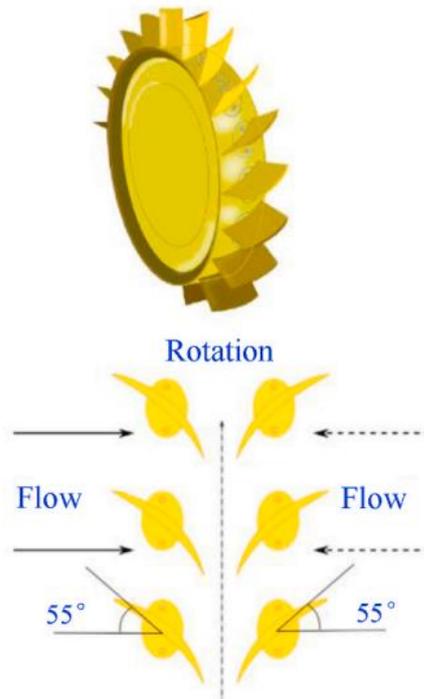


Figura 4-13. Diagrama de funcionamiento de una Turbina de Dennis-Auld [6]

#### 4.3.2 Tecnología de movimientos oscilantes

En los dispositivos que captan el movimiento oscilante, el oleaje induce un movimiento relativo entre las partes móviles y fijas del dispositivo. De este modo, los cuerpos de conversión tienen seis grados de libertad: oscilación vertical, cabeceo, oleada, guiñada, balanceo y alabeo. Teniendo en cuenta la continuidad en la generación de energía, la tecnología de generación de energía de boya oscilante utiliza el cuerpo para hacer movimientos de balanceo, cabeceo o balanceo bajo la excitación de onda para impulsar el PTO, motivando así al generador a generar electricidad [6].

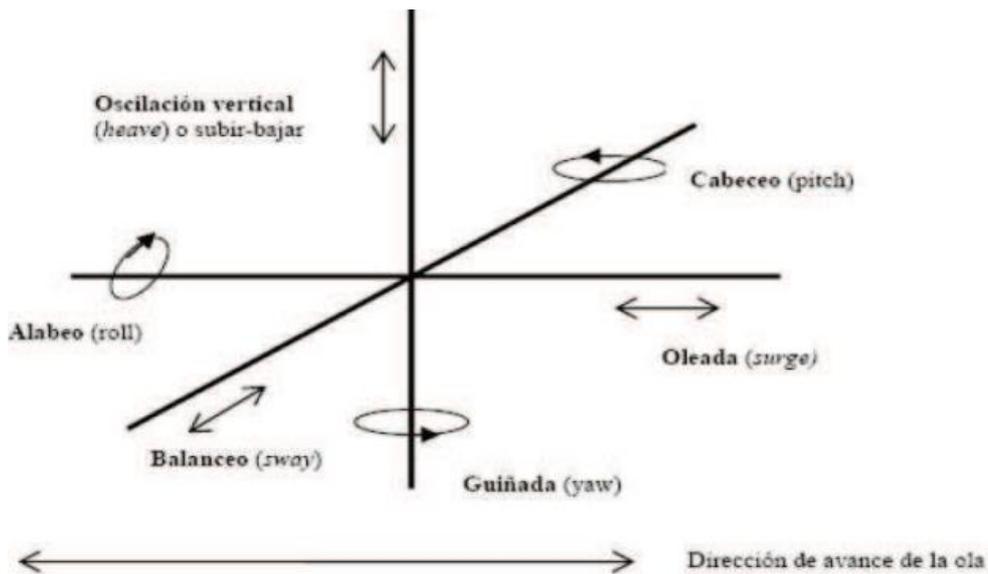


Figura 4-14. Grados de libertad de los dispositivos de movimiento oscilante

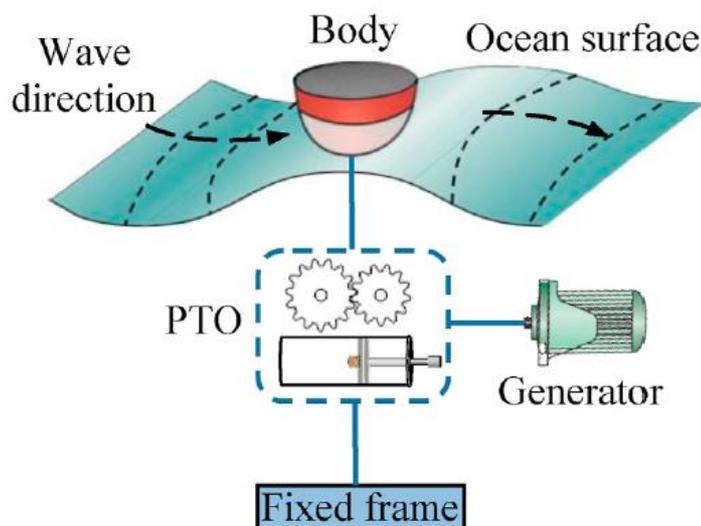


Figura 4-15. Estructura básica del sistema de movimiento oscilante [6]

Existen varios tipos de sistemas de conversión energética empleados por los dispositivos oscilantes, siendo los más comunes los dispositivos de mecánicos, hidráulicos y eléctricos:

#### 4.3.2.1 Convertidor mecánico

El convertidor de energía undimotriz necesita usar diferentes dispositivos de toma de fuerza (PTO) para convertir y generar energía eléctrica de manera constante. Los sistemas de transmisión mecánica se llevan empleando durante mucho tiempo en otros sectores industriales, por ello representan una alternativa viable para conversión de energía undimotriz. Estos sistemas presentan las siguientes ventajas [19]:

- La gran variedad de elementos mecánicos (engranajes, levas, etc.) hace que sea posible diseñar un sistema de transmisión mecánica adecuado para dispositivo.
- El rendimiento del sistema es bueno siempre que el mantenimiento sea el adecuado.
- Es una tecnología altamente estandarizada, lo que implica que los costes estén acotados.

En contraposición, su mayor desventaja es la existencia de un número considerable de elementos móviles que implica necesidades de mantenimiento superiores a las de otros PTO. A pesar de ello, el tipo de engranaje mecánico es uno de los métodos de TDF más utilizados en el cuerpo oscilante. La transmisión requiere por lo general de un rodamiento unidireccional y un aumentador de velocidad para lograr una generación de energía continua y estable, pudiéndose dividir en los siguientes sistemas [6]:

- Transmisión por engranajes
- Transmisión por piñón y cremallera
- Transmisión por husillo de bolas

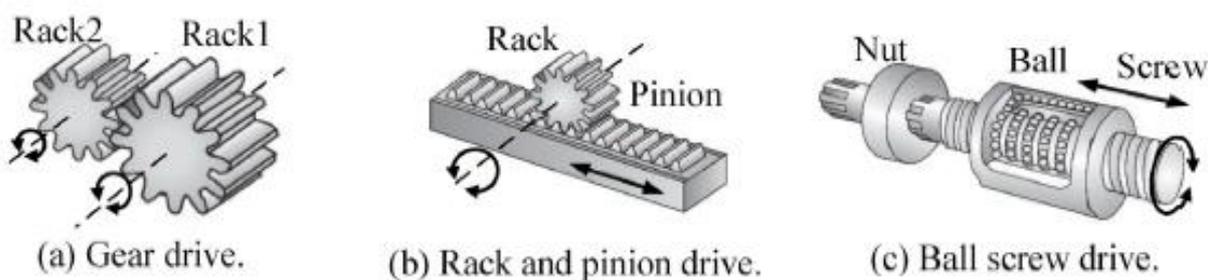


Figura 4-16. Diferentes tipos de convertidores de transmisión PTO mecánicos [6]

#### 4.3.2.2 Convertidor hidráulico

El sistema hidráulico / neumático tiene una transmisión flexible, un almacenamiento de energía estable y un gran par, que es adecuado para las características aleatorias de amplitud de cambio de energía de las olas y gran frecuencia de cambio de energía de las olas y gran frecuencia de cambio. El movimiento oscilatorio se emplea para comprimir aceite (o cualquier otro fluido) que acciona un motor hidráulico acoplado a un generador eléctrico. El flujo de trabajo se almacena en depósitos a diferentes niveles de presión, lo que proporciona una capacidad de almacenamiento que permite suavizar su producción. Además, se puede añadir capacidad de almacenamiento mediante la compresión de un gas [6].

También se trata de uno de los PTO más empleados en los dispositivos oscilantes debido a su idoneidad para absorber grandes fuerzas aplicadas a bajas velocidades. Además, permite disponer de una pequeña capacidad de almacenamiento de energía, y los equipos son muy similares a los empleados en la industria convencional, por lo que reduce los costes de los mismos. Su mayor inconveniente es la necesidad de conseguir una estanqueidad muy alta para evitar que se produzcan fugas del fluido hidráulico y desemboque en una contaminación ambiental [19].

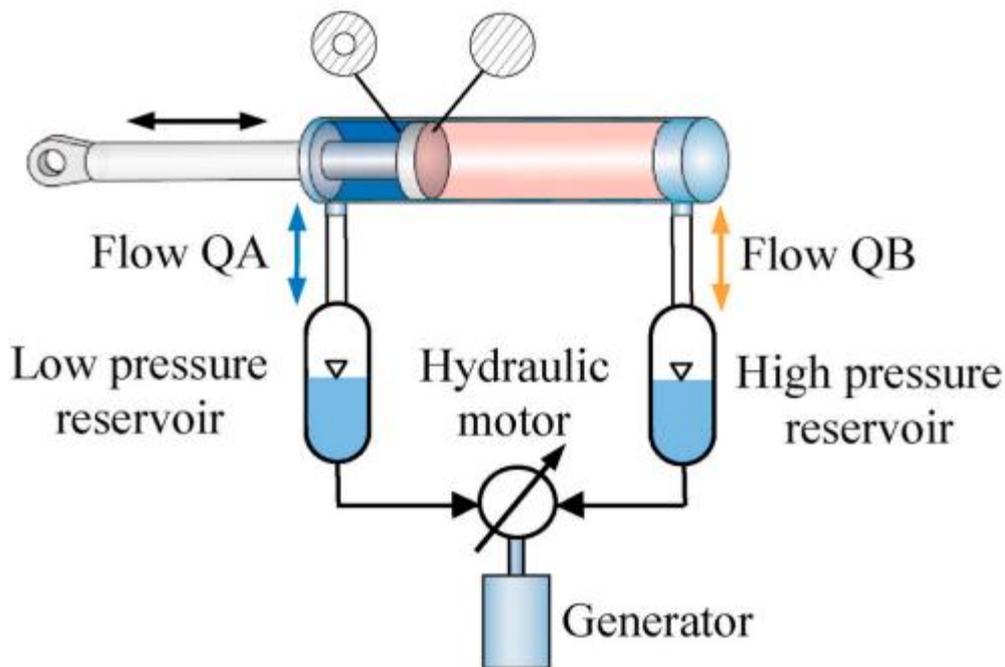


Figura 4-17. Transmisión de convertidores hidráulicos/neumáticos [6]

#### 4.3.2.3 Convertidor eléctrico lineal

Este sistema de conversión de energía es el resultado de la adaptación del generador eléctrico rotativo convencional. El sistema cuenta con dos componentes principales, la parte fija (equivalente al estator del generador eléctrico convencional) y la parte móvil (equivalente al rotor). No obstante, presenta la particularidad de que solo puede emplearse para dispositivos que funcionen bajo oscilación vertical. El movimiento alternativo de la parte móvil, donde se puede integrar imanes permanentes o un circuito de inducción en su estructura, provoca las variaciones de flujo magnético en el estator que genera la energía eléctrica [19].

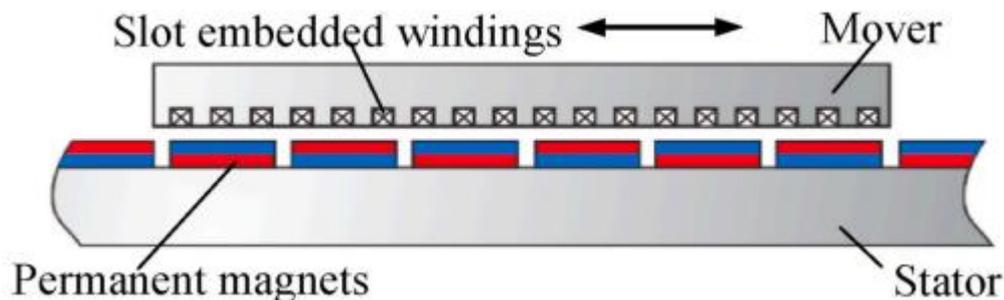


Figura 4-18. Transmisión de convertidores eléctricos lineales [6]

En comparación con otros métodos de PTO, la ventaja de transmisión eléctrica lineal es que genera electricidad directamente sin transmisión, lo que reduce la complejidad del diseño, los requisitos de operación y los costos de mantenimiento al prescindir equipos intermedios. Con todo ello se consigue reducir las pérdidas y aumentar la eficiencia.

Sin embargo, la producción directa de energía eléctrica elimina cualquier posibilidad de almacenamiento energético intermedio y las variaciones de la velocidad de la parte móvil hacen que la calidad de la señal generada sea baja, por lo que es imprescindible el tratamiento de la onda para poder inyectar energía en la red. Además, el hecho de que el movimiento oscilatorio se realice a velocidades bajas (aproximadamente 1-2 m/s) hace que para poder generar potencias altas se necesite absorber fuerzas muy grandes, lo que conlleva requerimientos más exigentes en el diseño mecánico. Por todo lo anterior, este sistema es el que presenta un menor grado de madurez y necesita un mayor desarrollo de todos los sistemas de conversión energética undimotriz [6].

### 4.3.3 Tecnología de desbordamiento

El principio de funcionamiento de los dispositivos de rebosamiento es diferente de los dos anteriormente explicados. Esto es porque no se aprovecha el movimiento de oleaje para accionar ningún elemento móvil, sino que se emplea para almacenar el agua del mar en el reservorio que posee el dispositivo [19].

La energía transportada por el movimiento de las olas incluye la energía cinética del punto de masa de agua y la energía potencial debida a dejar la posición de equilibrio. La tecnología de generación de energía de las olas del tipo de desbordamiento utiliza una superficie de las olas del tipo de las olas inclinadas para bloquear el movimiento de las olas. Luego, las ondas son guiadas para ascender a lo largo de la superficie de la onda guía y hacia el depósito, y la energía de las olas inestable se convierte en energía potencial estable. Finalmente, bajo la acción de la diferencia entre las cabezas de agua internas y externas, el agua en el depósito fluye a lo largo de la tubería de salida, impulsando así el dispositivo PTO para hacer que el generador produzca electricidad [6].

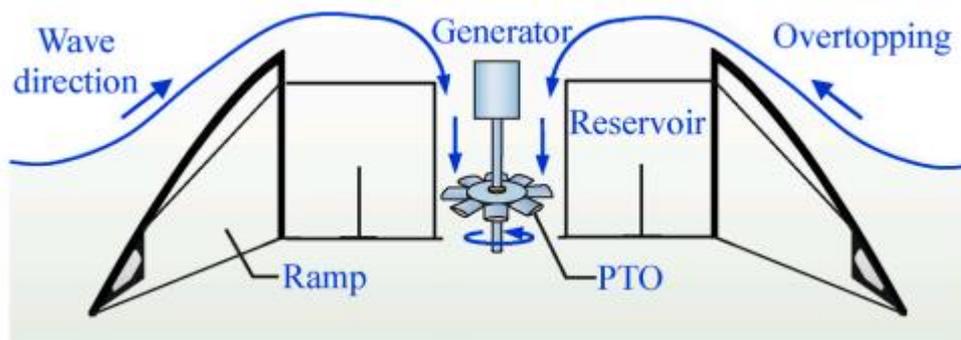


Figura 4-19. Estructura básica del principio de funcionamiento de los dispositivos de desbordamiento [6]

El dispositivo PTO de generación de energía undimotriz de tipo rebosante es similar a la central hidroeléctrica tradicional y utiliza una turbina de flujo axial. Este tipo de turbina se ha utilizado en sistemas de generación de

energía hidroeléctrica durante muchos años y la tecnología es bastante madura. En la siguiente figura se muestran tres tipos de turbinas de agua que se utilizan a menudo para generar electricidad a partir de las olas:

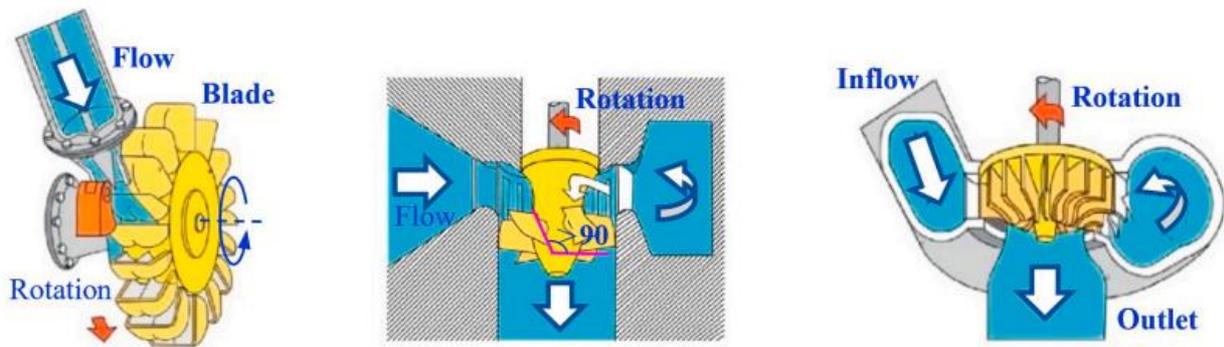


Figura 4-20. Diagrama de funcionamiento de turbinas hidráulicas [6]

La turbina Pelton, la turbina Kascheme y las turbinas Francis se pueden dividir de acuerdo con las diferentes alturas del cabezal de agua: cabezal de agua alto, cabezal de agua medio y cabezal de agua bajo. También se pueden dividir según el principio de funcionamiento: turbina reactiva y turbina de impulso. El rotor de la turbina reactiva está completamente sumergido en agua y rodeado por una carcasa de presión. Cuando el agua fluye a través de las palas del corredor, su forma única hace que la diferencia de presión en el flujo de agua genere sustentación que obliga al corredor a girar. Además, la turbina de impulso es diferente de la turbina reactiva. Sus palas del corredor se colocan en el aire y las boquillas están configuradas para hacer que el flujo de agua impacte las palas del corredor a alta velocidad, logrando así la rotación [6].

Una ventaja de los dispositivos de desbordamiento es su simplicidad desde un punto de vista mecánico. Excepto las turbinas de baja altura, de hecho, no hay partes móviles. En adición, exhiben una capacidad inherente para suavizar la producción de energía, por medio del reservorio que asegura las funciones de almacenamiento [19].

## 4.4 Principales proyectos undimotrices

### 4.4.1 Tecnología de columna de agua oscilante (CAO)

Yoshio Masuda propuso por primera vez el concepto de sistemas undimotrices por columna de agua oscilante en la década de 1940. En 1965, se construyó el primer sistema de este tipo del mundo llamado boyas de navegación de Masuda. En las décadas siguientes, el se desarrolló continuamente y se convirtió en el sistema undimotriz más utilizado en el mundo. En la actualidad existen muchos dispositivos que emplean este principio de funcionamiento. Los hay flotantes o fijos, ya sea a tierra o a una estructura [21].

#### 4.4.1.1 Tipo flotante

En la actualidad, uno dispositivos flotantes en el mar más importantes es el Oceanlinx en Australia. Se trata de una serie de dispositivos que emplea una turbina Dennis-Auld. El dispositivo Mk1 de 250 kW de potencia con una superficie de 100 m<sup>2</sup> fue instalado en 2005 en Port Kembla, cerca de Sidney, funcionando hasta mediados de 2009. Sobre estas fechas se fue desarrollando el dispositivo Mk2 de 1,5 MW de potencia a escala 1:3 a finales de 2007 para experimentación y obtención de datos. A finales de 2009 comenzó la construcción del dispositivo pre-comercial Mk3 de potencia unitaria 2,5 MW que también será instalado en Port Kembla [6].



Figura 4-21. Mk1

Asimismo, la planta piloto Mighty Whale, montada en una embarcación, está equipada con turbinas Wells, presentando una capacidad de producción de 110 kW [19].



Figura 4-22. Might Whale

Actualmente, con la excepción del Oceanlinx que ha sido probado con éxito y está a punto de ser comercializado, otros proyectos se han disuelto o suspendido después de un período de pruebas en alta mar.

#### 4.4.1.2 Tipo fijo

La construcción de sistemas undimotrices a lo largo de la costa puede reducir efectivamente el riesgo de daño al dispositivo causado por olas enormes. En 1991, la Comisión Europea decidió incluir la energía de las olas en el programa de investigación y desarrollo de energías renovables, y la investigación sobre los dispositivos

de columna de agua oscilante de tipo fijo a gran escala se llevó a cabo en la isla Pico en Portugal y la isla Islay en el Reino Unido [6].

El LIMPET británico se encuentra equipado con una turbina Wells, el convertidor está construido en un pozo en un acantilado rocoso y su potencia nominal es de 500 kW.



Figura 4-23. LIMPET

Como estructura artificial construida para resistir las olas del océano, los rompeolas pueden garantizar la seguridad de puertos, muelles y asentamientos humanos. El sistema de CAO de tipo fijo es más fácil de construir, operar y mantener mientras protege los puertos costeros integrándolo con el rompeolas. En 2001, España estableció el Mutriku, el primer convertidor de columna de agua oscilante de rompeolas del mundo, en la costa atlántica. Esta central cuenta con 16 turbinas Wells con una potencia total de 296 kW [21].



Figura 4-24. Central en Mutriku

## 4.4.2 Tecnología de movimientos oscilantes

Los sistemas de cuerpo oscilantes están considerados como uno de los convertidores más económicos. De acuerdo con la forma, el tamaño y el ángulo de la dirección de las olas incidentes sobre el cuerpo, los sistemas de movimiento oscilantes se pueden dividir en tres tipos: absorbedores puntuales, atenuadores y terminadores [19].

### 4.4.2.1 Absorbedores puntuales

Los absorbedores de puntos de superficie son estructuras flotantes que absorben la energía de las olas desde todas las direcciones, a diferencia de los atenuadores [21].

Canadian Finavera Renewables Limited desarrolló el absorbedor de punto AquaBuoy en 2000. Este convertidor se compone principalmente de cuatro componentes: boya, tubo de aceleración, pistón y bomba de manguera. Cuando la boya se mueve hacia arriba y hacia abajo sobre la superficie de la ola, la bomba de manguera se contrae y se expande a través del movimiento relativo del tubo de aceleración y el pistón, de modo que el agua de mar se bombea a la turbina a través de la bomba de manguera e impulsa el generador para producir electricidad [6].



Figura 4-25. AquaBuoy

American Ocean Power Technologies desarrolló un absorbedor puntual llamado PowerBuoy en 2005. Este convertidor está amarrado en el lecho marino y el movimiento vertical del pistón en su sistema hidráulico está motivado por la ondulación de las olas, lo que impulsa el generador para producir electricidad [6]. El dispositivo ha ido evolucionando a lo largo de los años, pasando de 40 kW de potencia nominal a los 150 kW actuales, con dimensiones de 15 m de diámetro y 50 m de longitud. Se espera que en un futuro se alcancen los 500 kW por dispositivo [21].



Figura 4-26. PowerBuoy

La Universidad de Manchester apoyada por diversas empresas han desarrollado el Manchester Bobber. Un dispositivo que presenta un enfoque diferente a los anteriormente descritos. Se trata de una plataforma equipada con 25 absorbedores puntuales, cada uno de los cuales acciona un sistema de transmisión mecánica acoplado a un generador eléctrico de 500 kW de potencia nominal, dando un global de 12,5 MW de potencia por dispositivo. La plataforma se instalaría en profundidades comprendidas entre los 20-40 metros de profundidad. Actualmente se encuentra en la fase 3 de su proceso de desarrollo en la que se tienen que realizar pruebas experimentales con prototipo a escala 1:70 para optimizar el diseño [21].



Figura 4-27. Prototipo 1:70 de Manchester Bobber

#### 4.4.2.2 Atenuadores

Un atenuador es un dispositivo flotante largo que se alinea con la dirección de propagación de la onda. El dispositivo captura la energía de la ola restringiendo selectivamente los movimientos a lo largo de su longitud [21]. El concepto de sistema atenuador fue propuesto por primera vez por el británico Christopher Cockrell en la década de 1870, y posteriormente desarrolló hizo el dispositivo de energía de las olas llamado balsa Cockrell. Este convertidor consta de varias balsas flotantes. Bajo la acción de la ondulación de las olas, existe un desplazamiento angular entre balsas adyacentes, y el sistema hidráulico instalado entre las balsas impulsa el generador para producir electricidad.

University College Cork y la Queen's University de Belfast desarrollaron la bomba McCabe Wave en 1996 basándose en este principio de generación de energía. Posteriormente Ocean Power De desarrolló la serpiente marina llamada Pelamis en 2006 [6]. El dispositivo Pelamis se trata de uno de los dispositivos más avanzados en la actualidad. Se trata de un dispositivo de 180 m de longitud y 4 m de diámetro. Cosnta de 4 módulos cilíndricos y 3 módulos de potencia. La potencia novimal de cada módulo es de 250 kW, suponiendo una potencia global por dispositivo de 750 kW. Este sistema tiene como ventaja que permte aprovechar dos grados de libertad, la oscilación vertial y el balanceo, lo que hace que la eficiencia del proceso de captación de la energía undimotriz se mayor [19].



Figura 4-28. Dispositivo Pelamis

#### 4.4.2.3 Terminadores

El tamaño de la boya del terminador es mayor y su eje principal es perpendicular a la dirección de la ola, lo que puede absorber la energía de la ola con un ancho de ola mayor. En comparación con los otros dos convertidores de tipo boya oscilante, tiene una mayor eficiencia de generación de energía.

En la investigación del terminador, el profesor Trevor Whittaker de la Queen's University de Belfast desarrolló el terminador Oyster en 2001. El Oyster está fijado en el lecho marino cercano a la costa y equipado con cilindros hidráulicos. Cuando las olas fluyen a través del Oyster, el péndulo de flotabilidad oscila, y el cilindro hidráulico transporta agua a alta presión a tierra e impulsa el generador hidroeléctrico para producir electricidad [6]. El Oyster utilizó el fondo marino como referencia y, por lo tanto, estaba destinado a instalarse cerca de la costa, en profundidades de agua de 10 a 15 m.

Hasta la fecha, se han construido dos prototipos del Oyster. El Oyster 1 (315 kW) se instaló en 2009 en el EMEC. Fue reemplazado rápidamente por el Oyster 800 (800 kW), del cual se implementó un prototipo en 2011 en el EMEC. A pesar de que los dos sistemas compartían la misma altura de conversión de energía de olas oceánicas 130 (12 m según la profundidad del agua), el ancho del Oyster 800 era de 26 m, mientras que el del Oyster 1 era de solo 18 m. Este casi 50% de ancho adicional, combinado con una relación de ancho de captura ligeramente mayor, aumentó la producción de energía en más del 50% por unidad [19].

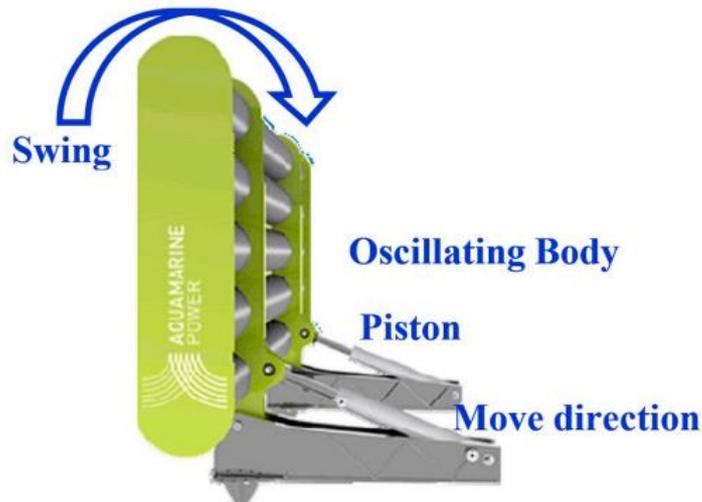


Figura 4-29. Oyster

### 4.4.3 Proyectos con tecnología por desbordamiento

Las tecnologías de desbordamiento se pueden dividir en tipo flotante y tipo fijo. El convertidor de tipo flotante se fija en la superficie del mar mediante un sistema de anclaje, que puede operar en aguas profundas con abundantes recursos energéticos de las olas. Su tasa de utilización de energía es alta y menos afectada por la amplitud de las mareas. Los convertidores de tipo fijo se instalan comúnmente en aguas costeras o cercanas a la costa, que son fáciles de configurar y mantener. Además, los convertidores no requieren el anclaje y tendido de equipos de cable submarino de larga distancia en aguas profundas. Sin embargo, su tasa de utilización de la energía de las olas es menor que en aguas profundas debido a la limitación de la ubicación de la instalación. También están restringidos por muchos factores, como la topografía de la costa, la amplitud de las mareas y la protección costera [6].

#### 4.4.3.1 Tipo flotante

El barco WEC de tipo flotante es un convertidor de desbordamiento desarrollado por Sweden Sea Power para operaciones en alta mar. El convertidor está compuesto por una piscina flotante sostenida por cuatro tanques de lastre, y la rampa y el tanque de agua están ubicados en el medio de la estructura. La rampa del dispositivo puede orientarse hacia la dirección con la energía de las olas más fuerte debido a su sistema de anclaje especial [6].

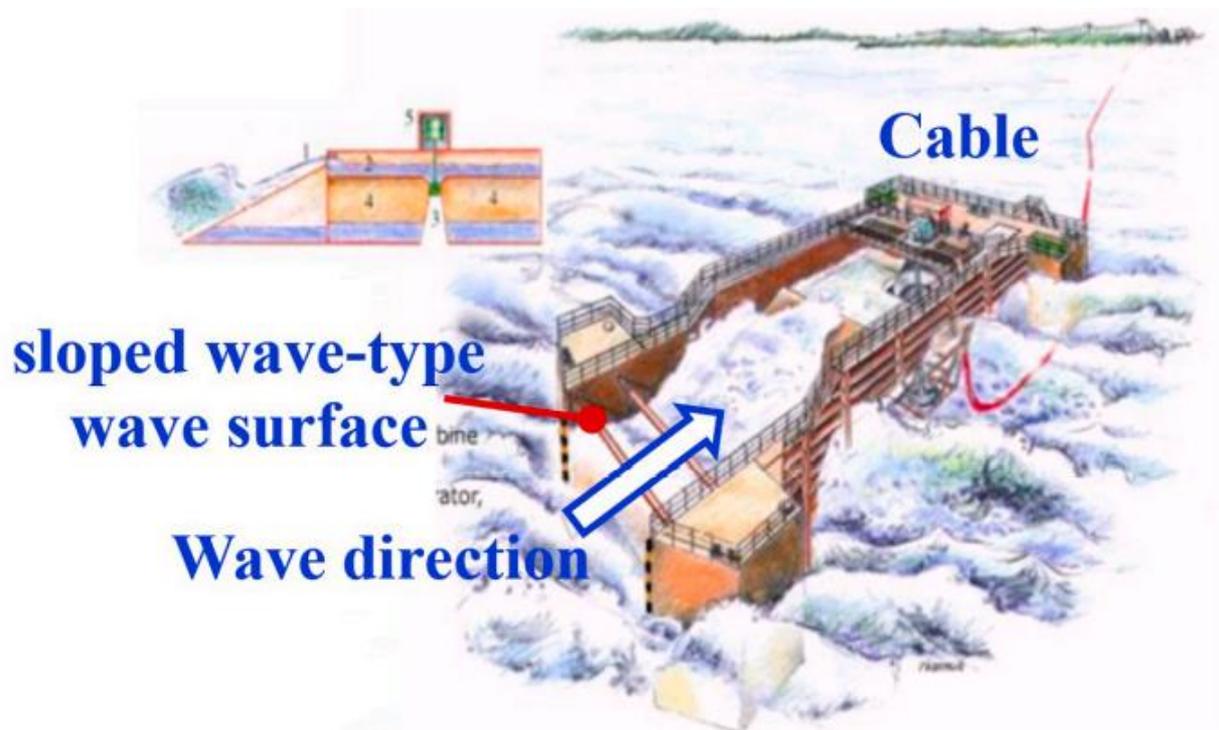


Figura 4-30. Sistema flotante desarrollado por Sweden Sea Power

Una de las innovaciones que presenta este concepto es la turbina multieje, una por cada cámara de almacenamiento de agua que permite aprovechar mejor el salto hidráulico disponible en las cámaras superiores. En el año 2008 estaba prevista la instalación de una planta piloto en Kvitsoy, Noruega, pero el proyecto fue cancelado como consecuencia de una mala gestión de la opinión pública.

En la actualidad, la compañía está trabajando para poder realizar pruebas con su dispositivo a escala real integrado en un rompeolas en el puerto de Hanstholm, Dinamarca [19].

El Wave Dragon es otro dispositivo de tipo flotante desarrollado por Dinamarca en los años 80. La estructura principal del dispositivo de generación de energía está compuesta por rampas dobles y una piscina con estructura de hormigón. Se instalan paredes reflectantes curvas a ambos lados de la rampa de modo que las ondas incidentes se concentren en la rampa, lo que puede aumentar de forma eficaz la tasa de adquisición de energía de las olas [6].



Figura 4-31. Sistema de desbordamiento flotante Wave Dragon

El prototipo a escala tiene una potencia de unos 20 kW, si bien se espera que el dispositivo a escala real tenga una potencia entre 4-10 MW, en función de las condiciones climáticas de la zona. De los dispositivos de energía undimotriz concebido con una potencia específica muy alta (del orden de MW) el Wave Dragon es el más avanzado de todos ellos en la actualidad, lo cual lo convierte en el líder de los dispositivos de energía undimotriz de muy alta potencia [19].

#### 4.4.3.2 Tipo fijo

Norwave AS construyó el primer sistema por desbordamiento de tipo fijo del mundo llamado TAPCHAN con una capacidad instalada de 350 kW cerca de la central eléctrica MOWC en 1986. Las olas entrantes acceden a un depósito situado en una cota superior a la del mar a través de una rampa, para después hacer pasar el agua por unas turbinas acopladas a unos generadores eléctricos antes de ser devuelta al mar [20].

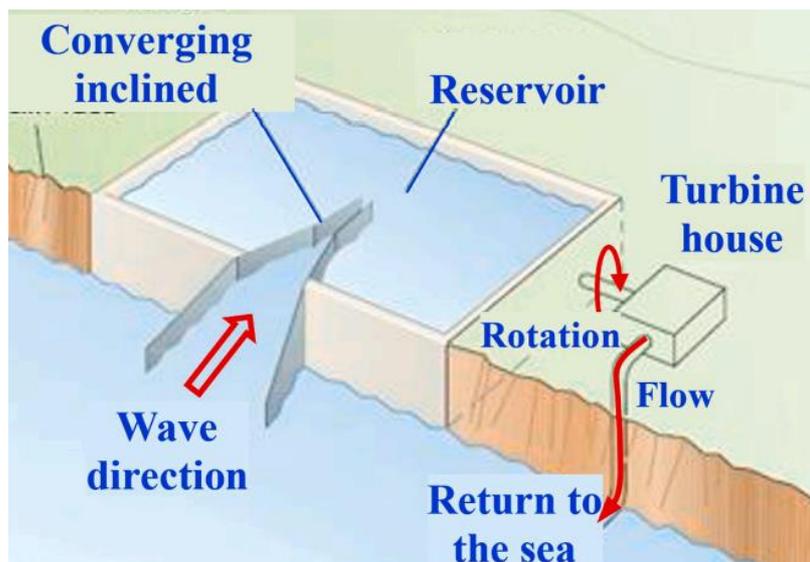


Figura 4-32. Sistema de funcionamiento de TAPCHAN

Tabla 4-1. Resumen de principales proyectos undimotrices

Central	Fase	Tecnología	Tipo	Potencia
Mk3	Prototipo	Columna de Agua Oscilante	Flotante	2,5 MW
Mighty Whale	Escala real	Columna de Agua Oscilante	Flotante	110 kW
LIMPET	Escala real	Columna de Agua Oscilante	Fijio	400 kW
Mutriku	Escala real	Columna de Agua Oscilante	Fijio	296 kW
AquaBuoy	Prototipo	Movimiento Oscilante	Puntual	250 kW
PowerBuoy	Escala real	Movimiento Oscilante	Puntual	150 kW
Manchester Bobber	Prototipo	Movimiento Oscilante	Puntual	12,5 MW
Pelemis	Escala real	Movimiento Oscilante	Atenuador	750 kW
Oyster	Escala real	Movimiento Oscilante	Terminador	800 kW
Wave Dragon	Prototipo	Desbordamiento	Flotante	20 kW
TAPCHAN	Escala real	Desbordamiento	Fijio	350 kW



# 5 ENERGIA POR CORRIENTES MARINAS

---

La extracción de energía de la corriente oceánica se puede definir como la conversión de la energía cinética disponible en las corrientes superficiales geostroficas del océano abierto a gran escala en forma de energía más utilizables (generalmente electricidad).

Estas corrientes oceánicas son más fuertes cerca de la superficie del océano y se han estudiado durante casi 50 años como una fuente potencial para generar energía eléctrica. Aunque no se utiliza todo lo ampliamente que se pudiera, las corrientes marinas tienen un potencial importante para la futura generación de electricidad. Una de las principales ventajas de este tipo de energía es que tiene una alta previsibilidad, de manera que, a diferencia de muchas otras energías renovables, la disponibilidad de la energía será conocida y prevista, evitando la intermitencia [3].

## 5.1 Fundamento teórico: generación de corrientes

Las corrientes oceánicas o corrientes marinas se pueden definir como el movimiento de las aguas de mares y océanos hacia una determinada dirección, tanto horizontal como vertical. Estas corrientes vienen causadas por multitud de factores: el movimiento rotacional y de traslación de la Tierra, la geografía de las costas y, relativamente, el emplazamiento de los continentes en el planeta. Los vientos también pueden crear corrientes, pero prácticamente son una causa no considerada ya que en determinadas ocasiones coinciden las corrientes y los vientos planetarios. Esto se debe a que comparten una causa común, que viene siendo los movimientos astronómicos realizados por la Tierra [22].

Las corrientes marinas suelen mover tanto masas de agua fría como caliente, que conectan varias zonas climatológicas del planeta, viajando tanto superficial como submarinamente [23]:

- Corrientes cálidas: Estas corrientes constan de aguas superficiales y tienen su origen en los océanos de la zona intertropical. Éstas se desplazan desde las costas orientales de los continentes hacia latitudes medias y altas, siempre en contra de la rotación terrestre y sólo en el hemisferio norte.
- Corrientes frías: Estas corrientes son formadas por aguas con una temperatura baja y generalmente a grandes profundidades. Se originan en la zona intertropical o subtropical, y compensan el efecto de las corrientes cálidas cuando alcanzan las costas occidentales de los continentes. Son características de las regiones polares árticas, ya que en la zona antártica solo hay una corriente circular alrededor del polo.

Según las características de las corrientes se pueden distinguir los siguientes tipos de corriente:

- Corrientes oceánicas: Son corrientes con un movimiento constante generado por la rotación terrestre, en general en sentido este-oeste en la zona intertropical, y en sentido opuesto en latitudes medias/altas. Sucede lo mismo que con los vientos constantes o vientos planetarios, de desplazamientos producidos por la inercia: en la zona intertropical, las corrientes se mueven en sentido contrario a la rotación terrestre, las aguas del fondo oceánico acompañan al planeta en el movimiento de rotación de oeste a este, pero las aguas superficiales se van quedando atrás por inercia, lo que significa una corriente ecuatorial de gran amplitud y la de mayor volumen de agua que se produce en nuestro planeta.
- Corrientes de marea: Son corrientes periódicas que reinician el ciclo diariamente. Vienen generadas por la acción de la Luna y del Sol sobre la superficie de los océanos. Desplazan cantidades muy grandes de agua del hemisferio norte al sur y viceversa. Si la posición del Sol y la Luna coinciden en el mismo hemisferio (durante la luna llena o la luna nueva en el verano del hemisferio norte) las mareas resultantes atraen una gran cantidad de agua que cruza el ecuador terrestre en el Océano Pacífico y más aún en el Atlántico. Durante el invierno en el hemisferio norte ocurre el proceso inverso.
- Corrientes de oleaje: Producidas por los vientos, generalmente durante tormentas y huracanes que se

asocian al movimiento de las masas de aire tanto de origen continental como marítimo. Se dan en la superficie de las aguas y tienen un impacto relativamente pequeño.

- Corrientes de deriva litoral: Son corrientes que, al encontrarse con las costas, éstas les fuerzan a alterar su dirección. Un claro ejemplo es la corriente ecuatorial atlántica al llegar a las costas de Brasil, ya que casi todas las aguas de la misma son desviadas hacia el noreste porque las costas tienen esta dirección.
- Corrientes de densidad: Estas corrientes solo se dan en zonas donde se encuentran dos masas grandes de agua dulce y salada. Se suelen dar en estrechos entre mares y océanos distintos, a lo largo del eje ecuatorial, o a lo largo del círculo polar ártico. Generalmente se desplazan en sentido contrario. Por ejemplo, en el estrecho de Gibraltar suelen presentarse muchas veces unas corrientes superficiales hacia el oeste, mientras que en el fondo penetra en el Mediterráneo una gran cantidad de agua procedente del Atlántico mucho mayor en proporción porque el Mediterráneo es deficitario en volumen de agua (sufre mayor evaporación que el caudal aportado por los ríos y lluvias).

Según la profundidad en la que se genera la corriente marina se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Corrientes de profundidad: Son corrientes generadas debajo de los 1000 metros de profundidad (picnoclina), principalmente debido a la rotación terrestre, que da origen a la generación de aguas profundas, y por lo tanto frías, en las costas occidentales de los continentes en las latitudes intertropicales. El motivo de estas corrientes de profundidad podría explicarse como una especie de compensación con relación a las corrientes superficiales.
- Corrientes de superficie: Son corrientes originadas por la acción giratoria de la Tierra, y que se ven afectadas por los vientos predominantes, los cuales les transmiten gran cantidad de energía y generan corrientes circulares a escala terrestre (en la franja ecuatorial) o en forma de espiral, formando bucles en las latitudes próximas a los trópicos. Estas corrientes superficiales influyen mucho en el clima, modificando las temperaturas de las regiones por las que pasan.

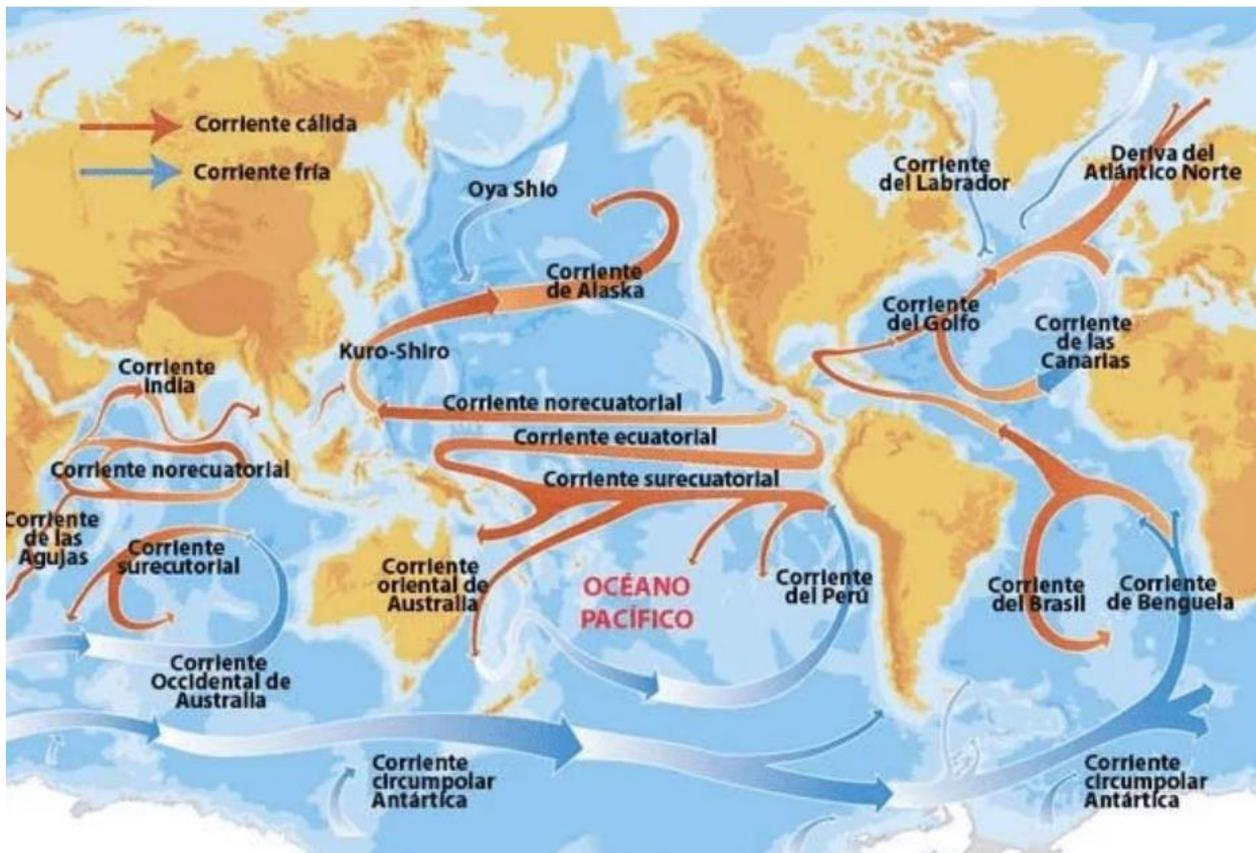


Figura 5-1. Principales corrientes marinas en la Tierra

## 5.2 Funcionamiento de los sistemas de corrientes marinas

Las corrientes marinas pueden provenir de diferentes efectos físicos, no obstante, el principio de extracción energética para todos los casos se centra en la energía cinética de la misma. La energía generada a través de las corrientes marinas, prácticamente en su totalidad es captada usando turbinas sumergidas con aspas rotativas y un generador. Las turbinas submarinas trabajan con el mismo principio de funcionamiento que las turbinas eólicas, transformando la energía cinética de los fluidos y transfiriéndola a energía de rotación, y luego a energía eléctrica. En cada uno de estos procesos de conversión de energía existen pérdidas, es decir, en el proceso de transformación de energía cinética a mecánica se producen pérdidas mecánicas y el proceso de transformación de la energía mecánica a eléctrica se producen pérdidas eléctricas.

A diferencia de las turbinas eólicas donde el flujo de viento no está restringido, los flujos de corriente de marea están limitados por la superficie libre y el fondo marino, y en canales, por las paredes que los conforman. Por tanto, el rendimiento variará según la ubicación de la columna de agua. Además, las velocidades de las corrientes son más lentas que las del viento, pero debido a la densidad del agua (835 veces la del aire) las turbinas acuáticas son más pequeñas que las eólicas y cuentan con la misma capacidad instalada [24].



Figura 5-2. Esquema general de conversión de energía por corrientes marinas

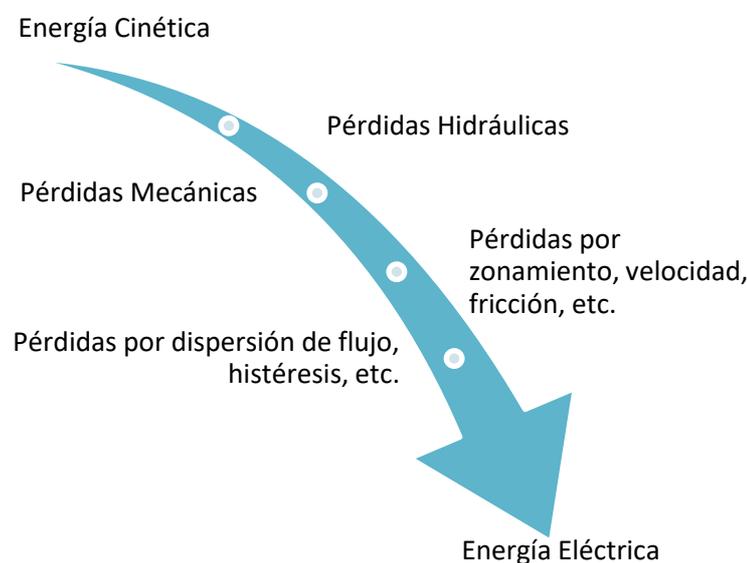


Figura 5-3. Pérdidas en el proceso de conversión de energía cinética a energía eléctrica

Al igual que los aerogeneradores, las turbinas de corrientes cuenta con álabes de secciones transversales de perfil aerodinámico y funcionan de acuerdo con los principios del levantamiento aerodinámico, ya que es más eficiente que la utilización de la resistencia erodinámica. En contraste con la energía eólica, no hay velocidades extremas de flujo bajo agua que podrían dañar los dispositivos o forzarlos a apagarse. Sin embargo, los dispositivos de corriente deben ser más robustos para soportar mayores cargas generadas por el agua. [25].

### 5.3 Tecnologías de energía por corrientes marinas

En la actualidad, existe una amplia variedad de generadores para el aprovechamiento de esta fuente energética. Todos basan su funcionamiento en ser posicionados en medio del flujo y corresponden a distintos diseños que pueden agruparse en tres tipologías: turbinas de flujo axial, turbinas de flujo vertical y alerones basculantes [26].

#### 5.3.1 Turbina de flujo axial

La conversión de energía ocurre a través de un componente que gira alrededor de un eje horizontal. Se trata de dispositivos que utilizan tecnologías tradicionales derivadas tanto del conocimiento sobre aerogeneradores como del conocimiento sobre motores marinos. Este tipo de turbinas han sido utilizadas principalmente para el aprovechamiento de las velocidades de agua en entornos marítimos y fluviales [24].

Las turbinas de eje horizontal parecen ser la solución más viable desde el punto de vista tecnológico y económico para las turbinas de corriente marina de gran escala debido a que tienen un bajo impacto ambiental al estar completamente sumergidas a una profundidad que no dificulta la navegación. En los prototipos construidos hasta la fecha siempre hay una parte no sumergida para facilitar la instalación y el mantenimiento. En general, se puede montar la unidad fuera del agua y luego deslizarla a través de un bastidor hasta que alcance el hundimiento deseado, o se realiza una estructura en el fondo del mar que la fije.

Existen dos formas de movimiento de las turbinas:

- Por arrastre: las turbinas se mueven despacio y aprovechan todo el flujo que las atraviesa.
- Por sustentación: se mueven más deprisa, requiriendo menos velocidad para girar. Este tipo de turbinas requieren de diseños de álabe especiales (NACA).

La turbina se puede acoplar directamente a un generador normal a través de un elemento de transmisión que generalmente consiste en una caja de engranajes multiplicadores o usar un esquema de transmisión diferente. La electricidad se transmite a la tierra a través de cables aislados [27].

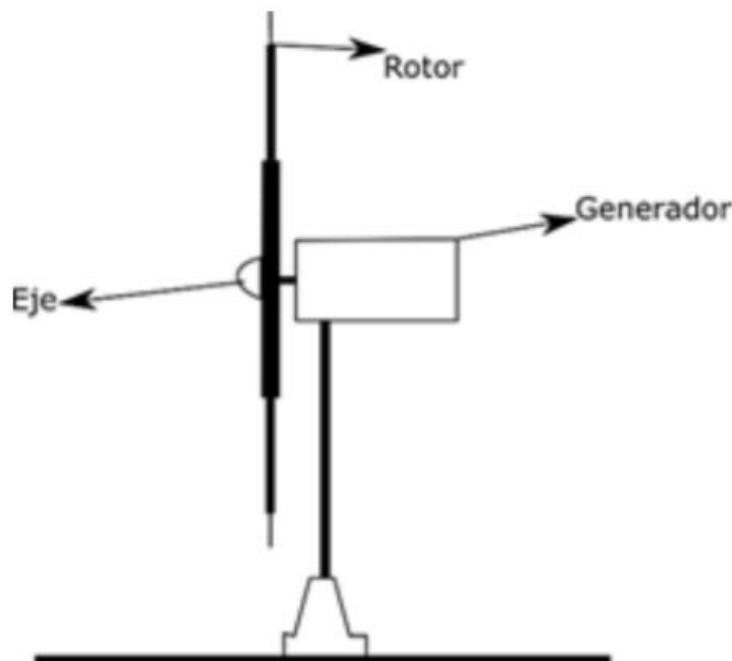


Figura 5-4. Esquema de turbina de eje horizontal marina [27]

### 5.3.1.1.1 Turbina Kinetic Hydropower System (KHPS)

La turbina KHPS es una turbina de flujo axial de 3 palas de 5 metros de diámetro, con una potencia de 35 kW que incorpora un diseño de pala patentado por la Universidad de Nueva York que tiene una alta eficiencia en una amplia gama de velocidades. El rotor y la turbina accionan un generador de velocidad, que a su vez acciona un generador de inducción trifásico conectado a la red. La caja de engranajes y el generador están ubicados en una góndola aerodinámica que está montada en un pilar aerodinámico. El conjunto del pilar tiene cojinetes que le permiten girar la turbina con la dirección de la corriente de marea, reflujo o inundación.

La turbina funciona por debajo de 1,0 m/s, pero para una eficiencia económica se recomiendan velocidades superiores a 2,0 m/s y profundidades de agua de al menos 6,5 metros [27].

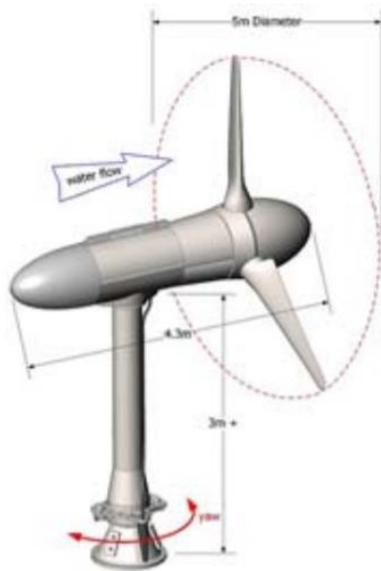


Figura 5-5. Turbina KHPS [27]

### 5.3.1.1.2 Turbina Generador de Marea

El generador de turbina de marea de Clean Current es una turbina de eje horizontal con dos conductos bidireccionales con un generador de imán permanente de velocidad variable y accionamiento directo. Existen versiones de estos sistemas como que incorporan turbinas duales lado a lado con pantallas portectoras. La operatividad se ve mejorada por un diseño simple que tiene una parte móvil: el conjunto del rotor que combina las funciones de turbina y generador. La turbina se encuentra completamente sumergida, no causando impacto visual.

Hoy en día, los modelos comerciales tienen 14 metros de diámetro y están diseñados para producir aproximadamente 250 kW, necesitando localizaciones con profundidades mayores de 15 metros [27].

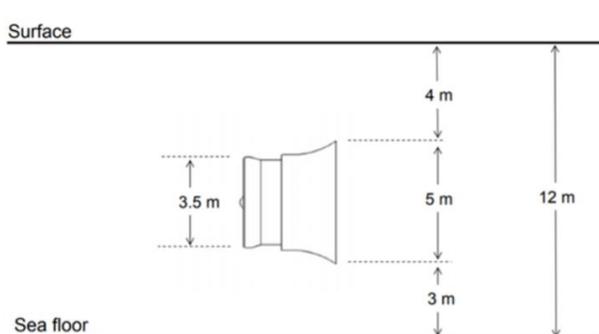


Figura 5-6. Turbina Generador de Marea de Clean Current [27]

### 5.3.1.1.3 Turbina Underwater Electric Kite

Este sistema emplea dos turbinas de flujo axial. Cada turbina consta de cinco palas que impulsan un único generador interno ubicado dentro de la góndola. El sistema incorpora, además, un anillo que se extiende hacia

afuera con respecto a la alineación axial de los ejes de la turbina y desvía el flujo de agua alrededor de la cubierta. Esto crea una zona de baja presión en la parte posterior de la cubierta que impulsa el agua a través de las palas de la turbina a una velocidad mayor que la del flujo de agua normal o circulante.

La unidad tiene una flotabilidad positiva y se asegura al fondo marino mediante un sistema de anclaje único por cable. El ángulo de ataque se puede modificar con un sistema patentado que desplaza un peso hacia adelante y hacia atrás en la quilla. Manteniendo una profundidad operativa controlada, las unidades no se ven afectadas por el efecto de las olas grandes o de la navegación. Los controles de posicionamiento lateral permiten que las unidades permanezcan en el núcleo de la corriente.

La turbina está diseñada para operar en corrientes de ríos, mareas y océanos. Existen varios modelos de 2 a 5 m y funcionan a velocidades extremadamente bajas de 0,20 m/s o menos. Se calcula su rendimiento nominal en hasta 1 MW [27].



Figura 5-7. Turbina Underwater Electric Kite

#### 5.3.1.1.4 Turbina Hydroreactor Stream Accelerator

La tecnología Hydroreactor Stream Accelerator consiste en un conducto cilíndrico con un perfil único de “Hidrorreactor” que se sumerge, unido a una plataforma elevadora. El conducto interno está compuesto por una zona de compresión, una zona Venturi estrecha y finalmente una zona de escape en expansión donde se genera un efecto de succión por la difusión del flujo interno y la desviación de la corriente externa.

El conducto se orienta de forma automática y pasiva según la dirección de la corriente. Una turbina de flujo axial de baja presión y alta velocidad está ubicada en la sección más estrecha del conducto. Las turbinas accionan un generador de bajas revoluciones ubicado en una cámara hermética en el borde del conducto. La ubicación de la unidad se marca con una boya flotante.

El mantenimiento se realiza levantando el conducto por medio de una plataforma extensible. Las dimensiones interiores del conducto son aproximadamente 1,2 metros en su parte más estrecha, 5,4 metros en su parte más ancha y 8,4 metros de largo, estando diseñado para generar 30 kW a 2,75 m/s [27].

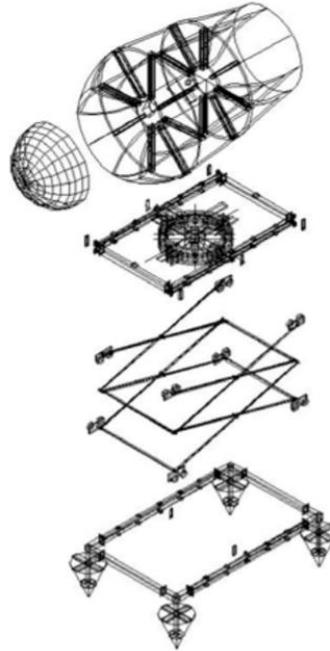


Figura 5-8. Turbina Hydroreactor Stream Accelerator [27]

#### 5.3.1.1.5 Turbina Swanturbines

La unidad consta de una turbina de flujo axial de tres palas. Un generador de baja velocidad sin engranajes ofrece una alta eficiencia en un rango de velocidades con mínimas demandas de mantenimiento mediante el uso de mejoras estructurales y electromagnéticas. En colaboración con la Universidad de Gales, utilizando un modelo dinámico de rotor, se diseñó para permitir su instalación con un mantenimiento sencillo en aguas poco profundas.

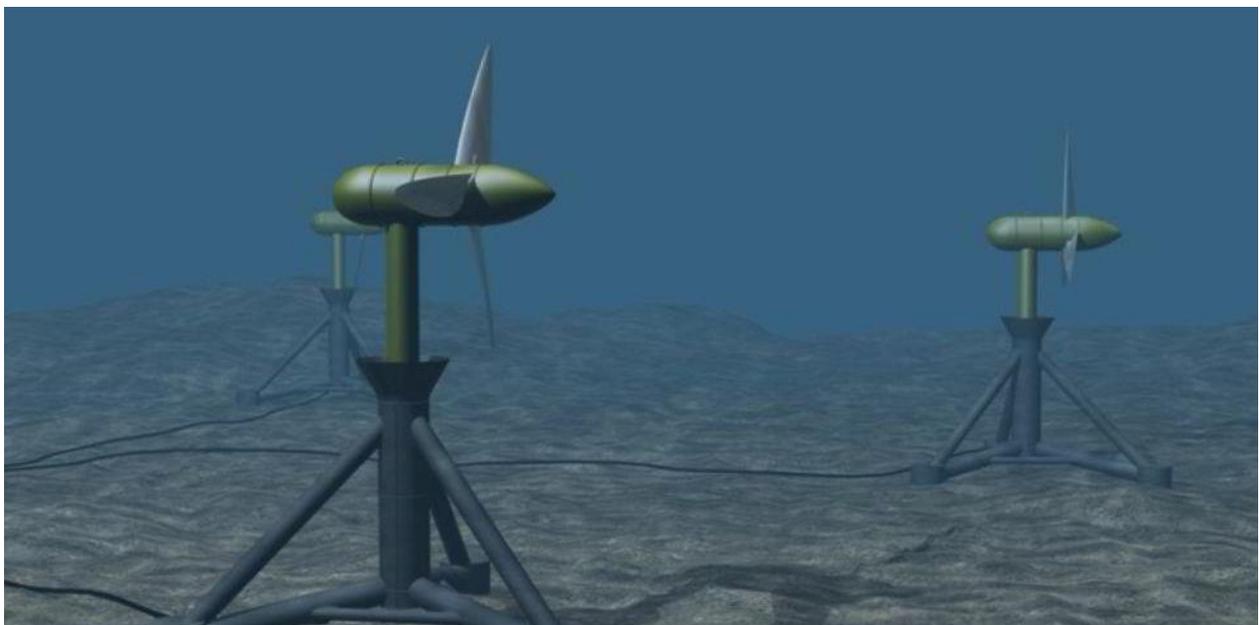


Figura 5-9. Turbina Swanturbines

#### 5.3.1.1.6 Turbina Delta Stream

El dispositivo de turbina DeltaStream ha sido desarrollado por la compañía inglesa “Tidal Energy Ltd.”, con una amplia experiencia en motores marinos. El prototipo de 1,2 MW consta de tres turbinas de eje horizontal con tres palas de 15 m montadas en una estructura triangular colocada o anclada en el fondo con un cenro de gravedad muy bajo para asegurar la estabilidad. Estas estructuras, completamente sumergidas, no son un obstáculo para la navegación. Además, la bajada velocidad de rotación implica un impacto mínimo en la vida

marina [25].



Figura 5-10. Turbina Delta Stream

#### 5.3.1.1.7 Turbina Evopod

La turbina de marea Evopod fue desarrollada por la compañía inglesa Ocean Flow Energy Ltd. Consiste en una turbina de cinco palas con un eje horizontal montado sobre una estructura flotante anclada al fondo marino. El anclaje garantiza la alineación de la máquina en la dirección de la corriente. Un modelo a escala 1:10 fue probado en mayo de 2009 en el estrecho de Strangford en Irlanda del Norte [27].

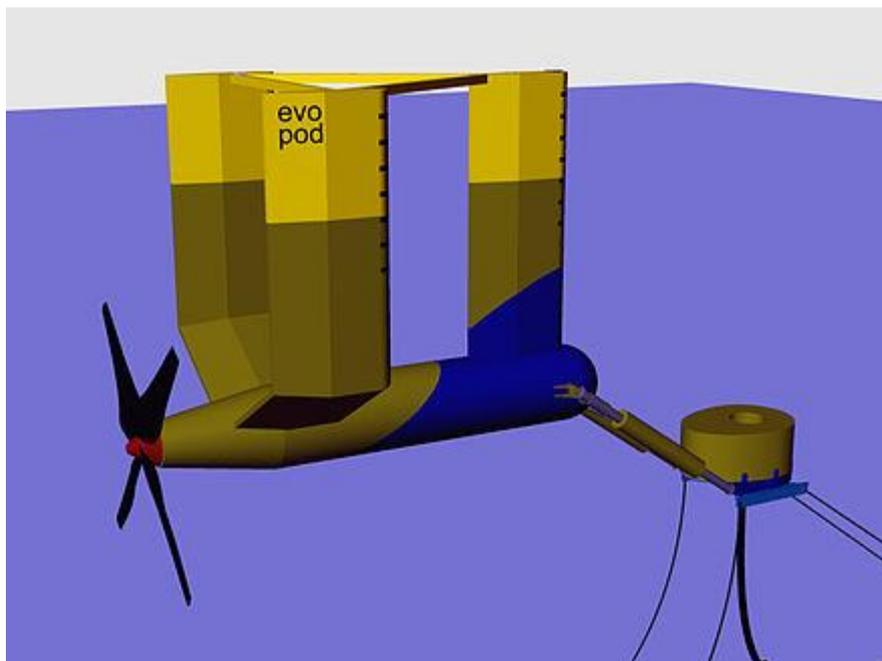


Figura 5-11. Turbina Evopod

### 5.3.1.1.8 Turbinas Nereus y Solon

Las turbinas Nereus y Solon fueron desarrolladas por Atlantes Resource Corporation Ltd. de Singapur. La turbina de marea Nereus para aguas poco profundas (de menos de 25 m) es de 400 kW y está formada por una serie de álabes dispuestos en una banda deslizante en torno a dos ejes [27].



Figura 5-12. Turbina Nereus

La turbina Solon fue diseñada para ríos y es muy robusta. Tiene capacidad de aguantar el flujo con grandes cantidades de escombros. Se caracteriza por tener una potencia de 500 kW a velocidades de 2,6 m/s.



Figura 5-13. Turbina Solon

### 5.3.2 Turbina de flujo vertical

La conversión de energía en estos dispositivos ocurre a través de un componente que rota alrededor de un eje vertical, por lo que su principio de funcionamiento es similar a las turbinas de eje horizontal. Las principales desventajas de las turbinas de eje vertical son las altas fluctuaciones de torque, la relativa baja capacidad de arranque automático, y la baja eficiencia en comparación con las turbinas de eje horizontal [24]. A pesar de ello, pueden ser instaladas en más ubicaciones al requerir de menor inversión y funcionar con independencia de la dirección de incidencia del flujo de agua [22].

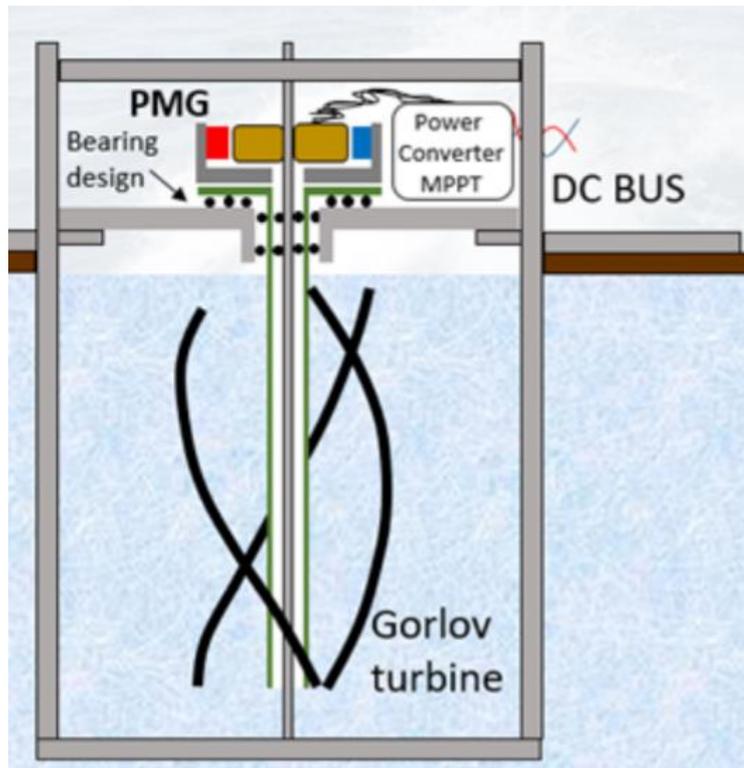


Figura 5-14. Esquema de turbina de eje vertical marina [27]

Este tipo de turbinas presentan una serie de ventajas sobre las turbinas de eje horizontal [27]:

- Mejor rendimiento, por la capacidad de agrupación de rotores, ya que no requieren de grandes distancias de separación entre ellas.
- Posibilidad de tener parte de los dispositivos fuera del agua, aumentando su duración (como el multiplicador de revoluciones y la parte eléctrica).
- Facilidad de montaje y mantenimiento
- Aprovechamiento de la energía del fluido independientemente del ángulo de incidencia de este sobre la turbina.

Sin embargo, este tipo de turbinas también presenta una serie de desventajas [22]:

- Implica considerablemente más estructura de rotor por unidad de área barrida (lo que aumenta los costos).
- Por lo general, no se enciende automáticamente, pero debe impulsarse a una velocidad a la que las palas del rotor se desestabilicen al cruzar el flujo.
- Podría ser difícil detenerse en una situación de emergencia, porque no se puede sacar fácilmente del flujo (o un rotor de flujo axial puede inclinarse hacia el flujo o las palas individuales del rotor pueden inclinarse en una posición emplumada).
- Depende mucho más que un rotor de flujo axial de tener un buen acabado superficial para mantener

una alta relación de sustentación: arrastre que se necesita para lograr una eficiencia razonable; esto puede ser difícil de mantener bajo el mar.

### 5.3.2.1 Turbina Darrieus

Estas pequeñas turbinas Darrieus están construidas con materiales de alta calidad. Los álabes son extrusiones de aluminio con sección transversal resistente. El eje está hecho de acero inoxidable y está apoyado en dos cojinetes estándar de acero inoxidable.

La potencia se transfiere a través de un acoplamiento flexible a una combinación de moto y caja de engranajes que permite que el motor funcione a una velocidad más alta, lo que aumenta su eficiencia y reduce las fluctuaciones de par [27].

La empresa Alternative Hydro Solutions, Ltd. ha tomado los conceptos de la turbina Darrieus y los ha modificado para que sean más adecuados para corrientes más pequeñas. El diámetro de la turbina es mayor que la altura, por lo que se ajusta mejor a la sección transversal de sitios poco profundos, incorporando una serie de simplificaciones sobre los diseños tradicionales.

### 5.3.2.2 Dispositivo Blue Energy

La tecnología llevada a cabo por Blue Energy se basa en la aplicación de la turbina hidráulica Davis que es una evolución de la turbina eólica Darrieus. Esta turbina impulsa una caja de cambios integrada y un conjunto de generador eléctrico. El objetivo a largo plazo es instalar muchas de estas turbinas para formar una estructura similar a una valla que se puede doblar, lo que permitirá reducir los costos. La compañía ha experimentado hasta ahora con seis plantas de diferentes tamaños y el mejor valor obtenido fue de 100 kW [27].

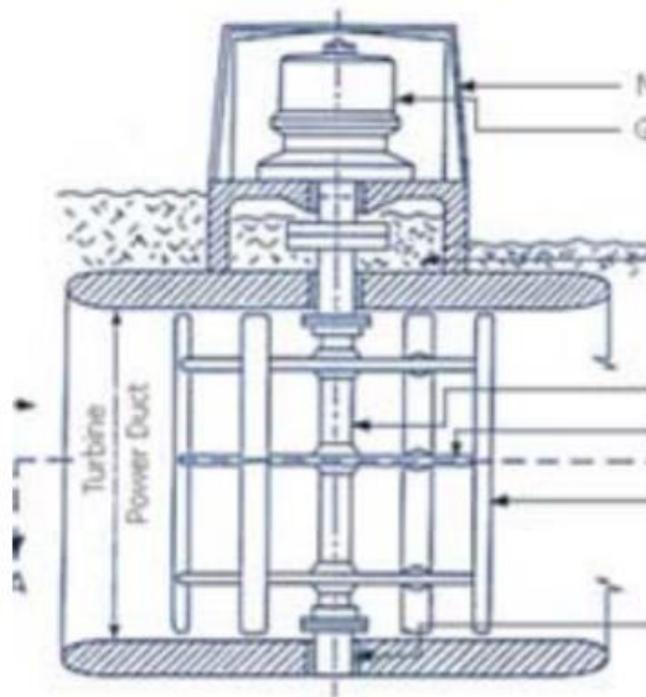


Figura 5-15. Dispositivo Blue Energy

### 5.3.2.3 Turbina Helicoidal Gorlov

La turbina Gorlov fue desarrollada por GCK Technology Inc. y consta de palas helicoidales que recorren una superficie cilíndrica imaginaria como una rosca de tornillo. Estas palas helicoidales proporcionan un empuje de reacción perpendicular a los bordes delanteros que tiran de ellas más rápido el flujo del fluido. Permite que una gran masa de agua lenta fluya a su través capturando su energía cinética con un rotor muy simple. Estas palas helicoidales aseguran un par constante a lo largo de todo el ciclo, con una reducción significativa de las vibraciones y aumento de la eficiencia, que ha alcanzado valores del 35 % en algunos generadores. En la

actualidad, la unidad estándar ahora tiene 1 metro de diámetro por 2,5 metros de longitud y comienza a producir energía aproximadamente a 0,60 m/s [27].



Figura 5-16. Turbina Helicoidal Gorlov

#### 5.3.2.4 Turbina Kobold

La turbina Kobold de la empresa italiana Ponte di Archimede fue diseñada en el Departamento de Diseño Aeronáutico (DPA) de la Universidad “Federico II” de Nápoles, y actualmente es el primer sistema con un eje vertical instalado para la explotación de corrientes de marea.

Este sistema consta de un rotor con tres palas diseñado con un perfil ad hoc sin cavitación y equipado con un sistema de contrapeso original que garantiza automáticamente el mejor ángulo de ataque durante todo el ciclo y permite el inicio espontáneo de la rotación.

La turbina Kobold ha sido diseñada para alcanzar el nivel más alto posible de protección y eficiencia ambiental, así como para respetar la necesidad de bajos costes de construcción y mantenimiento. Todo el sistema se monta en una plataforma flotante de 10 metros diámetro anclada al fondo marino mediante 4 bloques de cemento. El multiplicador de revolución mecánica tiene una razón de 1:161, el generador eléctrico es sin escobillas con capacidad de generar una potencia nominal de 160 kVA y está conectado a una unidad de control capaz de suministrar energía a la red. El rotor tiene un diámetro de 6 metros y consta de tres álabes rectos con un perfil llamado HL-18 que puede garantizar altas eficiencias hidrodinámicas y al mismo tiempo evitar el problema de cavitación [27].

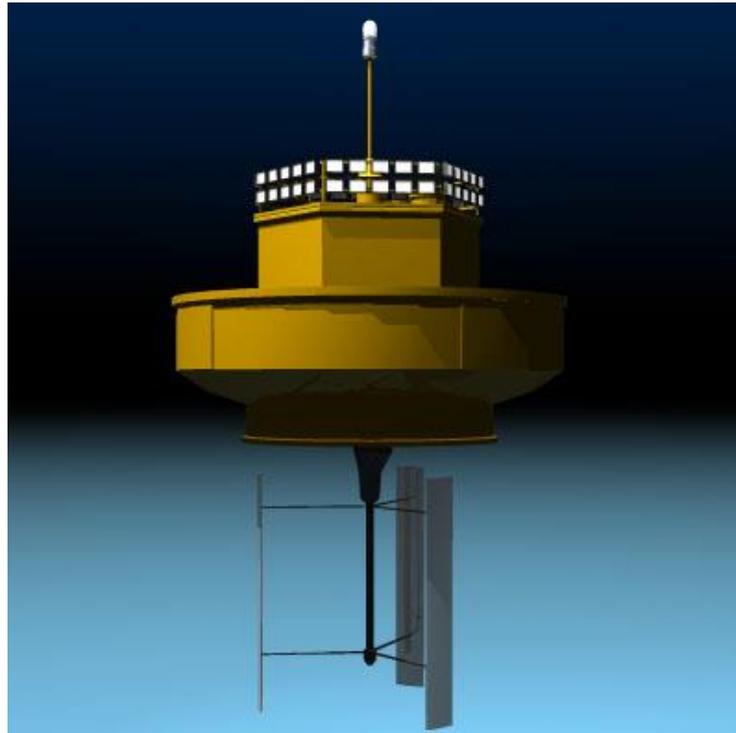


Figura 5-17. Turina Kobold

### 5.3.3 Alerones basculantes

El principio de funcionamiento es similar a la aleta de cola de un pez, el movimiento es causado por la circulación de la corriente en ambos lados, lo que causa un movimiento oscilatorio que es transmitido a un sistema hidráulico para ser convertido en electricidad. El extremo opuesto del brazo está anclado a una estructura apoyada en el lecho marino que tiene a su vez instalado un sistema hidráulico, al ir subiendo y bajando el brazo por el efecto de sustentación del perfil mueve el líquido hidráulico que este a su vez produce electricidad.

La sustentación que impulsa el dispositivo depende de la velocidad y la densidad del flujo, el área de la superficie de la lámina y la relación de aspecto y las características del perfil de la lámina, es decir, sus coeficientes de sustentación y resistencia para un ángulo de ataque óptimo [25].

En cuanto al sistema que permite su posicionamiento en la corriente, puede ser una estructura apoyada por gravedad en el fondo marino o bien pilotada en el lecho marino, al modo de los grandes generadores de aprovechamiento eólico offshore y también estructuras flotantes, que actúan bien a flote o en inmersión y, en todos estos últimos casos debe disponerse el correspondiente sistema de fondeo.

A diferencia de las tecnologías de rotación convencionales que, una vez operativas, generan, a una velocidad de rotación constante, la sustentación que actúa sobre el hidroala oscilante se aproxima a un decaimiento sinusoidal de las posiciones horizontal a vertical del brazo. Esta velocidad no lineal y la pérdida de impulso hacen que el dispositivo tenga inherentemente un alto grado de complejidad mecánica en el desarrollo y optimización de la potencia de salida del dispositivo.

A medida que la sustentación decae sinusoidalmente, el grado de oscilación debe limitarse (aproximadamente  $35^\circ$ ) para evitar una pérdida significativa de sustentación. La sustentación máxima se rige por el ángulo de ataque óptimo empírico. Este ángulo de ataque es relativo a la velocidad de entrada, y como el hidroplano está continuamente en movimiento a través de la entrada, este ángulo de ataque debe controlarse y optimizarse dinámicamente para mantener un rendimiento eficiente [26].

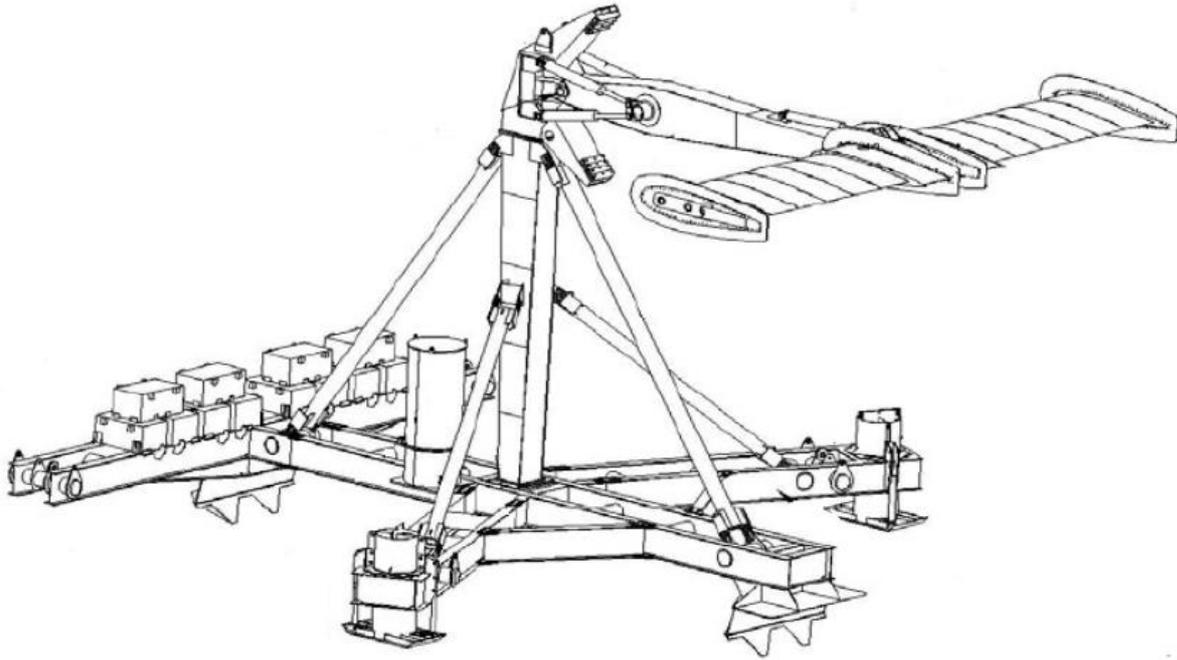


Figura 5-18. Diseño de alerón basculante

Estos dispositivos suelen instalarse en zonas poco profundas. La mayor parte de estos diseños se ha producido en el Reino Unido, cuyo litoral posee unas condiciones idóneas para albergar estas instalaciones y que presupuesta sustanciales cantidades para la investigación y el desarrollo en tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables marinas [26].

## 5.4 Principales proyectos por corrientes marinas

A día de hoy existe un alto número de diseños, si bien la mayoría está en fase conceptual. Sólo son unos 60 los que se encuentran en fase de desarrollo del proyecto y para construir prototipos experimentales de no más de 100 Kw que son sometidos a ensayos en condiciones reales de operación. Son, en cambio, muy pocos los proyectos que han alcanzado un nivel de desarrollo precomercial o integrados en sistemas comerciales de generación [26].

### 5.4.1 SeaGen

Se trata del proyecto a escala industrial más antiguo para el aprovechamiento de energía por corrientes marinas y fue llevado de la mano de la empresa Marine Current Turbines. Consiste en dos turbinas axiales y de eje horizontal, abiertas y montadas sobre un soporte que, discurriendo a lo largo de un pilote anclado al fondo, puede emerger fuera del agua para su mantenimiento. Las turbinas son accionadas por corriente continua o de marea marina si las velocidades son altas (por encima de 4 nudos o 2 m/s) y están diseñadas para operar en flujos bidireccionales al permitir que las hojas que se pongan a 180 °.

Este proyecto se inició en 1999 y fue instalado en el año 2003 a través de un prototipo experimental denominado SeaFlow de 300 kW, con un solo rotor de 11 metros de diámetro y que descargaba la energía a una carga pasiva. Tuvo un coste de 3,4 millones de libras esterlinas y el rendimiento del sistema alcanzó el 40%. A partir del año 2004 estuvo en desarrollo la fase de demostración industrial, habiendo sido montado en los Strangford Narrows (Irlanda del Norte) el primer generador comercial en mayo del 2008, ya con dos rotores de 16 metros de diámetro. Con un presupuesto de 8,5 millones de libras esterlinas, está prevista su conexión a la red de tierra en breve. Tiene una potencia de 1,2 MW [26].



Figura 5-19. SeaGen en Strangford

#### 5.4.2 Hammerfes Strom

Tomando como base un prototipo de 300 kW, está desarrollando un generador de 1MW, denominado HS1000, y en marzo de 2011 se obtuvieron los permisos oficiales para la instalación de un parque en Sound of Islay (Escocia), que tendrá 10 generadores fondeados a una profundidad mayor de 48 metros con una potencia total instalada de 10 MW.

Este generador consta de una turbina de tres palas, soportada mediante una estructura compleja fondeada con cajones de gravedad, con unas dimensiones totales de 15 metros de ancho y 22 de largo, y una turbina posicionada a una altura de 22 metros sobre el fondo marino. La turbina dispone de un rotor de 23 metros de diámetro, cuyo funcionamiento permite una altura máxima sobre el fondo del extremo de pala de 33,5 metros, dejando libres 15 metros hasta la superficie. Esta distancia permitirá la navegación por encima del parque, sin que se altere el flujo de las corrientes a la profundidad de operación de la turbina [26].



Figura 5-20. Turbina HS1000

### 5.4.3 Parque de generación en Paimpol-Brehat

El tercer proyecto, que está siendo ejecutado por un consorcio liderado por la empresa francesa EDF, consiste en situar un parque de generación en Paimpol-Brehat, localidad de la Bretaña francesa, con una potencia total de 4,5 MW. Utiliza como generador el desarrollado por la empresa irlandesa Open Hydro, que posee una potencia unitaria de 500 kW y está apoyado sobre el fondo mediante una estructura de acero de grandes dimensiones, con un peso de 430 toneladas de acero que sumadas las 70 que pesa la turbina supone un peso total por generador de 500 toneladas. A día de hoy se ha finalizado el periodo de pruebas del prototipo a escala real en el European Marine Energy Centre en Orkney (Escocia) [26].



Figura 5-21. Turbina en el parque de generación de Paimpol-Brehat

#### 5.4.4 GESMEY

Merece mención el proyecto español GESMEY que, bajo el patrocinio de SOERMAR y con financiación del programa Nacional de Proyectos de Investigación Aplicada del plan Nacional de I+D+i 2008/2011, tiene por objeto el diseño funcional de un nuevo tipo de generador eléctrico que aprovecha la energía de las corrientes marinas mediante una hélice de tres palas, sumergida y acoplada al generador.

Todo ello, soportado por una estructura en Y de tres flotadores en forma de torpedos y con un sistema de fondeo, de modo que pueda trabajar en inmersión a distintas profundidades. El generador emerge y se sumerge hasta la profundidad de operación, que puede ser superior a los 50 metros, utilizando fuerzas hidrodinámicas producidas mediante la variación del nivel de agua de lastre en los tres flotadores.

La idea de partida es propia del catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid, adscrito a su E.T.S. de Ingenieros Navales, Amable López Piñero, y fue patentada por dicha Universidad en el año 2007. SOERMAR ha alcanzado los correspondientes acuerdos para desarrollar este sistema, siendo este proyecto GESMEY una consecuencia práctica de ello [26].

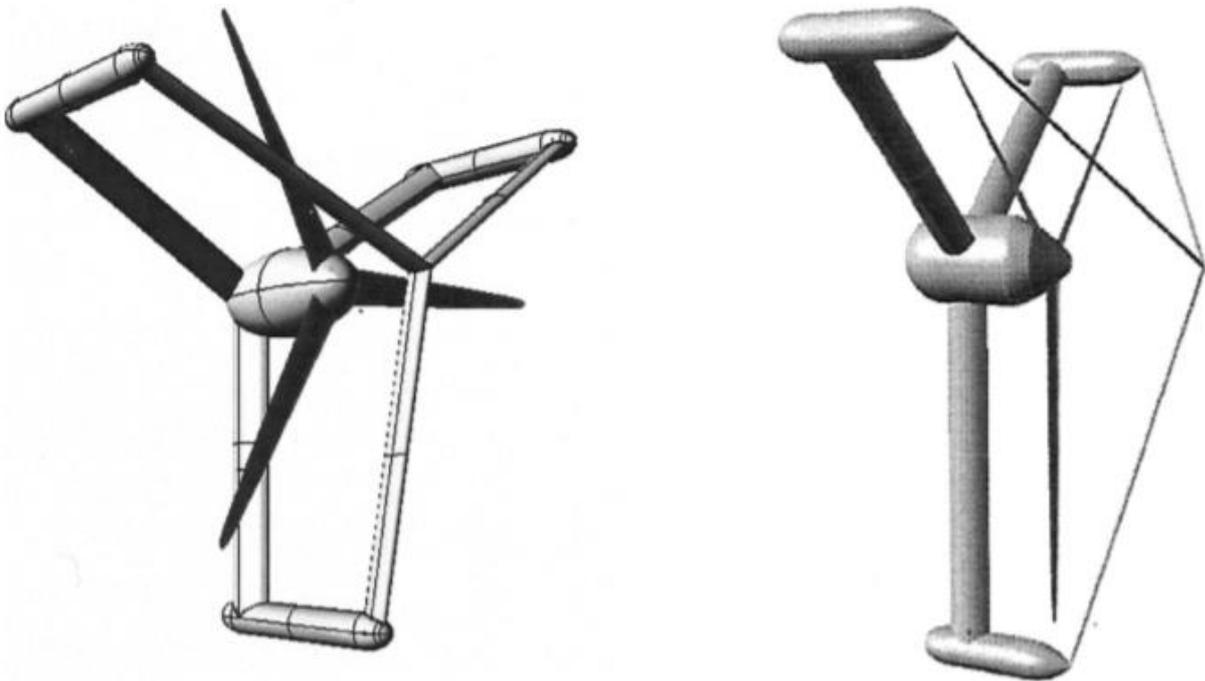


Figura 5-22. Diseños de turbinas del proyecto GESMEY

Tabla 5-1. Resumen de los principales proyectos de energía por corrientes marinas

Proyecto	Ubicación	Año instalación	turbina	Potencia
SeaGen	Strangford Narrows (Irlanda del Norte)	2007	Flujo axial	1,2MW
Hammerfes Strom HS1000	Sound of Islay (Escocia)	2011	Flujo axial	1 MW
Paimpol-Brehat	Paimpol-Brehat (Francia)	En desarrollo	Flujo axial	4,5 MW
GESMEY	España	En desarrollo	Flujo axial	1 MW

## 6 ENERGIA TÉRMICA OCEÁNICA

La energía térmica oceánica, conocida también por sus siglas en inglés OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) es un proceso que utiliza la energía térmica oceánica causada por la diferencia de temperatura entre el agua de mar superficial y profunda para generar electricidad.

Debido al calentamiento solar, la capa superior del agua es mucho más cálida que el agua del océano profundo. Cuando la diferencia de temperatura entre la capa superior del océano más cálida y el agua profunda del océano más fría es de aproximadamente  $20^{\circ}\text{C}$ , las condiciones para OTEC son más favorables [3].

Si se compara la energía térmica oceánica con el resto de las demás fuentes de energía renovables, su investigación y desarrollo todavía se encuentran en fase preliminar, no obstante, su potencial es muy alto, ya que los recursos marinos ofrecen una enorme fuente de energía y agua [28].

### 6.1 Fundamento teórico: gradiente térmico

Los océanos funcionan como grandes colectores de energía solar. El agua de los océanos retiene aproximadamente el 15 % de la energía solar en forma de energía térmica. Este tipo de energía se concentra en la superficie del agua de mar y va disminuyendo exponencialmente al aumentar la profundidad hasta el fondo marino. Solo alrededor del 1% de la energía puede llegar a aguas por debajo de los 10 m. Por lo tanto, a medida que aumenta la profundidad, la temperatura disminuye gradualmente, creando así un gradiente de temperatura [28].

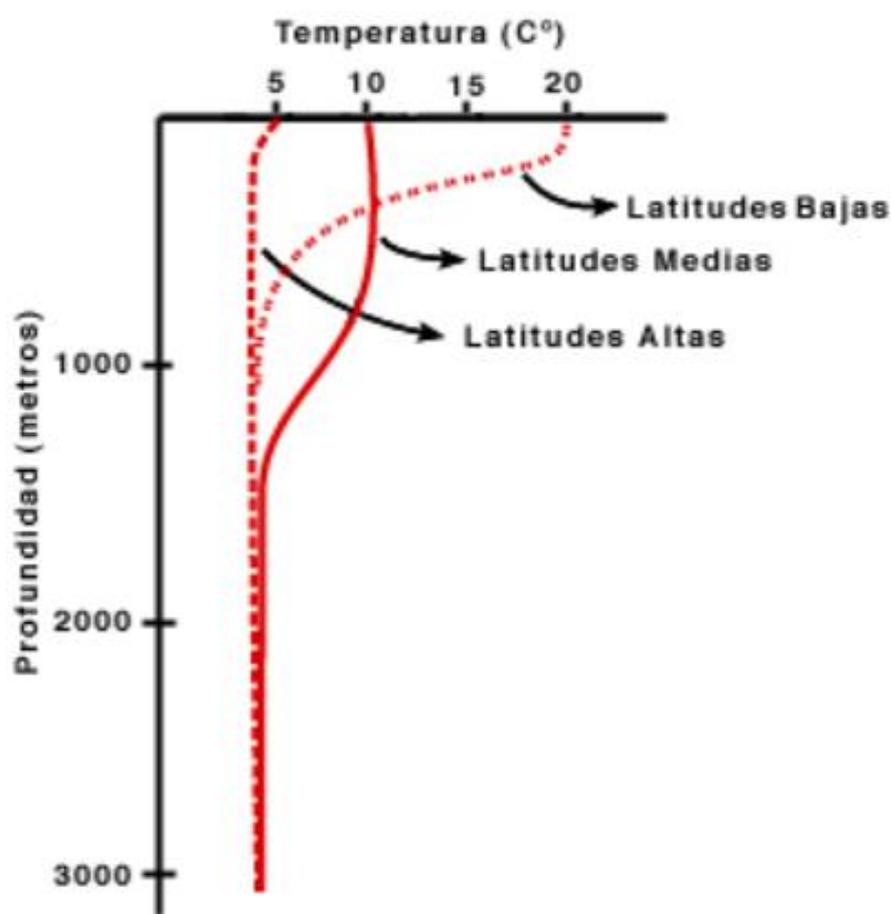


Figura 6-1. Variación de la temperatura con la profundidad [29]

El fundamento de la energía oceánica térmica se debe principalmente al aprovechamiento de las diferencias de temperaturas entre las aguas cálidas de las superficies de los mares y el agua de las profundidades (del orden de 1.000 m de profundidad), para la producción de energía eléctrica. Es preferible trabajar en áreas donde el gradiente térmico de la columna de agua sea mayor a 20°C, para asegurar una mayor eficiencia del sistema, por esta razón países que se encuentran ubicados cerca del Ecuador tienen un mayor potencial. Sin embargo, no es una limitante pues Japón, Estados Unidos y Francia ya cuentan con esta tecnología [29].

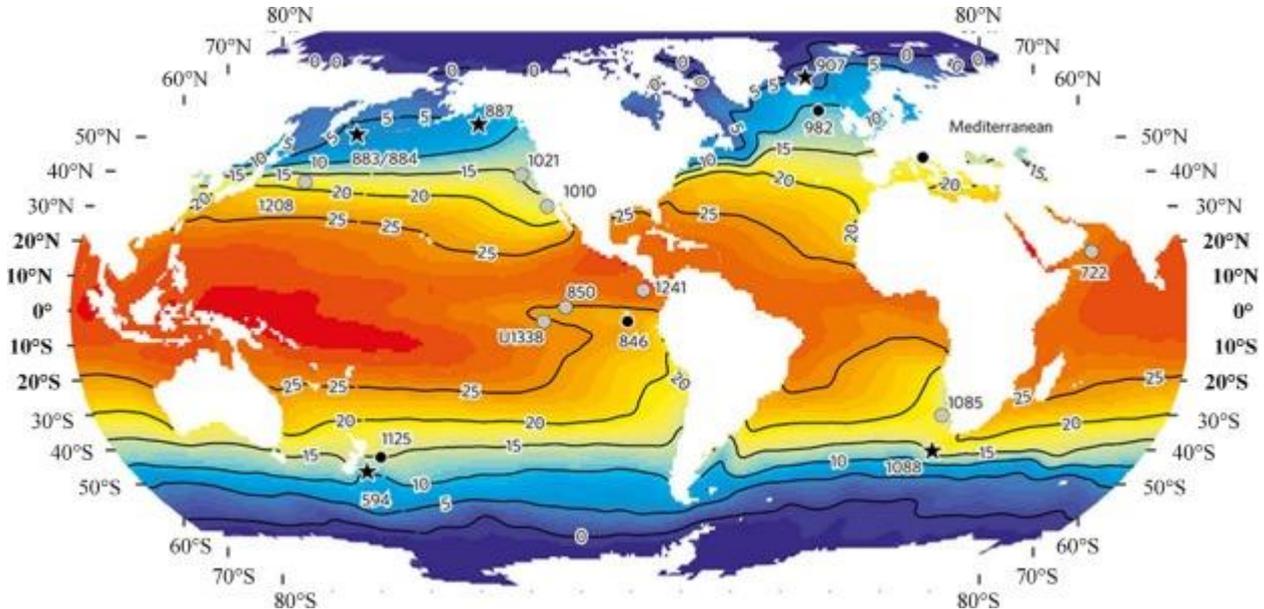


Figura 6-2. Distribución de temperatura en los océanos [29]

### 6.2 Funcionamiento de las tecnologías OTEC

La tecnología OTEC utiliza para su funcionamiento el ciclo de calor termodinámico Rankine para generar electricidad por medio de turbinas de vapor. El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina un ciclo de potencia. Como cualquier otro ciclo de potencia, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot que operase entre los mismos focos térmicos (límite máximo que impone el Segundo Principio de la Termodinámica) [29].

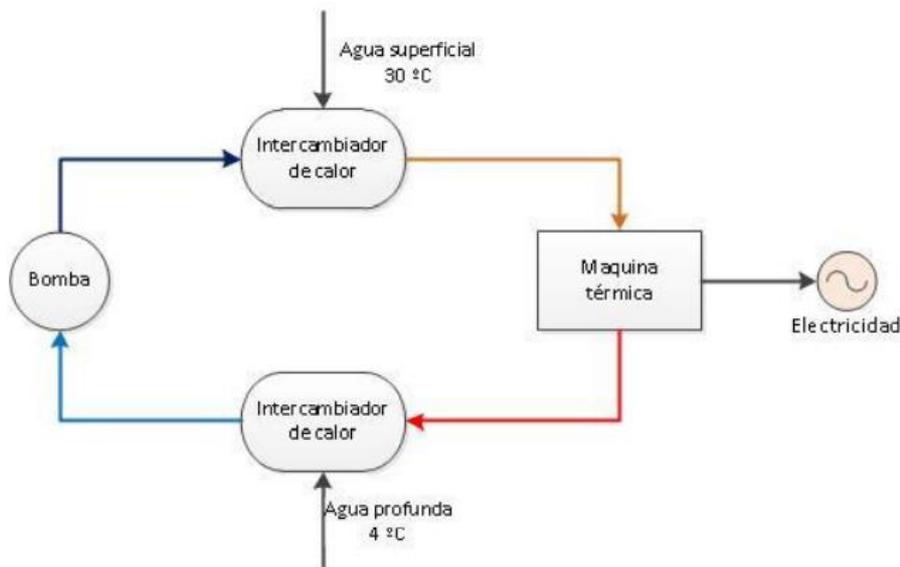


Figura 6-3. Diagrama de proceso de un sistema OTEC [31]

La anterior figura muestra el diagrama de proceso de un sistema OTEC el cual se divide en cuatro etapas fundamentales [29]:

1. **Evaporación:** en esta etapa se evapora el fluido de trabajo, es decir, pasara de un estado líquido a uno gaseoso para lo cual es necesario un Evaporador, el cual utiliza la temperatura del agua superficial más el aprovechamiento de la radiación solar para evaporar el fluido de trabajo. Este proceso produce vapor de alta eficiencia, es decir un vapor con a altas presiones y temperaturas.
2. **Generación:** durante esta etapa del proceso se produce la electricidad. El vapor de alta eficiencia producido en la etapa anterior mueve la maquina térmica, la cual es una turbina muy similar a las usadas en las centrales térmicas a vapor. La maquina térmica va ensamblada a un generador que convierte el movimiento de la maquina en electricidad en lo que comercialmente se conoce como un combo turbina-generador. Del generador sale vapor de baja eficiencia, es decir vapor que ha perdido parte de su potencial energético al haber sido usado en algún proceso.
3. **Condensación:** en esta etapa se toma el vapor de baja eficiencia que sale de la maquina térmica y es condensado mediante un Condensador, el cual es un intercambiador de calor que usa la diferencia de temperatura entre el agua profunda y el vapor de baja eficiencia para condensar este último.
4. **Recirculación:** el fluido de trabajo que sale del condensador es recirculado a la etapa de evaporación mediante un bombeo que le entrega energía al fluido para volverlo útil nuevamente. Este condensado ha sido denominado de baja eficiencia dado que viene de un vapor de baja eficiencia.

Para dichas etapas serán necesarios tres recursos:

1. **Agua Superficial:** hace referencia al agua tomada de la superficie marina a una temperatura media de 30 °C.
2. **Agua Profunda:** se refiere a las aguas profundas captadas para el proceso. Es tomada desde una profundidad de 1.000 m y con una temperatura aproximada de 4 °C. Es necesario tener en cuenta las variaciones en temperatura que puede provocar el transporte del agua hasta la superficie.
3. **Fluido de Trabajo:** es un fluido con propiedades específicas para la producción de energía térmica, tales como un punto bajo de ebullición y buena ductilidad. Este fluido cumplirá la función de mover la maquina térmica para generar la energía y será evaporado y condensado tantas veces como sea posible. Dependiendo del sistema a usar este fluido puede ser amoniaco o la misma agua de mar captada de superficie.

Actualmente, existen cuatro ciclos diferentes para el aprovechamiento de los gradientes térmicos: ciclo abierto, ciclo cerrado, ciclo Kalina y ciclo híbrido, siendo la principal diferencia el modo en el que se utilizan los fluidos de trabajo.

### 6.2.1 Ciclo abierto

El ciclo abierto fue utilizado por primera vez en el sistema OTEC en la década de 1930 por Georges Claude. Este ciclo usa el agua marina como fluido de trabajo. Este funciona cuando el agua marina superficial (~25°C) entrante es bombeada y sometida a vacío para bajar su presión hasta que el agua llega a su punto de ebullición, convirtiendo el líquido en vapor, este se dirige hacia una turbina conectada a un generador para producir energía eléctrica y luego se dirige a un condensador, en el que se obtiene de nuevo agua líquida saturada a una presión y temperatura aproximadas de 1.7 kPa y 15 °C, respectivamente. Este procedimiento se lleva a cabo utilizando agua fría del mar bombeada desde las profundidades del mar (aproximadamente 1.000 m) como fluido refrigerante. El agua del condensador se regresa al mar, así el proceso se repite de manera continua [29].

Es en el proceso de evaporación es donde la mayor parte de sales se precipita, este vapor es el que pasa a la turbina y luego al pasar en el condensador se recupera el agua sin sal, pero la desalinización pasa en el evaporador. Dado que el sistema entra en contacto directo con el agua de mar, también existen los problemas del aire disuelto y corrosión marina [30].

Una planta pequeña puede producir de 1 MW a 10 MW de electricidad neta y producir 1.700 m<sup>3</sup> a 3.500 m<sup>3</sup> de agua dulce al día. Estas cantidades podrían cubrir las necesidades de comunidades con alrededor de 4.500 a 100.000 personas. Dado que el fluido de trabajo es agua marina, no representa daño ambiental, pero el costo de

mantenimiento podría ser elevado porque se promueve la corrosión de los equipos. Además, se debe considerar que una instalación de este tipo requiere de equipos especiales para eliminar gases disueltos en el agua de mar, que no son condensables [29].

El ciclo de Claude tiene ciertas características que lo hacen distinto a otros ciclos, por ejemplo, en el evaporador de un ciclo abierto se usa un sistema de aspersion para que el agua tibia se evapore en una mayor proporción, a este método de evaporación se le llama evaporación flash, es decir, disminuye súbitamente la presión para evaporar un fluido.

El rendimiento de este sistema es muy bajo pues está sobre un 7 %, además es preciso consumir energía para bombear el agua fría de las profundidades del mar para condensar el vapor y para accionar la bomba de vacío del evaporador. Se estima que entre un 20% a un 30% de la potencia eléctrica generada se consume en las operaciones de bombeo [31].

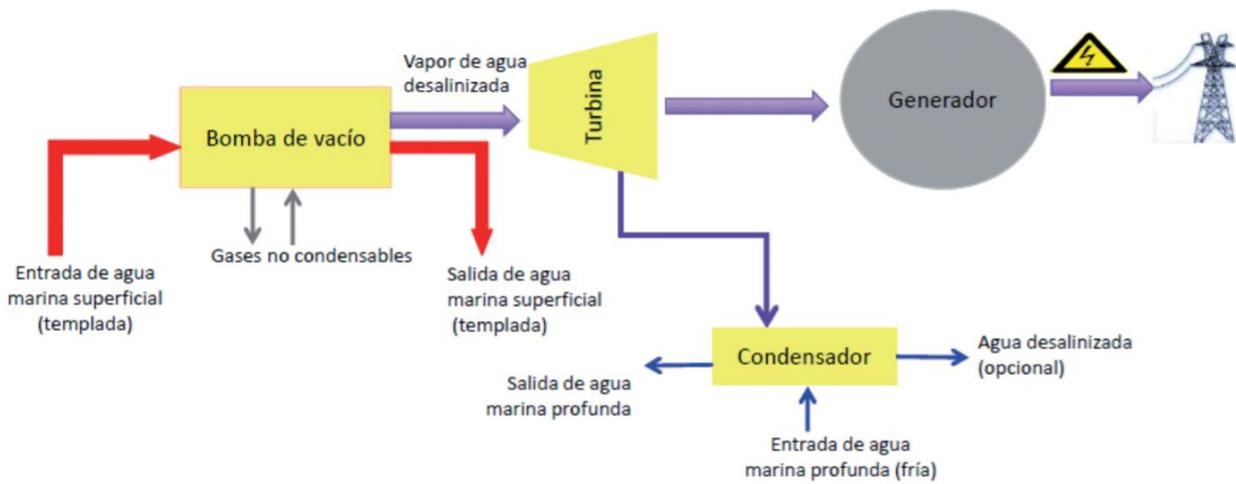


Figura 6-4. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo abierto [31]

## 6.2.2 Ciclo cerrado

El primer sistema OTEC de ciclo cerrado puede remontarse a 1881, propuesto por d'Arsonval, y en este sistema se utilizó dióxido de azufre líquido como fluido de trabajo. Desde entonces, el ciclo cerrado se utiliza ampliamente en el sistema OTEC [30].

En la actualidad, se usan fluidos que tengan bajos puntos de ebullición, tales como el amonio, propano, freón, R134, R123, R 152a, entre otros, para impulsar una turbina que genere electricidad. El agua marina superficial es bombeada a través de un intercambiador de calor (evaporador) que vaporiza el fluido de trabajo provocando el movimiento del sistema turbina - generador para producir energía eléctrica. El agua fría proveniente de las profundidades del mar es bombeada a través de un segundo intercambiador de calor (condensador) donde el vapor se transforma en líquido de nuevo y se bombea al evaporador para comenzar otra vez el ciclo termodinámico.

Este método genera más electricidad que el ciclo abierto, pero no genera agua dulce, el costo de mantenimiento es mínimo ya que el fluido de trabajo no corroe los equipos, a excepción del evaporador y el condensador; además pueden tener un menor tamaño de planta que los ciclos abiertos [29].

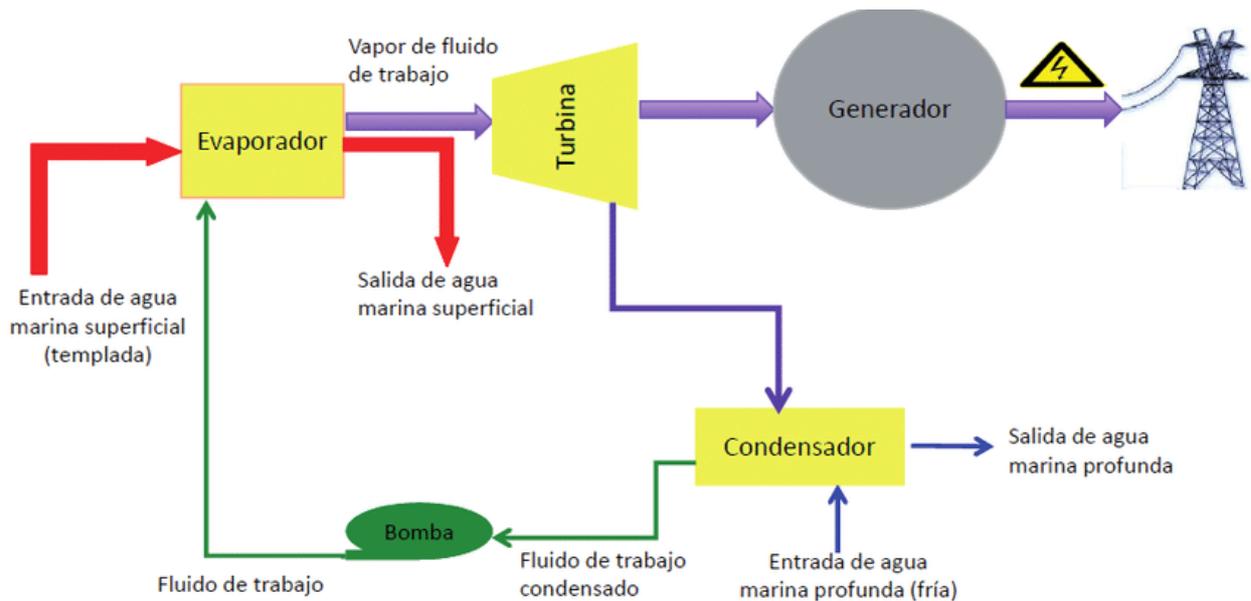


Figura 6-5. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo cerrado Rankine [31]

Dentro de los ciclos cerrados destaca el Ciclo Kalina el cual fue propuesto por el Dr. Alexander Kalina en 1985. Es un Ciclo Rankine mejorado, en el cual se utiliza como fluido de trabajo una mezcla de 70 % amoniaco y 30 % agua. El amoniaco es uno de los fluidos con menor punto de ebullición lo que genera mayor eficiencia a temperaturas más bajas. De este modo, la elevación de temperatura puede ser más alta y se minimiza la cantidad de agua de las profundidades necesaria para el condensador, reduciendo las dimensiones de la tubería de entrada y por tanto el capital invertido en la central, mientras aumenta la potencia energética de salida. Para sistemas OTEC, éste incrementa la eficiencia térmica teórica, sin embargo, al usar un fluido binario, se reduce el desempeño del evaporador y del condensador respecto el ciclo Rankine, además de ser más complejo en su arreglo [30].

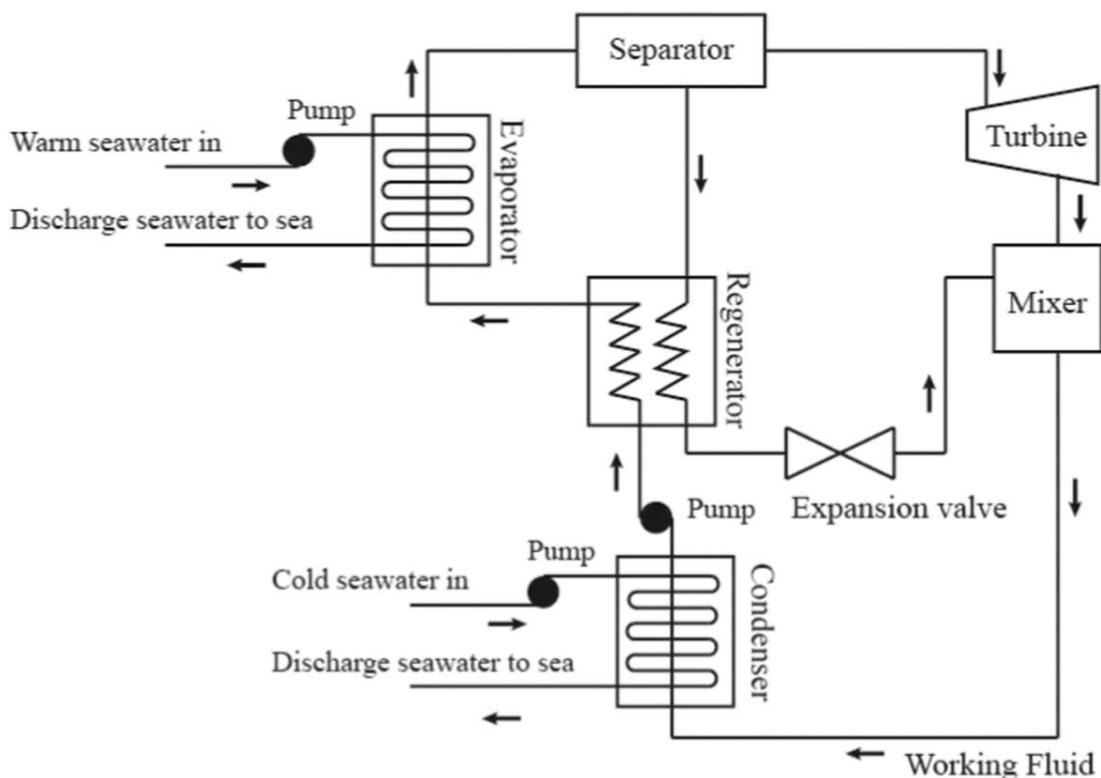


Figura 6-6. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo cerrado Kalina [31]

Otro tipo de ciclo es el Ciclo Uehara, que fue inventado en 1994 por H. Uehara con procesos de absorción y extracción y en comparación con el antiguo ciclo cerrado basado en el ciclo Kalina. Utiliza una mezcla de agua y amoníaco como fluido de trabajo y extrae parte del vapor de la turbina para reducir la carga del condensador, es uno de los ciclos termodinámicos más complejo de todos [29].

El ciclo de Uehara se puede dividir en cuatro partes (parte del evaporador, parte de la turbina, parte del condensador y parte del calentador). La transmisión térmica del ciclo de Uehara es similar a la del ciclo de Rankine. En comparación con el ciclo Rankine y el ciclo Kalina, los procedimientos típicos del ciclo Uehara se encuentran en la parte de la turbina y la parte del calentador, mientras que las partes de descanso son similares al otro sistema de ciclo cerrado. La parte de la turbina incluye dos turbinas. Después de que el vapor pasa por la primera turbina, parte de ellos se bombea al calentador y el resto a la segunda turbina. En la parte del calentador, el vapor caliente de la primera turbina calentará el fluido de trabajo antes del evaporador [30].

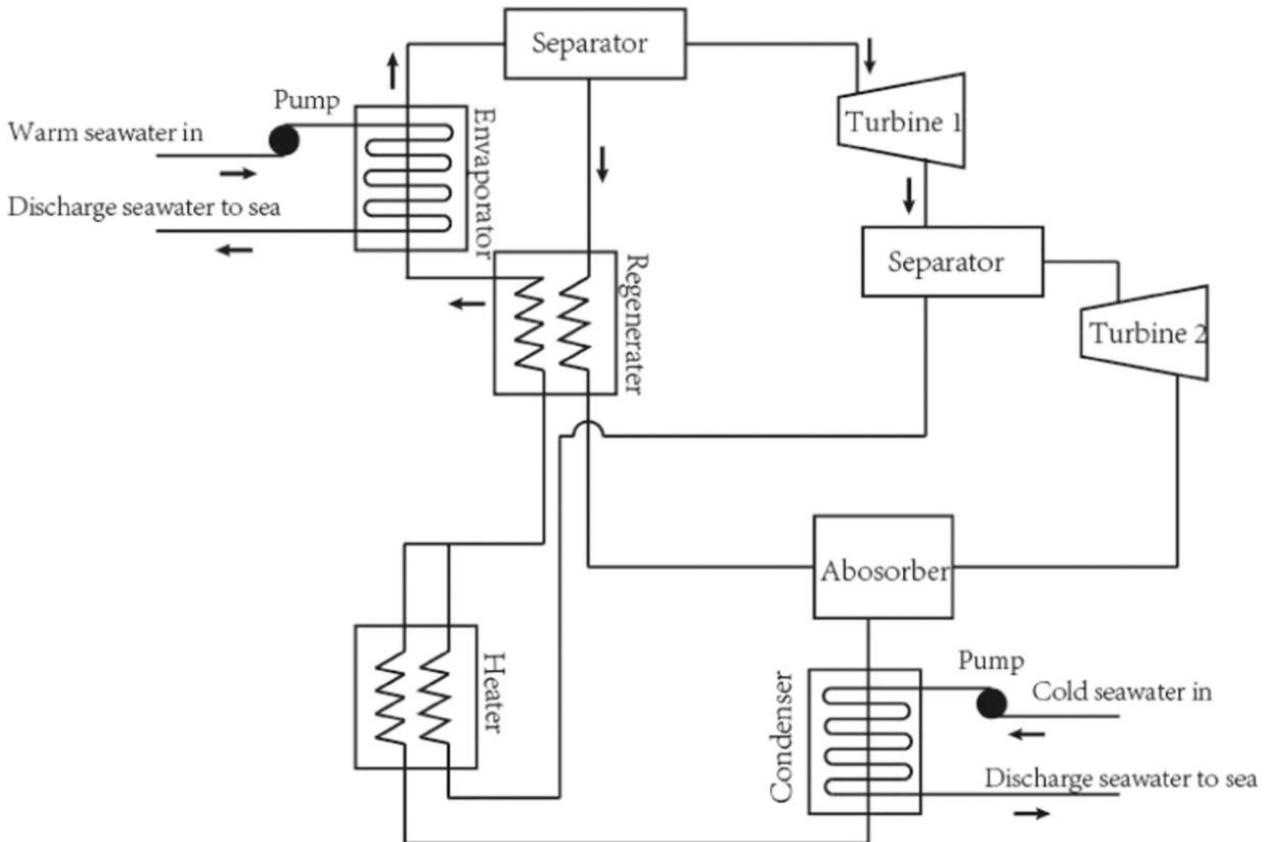


Figura 6-7. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo cerrado Uehara [31]

### 6.2.3 Ciclo híbrido

Los sistemas híbridos combinan las características de los sistemas de ciclo abierto y de ciclo cerrado como medio de optimizar su funcionamiento. Con estos sistemas híbridos se persigue la producción de electricidad y la desalinización de agua de mar. En el sistema híbrido, el agua caliente de la superficie se evapora al vapor como en el ciclo abierto y el fluido de trabajo se calienta con el vapor de manera similar al ciclo cerrado [30].

En un sistema híbrido, el agua marina superficial entra en un evaporador donde el agua se transforma en vapor, de forma similar a lo que ocurre en un proceso de evaporación de ciclo abierto. El calor del vapor obtenido se utiliza para vaporizar el fluido de trabajo como el que se utiliza en el ciclo cerrado. El fluido vaporizado acciona una turbina que produce electricidad. El vapor obtenido del agua de mar se vuelve líquido (condensación) dentro de un intercambiador de calor proporcionando agua desalinizada, que puede ser utilizada para consumo humano, agrícola etc.

La desalinización mediante evaporación ha sido estudiada con especial atención en los últimos años, porque el sistema es efectivo para resolver problemas de energía y de agua de manera simultánea, mediante un proceso

sustentable y amigable con el medioambiente, dado que no requiere precalentar el flujo de agua. Se reconoce como uno de los métodos de desalinización térmica de baja temperatura (ltd, por sus siglas en inglés) y resulta particularmente atractivo para islas y áreas remotas poco pobladas. Cabe mencionar que la desalinización por evaporación puede también ser aplicada por sí sola, es decir, sin el ciclo Rankine de generación de energía eléctrica [29].

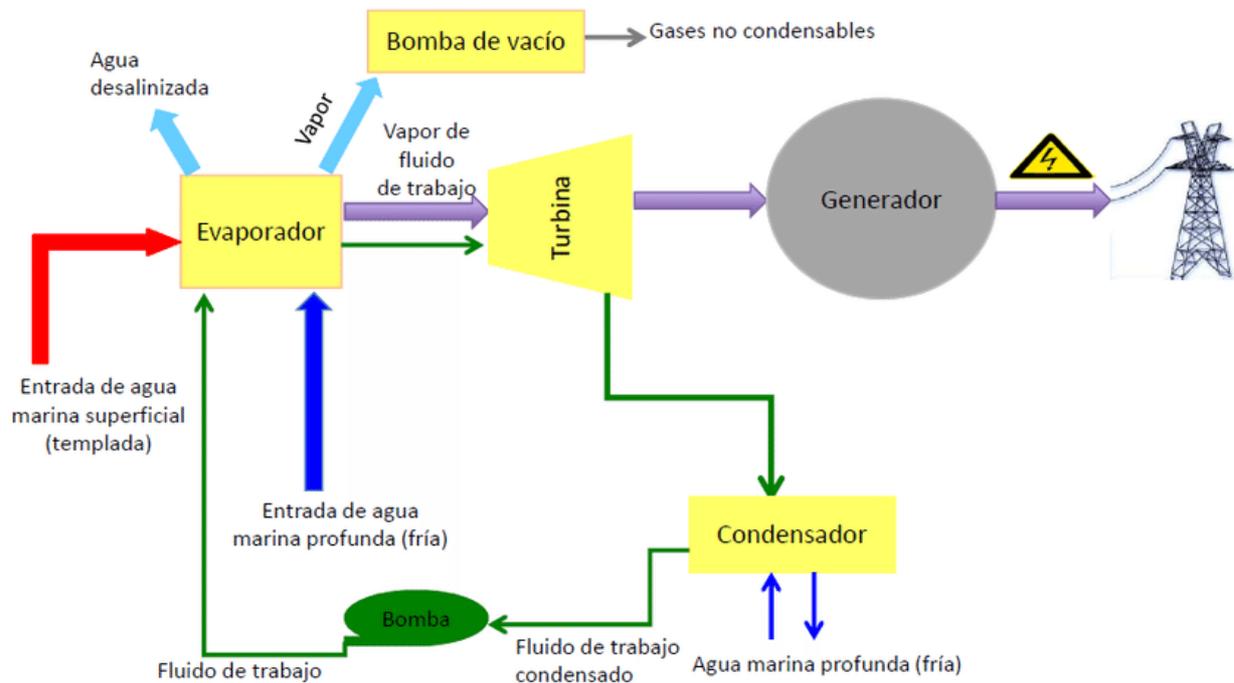


Figura 6-8. Esquema de funcionamiento de una planta OTEC con ciclo híbrido [31]

### 6.3 Tecnologías OTEC: ubicación y componentes

A diferencia de cualquier otra central térmica, los rendimientos de las plantas de energía maremotérmica suelen ser muy bajos debido a que los gradientes de temperatura también lo son. Sin embargo, el gradiente térmico no es el único parámetro a considerar, otras variables tales como las condiciones meteorológicas, marinas y batimétricas juegan también un papel importante en el correcto funcionamiento de la planta. Por esta razón, los sistemas OTEC no pueden implantarse en cualquier lugar y es necesario realizar un estudio previo del emplazamiento donde localizarlos para comprobar si esa zona es óptima.

Generalmente, se ha comprobado que las zonas ecuatoriales y subtropicales entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio cuentan con un termoclima constante y una diferencia térmica de más de 24 °C entre la superficie y el fondo de los océanos, por esta razón son los lugares donde se espera obtener mayor rendimiento y dónde han sido implantadas la mayor parte de centrales de energía maremotérmica hasta el momento.

En esta zona ecuatorial, el agua por debajo de los 1000 metros de profundidad se encuentra a una temperatura media de 4 °C y se mantiene constante debido a las continuas corrientes de agua procedentes de las regiones polares. Sin embargo, tanto en la zona del mar Caribe como en áreas al este y oeste de Centroamérica, también es posible instalar plantas de energía maremotérmica [32].

Los criterios más importantes para seleccionar la ubicación de la instalación de la planta OTEC son los siguientes [29]:

- Accesibilidad para el bombeo de agua fría.
- Profundidad para bombeo de agua fría máxima de 1000 m.
- Distancias cortas de la línea de costa al agua fría (máximo 10 km), con una pendiente topográfica de 15- 20°.

- Adecuada Topo-batimetría de la zona costera para construcción.
- Gradiente térmico entre aguas superficiales y profundas de al menos 20 °C, para obtener la mayor eficiencia posible.
- Baja probabilidad de terremotos, tormentas y otros peligros naturales.
- Baja probabilidad de daños ecológicos

### 6.3.1 Plantas en tierra firme o cercanas a la costa

Frente a las demás alternativas, las plantas en tierra firme, o cercanas a la costa, tienen las siguientes ventajas [32]:

- No requieren complicados amarres
- No es necesaria la utilización de cables de gran longitud para transportar la electricidad
- Los costes de mantenimiento de la instalación son más reducidos
- Se facilita el transporte del agua desalinizada.

Las desventajas son que se necesitan tuberías muy largas para coleccionar el agua marina y consume mucha energía para bombear el agua a la planta, lo cual reduce la producción neta de electricidad y tiene un alto costo económico. Frente a las demás alternativas, las plantas en tierra firme, o cercanas a la costa, tienen las siguientes ventajas [29].

No obstante, estas plantas pueden estar ubicadas en zonas protegidas frente a las grandes tormentas y el violento oleaje. Sin embargo, en muchos emplazamientos esta localización de la planta carece de sentido ya que el gradiente de temperaturas en las zonas cercanas a la costa suele ser pequeño. Por todas las ventajas enumeradas anteriormente, las plantas en tierra firme son la mejor opción siempre y cuando su actividad e instalación no afecten negativamente a otros parámetros como el turismo o el medio ambiente [32].

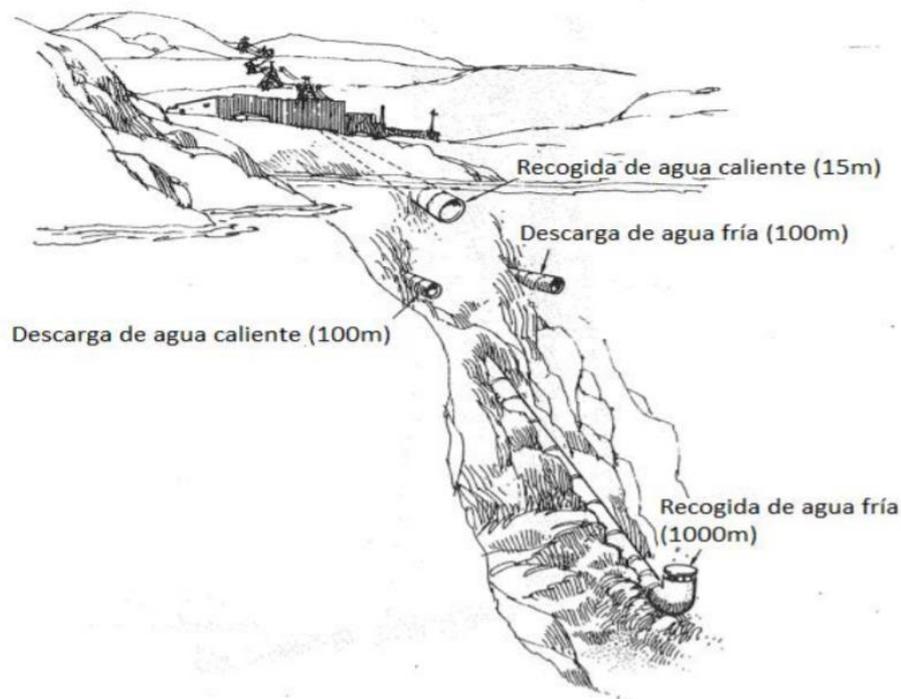


Figura 6-9. Plantas OTEC en tierra firme o cercanas a la costa [31]

### 6.3.2 Plantas montadas en plataformas

Estas plantas son instaladas en zonas de mar abierto con una profundidad de 100 metros aproximadamente, lo que permite una mayor accesibilidad al agua fría y se evitan los daños causados por el fuerte oleaje en la costa. Las plantas montadas en plataformas se encuentran fijas al suelo y deben soportar las condiciones adversas del mar abierto.

Además, el transporte de la energía eléctrica es más difícil que en el caso anterior debido a la gran longitud de los cables empleados. Estos inconvenientes, unidos al aumento del coste tanto en construcción como mantenimiento, hacen que estas plantas sean de las menos atractivas en relación con el resto de las alternativas [32].

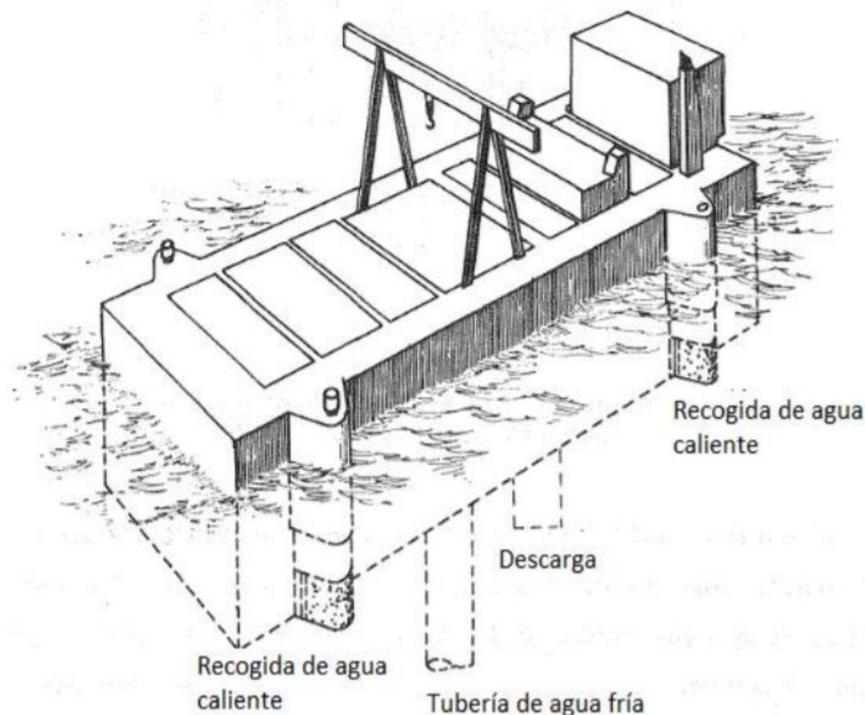


Figura 6-10. Plantas OTEC montadas en plataformas [31]

### 6.3.3 Plantas flotantes en aguas oceánicas profundas

Generalmente las plantas flotantes están diseñadas para operar en zonas de gran profundidad alejadas de la costa y para sistemas con una gran capacidad de potencia. Este tipo de plantas son difíciles de estabilizar y, al igual que ocurre con las plantas montadas en plataformas, los cables largos para el transporte de electricidad son muy vulnerables a ser dañados.

Además, las olas, vientos y corrientes marinas dificultan la estabilización de la planta y pueden ocasionar daños en las tuberías de suministro. Los costes de mantenimiento también son altos y hay que tener en cuenta que, en la gran mayoría de los casos, la reparación de cables y tuberías a profundidades superiores a 1000 metros es muy complicada. Las plantas flotantes tienen sentido en lugares donde se pretende obtener una potencia eléctrica elevada y con perfiles batimétricos óptimos para la instalación del cable submarino [32].

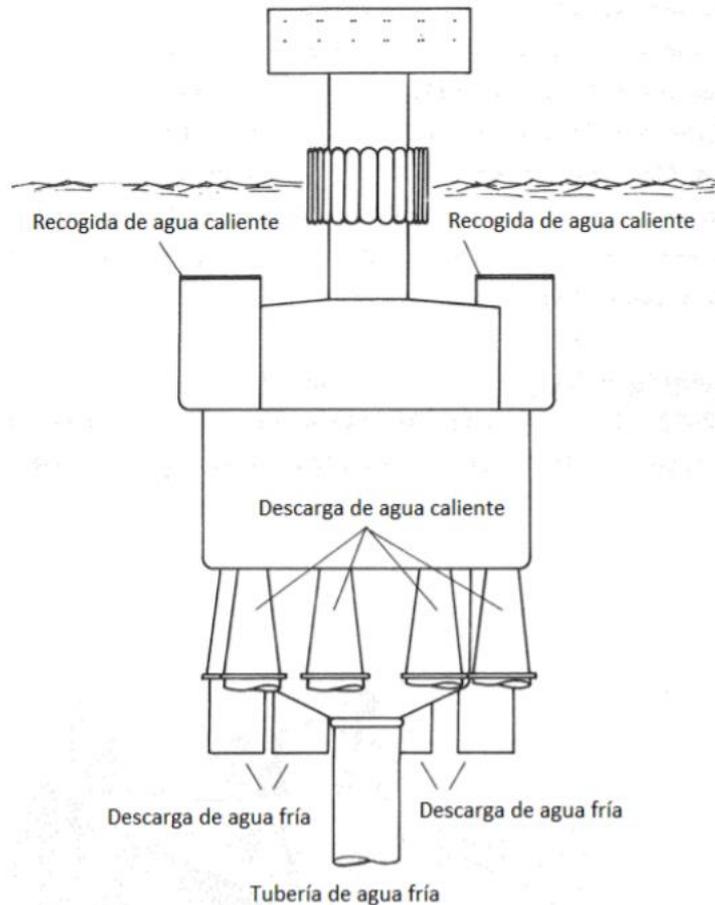


Figura 6-11. Plantas OTEC flotantes [31]

Independientemente del sistema OTEC utilizado, existen varios componentes indispensables en cualquier planta de energía maremotérmica.

### 6.3.4 Intercambiadores: evaporadores y condensadores

Los intercambiadores de calor constituyen una parte importante del funcionamiento y del costo de los sistemas de ciclo pues deben de disponer de una gran superficie para transferir suficiente calor en las plantas que operan con pequeño gradiente térmico [29].

En los evaporadores, el agua caliente de la superficie oceánica transfiere calor al fluido de trabajo para que este pase a estado vapor. En los casos más especiales, como los sistemas OTEC de ciclo abierto, este cambio de fase se produce en una cámara de vacío tal y como se ha detallado anteriormente. En los condensadores ocurre todo lo contrario, el fluido de trabajo pasa de su estado vapor a estado líquido gracias al intercambio de calor con el agua fría extraída del fondo oceánico.

Generalmente ambos intercambiadores son de mayor tamaño en las plantas maremotérmicas de ciclo cerrado ya que es necesario una mayor área de transferencia de calor al operar con gradientes de temperatura inferiores que las planas de ciclo abierto.

Los dos tipos de intercambiadores de calor más utilizados en la práctica son los de carcasa-tubo y los de placas. En los intercambiadores carcasa-tubo el agua del mar circula por el interior de los tubos y el fluido de trabajo cambia de fase en el interior de la carcasa. Existen tanto en disposición horizontal como vertical y para mejorar la eficiencia suelen utilizarse tubos acanalados, para que el fluido de trabajo fluya entre los surcos, y crestas, creando una película delgada que se evapora de forma más eficiente.

Los intercambiadores de placas constan de varias placas delgadas de metal entre las que circulan el agua y el fluido de trabajo de forma alternante [32].

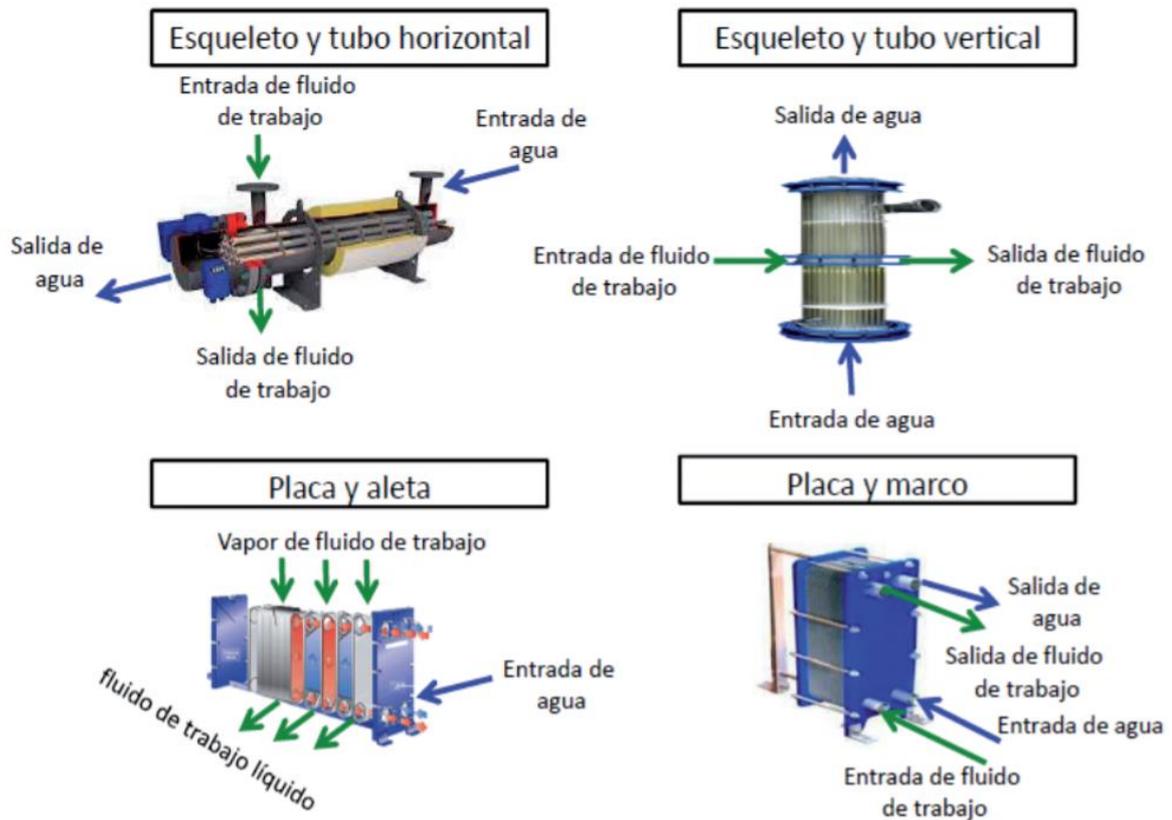


Figura 6-12. Intercambiador de calor para OTEC

Entre los evaporadores más utilizados en los sistemas OTEC de ciclo abierto destacan los de flujo en canal abierto, los de chorros descendentes y los de películas descendentes. En cuanto a los condensadores presentes en este tipo de ciclos se utilizan tanto los condensadores de contacto directo como los condensadores de superficie. La diferencia entre ambos es la pared sólida interpuesta de la que no disponen los condensadores de contacto directo y cuya ausencia permite que la transferencia de calor sea más efectiva.

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (nrel, por sus siglas en inglés), diseñó un condensador de contacto directo (adcc) de dos etapas donde el agua fría se distribuye a través de dos vasos de extremos abiertos rellenos de un material de protección disponible comercialmente. El sistema adcc reemplaza las placas tradicionales por una nueva placa que aumenta al área de la superficie de contacto entre el líquido de enfriamiento y el vapor, que lo hace más eficiente en un 5%. La capacidad de generación potencial aumento un 17% y el costo de reducción de emisiones se redujo a la mitad [29].

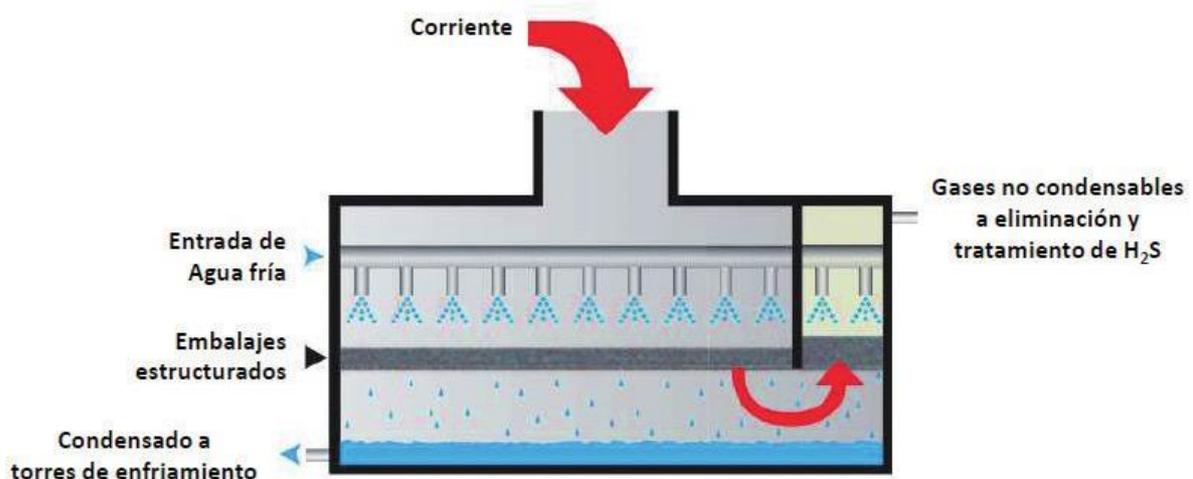


Figura 6-13. Condensador de contacto directo (ADCC) diseñado por El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos

En relación a los materiales utilizados para la construcción de estos intercambiadores cabe destacar por sus propiedades el titanio, el acero inoxidable y las aleaciones de aluminio.

- Titanio: Se caracteriza por su elevada conductividad térmica y sus buenas propiedades ante la corrosión y la erosión provocadas por el agua del mar y los fluidos de trabajo utilizados. El único inconveniente que limita su uso en algunas ocasiones es su elevado coste.
- Acero inoxidable: Sus altos contenidos en cromo y níquel hacen que este material se comporte muy bien frente a la corrosión y las picaduras ocasionadas por el agua del mar. Al igual que el titanio posee una gran conductividad térmica.
- Aleaciones de aluminio: Este tipo de aleaciones se caracterizan por su bajo coste, baja densidad y buena conductividad térmica. Sin embargo, no se comportan tan bien a la corrosión como los dos materiales anteriores.

### 6.3.5 Turbinas

El papel fundamental del conjunto turbina-generador es la obtención de energía eléctrica producida por el movimiento de los álabes cuando circula por su interior el vapor del fluido de trabajo. Las tecnologías de las turbinas son muy diferentes dependiendo el tipo de ciclo de la planta y al tipo de fluido que sea usado, por ejemplo, las turbinas usadas para un ciclo cerrado son de forma radial y más pequeñas [29].

Según estudios realizados por Kostors, la relación entre la eficiencia de la turbina y los costes asociados es 1:1. En las plantas de energía maremotérmica se utilizan turbinas multietapa de baja presión y en el caso de plantas de gran potencia pueden encontrarse varias turbinas acopladas en paralelo.

Tradicionalmente se han utilizado dos tipos de turbinas en las plantas de energía maremotérmica: turbinas radiales y axiales; y la selección de una u otra depende del rendimiento de cada una de ellas en las condiciones de operación requeridas por la planta.

Atendiendo a la historia, las turbinas radiales fueron empleadas en Mini-OTEC y las turbinas axiales en la planta de Nauru. Generalmente las turbinas radiales son preferibles para aquellos diseños de única etapa ya que se reduce mucho el tamaño y la eficiencia es aceptable. En el caso de turbinas multietapas suelen emplearse turbinas axiales para alcanzar un mayor rendimiento [32].

### 6.3.6 Fluido de trabajo

Independientemente del tipo de diseño y del tipo de ciclo que se utilice en una planta otec, es necesario el uso de un fluido de trabajo que hará que el gradiente térmico pueda ser aprovechado para la producción de energía [29]. Los aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de decantarse por un fluido de trabajo u otro para una planta de energía maremotérmica son los siguientes [32]:

- Presión de trabajo: Se refiere a la presión a la cual se evaporará el fluido de trabajo en el evaporador. Es recomendable que dicha presión se encuentre entre los 700 y 1400 kPa a 27 °C.
- Gasto másico: Se trata de reducir el gasto másico en el ciclo ya que al disminuir este, disminuyen también las caídas de presión. Además, el gasto másico es directamente proporcional a la potencia de la bomba, así como a su tamaño y precio.
- Coeficiente de transferencia de calor: Es recomendable la utilización de fluidos de trabajo con elevados coeficientes de transferencia de calor.
- Estabilidad y compatibilidad con los materiales utilizados en la fabricación de los diferentes equipos presentes en la central OTEC.
- Seguridad en condiciones de operación: En particular hay que prestar atención a la toxicidad y flamabilidad del gas. En cuanto a la toxicidad, se distinguen dos categorías en función del tiempo que una persona puede estar expuesta al refrigerante, A y B. La categoría A no presenta toxicidad en concentraciones superiores a 400 ppm; y la categoría B presenta toxicidad en concentraciones

inferiores a 399 ppm. En relación a la flamabilidad, la clase 1 no propaga el fuego, la clase 2 tiene propagación baja y la clase 3 presenta una elevada propagación.

Tabla 6-1. Clasificación de refrigerantes en función de su grado de seguridad

Propagación de Llama	Baja Toxicidad (A)	Alta Toxicidad (B)
No propagación de llama (1)	A-1	B-1
Baja propagación de llama (2)	A-2	B-2
Alta propagación de llama (3)	A-3	B-3

- Poder de calentamiento global (GWP): Capacidad de absorción de energía relativa a la del CO<sub>2</sub> en términos de masa.
- Potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP): Cantidad de ozono destruido por un refrigerante en la estratosfera. Los HCFCs, y fundamentalmente los CFCs, contribuyen a la destrucción del ozono en las capas altas de la atmósfera.

Entre los refrigerantes cuyas características se ajustan a las requeridas en las plantas de energía maremotérmica destacan los siguientes [32]:

- R717 (Amoníaco): Se utiliza en numerosas aplicaciones industriales y es uno de los refrigerantes más eficientes. Destaca por su pequeño impacto ambiental y su bajo punto de ebullición. Además, se caracteriza por su bajo precio y su elevada capacidad calorífica, que permite utilizar tuberías de menor diámetro.
- R290 (Propano): Es utilizado en varios sistemas de refrigeración y bombas de calor. Se caracteriza por tener un volumen específico inferior al resto de refrigerantes y un impacto ambiental muy bajo. Sin embargo, se trata de un refrigerante altamente inflamable.
- R32: Gas ligeramente inflamable utilizado en bombas de calor y aires acondicionados. Su impacto ambiental es moderado y las fugas no alteran su composición.
- R410a: Se trata de una mezcla casi azeotrópica de R32 (50%) y R125 (50%) usada en la climatización de instalaciones fijas con presiones de evaporación elevadas. Se caracteriza por operar en aplicaciones de baja temperatura y su uso es recomendable únicamente en equipos nuevos.

Tabla 6-2. Propiedades de refrigerantes aptos para OTEC

Propiedad	R717	R290	R32	R410a
Fórmula	NH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	R32+R125
Peso molecular (g/mol)	17	44,1	52	72,6
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	0,73	1,83	0,98	1,062
Punto de fusión 1 atm (°C)	-8	-187,6	-136	-137
GWP	0	3,3	650	1900
ODP	0	0	0	0

Desde el punto de vista ambiental se puede descartar la utilización de los refrigerantes R32 y R410a debido a su elevado poder de calentamiento global.

### 6.3.7 Bombas

Independientemente del tipo de ciclo es necesaria la utilización de bombas de gran potencia para transportar grandes caudales de agua desde el fondo marino hasta la superficie. Precisamente uno de los principales inconvenientes de las plantas de energía maremotérmica es que gran parte de la potencia que se extrae en la turbina es consumida por todas las bombas del sistema [32].

El diseño para bombear agua fría del mar profundo está acotado a los siguientes criterios [29]:

- Número de tuberías: Depende de la capacidad eléctrica de la planta.
- Longitud: Depende de la profundidad de la columna de agua.
- Diámetro: Depende de la cantidad de agua que sea bombeada, sin embargo, un mayor diámetro de ésta genera mayor riesgo en términos de diseño, transporte e instalación.
- Material: Debe ser económicamente viable, fácil de instalar y resistente a condiciones marinas extremas.

## 6.4 Principales proyectos OTEC

En la actualidad, la tecnología de OTEC se mueve de manera experimental o en fase de proyecto. El concepto OTEC fue inicialmente propuesto por el físico francés Jacques Arsene D'Ansoval en 1881; años más tarde uno de sus discípulos el Dr. Georges Claude, adoptó la idea y construyó la primera planta de ciclo abierto en la Bahía Matanzas en Cuba que produjo 22 kW de electricidad. Sin embargo, la planta operó pocos días debido a que fue destruida por una tormenta.

### 6.4.1 Laboratorio de Energía Natural (Hawai)

Una de las iniciativas más destacadas corresponde al Laboratorio de Energía Natural de Hawai (NELHA), creado en 1974 por el Gobierno estadounidense con el fin de impulsar este sistema. En 1979, sus responsables, con el apoyo de varios socios privados, producían por primera vez energía eléctrica en red con un sistema de OTEC de ciclo cerrado en mar abierto denominado "Mini-OTEC". La instalación se ubicaba en un barco a dos kilómetros y medio de la costa de Keahole Point y generaba energía para cubrir la iluminación y los sistemas eléctricos del buque, produciendo 55 kW de potencia bruta y 15 kW de potencia neta.



Figura 6-14. Buque Mini-OTEC

Los próximos mayores avances no vinieron hasta 1980-1981 con el proyecto experimental OTEC-1 en Hawái, gracias al Departamento de Energía de EEUU (DOE). La plataforma utilizada fue un tanque de la US Navy, que fue modificado para este proyecto, siguiendo el ejemplo de su predecesor Le Tunisie. Esta plataforma carecía del conjunto turbina-generador puesto que no estaba diseñada para producir energía, sino como una plataforma para probar diversas tecnologías relacionadas con OTEC, como la plataforma, la tubería de agua fría, los sistemas de amarre, los sistemas de transferencia de energía y los intercambiadores de calor. El proyecto OTEC-1 solo duró unos meses, hasta marzo 1981, en vez de la propuesta inicial de dos años, debido

a problemas de financiación.

En 2015 NELHA en Hawái, construyó una planta piloto de ciclo cerrado de 10 MW y lleva a cabo funciones secundarias como agricultura de agua fría, producción de aire acondicionado, agua potable y producción de organismos acuícolas.



Figura 6-15. Planta piloto de NELHA

#### 6.4.2 Otros proyectos de interés

El Instituto de Energía del Océano de la Universidad de Saga en Japón es el mayor centro investigador de la tecnología de la energía térmica del mar del mundo. En 2013, la Universidad de Saga instaló una planta en la isla de Kumejima compuesta por dos unidades de 50 kW cada una.

Se firmó un acuerdo entre la compañía Locked Martín y Beijing Based Reignwood Group para desarrollar una planta flotante de ciclo cerrado de 10 MW en la costa sur de China (Hainan), el bombeo de agua fría se hará desde una profundidad de 800 m a 1 000 m y su propósito será ofrecer electricidad a un complejo turístico.

En 2014, la compañía francesa DCNS, planeó la instalación de una planta base tierra de 10.7 MW, que podría suplir de electricidad a 35 000 casas en Bellefontaine, Martinica. Aún sigue desarrollándose. En el mismo año se firmó un acuerdo por OTEC CORP., para construir una planta base tierra de 45 mw en las islas vírgenes en Estados Unidos.

Entre 2017 y 2018 el Instituto Coreano de Ciencias Oceánicas (KIOST), planeó construir una planta prototipo de 10 MW, con el fin de iniciar prototipos para comercializar una planta de 100 MW para el año 2020. Los proyectos que están actualmente en etapa de diseño se encuentran en Francia (Isla Martinica), China (Qingdao), Japón (Saga) e Islas Tarawa. En un futuro se tiene planeado construir instalaciones en Bora Bora (planta base tierra, solo va a usarse para aire acondicionado), Tetiaroa (base tierra, solo va a usarse para aire acondicionado), África Ecuatorial (plantas flotantes), Tanzania, Mozambique, Curazao, Islas Madagascar, Islas Vírgenes, Islas Maldivas, Islas Marshall, Islas Andamán, Sri Lanka, Malasia, Bahamas, Barbados, India, Filipinas y Japón.

Tabla 6-3. Resumen de los principales proyectos OTEC

<b>Proyecto</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Año instalación</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ciclo</b>	<b>Fluido de trabajo</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Claude</b>	Cuba	1930	22 kW	Abierto	Agua de mar	Planta en tierra
<b>Mini-OTEC</b>	Hawai	1979	50 kW	Cerrado	R717	Buque
<b>OTEC1</b>	Hawai	1981	1 MW	Cerrado	Amoniaco	
<b>NELHA</b>	Hawai	1993	210 kW	Abierto	Agua	Experimental
<b>Universidad de Saga</b>	Saga	1995	9 kW	Cerrado	Amoniaco/Agua	Cilo Uehara
<b>NIOT</b>	Puerto de Tuticorin	2000	1 MW	Cerrado	Amoniaco	Flotante
<b>Lockheed Martin</b>	Isla Hainan	2013	10 MW	Cerrado	Amoniaco	Prototipo
<b>KRISO y KIOST</b>	Corea	2014	20 kW	Cerrado	R32	Planta piloto
<b>NELHA</b>	Hawai	2015	100 kW	Cerrado	Amoniaco	

# 7 ENERGÍA AZUL O POTENCIA OSMÓTICA

La energía azul, también conocida como energía osmótica, es la energía extraída en la unión de dos fuentes de agua con diferentes concentraciones de sal para la generación de electricidad. La energía azul surge de mares y ríos cuando el agua dulce entra en contacto con la salada, por ejemplo, cuando un río muere en el mar [33].

Entre las diversas tecnologías discutidas para aprovechar la energía utilizando gradientes de salinidad, dos tecnologías se han considerado altamente eficientes y han sido las más investigadas: la ósmosis retardada por presión (PRO) y la electrodiálisis inversa (RED), utilizando membranas como separadores para permitir el transporte preferencial de especies [34].

## 7.1 Fundamento teórico: gradiente osmótico

La osmosis en términos generales se trata de membranas y diferenciales de concentración que provocan que el agua (considéralo en la mayoría de los casos) fluya contra el gradiente de concentración del soluto, dicho fenómeno es comúnmente descrito en términos de “presión osmótica”.

Por ósmosis, la solución de baja concentración en el compartimiento de la derecha pasa a través de la membrana semipermeable a la solución de alta concentración en el otro compartimiento. El agua seguirá fluyendo a través de la membrana hasta que la concentración se iguala a ambos lados de la membrana [35].

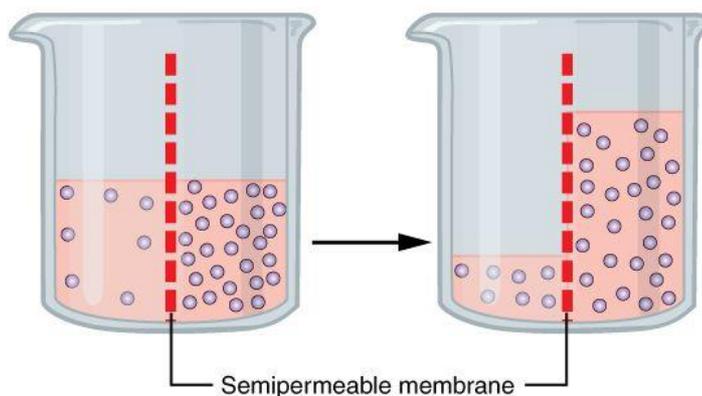


Figura 7-1. Proceso de ósmosis [34]

La cantidad teórica máxima de energía que se puede obtener del gradiente salino se calcula utilizando la termodinámica, y viene dada por la “energía libre de Gibbs” o energía de mezcla, aplicable a la mezcla de disoluciones ideales. Representa la diferencia entre el potencial químico de la mezcla resultante y el de las disoluciones de partida.

Esta energía libre es la máxima teórica disponible al mezclar dos disoluciones salinas de diferentes concentraciones; depende de temperatura de operación, de los volúmenes mezclados y de la diferencia de concentración entre las dos disoluciones.

No obstante, la mezcla de agua de río y agua de mar se aleja de una situación ideal, no solamente por la compleja composición química del agua de mar, sino también por las limitaciones tecnológicas susceptibles de extraer la energía de mezcla, que hará que la energía aprovechable represente una pequeña fracción de la energía teórica termodinámica [34].

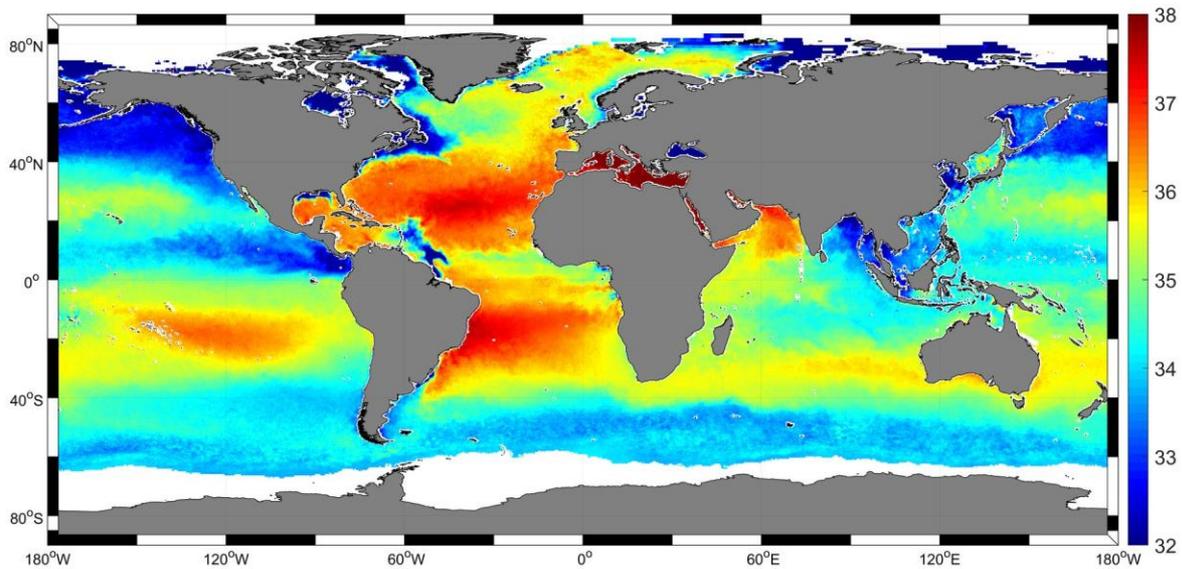


Figura 7-2. Mapa de salinidad en los océanos y mares [34]

## 7.2 Funcionamiento de una planta osmótica

Los componentes necesarios para una planta de energía osmótica son: Las membranas, el intercambiador de presión, el sistema de pre-tratamiento, las bombas, la tubería y el grupo turbina generador. El siguiente esquema muestra que no hay el aprovechamiento de una caída geodética, en cambio de la membrana donde ocurre la ósmosis, sale un caudal de agua a la presión osmótica (que a su vez depende de la diferencia de salinidad entre los fluidos) con el que se acciona una turbina [36].

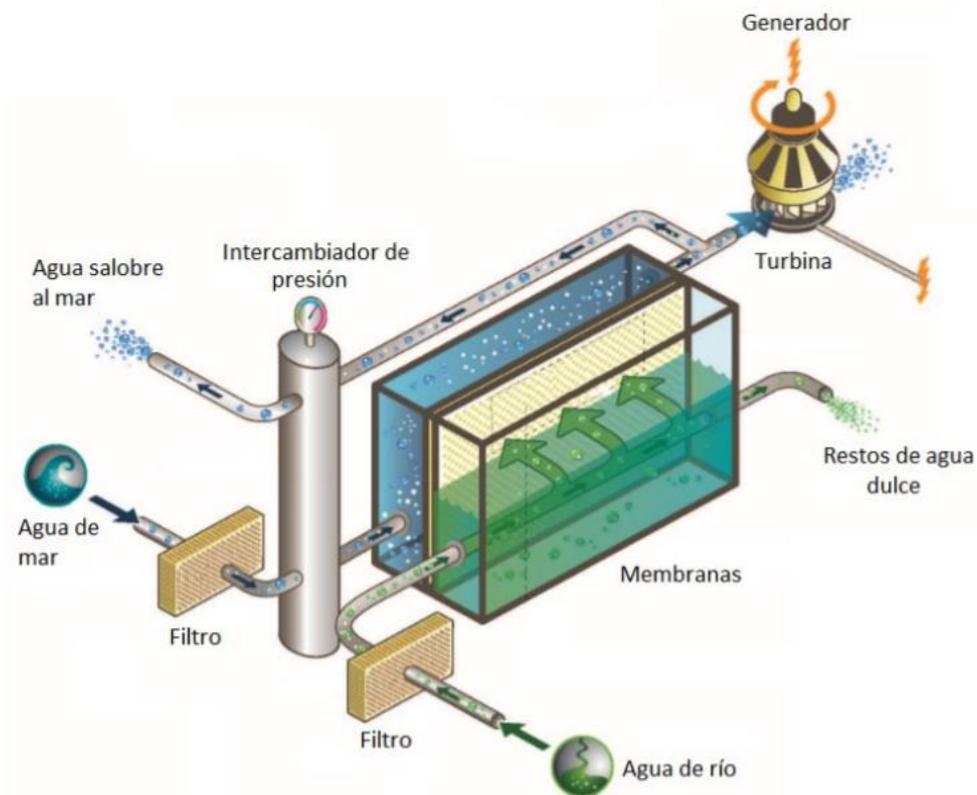


Figura 7-3. Esquema de funcionamiento de una planta osmótica [36]

La disposición de estos elementos se debe adecuar a las oportunidades que brinde la zona de implementación, y esto es posible gracias a que el sistema de generación por ósmosis tiene una construcción modular, especialmente por el elemento membrana.

La integración de la planta de energía contempla dos frentes que vale la pena diferenciar: uno en lo concerniente a la integración de la planta con el entorno, y otro en lo que respecta a la integración de los elementos constitutivos, donde el segundo frente está anidado en el primero. Por esto, el desarrollo de la metodología para el diseño de una planta de este tipo se enfoca en la metodología y trata al tiempo aspectos técnicos.

Se puede considerar que una planta de energía osmótica tiene las siguientes características [36]:

- Es una energía renovable, por depender de un recurso en teoría inagotable.
- Es una forma de hidrogenación, por accionar el grupo turbina-generator.
- Está catalogada como una forma de energía marina, según la IPCC.
- Funciona en zonas costeras, donde se disponga de agua de río y de mar.
- Es una fuente de energía limpia, por no emitir dióxido de carbono.
- Genera de forma silenciosa.
- Funciona de manera continua, considerando que exista agua dulce desembocando al mar.
- Es confiable, en la medida en que los flujos de operación son constantes y las presiones regulares, lo que se traduce en un caudal de salida estable.
- Brinda seguridad, pues no posee elementos de riesgo o situaciones de riesgo inminentes, y se puede poner fuera de servicio sin mayores medidas de control que en las usadas en una planta hidroeléctrica.
- Se basa en un diseño modular gracias a las membranas.
- Su diseño modular permite un rápido reemplazo de membranas, lo que facilita el mantenimiento preventivo y correctivo.
- Es actualizable, ya que se pueden implementar mejoras en los componentes que están en desarrollo como son las membranas y el sistema de pre-tratamiento.
- Posibilidad de compartir costos con las plantas de tratamiento y desalinización de agua ubicadas cerca de las costas.

### 7.3 Tecnologías en energía azul

Se pueden proponer varias clasificaciones para describir las diferentes opciones para extraer energía de los gradientes de salinidad. La siguiente figura un esquema de clasificación basado en el tipo de proceso. De acuerdo con este esquema, se pueden identificar cinco categorías principales de procesos [37]:

- Procesos de intercambio iónico: son aquellos procesos en los que el transporte de iones (es decir, cationes y aniones) es el mecanismo responsable del cambio de concentración de las dos corrientes a diferente salinidad. Los procesos tecnológicos se diferencian aún más en función de si utilizan membranas o no.

Electrodiálisis inversa (RED) es el nombre que se le da al proceso que hace uso de membranas de intercambio iónico responsables de la mezcla controlada de los iones entre las corrientes a diferentes salinidades. Los componentes clave de una unidad RED son los IEM, que se ensamblan en una pila con una membrana selectiva catiónica (CEM) y una membrana selectiva aniónica (AEM) alternas. La distancia entre dos membranas subsiguientes (es decir, el grosor del compartimento) generalmente está garantizada por el uso de espaciadores poliméricos. Las dos soluciones se ven obligadas a fluir a través de la pila en canales alternos por medio de sistemas de distribución de entrada y salida de forma adecuada. El gradiente de concentración entre concentrado y diluido actúa como fuerza impulsora de los iones, que comienzan a difundirse a través de las membranas.

RED microbiano es una tecnología híbrida que consiste en una pila RED colocada entre los electrodos de una celda de combustible microbiana (MFC). De esta manera, las aguas residuales se utilizan para generar energía, lo que resulta en una mayor producción de energía en comparación con un MFC solo.

Mezcla mediada por acumuladores (AccMix) define una categoría de proceso completa donde el transporte de intercambio iónico hacia los electrodos tiene lugar con o sin el uso de membranas. La llamadamezcla capacitiva (CapMix) hace uso de electrodos especiales llamados electrodos capacitivos en ausencia de membranas. El proceso se basa en un ciclo de cuatro pasos durante el cual los electrodos acumulan la carga eléctrica en presencia de la corriente de alta salinidad y posteriormente la descargan en presencia de la corriente de baja salinidad. Se produce una cantidad neta de energía ya que la cantidad de energía requerida para cargar los electrodos capacitivos es menor que la liberada durante el paso de descarga.

- Procesos osmóticos: son aquellos procesos en los que el transporte del disolvente (por ejemplo, agua) es el mecanismo responsable del cambio de concentración de las dos corrientes a diferente salinidad.

La ósmosis retardada por presión (PRO) se basa en el uso de una membrana osmótica, que separa dos soluciones de diferente salinidad. Esta membrana semipermeable permite que el disolvente penetre y retiene el soluto (es decir, las sales disueltas). La diferencia de potencial químico entre las soluciones provoca el transporte de agua desde la solución diluida a la solución más concentrada. Si se aplica una presión hidrostática menor que la osmótica al lado del concentrado, el transporte de agua se retrasará parcialmente. El transporte de agua desde la solución diluida a baja presión a la solución concentrada a alta presión da como resultado una presurización del volumen de agua transportada. Aunque PRO no puede generar electricidad directamente como en el caso de los procesos RED o AccMix, el volumen presurizado de agua transportada se puede utilizar en una turbina hidráulica para generar energía mecánica que se puede convertir en electricidad acoplando la turbina con un generador.

- Procesos de mezcla directa: categoría de proceso en la que tanto los iones como el disolvente de una corriente se transportan y se mezclan directamente con la otra corriente, sin el uso de ninguna membrana.

El Generador Hidrocrático (HG) es un dispositivo que consta de un tubo vertical con una serie de aberturas, que está completamente sumergido en agua de mar. El agua dulce se inyecta en la entrada inferior del tubo vertical, lo que provoca el arrastre de agua de mar desde las aberturas y la afluencia de corrientes de alta y baja salinidad. Un balance de energía general muestra que el caudal total generado en la salida superior del tubo vertical se debe no solo a la carga hidráulica y la flotabilidad, sino también a la energía resultante de la mezcla directa de las dos corrientes y puede usarse para generar energía mecánica en una turbina hidráulica.

- Procesos de adsorción: categoría de proceso en la que se utiliza un material de adsorción adecuado para eliminar el disolvente de una corriente y posteriormente descargarlo en la otra corriente mediante desorción.

El hinchazón y encogimiento de hidrogeles (SSH) es una tecnología muy reciente que se basa en las propiedades de expansión y contracción de los hidrogeles poliméricos. La recuperación de energía de gradiente salino se realiza exponiendo los hidrogeles a agua dulce y haciéndolos hincharse como resultado de la adsorción de agua. La energía recuperada durante el proceso de hinchamiento se convierte en energía potencial gracias a la presencia de un peso adecuado colocado en la parte superior de la columna de hidrogel. De hecho, el peso se eleva a una altura correspondiente a la expansión de los hidrogeles en la columna. Posteriormente, los hidrogeles se ponen en contacto con agua de mar con el fin de hacerlos encoger liberando el agua captada en el paso anterior. Por tanto, se puede realizar una operación cíclica repitiendo los pasos de hinchamiento y contracción.

- Procesos basados en la diferencia de presión de vapor: categoría de proceso basada en la diferencia de presión de vapor existente entre las corrientes de baja y alta salinidad.

Esta tecnología puede considerarse como el reverso de la tecnología de compresión mecánica de vapor ampliamente establecida en la desalinización. En condiciones de vacío, las dos corrientes a diferentes salinidades se evaporan en cámaras separadas generando diferentes presiones de vapor. El vapor generado a mayor presión en la cámara de baja salinidad fluye hacia la cámara de alta salinidad

donde el vapor se genera a menor presión. Si se coloca una turbina entre las dos cámaras, se puede recuperar energía.

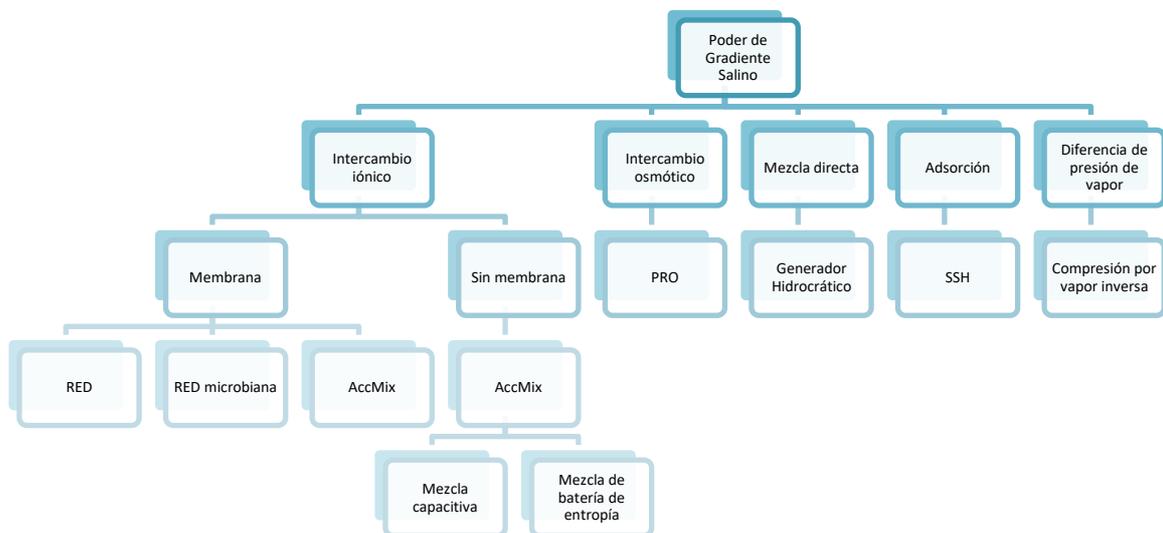


Figura 7-4. Clasificación de la energía de salinidad basada en el tipo de proceso

No obstante, para el aprovechamiento de gradientes salinos oceánicos las dos técnicas más empleadas son la ósmosis por presión retardada (PRO) y la electrólisis inversa (RED). Con ambas tecnologías la energía de mezcla se convierte en energía eléctrica. En la RED, mediante un proceso electroquímico, y en la PRO mediante un proceso osmótico que da lugar a un trabajo mecánico que acciona una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Cada una de estas tecnologías tiene su propio campo de aplicaciones. La concentración de sales en el agua salina influye en el rendimiento de la tecnología aplicada. La RED presenta un mayor rendimiento en la generación de energía eléctrica con la mezcla de agua de río y agua de mar, mientras el proceso PRO incrementa su rendimiento con la mezcla de agua de río con aguas más concentradas en sales que el agua de mar, como puede ser la salmuera procedente de la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa, o situaciones equivalentes [36].

### 7.3.1 Ósmosis por Presión Retardada (PRO)

Este proceso se basa en el uso de una membrana semipermeable, que permite el paso de agua y no de sales, para separar una disolución concentrada en sales (agua de mar o una salmuera) de otra disolución diluida (agua dulce o agua salobre) aprovechando el mecanismo de ósmosis natural o directa. A través de este mecanismo, el gradiente salino existente entre las dos disoluciones constituye una fuerza impulsora para el transporte de agua desde la diluida hasta la concentrada hasta alcanzar el equilibrio de potencial químico. Si la cámara que contiene la disolución concentrada se mantiene a volumen constante, se produce un incremento de presión suficiente para actuar sobre una turbina, la cual mueve un generador que produce energía eléctrica [37].

Antes de entrar en los módulos de membrana, el agua de mar se presuriza mediante un intercambiador de presión aproximadamente a la mitad de la presión osmótica, 12- 14 bars. Después de filtrarla, se hace pasar el agua dulce hacia el módulo de membrana. En este proceso se consigue entonces un exceso de agua de mar presurizada, que se divide en dos corrientes: un tercio de este agua de mar a presión se utiliza para la generación de electricidad en una turbina de energía hidroeléctrica, y la parte restante pasa a través de un intercambiador de presión con el fin de presurizar el agua de mar entrante. El agua producida como desecho (agua salobre) será redirigida de vuelta a la desembocadura del río o al mar.

En los módulos de membrana, el agua con bajo contenido en sal se mueve a través de la membrana hacia el

agua de concentración más alta, que crea una mayor presión debido a las fuerzas osmóticas. Gracias al control de esta presión, aproximadamente la mitad de la energía teórica puede transformarse en energía eléctrica, obteniendo 1 MW por  $\text{m}^3/\text{s}$  de agua dulce.

En consecuencia, cuanto mayor es el gradiente de salinidad entre agua dulce y salada, mayor es la presión que se acumula en el sistema. Por otra parte, cuanto más agua se introduzca en el sistema, más energía se puede producir. Es muy importante que tanto el agua dulce como el agua de mar estén lo más limpias posibles. Las sustancias en suspensión en el agua pueden quedar capturadas dentro de la estructura de soporte de membrana o en la misma superficie de la membrana, reduciendo el flujo a través de la membrana, la potencia de salida y la eficiencia general del sistema. Este fenómeno está vinculado a las características de la membrana, al módulo de membrana y al pretratamiento del agua dulce y el agua de mar.

Para maximizar la potencia neta máxima que se puede producir a partir del proceso PRO se pueden considerar las siguientes estrategias [38]:

- La presión osmótica de las fuentes de agua. La fuente de agua salada más disponible es el agua de mar, cuya presión osmótica ronda los 27 bar. Si se utiliza salmuera de agua de mar de plantas desalinizadoras de ósmosis inversa existentes, un mayor volumen de permeación de agua puede obtenerse en determinadas áreas de la membrana debido a su mayor fuerza impulsora osmótica.
- La presión de funcionamiento. La presión de funcionamiento óptima que maximiza la potencia de salida es la mitad del gradiente de presión osmótica. Para un sistema de agua de río-agua de mar, la presión de funcionamiento ideal es 13,5 bar. Sin embargo, debido a la imperfección de las membranas PRO y los efectos de dilución en módulos, la presión óptima para el sistema PRO a gran escala puede ser diferente. Debe diseñarse cuidadosamente para maximizar la eficiencia del proceso.
- Las membranas. Se necesitan membranas con alta permeabilidad al agua, baja permeabilidad a la sal y pequeño parámetro estructural para mejorar el volumen de permeación de agua.
- Los caudales volumétricos de las soluciones de extracción y alimentación. Por ejemplo, a un caudal de extracción bajo, el agua salada podría diluirse en gran medida, provocando un flujo de agua bajo y una utilización ineficaz del área de la membrana. Por otro lado, a una tasa de flujo de extracción alta, el potencial en la solución de extracción no se utiliza lo suficiente mientras que la entrada de energía para impulsar el flujo es alta.

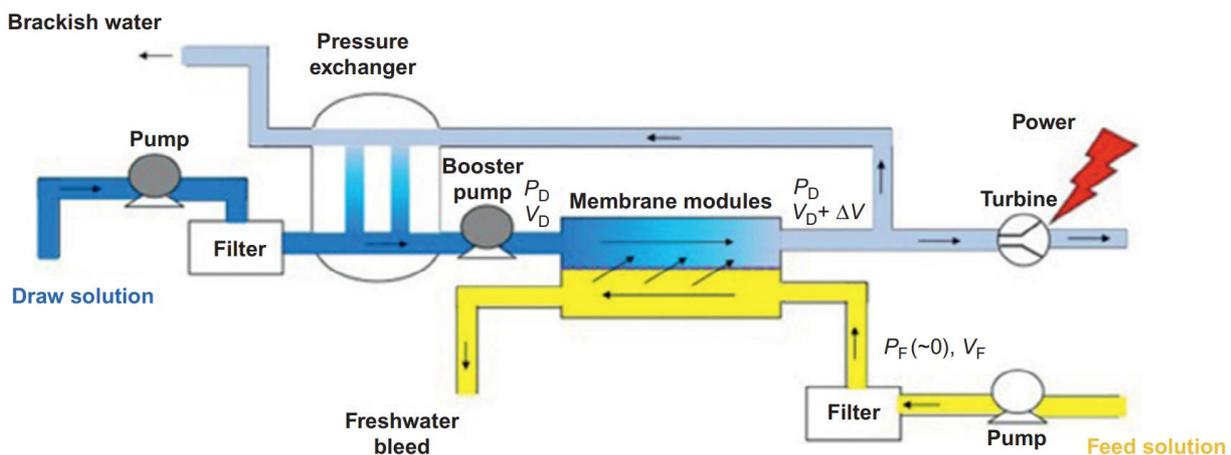


Figura 7-5. Esquema de funcionamiento de centrales eléctricas por ósmosis por presión retardada (PRO) [38]

Desde su concepción original, varios estudios han investigado PRO en configuraciones de circuito abierto y cerrado a escala de banco, escala piloto e incluso escala comercial. El concepto PRO se introdujo en la década de 1970 y se previeron varias configuraciones de plantas durante las próximas dos décadas. Debido a sus similitudes con la ósmosis inversa, los esfuerzos iniciales para desarrollar PRO se basaron en membranas y módulos de membrana originalmente diseñados para RO. Esto permitió la recopilación de resultados experimentales tempranos sin la necesidad de aparatos específicamente diseñados, pero también resultó en salidas de potencia muy por debajo de las salidas esperadas.

Aunque PRO es una tecnología emergente, la aplicación de una hidroturbina y un generador dentro del sistema PRO es esencialmente la misma que en los sistemas hidroeléctricos clásicos. En lugar de utilizar un depósito con una tubería forzada o una turbina en la corriente de pasada, una parte del flujo de la solución de extracción presurizada (el permeado) se desvía a través de la turbina. Un diseño de turbina Francis es apropiado para la aplicación PRO basado en la eficiencia y simplicidad del diseño.

Además, la presión sobre la descarga de una turbina Francis se puede ajustar para proporcionar suficiente energía para mover la solución salobre al pozo húmedo del emisario. Se puede suponer que la eficiencia de una turbina Francis es aproximadamente del 87%. Un generador de inducción trifásico proporciona energía con una operación simple y un bajo costo de mantenimiento. La eficiencia del generador suele ser de aproximadamente el 95% [37].

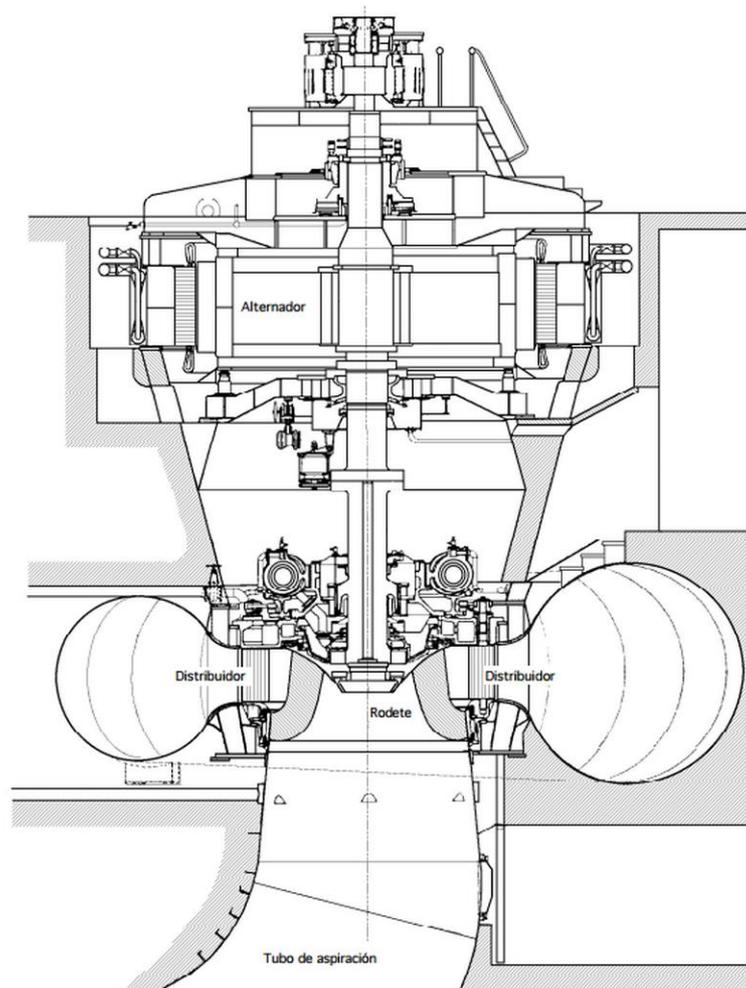


Figura 7-6. Esquema general de una turbina Francis

En PRO se utilizan membranas poliméricas hidrófilas y semipermeables. Las membranas son de triacetato de celulosa asimétrico integrado (CTA) o membranas compuestas de película delgada (TFC). Sin embargo, típicamente se utilizan membranas TFC debido a su flujo de agua superior. Las membranas TFC están hechas de un soporte poroso y una fina capa activa. Los primeros estudios utilizaron membranas TFC en ósmosis inversas para realizar pruebas en PRO. No obstante, debido a la gruesa capa de soporte hidrófoba, se logró una baja permeabilidad y, por lo tanto, una baja densidad de potencia.

El avance de la ósmosis directa trajo el desarrollo de una nueva generación de membranas TFC. Estas membranas no solo ofrecen una capa de soporte más delgada, sino que se descubrió que el aumento de la hidrofiliidad de la capa de soporte a través de la modificación de la superficie aumenta la permeabilidad, lo que permite el uso de membranas TFC en PRO. En PRO, la capa activa de la membrana TFC se enfrenta a la solución de extracción y el soporte poroso se enfrenta a la solución de alimentación (opuesta a la orientación de ósmosis inversa). Las membranas son de hoja plana o de fibra hueca, y se pueden configurar en placa y marco, enrollado en espiral o módulos de fibra hueca tubular [37].

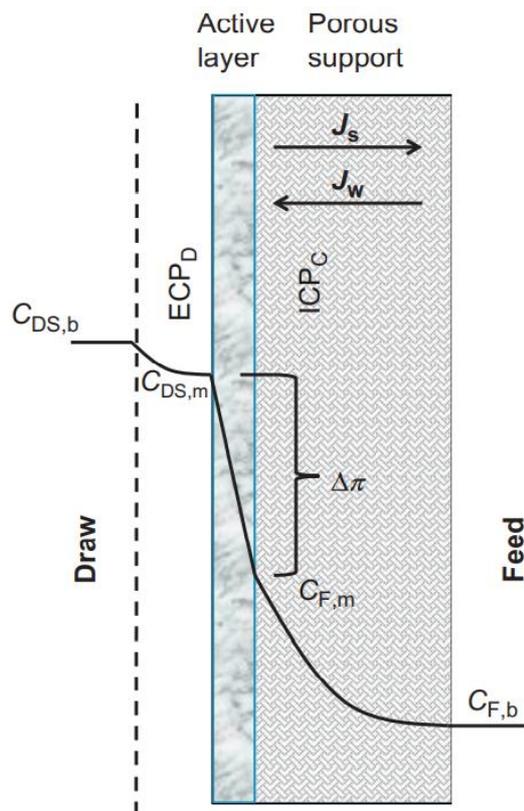


Figura 7-7. Esquema de membranas PRO [37]

### 7.3.1.1 Membranas de lámina planta TFC

Las membranas de lámina plana de TFC están constituidas por un sustrato de soporte y una fina capa selectiva de poliamida. Para desarrollar membranas PRO eficaces, se han utilizado generalmente dos estrategias de fabricación. La primera estrategia es mejorar la permeabilidad al agua de las membranas de TFC durante la formación de capas de poliamida y/o nuevos procesos de postratamiento. El segundo implica el desarrollo de nuevos sustratos que posean un pequeño parámetro estructural y suficiente robustez mecánica.

Varios aditivos como monómeros voluminosos y tensioactivos se han incluido en las soluciones de monómeros durante la polimerización interfacial para aumentar el volumen libre intrínseco de la capa de rechazo de poliamida y, por tanto, su permeabilidad al agua. Nuevos tratamientos posteriores, incluido el tratamiento con cloro, inmersión en alcohol y el contacto con dimetilformamida también se han utilizado para mejorar la permeabilidad al agua de la membrana. El primero podría agrandar y ensanchar la cavidad de volumen libre intrínseco de la capa de poliamida, mientras que el segundo podría hinchar las cadenas de poliamida, eliminar los monómeros sin reaccionar y las cadenas de polímero de bajo peso molecular.

Se encuentra que un incremento moderado en el volumen libre promovería significativamente la permeabilidad al agua con una ligera disminución en el rechazo de sal y, por lo tanto, aumentan tanto el flujo de agua como la densidad de potencia. Sin embargo, un incremento demasiado grande en el volumen libre reduciría tanto la selectividad de la membrana como la densidad de potencia debido a los efectos acoplados del flujo de sal inverso.

Además de optimizar la permeabilidad de la piel selectiva de la membrana, se han empleado nuevos sustratos de membrana para fabricar membranas de lámina plana TFC-PRO eficaces. Los sustratos de nanofibras tienen una estructura súper porosa con poros interconectados entre nanofibras y, por lo tanto, poseen alta porosidad y baja tortuosidad. Por lo tanto, tienen una muy pequeña  $S$  (p.ej  $S \approx 150 \mu\text{m}$ ) y una PIC muy reducida. Sin embargo, la estabilidad mecánica bajo altas presiones hidráulicas es cuestionable y la fuga de sal puede ser bastante alta al ser comprimida a alta presión. Además, HTI desarrolló recientemente una membrana de lámina plana TFC para aplicaciones PRO con un flujo de agua doble en comparación con la membrana CTA-FO anterior, que también garantiza un mejor rechazo de sal. La membrana HTI TFC posee una capa de soporte porosa de polisulfona con una malla tejida incrustada, y el espesor total de la membrana es de

aproximadamente 115  $\mu\text{m}$ .

Actualmente, una densidad de potencia bruta de  $9,0 \text{ W m}^{-2}$  podría lograrse a alrededor de 13 bar utilizando agua de mar sintética (NaCl 0,59 M) como solución de extracción y agua desionizada como alimentación. Cuando se emplean aguas saladas más concentradas, como salmuera de agua de mar sintética (NaCl 1,06 M), una densidad de potencia bruta de  $21,3 \text{ W m}^{-2}$  podría estimarse en 15,2 bar cuando se utiliza agua desionizada como solución de alimentación. Sin embargo, para mantener la geometría del canal de flujo y mejorar la transferencia de masa cerca de la superficie de la membrana, los módulos de membrana de hoja plana requieren espaciadores de canal. El espaciador de alimentación provocará una pérdida de presión en el canal de flujo e inducirá efectos de sombra que reducirán el flujo de permeación del agua a través de la membrana. Además, los espaciadores de alimentación actuales deforman inevitablemente la membrana PRO bajo altas presiones hidráulicas. La deformación de la membrana no solo reduce drásticamente el rechazo de la membrana, sino que también aumenta su parámetro estructural. Como consecuencia, los efectos del flujo salino inverso y del ICP aumentan significativamente, lo que resulta en una reducción sustancial tanto del flujo de agua como de la densidad de potencia. Por lo tanto, el diseño de espaciadores compatibles con las membranas PRO es de suma importancia para el desarrollo de módulos de membrana PRO de hoja plana eficaces [37].

### 7.3.1.2 Membranas de fibra hueca

En comparación con las membranas de hoja plana, la configuración de fibra hueca tiene la ventaja de una mayor superficie por módulo, estructura autoportante y facilidad de fabricación del módulo. No se necesitan espaciadores de alimentación para los módulos de fibra hueca, que no solo podrían minimizar las interacciones membrana-espaciador bajo altas presiones, sino que también reducirían la pérdida de energía adicional mencionada anteriormente en el canal de flujo de alimentación de los módulos de hoja plana. Hasta la fecha, tanto la inversión de fase de piel integral como las membranas de fibra hueca TFC se han explorado para aplicaciones PRO [37].

### 7.3.1.3 Membranas de fibra hueca de piel integral

Las membranas de fibra hueca asimétricas de piel integral se pueden preparar mediante procesos de inversión de fase húmeda directa por chorro seco en un solo paso, que normalmente implica la extrusión de soluciones de polímero a través de hileras, la posterior inversión de fase y formación de fibras en el baño de coagulante y la recogida de fibras mediante un tambor.

Este tipo de membrana presenta procesos de fabricación simplificados y convenientes. Consiste en una capa externa selectiva de polibencimidazol (PBI) y una capa interna de soporte de poliacrilonitrilo (PAN) similar a una esponja. Se añadió polivinilpirrolidona (PVP) a la mezcla PAN como puente entre las dos capas para eliminar la delaminación. Para aumentar aún más la permeabilidad al agua, se hizo fluir una solución acuosa de persulfato de amonio a través de la fibra para eliminar las moléculas de PVP atrapadas en el sustrato mientras se mantenía la integridad de la interfaz. La mejor membrana exhibió una densidad de potencia máxima de  $5,10 \text{ W m}^{-2}$  a una presión hidráulica de 15,0 bar cuando se utiliza NaCl 1 M como solución de extracción y NaCl 10 mM como alimentación [37].

### 7.3.1.4 Membranas de fibra hueca TFC

Las membranas de fibra hueca pueden ser selectivas para el interior o el exterior. Actualmente, la mayoría de las membranas TFC para PRO son selectivas internamente. Tienen pieles selectivas de poliamida similares, pero las capas de soporte están hechas de diferentes polímeros. Las estructuras microscópicas de los sustratos de soporte también son diferentes [37].

## 7.3.2 Electrólisis inversa (RED)

La técnica de la electrodiálisis inversa utiliza una pareja de membranas, de tipo diferente de las semipermeables descritas anteriormente: se trata de membranas permeables, ya sea al agua o a los iones de un patrón marcado; se dividen en catiónicas y aniónicas, según que permitan el paso de cationes o aniones. Estas membranas están compuestas de polímeros similares a las llamadas resinas de cambio iónico. Una unidad de la técnica consiste en una serie de compartimentos delimitados por membranas catiónicas y aniónicas

alternativamente; se hace fluir agua dulce y agua salada, de manera que en cada uno de los compartimentos se encuentre agua con concentración distinta de la del compartimento contiguo. Al conjunto de una membrana aniónica y otra catiónica que separa las disoluciones concentrada y diluida se le denomina “par de celda”.

Por difusión, los iones se esparcen de un compartimento con agua salada a los dos compartimentos adyacentes, pero, gracias a las membranas, en los dos compartimentos entran iones de signo opuesto. Los iones transportados tienden a descargarse en los electrodos metálicos, ánodo y cátodo, mediante el intercambio de electrones derivados de una reacción de oxidación-reducción. En el caso indicado en la figura, los iones cloruro y sodio transportados a través de las membranas se descargan en los electrodos de hierro que están conectados por un circuito externo por el que fluye una corriente de electrones (corriente eléctrica) derivada de la reacción de oxidación-reducción del hierro [37].

A lo largo de la secuencia de los compartimentos se produce por lo tanto una diferencia de potencial, que puede ser recogida con dos electrodos situados a los extremos. Cuando se acoplan muchas unidades en serie, formando una pila alimentada por agua salada, la tensión total entre los electrodos alcanza decenas de voltios. En los compartimentos colocados a los extremos, donde se recoge la corriente de los electrodos, la tensión debe ser suficiente para que suceda una óxido-reducción, ya que, si no ocurriera, no habría ningún paso de corriente

En la técnica RED, la permeabilidad de la membrana define la resistencia al paso de los iones, esto es, de la corriente. La potencia típicamente producida es del orden de 1– 3W/m<sup>2</sup> de membrana, análoga por lo tanto a la producida por la técnica PRO. Dado que la fuente de energía es la misma, sea PRO o sea RED, pueden producir idealmente la misma energía a partir de la misma cantidad de agua, y también el rendimiento efectivo es similar, esto es, mayor del 50% [38].

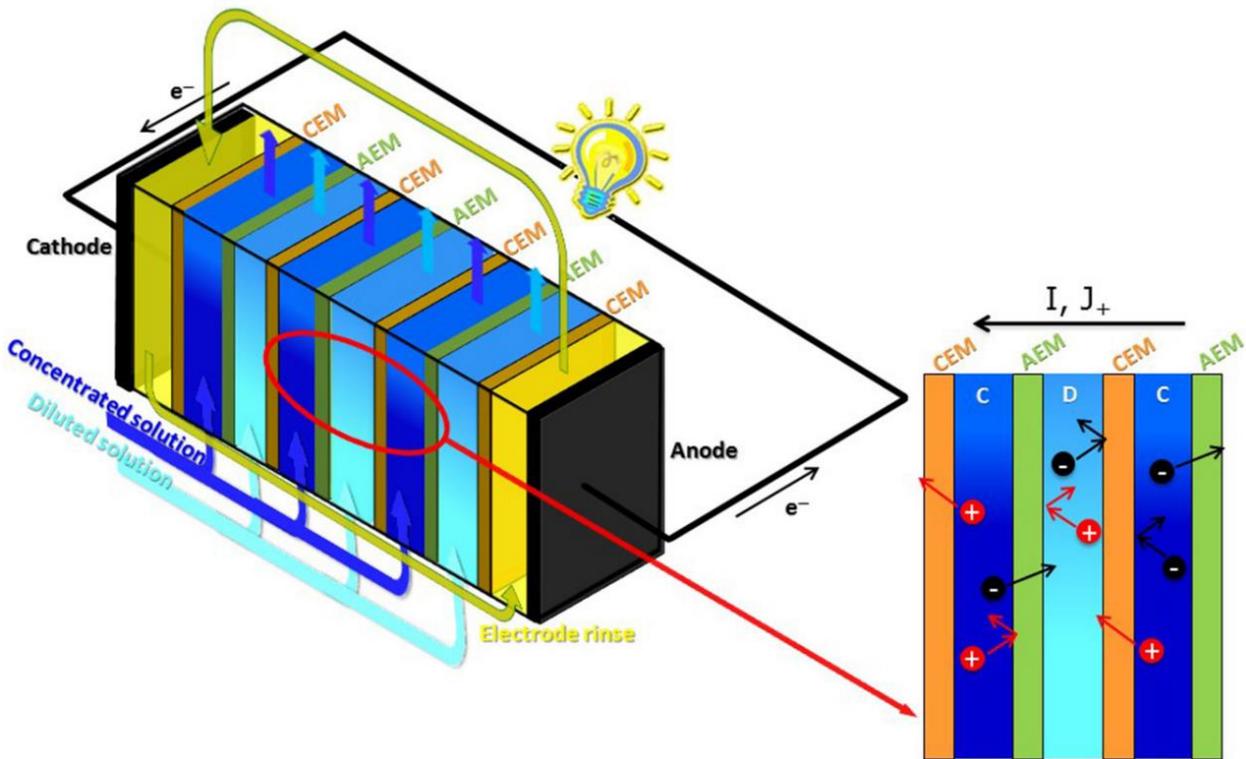


Figura 7-8. Esquema de funcionamiento de una central por electrólisis inversa (RED) [37]

### 7.3.2.1 Sistemas integrados cerrados

La mayoría de los ejemplos hasta ahora consideran sistemas abiertos. El agua de alimentación se obtiene de un ambiente abierto y el efluente (por ejemplo, agua salobre) se vierte al mar. Por otro lado, los sistemas de circuito cerrado no tienen tomas de alimentación abiertas, ni descarga externa: operan con circuitos de circuito cerrado que recirculan las corrientes de salida después de una etapa de regeneración. Hay dos tipos prácticos de sistemas de circuito cerrado: sistemas de almacenamiento de energía y unidades de calor a energía.

El almacenamiento de energía es posible con el concepto de Forgacs (ciclo ED-RED para almacenar energía eléctrica temporal en gradientes de salinidad) y algunos grupos investigaron esta técnica recientemente. El almacenamiento de energía eléctrica en agua salada y agua dulce hace uso de la densidad de energía relativamente alta de esta técnica en comparación con la energía hidroeléctrica (similar o un orden de magnitud mayor que la de la energía hidroeléctrica), al tiempo que ofrece una alternativa segura y ecológica a las baterías tradicionales.

Otra opción interesante es la generación de energía eléctrica a partir del calor residual. Este concepto utiliza una pila RED con circuito cerrado para la generación de energía y un paso de regeneración impulsado térmicamente para restaurar el gradiente de salinidad inicial de las soluciones de alimentación. Esta sal es volátil y se puede eliminar calentando en el regenerador.

### 7.3.2.2 Sistemas híbridos

Los electrodos de una pila RED se pueden utilizar para diferentes reacciones químicas. Sin embargo, la mayoría de los investigadores consideraron la generación de reacciones de evolución de gas de  $H_2$  y  $O_2$  o  $Cl_2$  como no deseado porque es peligroso y consume energía. Sin embargo, la vieja idea de hacer hidrógeno con la ayuda de RED fue patentada dos veces: por Seale (2006) y por Logan y col. (2014).

### 7.3.2.3 Nano sistemas

Uno de los desafíos en la ampliación del proceso RED es el suministro de agua de alimentación a la chimenea. El contenido de energía de las soluciones salinas típicamente adoptadas es muy bajo en comparación con los "combustibles" convencionales como la gasolina y la consecuencia es una producción de energía neta relativamente baja. Además, las pilas más grandes necesitan mayores cantidades de "combustible" de gradiente de salinidad y, por lo tanto, los compartimentos de agua de alimentación deben ampliarse, lo que da como resultado una mayor resistencia óhmica.

Sin embargo, reducir el proceso RED da como resultado una mayor densidad de potencia. En algunos artículos se utilizan electrodos grandes de  $Ag/AgCl$ , pero la densidad de potencia se calcula mediante la sección transversal del nanocanal de interconexión. Dichos sistemas se conocen como células de concentración, en el que la mayor parte de la fuerza impulsora se genera en los electrodos. En consecuencia, el área del electrodo es un mejor parámetro para escalar la potencia generada en estos casos.

Aunque los sistemas nano RED son difíciles de escalar a plantas de energía reales en su arquitectura actual, son muy interesantes desde un punto de vista científico. El uso de la nanotecnología no solo se refleja en el tamaño del canal de alimentación, sino también en el uso de material nanoporoso cargado (inorgánico) en lugar de membranas poliméricas. Algunos ejemplos son los estudios de nanocanales mejorados por deslizamiento y nanocanales de nitrato de boro. Algunos autores sugieren una aplicación directa de un sistema nano RED como fuente de energía en un sistema lab-on-a-chip; otros piensan en conectar muchos de estos sistemas a unidades que pueden usarse como bloques de construcción para sistemas más grandes.

Por otro lado, cabe destacar que en RED se utilizan dos tipos de IEM: membranas de intercambio catiónico (CEM) y membranas de intercambio aniónico (AEM). Ambos tipos de membranas (CEM y AEM) tienen versiones homogéneas y heterogéneas.

Las membranas homogéneas consisten en una estructura polimérica donde los grupos cargados se unen con enlaces químicos. En el caso de las CEM, los grupos sulfonato  $-SO_3^-$  se utilizan comúnmente, es decir, el anión del ácido sulfónico fuerte. La carga de estos grupos fijos negativos se equilibra mediante contraiones móviles (es decir, iones con una carga opuesta a las cargas fijas IEM). En el funcionamiento común de RED, los contraiones son predominantemente iones de sodio ( $Na^+$ ). Entonces  $Na^+$  Los iones se hidratan con aproximadamente seis moléculas de agua y cuando la membrana se humedece, hay al menos dos fases presentes: una fase de polímero y una fase de gel que contiene las cargas fijas y los contraiones. En la fase de gel, los iones negativos son excluidos en gran medida por las cargas fijas negativas, que se denomina Exclusión de Donnan. Por inserción de grupos metileno (DCH<sub>2</sub>D) entre el grupo funcional iónico y la columna vertebral, el ion está más libre en solución, lo que resulta en una menor resistencia de la membrana.

En el caso de los AEM, ocurren fenómenos similares, pero ahora con un grupo fijo cargado positivamente (por ejemplo, amonio cuaternario). Los contraiones negativos equilibran la carga de estos grupos cargados. En conclusión, los CEM contienen cargas negativas fijas e iones positivos libres (cationes) y AEM viceversa. El

término "intercambio" en el nombre se deriva de las resinas de intercambio iónico donde los iones libres pueden ser reemplazados (intercambiados) por otros iones. Un CEM solo es permeable a los cationes; estos pueden entrar en la membrana por un lado mientras que otros cationes salen de la membrana por el otro lado, de hecho, también es un proceso de intercambio.

A diferencia de una membrana homogénea, una membrana heterogénea consta de dos compuestos químicos: una resina de intercambio iónico y una matriz sólida, a menudo un polímero termoplástico. En las membranas homogéneas, los grupos de intercambio se unen químicamente a una estructura polimérica, mientras que en las membranas heterogéneas el material de intercambio iónico se mezcla con la matriz polimérica sin enlaces químicos entre ellos. Las membranas heterogéneas son robustas, fuertes y fáciles de preparar. Sin embargo, son bastante gruesos y presentan una alta resistencia de superficie. Por tanto, su aplicación en RED suele estar restringida a las membranas exteriores, blindando los electrodos. Por el contrario, las membranas homogéneas se han diseñado tan delgadas como 30  $\mu\text{m}$ , aumentando así la densidad de potencia obtenible.

En la literatura más antigua, las "membranas homogéneas" se consideraban literalmente homogéneas, es decir, que contenían sólo una fase de gel. Una aproximación más moderna es el modelo de dos fases: a nivel micro, los IEM son bastante heterogéneos porque hay regiones separadas con polímero y gel y estas dos fases no se mezclan. Además, se encuentra que a menudo hay una tercera fase acuosa con sal disuelta como conexión entre las partículas de la fase de gel.

#### 7.3.2.4 Membranas selectivas monovalentes

Las aguas naturales contienen iones monovalentes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , etc.) así como iones bivalentes ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{ASIQUE 2 4}$ ). Se observa experimentalmente que el magnesio y los iones de calcio tienen una influencia negativa sobre la potencia generada en RED, con explicaciones sugeridas que incluyen baja movilidad debido al gran radio de iones, formación de pares de iones con iones fijos, quelación con los grupos circundantes y transporte de regreso (cuesta arriba).

Para evitar el transporte (cuesta arriba) de iones multivalentes, se pueden aplicar membranas selectivas monovalentes. Existen dos mecanismos diferentes para hacer que un IEM sea monovalente selectivo: La primera es cubrir la membrana con (una capa fina de) material altamente reticulado. En este caso, se excluye el tamaño de los iones bivalentes grandes. El otro método consiste en aplicar una capa delgada de un material de intercambio iónico de carga opuesta.

#### 7.3.2.5 Membranas exteriores especiales

Las membranas externas están en contacto con la solución de enjuague de electrodos (ERS) y, a veces, en contacto directo con los electrodos. Dependiendo del electrolito, deben ser resistentes a pH bajo o alto, cloro e hipoclorito. Debido a que solo hay dos membranas externas en una pila, el precio y las propiedades eléctricas son factores menos importantes. Para evitar el paso de especies químicas presentes en el ERS a los otros compartimentos de la pila, generalmente se instalan membranas con alta selectividad como membranas externas.

#### 7.3.2.6 Membranas perfiladas u onduladas

Las membranas están separadas por espaciadores, redes de material polimérico. Estos espaciadores forman el esqueleto de soporte de los compartimentos de agua de alimentación. Una ventaja de estos espaciadores es que promueven el proceso de mezcla dentro del compartimento, lo que reduce la polarización de la concentración (CP). Los efectos negativos del uso de espaciadores de red son el aumento de la resistencia eléctrica de la pila y las gotas de presión en los compartimentos. Además, los espaciadores de red proporcionan un buen sustrato para depositar material y crecimiento de microorganismos ('ensuciamiento'). Al hacer un espaciador de material conductor de iones, se reportan mejores propiedades eléctricas. Un paso más puede ser crear perfiles espaciadores mediante una estructura en la superficie de la membrana (perfilado) o incrustando este procedimiento en el proceso de fabricación de la membrana (corrugado). El perfilado permite más libertad en la construcción y optimización de los canales de flujo que los espaciadores. Con polímeros termoplásticos, esto se puede hacer después de la fabricación, pero con materiales reticulados, se debe realizar el perfilado durante la producción de la membrana.

## 7.4 Principales proyectos de energía azul

### 7.4.1 Proyectos con proceso PRO

#### 7.4.1.1 Planta de Statkraft

El primer prototipo del mundo del proceso PRO fue instalado en Noruega, en el año 2009, por la empresa Statkraft, con la finalidad de verificar la viabilidad técnica y económica del proceso, con vistas a una comercialización a gran escala para el año 2015.

La planta fue diseñada para una potencia teórica de 10 kW, admitiendo que se podía alcanzar una eficacia de 5 W/m<sup>2</sup> de membrana a lo largo de su vida operativa. Se utilizaron inicialmente membranas convencionales de acetato de celulosa, adaptadas al proceso PRO, en módulos de 8 pulgadas y arrollamiento en espiral, con una superficie total de membranas de 2.000 m<sup>2</sup>. Alimentación continua de agua de mar, con caudal de 20 l/s, y de agua dulce, con caudal de 10 l/s, ambas sometidas a un pretratamiento de tamizado y posterior ultrafiltración para prevenir el ensuciamiento de las membranas. La presión transmembrana establecida fue de 12 bars.

El prototipo fue equipado con una turbina Pelton acoplada a un generador eléctrico, así como de dispositivos de recuperación de energía, semejantes a los utilizados en los procesos de ósmosis inversa para desalinización de agua de mar, pero adaptados a la baja presión de operación del proceso PRO.

Durante la primera fase de operación de la planta, los resultados obtenidos se alejaron de los previstos en el diseño, sobre todo por el comportamiento y eficacia de las membranas utilizadas, alcanzando potencias específicas del orden de 1W/m<sup>2</sup> y potencia global real de unos 2 kW, pero después de un proceso de optimización de membranas se alcanzó una eficacia 10 veces superior y abrió grandes expectativas para un nuevo proyecto internacional de una potencia de 1-2 MW en 2015. Sin embargo, el análisis económico del proceso implicó un retraso en el proyecto de ampliación a escala comercial, a la espera del desarrollo de membranas más adecuadas para hacer completamente competitivo el proceso frente a otras tecnologías existentes para la producción de energía eléctrica

#### 7.4.1.2 Proyecto SeaHERO (Corea)

El proyecto SeaHERO en Gi-Jang de Busan, Corea, es un sistema de ósmosis inversa de agua de mar híbrido de energía renovable que se encuentra actualmente en la etapa de prueba. El objetivo de esta instalación es tratar 10 MIGD de agua de mar por día, consumir menos de 4 kWh/m<sup>3</sup> y reducir las incrustaciones en un 50%. La instalación ósmosis inversa de agua de mar se combinará con PRO para reducir el consumo de energía y los posibles impactos ambientales del rechazo de salmuera. El tren de tratamiento PRO propuesto consta de tres unidades que recuperan la energía de la mezcla de aguas residuales tratadas y agua de mar, aguas residuales tratadas y salmuera ósmosis inversa de agua de mar, y aguas residuales tratadas y salmuera de ósmosis inversa de agua de mar más densa. La producción de energía prevista de las tres unidades es de 1,5, 3,0 y 4,2 MJ por metro cúbico de agua permeada [37].

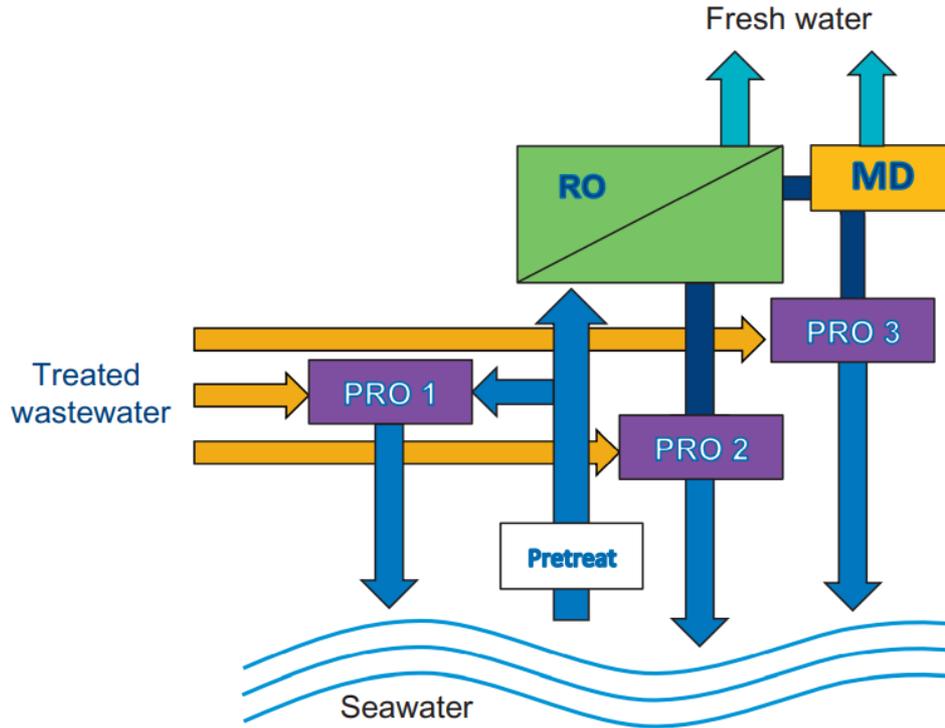


Figura 7-9. Esquema del proyecto SeaHERO en Corea [37]

#### 7.4.1.3 Proyecto Mega-Ton (Japón)

El proyecto de sistema de agua de Mega-Ton en Japón también es un sistema ósmosis inversa de agua de mar híbrido de energía renovable que se encuentra actualmente en la etapa de puesta en servicio. Esta instalación será la instalación ósmosis inversa de agua de mar más grande del mundo, tratando 1.000.000 m<sup>3</sup>/día de agua de.

El objetivo de esta instalación es ser una instalación de desalinización y recuperación integrada y sostenible que, en comparación con las plantas de tratamiento ósmosis inversa de agua de mar existentes, pueda reducir el consumo de energía entre un 20% y un 30% y tener un impacto ambiental reducido.

De manera similar al proyecto HERO, la instalación ósmosis inversa de agua de mar se combinará con PRO para reducir el consumo de energía y los posibles impactos ambientales del rechazo de salmuera. El sistema PRO propuesto utilizará 100.000 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales tratadas y salmuera ósmosis inversa de agua de mar para generar energía y prepresurizar el agua de mar cruda que ingresa a la planta ósmosis inversa de agua de mar. El proyecto Mega-Ton se ha asociado con Toyobo Co.Ltd y Kyowakiden Industry Co., Ltd para el suministro de membranas y la puesta a prueba, respectivamente. La planta prototipo utiliza ocho, 10 pulgadas. membranas CTA de fibra hueca, capaces de producir 13,3 W/m<sup>2</sup> y genera de 4 a 8 kW de potencia [37].

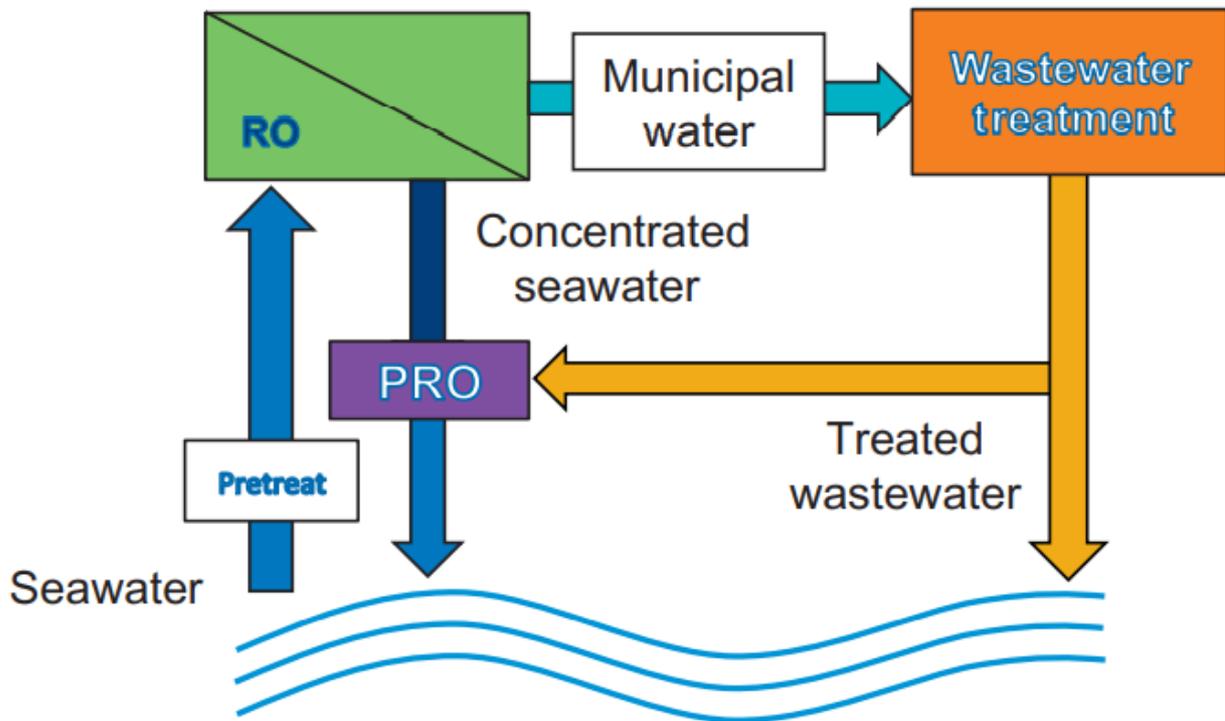


Figura 7-10. Esquema del proyecto Mega-Ton en Japón [37]

#### 7.4.2 Prototipo del proceso RED

Si bien la mayoría de la información aportada procede de estudios teóricos y experimentales a escala de laboratorio, en estos últimos años se ha tratado de verificar el comportamiento de este tipo de proceso en condiciones reales, a través del diseño, construcción y puesta en operación de plantas piloto equipada con sistemas de medida y control equivalente a lo que sería una planta comercial.

Entre las plantas piloto instaladas en los últimos años, cabe citar la instalada en Sicilia, Italia, compuesta por 125 pares de celdas, con superficie total de membranas de 50 m<sup>2</sup>. Se alimenta con una salmuera concentrada (aguas madres de un proceso de cristalización de sal en unas salinas) con una concentración de 4-5 molar de ClNa equivalente, y agua salobre con concentración de 0,03 molar de ClNa equivalente, procedente de un pozo cercano. Durante cinco meses de operación la planta suministró una potencia de unos 40 vatios (1,6 vatios/m<sup>2</sup> de par de celdas) y no se destacaron problemas importantes de comportamiento por ensuciamiento de las membranas.

Otra planta piloto con proceso RED está instalada en Holanda. Se alimenta con agua de mar (28 g sales/litro) y agua de un lago (0,2- 0,5 g sales/litro), con caudales de diseño de 220 m<sup>3</sup>/h para cada tipo de agua, y puede suministrar una potencia global de 50 KW.



## 8 CONCLUSIONES

La energía oceánica tiene un potencial de desempeñar un importante papel en el futuro del sistema energético debido a que su potencial teórico se encuentra en más de 100.000 TWh/año. A pesar de ello, la capacidad de energía oceánica instalada en 2020 en todo el mundo es de 535 MW, una cifra insignificante en comparación con la capacidad global instalada de todas las energías renovables de 2.600 GW.

En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones y pruebas que han permitido el desarrollo de diferentes tecnologías y la demostración de la factibilidad del aprovechamiento de la energía oceánica para la generación de electricidad. A lo largo del siglo XXI se ha iniciado la integración de algunos proyectos de energía oceánica con la red eléctrica, a pesar de que se encuentran en etapas muy iniciales de desarrollo. No obstante, este hecho supone un avance significativo para cualquier tipo de energía no convencional.

La energía de las mareas y las olas son actualmente los tipos más avanzados de tecnologías de energía oceánica, pero aún no han alcanzado el nivel de confiabilidad, viabilidad y capacidad de supervivencia de otras tecnologías renovables maduras para convertirse en una fuente de energía viable, teniendo una capacidad instalada de 521,50 MW en todo el mundo. Las principales centrales de energía mareomotriz se encuentran ubicadas en Francia y Corea del Sur, las cuales son de tipo embalse y utilizan turbinas de tipo Bulbo.

La energía undimotriz es aquella que cuenta con mayores dispositivos de extracción de energía de las olas, por lo que es una de las más prometedoras. A fecha de 2020, la capacidad instalada es de 2,31 MW entre diferentes tecnologías de columna de agua oscilante, movimientos oscilantes y desbordamiento.

Técnicamente es factible extraer energía de las corrientes marinas, siendo la segunda tecnología oceánica más desarrollada en términos de energía, alcanzando una capacidad instalada de 10,60 MW. En la actualidad, los principales proyectos liderados a partir de corrientes marinas pueden superar los 1 MW de potencia mediante la utilización de turbinas de flujo axial, las cuales permiten obtener un mejor rendimiento.

Con respecto a las plantas de energía térmica oceánica, merece ser destacado que son viables técnicamente debido a las grandes ventajas que presentan. Sin embargo, el bajo rendimiento final de la planta de 3,4% para cualquiera de los ciclos existentes (abierto, cerrado o híbrido), hace que sea necesario continuar con las actividades investigativas para incrementar la productividad de esta tecnología. En Hawai se están llevando a cabo las principales actividades investigativas y experimentales, con centrales que podrían llegar a superar los 210 kW de potencia.

A pesar del gran potencial de la energía osmótica, se trata de la fuente menos desarrollada al ser sus técnicas menos investigadas, no superando los 0,05 MW de capacidad instalada. No obstante, se siguen desarrollando mejoras en los dos principales sistemas de extracción (Ósmosis por Presión Retardada y Electrólisis Inversa) a través de nuevas membranas de mayor capacidad osmótica de separación. Entre sus grandes ventajas se encuentra la posibilidad de causar menor impacto a través de óptimos diseños de las infraestructuras de centrales de generación de energía eléctrica.

Tabla 8-1. Resumen de la capacidad total instalada de energía oceánica a escala internacional en 2020

Tipo de energía	Capacidad instalada
Mareomotriz	521,50 MW
Undimotriz	2,31 MW
Corrientes marinas	10,60 MW
Térmica	0,23 MW
Osmótica	0,05 MW

Aunque las investigaciones y desarrollos llevados hasta el momento han ido por buen cauce, el ritmo de crecimiento de la demanda energética es superior al ritmo de crecimiento de las tecnologías oceánicas, lo que hace necesario que sea necesario contar con nuevas políticas que impulsen las actividades investigativas y de desarrollo para minimizar los costos iniciales para su implementación en la red eléctrica.

# REFERENCIAS

---

- [1] J. R. Q. G. y. L. E. Q. González, «SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ,» *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 16, nº 1, pp. 39-45, 2016.
- [2] EREC, «OCEAN ENERGY,» de *Renewable Energy in Europe: Markets, Trends and Technologies*, Earthscan, 2010, pp. 191-207.
- [3] S. N. y. P. B. Vikas Khare, «FUNDAMENTAL AND PRINCIPLES OF THE OCEAN ENERGY SYSTEM,» de *Ocean Energy Modeling and Simulation with Big Data*, Elsevier Inc, 2020, pp. 1-48.
- [4] «International Energy Agency,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/>.
- [5] «Ocean Energy Europe,» [En línea]. Available: <https://www.oceanenergy-europe.eu/>.
- [6] Y. Z. W. S. J. L. Youngxing Zhang, «OCEAN WAVE ENERGY CONVERTERS: TECNICAL PRINCIPLE, DEVICE REALIZATION AND PERFORMANCE EVALUATION,» *Renewable and sustainable Energy Reviews*, 2021.
- [7] IRENA, «LAS ENERGIAS RENOVABLES MARINAS IMPULSAN LA ECONOMIA AZUL,» 2020.
- [8] A. U. Davide Magagna, «OCEAN ENERGY DEVELOPMENT IN EUROPE:CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES,» *International Journal of Marine Energy*, nº 11, pp. 84-104, 2015.
- [9] E. Chaparro, *GENERACIÓN DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ EN ARGENTINA*, Tesis de Grado en Ingeniería Industrial, 2010.
- [10] F. B. F. a. R. A. O'Rourke, «TIDAL ENERGY UPDATE 2009,» *Applied Energy*, vol. 87, nº 2, pp. 398-409, 2010.
- [11] J. G. J. C. C. s. W. Z. L. C. X. Z. Yongjun Don, «DEVELOPMENT OF A 300 KW HORIZONTAL-AXIS TIDAL STREAM ENERGY CONVERSION SYSTEM WITH ADAPTIVE VARIABLE-PITCH TURBINE AND DIRECT-DRIVE PMSG,» *Energy*, 2021.
- [12] P. J. Hernández, *DISEÑO DE UNA TURBINA PARA UNA CENTRAL DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ*, Trabajo Fin de Grado, 2020.
- [13] S. N. y. P. B. Viks Khare, «TYDAL ENERGY,» de *Ocean Energy Modeling and Simulation with Big Data*, Elsevier Inc, 2020, pp. 47-81.
- [14] W. H. e. a. Cho sun, «EMPIRICAL MODEL FOR DARRIEUS-TYPE TIDAL CURRENT TURBINE INDUCED SEABED SCOUR,» *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 478-490, 2018.
- [15] e. a. Saif ed-Din Fertahi, «CFD PERFORMANCE ENHANCEMENT OF A LOW CUT-IN SPEED CURRENT VERTICAL TIDAL TURBINA THROUGH THE NESTED HYBRIDIZATION OF SAVONIUS AND DARRIEUS,» *Energy conversion and Management*, vol. 169, pp. 266-278, 2018.

- [16] C. S. a. A. Priyam, «A REVIEW ON TIDAL ENERGY TECHNOLOGIES,» *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [17] M. A. Ormaza, «LA ENERGIA RENOVABLE PROCEDENTE DE LAS OLAS,» *Ikastorratza*, nº 8, pp. 1-14, 2012.
- [18] R. y. V. R. D. Calero Mendoza, «ENERGIA UNDIMOTRIZ, ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCION DE ENERGÍA ELECTRICA EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA,» *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, vol. 1, nº 2, 2013.
- [19] A. Babarit, «WORKING PRINCIPLES AND TECHNOLOGIES OF WAVE ENERGY CONVERSION,» de *Ocean Wave Energy Conversion*, 2017, pp. 99-151.
- [20] A. Vieira da Rosa, «OCEAN ENGINES,» de *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, 2009, pp. 799-827.
- [21] S. P. N. a. M. R. Hashemi, «WAVE ENERGY,» de *Fundamentals Of Ocean Renewable Energy. Generating Electricity From The Sea*, Elsevier, 2018, pp. 107-140.
- [22] P. L. Fraenkel, «POWER FROM MARINE CURRENTS,» *Journal of Power and Energy*, vol. 16, nº 1, pp. 1-14, 2002.
- [23] Corrientes Marinas, «<https://concepto.de/corrientes-marinas/>,» [En línea].
- [24] L. M. A.S. Bahaj, «FUNDAMENTALS APPLICABLE TO THE UTILISATION OF MARINE CURRENT TURBINES FOR ENERGY PRODUCTION,» *Renewable Energy*, vol. 28, nº 14, pp. 2205-2211, 2003.
- [25] P. Breeze, «MARINE POWER GENERATION TECHNOLOGIES,» de *Power Generation Technologies*, 2019, pp. 323-349.
- [26] L. R. N. Rivas, «EL APROVECHAMIENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES MARINAS COMO OPCIÓN TECNOLÓGICA DE FUTURO,» *Fundación INNOVAMAR*, pp. 99-108.
- [27] R. E. Valdés, *MICROTURBINA PARA APROVECHAMIENTO ELÉCTRICO EN CORRIENTES DE BAJA VELOCIDAD*, 2019.
- [28] Y. Y. a. S. Guohui Wang, «OCEAN THERMAL ENERGY APPLICATION TECHNOLOGIES FOR UNMANNED UNDERWATER VEHICLES: A COMPREHENSIVE REVIEW,» *Applied Energy*, vol. 278, 2020.
- [29] M. Bernal Francisco, *ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UNA PLANTA OTEC Y SUS USOS*, 2016.
- [30] CEMIE-OCEÁNO, *CONVERSIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA OCEÁNICA (OTEC). ESTADO DEL ARTE*, 2017.
- [31] R. G. Alba, *ESTUDIO SOBRE LA IMPLANTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MAREMOTÉRMICA*, 2017.
- [32] Y. L. X. W. y. S. G. Wei Zhanga, «REVIEW OF THE APPLIED MECHANICAL PROBLEMS IN OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION,» *Renewable and Suitable Energy Reviews*, vol. 93, pp.

231-244, 2018.

- [33] «OTHERS FORMS OF OCEAN ENERGY,» de *Fundamentals of Ocean Renewable Energy*, p. 2018.
- [34] P. P. D. A. C. a. M. K. P. Mukesh Sharma, «CLEAN ENERGY FROM SALINITY GRADIENTS USING PRESSURE RETARDED OSMOSIS AND REVERSE ELECTRODIALYSIS: A REVIEW,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, 2021.
- [35] B. A. H. Sharqawy, «TEMPERATURE EFFECTS ON SALINITY GRADIENT ENERGY HARVESTING AND UTILIZED MEMBRANE PROPERTIES-EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, 2021.
- [36] E. Andrade, *DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA DISEÑAR UNA PLANTA DE ENERGÍA OSMÓTICA*, 2015.
- [37] SUSTAINABLE ENERGY FROM SALINITY GRADIENTS, 2016.
- [38] I. Fernández-Ladreda, «ENERGÍA POTENCIAL OSMÓTICA: UN BUEN SUSTITUTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES,» 2015.

