

# ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES

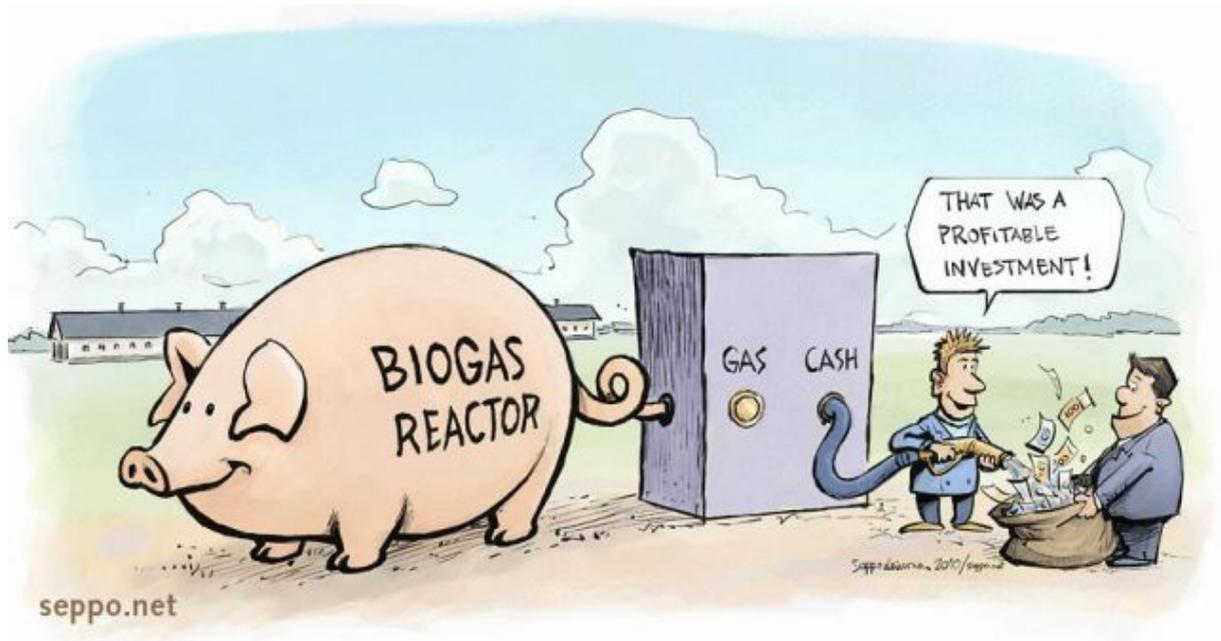
Apuntes de la Asignatura

**Jesús Mirapeix Serrano**

Grupo de Ingeniería Fotónica  
Universidad de Cantabria







Cartoon: Seppo Leinonen, www.seppo.net. Permission granted by the author.

## Energía y Telecomunicaciones

Mirapeix Serrano, Jesús

© 2020 Jesús Mirapeix Serrano. Esta obra está disponible bajo licencia Creative Commons.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Universidad de Cantabria

39005 Santander

# ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES: ENERGÍAS RENOVABLES

## *Otras Energías Renovables*

**A**l margen de las energías solar y eólica, hay otras energías renovables cuya relevancia en la actualidad hace que sea interesante el revisar brevemente sus conceptos básicos. La más relevante de estas tecnologías es probablemente la hidráulica ya que, aunque no puede considerarse una renovable “moderna”, ofrece unas cifras muy notables en cuanto a generación eléctrica a nivel mundial. La biomasa, la energía geotérmica y las derivadas del mar serán también brevemente presentadas.

Los principales objetivos de este capítulo son, por tanto:

The main goals of this chapter on “other” RE are: To understand the importance of hydro-power, as well as its fundamentals To become familiar with the fundamentals of biomass energy To become familiar with the fundamentals of geothermal energy To become familiar with the different technologies derived from ocean energy and their corresponding working principles

**Comprender** la importancia de la energía hidráulica, así como sus fundamentos

**Familiarizarse** con los fundamentos de la biomasa

**Familiarizarse** con los fundamentos de la energía geotérmica

**Familiarizarse** con las diferentes tecnologías renovables derivadas del mar, así como sus principios de funcionamiento

# ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES: ENERGÍAS RENOVABLES

## *Estructura del Curso*

**E**ste curso se ha dividido en 4 partes dedicadas a una introducción a las energías renovables (y conceptos asociados), energía solar (incluyendo energía solar térmica y fotovoltaica) y energía eólica. El último capítulo está dedicado a revisar brevemente los conceptos fundamentales de otras energías renovables, como la hidráulica, biomasa, energías derivadas del mar, etc.

### ▸ **Capítulo 1: Introducción a las Energías Renovables**

El objetivo es que el estudiante se familiarice con los conceptos básicos sobre Energías Renovables. Esto incluye el comprender las razones que motivan el nacimiento y desarrollo de estas tecnologías, con un especial énfasis en el cambio climático. Resulta fundamental también conocer el panorama actual de estas tecnologías a nivel global, europeo y en España. ¿Qué país es líder en energía fotovoltaica o eólica? ¿Cómo han evolucionado las energías renovables en China en los últimos años? Además, se prestará especial atención a las tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica, así como a la relación existente entre energías renovables y telecomunicaciones.

### ▸ **Capítulo 2: Energía Solar**

La energía solar puede ser dividida entre térmica y fotovoltaica. La energía solar térmica será brevemente revisada, mencionándose tanto instalaciones solares térmicas convencionales (y su diseño), como plantas de concentración o CSP (Concentrating Solar Power), donde la energía del Sol es transformada en calor y, posteriormente, en electricidad. La energía solar fotovoltaica (FV) constituirá el principal tema de este curso, dada su relevancia para los ingenieros de telecomunicación. Los fundamentos y aspectos prácticos de la energía solar FV serán estudiados e instalaciones aisladas y conectadas a red serán analizadas.

### ▸ **Capítulo 3: Energía Eólica**

La energía eólica es una tecnología madura, con varios parques instalados en España. Aunque probablemente desde un punto de vista distinto (comunicaciones y sensores), esta tecnología está también asociada con las telecomunicaciones. Los aspectos fundamentales relacionados con los aerogeneradores, así como la estructura de una turbina moderna y las tendencias actuales en el sector serán analizadas en este capítulo.

### ▸ **Capítulo 4: Otras Energías Renovables**

Las energías hidráulica, de la biomasa, geotérmica o derivadas de los mares/oceános serán brevemente analizadas en este capítulo. Se estudiará la relevancia (a nivel mundial) de la producción hidro-eléctrica y los fundamentos básicos de las energías geotérmica y de la biomasa. Finalmente, se comentarán algunos aspectos básicos relativos a las energías derivadas del mar.

# Índice

<b>Índice</b>	<b>I</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>III</b>
<b>Símbolos</b>	<b>IV</b>
<b>Unidades</b>	<b>v</b>
<b>Glosario</b>	<b>VI</b>
<b>4. Otras Energías Renovables</b>	<b>1</b>
4.1. Otras Energías Renovables: Introducción . . . . .	1
4.2. Energía Hidráulica . . . . .	1
4.2.1. Introducción a la Energía Hidráulica . . . . .	1
4.2.2. Energía Hidráulica: Situación Actual . . . . .	2
4.2.3. Energía Hidráulica: Tipos de Centrales . . . . .	5
4.2.4. Energía Hidráulica: Otros Datos de Interés . . . . .	6
4.3. Energías derivadas del Mar . . . . .	7
4.3.1. Energía Mareomotriz ( <i>Tidal Energy/Power</i> ) . . . . .	9
4.3.2. Energía Undimotriz ( <i>Wave Energy/Power</i> ) . . . . .	14
4.3.3. Wave activated bodies . . . . .	15
4.3.4. <i>Overtopping Devices</i> . . . . .	17
4.3.5. <i>Oscillating Water Columns</i> . . . . .	18
4.3.6. Energía Maremotérmica (OTEC: <i>Ocean Thermal Energy Conversion</i> ) . . . . .	19
4.3.7. Evolución y perspectivas de las energías derivadas del mar . . . . .	21
4.3.8. <i>Levelized Cost of Energy: LCOE</i> . . . . .	22
4.3.9. EERR derivadas del Mar: Ventajas e Inconvenientes . . . . .	23
4.4. Energía Geotérmica . . . . .	24

4.4.1. Geotermia: un poco de Historia . . . . .	24
4.4.2. Tipos de centrales geotérmicas . . . . .	25
4.4.3. Energía Geotérmica en el Entorno Residencial . . . . .	26
4.4.4. Energía geotérmica: emplazamientos . . . . .	27
4.4.5. Energía Geotérmica: Impacto Ambiental . . . . .	27
4.5. Biomasa . . . . .	28
4.6. Conclusiones . . . . .	30

<b>Lista de Figuras</b>	<b>32</b>
-------------------------	-----------

# Acrónimos

<b>CSP</b>	Concentrating Solar Power
<b>GHG</b>	Green-House Gas
<b>IDAE</b>	Spanish Institute for Energy Diversification and Saving
<b>LCOE</b>	Levelized Cost of Energy
<b>OTEC</b>	Ocean Thermal Energy Conversion
<b>OWC</b>	Oscillating Water Column
<b>PM</b>	Particulate Matter
<b>PV</b>	Photovoltaics
<b>RE</b>	Renewable Energy

# Símbolos

<b>F</b>	Fuerza (gravitacional)
<b>g</b>	Constante Gravitacional
<b>h</b>	Altura (en saltos de agua, energía hidráulica)
<b>m</b>	masa (de agua) (energía hidráulica)
<b>p</b>	Potencia generada por el movimiento del agua (energía hidráulica)
<b>T</b>	Periodo
<b><math>\rho</math></b>	Densidad del Agua

# Unidades

<b>°C</b>	Celsius (temperatura)
<b>J</b>	Julio (energía)
<b>K</b>	Kelvin (temperatura)
<b><i>kg/m<sup>3</sup></i></b>	Densidad
<b><i>kg/s</i></b>	Mass Flow Rate
<b><i>m<sup>3</sup>/s</i></b>	Volume Flow Rate
<b>Mtoe</b>	Millones de Toneladas Equivalentes de Petróleo
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>ppb</b>	Partes por billón
<b>ppt</b>	Partes por trillón
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto (rotación)
<b>Wh</b>	Vatio-hora (energía)
<b>W</b>	Vatio (potencia)[capacity]

# Glosario

***Attenuating Wave Energy Converter*** este tipo de generador undimotriz, comúnmente denominado “serpiente marina” está formado por diversos segmentos. El movimiento relativo entre segmentos consecutivos (generado por las olas) es usado para generar energía eléctrica.

**Biomasa** se denomina a la materia orgánica capaz de transformar la radiación solar en energía química.

**Biomasa (Energía)** consiste en el uso de biomasa para producir calor y/o electricidad por medio de su combustión.

***Direct Activation Tidal Energy (Energía de las Mareas de Activación Directa)*** se refiere al uso de las mareas para generar electricidad por medio de turbinas normalmente dispuestas sobre el lecho marino. Este esquema es alternativo al convencional basado en el uso de represas.

**Energía Geotérmica** se basa en el uso de la energía almacenada en forma de calor (asociada a volcanes, fumarolas, etc.) bajo la superficie terrestre para aplicaciones de calefacción y/o generación de electricidad.

## **Grid Parity**

***Ocean Thermal Energy Conversion (Energía Maremotérmica)*** (OTEC) se basa en el uso de las diferentes temperaturas a las que está el agua de los océanos a diferentes profundidades para la generación de energía eléctrica.

***Overtopping Devices (Dispositivos de Desbordamiento)*** emplean la energía de las olas para generar electricidad por medio de un tanque que almacena agua con una cierta elevación sobre el nivel del mar. Ese agua derivado de las olas será conducido por un conducto de vuelta al mar, pasando en el proceso por una turbina cuya activación permitirá la generación eléctrica deseada.

***Oscillating Water Column (Columna de Agua Oscilante)*** tecnología undimotriz donde las olas impulsan el aire confinado dentro de una cámara que, a su vez, accionará una turbina para generar electricidad.

**PM (*Particulate Matter*) particles (Partículas en Suspensión)** se trata de una mezcla compleja de partículas muy pequeñas que son generadas en algunos procesos, como los motores de combustión. Una vez inhaladas, estas partículas pueden afectar al corazón y los pulmones con posibles consecuencias para la salud.

**Hidráulica de Bombeo** las centrales hidroeléctricas de bombeo se basan en el transporte de agua desde una reserva inferior a una de mayor elevación. Así, cuando se desea el agua puede ser liberada desde el embalse superior, haciéndola pasar por una turbina que permitirá la generación de electricidad. Se trata de la principal tecnología (en la actualidad) que permite el almacenamiento de energía a gran escala en la red.

**Run-of-the-River Hydro (Hidráulica con derivación del cauce de un río)** se trata de un tipo de central hidroeléctrica en la que no se considera el almacenamiento de agua y donde se desvía el cauce natural de un río para la generación de electricidad.

**Energía de las Mareas** energía renovable derivda del mar donde se usan las mareas para su transformación en otras formas de energía, principalmente en electricidad.

**Wave Activated Bodies** son el tipo de dispositivos undimotrices más común, especialmente los atenuadores (*point absorber buoys*). Su principio de funcionamiento se basa en la instalación de boyas fijadas al lecho marino. La energía cinética de las olas moverá las boyas, con lo que el uso de generadores lineales permitirá la generación de electricidad.

**Energía Undimotriz** es una forma de energía renovable derivda del mar que permite la conversión de la energía de las olas en otros tipos de energía, fundamentalmente electricidad.

# CAPÍTULO 4

## Otras Energías Renovables

### 4.1. Otras Energías Renovables: Introducción

Una vez que los fundamentos de las energías solar y eólica han sido revisados, puede ser interesante analizar brevemente el funcionamiento de otras tecnologías renovables de relevancia en la actualidad, como puede ser la biomasa, la energía geotérmica o las energías derivadas del mar, por ejemplo. En algunos de estos casos la relación con las telecomunicaciones puede parecer menos obvia, aunque se pueden plantear varios ejemplos, como sistemas de monitorización del recurso marino (olas, temperatura del océano, etc.).

En este capítulo se revisarán brevemente los fundamentos de las siguientes tecnologías renovables:

- Energía Hidráulica
- Energías derivadas del Mar
- Energía Geotérmica
- Biomasa
- Smart Grids
- Almacenamiento de Energía en la Red Eléctrica

### 4.2. Energía Hidráulica

#### 4.2.1. Introducción a la Energía Hidráulica

Con el auge y la notoriedad de las que podríamos denominar “nuevas” energías renovables, como la solar (fotovoltaica, térmica o termoeléctrica) o la eólica (aunque ambas presentan en realidad precedentes históricos antiguos), en ocasiones olvidamos que las EERR están constituidas por una amplia gama de tecnologías. En este sentido: **¿se puede considerar a la energía hidráulica una energía renovable?**

Con lo visto ya en este curso debiéramos ser capaces de contestar a esta pregunta: al comienzo de la sección de Introducción de esta parte sobre EERR se presentaron diferentes definiciones de



**Figura 4.1.** Ejemplo de planta hidroeléctrica en el curso de un río en Toba Montrose. Fuente: Altterpower. Licencia CC BY-SA 3.0. <https://bit.ly/2GaTnN>

energía renovable. ¿Se ajusta la energía hidráulica a estas definiciones? Este tipo de energía: ¿se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables?

**La respuesta es afirmativa**, ya que el ciclo del agua en nuestro planeta se puede considerar continuo, por lo que podemos entender que se trata de una fuente virtualmente inagotable.

La energía hidráulica se basa en capturar la **energía cinética del agua**, convirtiéndola primero en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica por medio de un generador<sup>1</sup>.

#### 4.2.2. Energía Hidráulica: Situación Actual

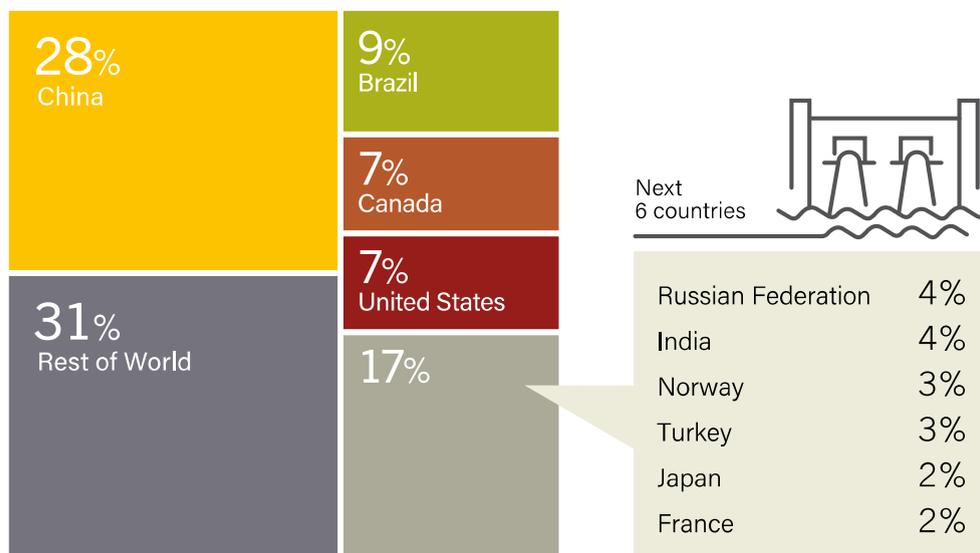
¿Cuáles son los principales actores a nivel mundial en el uso de energía hidráulica? La respuesta la vemos en la Figura 4.2. Los principales países a nivel mundial en energía hidráulica (hydropower) son China, Brasil, USA, Canadá y Rusia. El total de capacidad instalada en estos países se estima que asciende al **55%** del total de la energía hidráulica mundial.

Un aspecto a valorar en este contexto reside en que la energía hidráulica y las centrales hidroeléctricas presentan ya una notable madurez en comparación con otras tecnologías renovables más recientes, como pudiera ser la energía solar fotovoltaica o termoeléctrica. Este hecho justifica en parte los datos presentados en la Figura 4.3, donde puede apreciarse como las inversiones (potencia añadida recientemente) es modesta en este caso comparada con otras tecnologías. Por otro lado, esta madurez implica que las cifras de generación eléctrica de este tecnología (ver Figura 4.4) son muy significativas. Puede apreciarse como la capacidad renovable total a finales del 2017 era de 2195 GW, **con la energía hidráulica contribuyendo con 1081 GW, esto, es, casi el 50%**.

El hecho de que se trata de una tecnología madura no implica que las centrales hidroeléctricas no se enfrenten a retos y necesidades de actualización. En primer lugar, las sequías que afectan a

<sup>1</sup>La conversión a energía eléctrica constituye el ejemplo típico, ya que también se ha empleado la energía mecánica generada por ejemplo por el flujo de un río en molinos para moler cereales. Los primeros datos que se disponen sobre molinos de agua se deben a Vitrubio (siglo I), que describe el funcionamiento del molino de rueda vertical usado en Persia y en las riberas del Mediterraneo oriental (siglo V a.C.) (Fuente: <https://bit.ly/2JhH11t>)

Hydropower Global Capacity, Shares of Top 10 Countries and Rest of World, 2018



**Figura 4.2.** Potencia hidráulica instalada (2018). Fuente: Renewables 2019 Global Status Report (REN21). <http://bit.ly/2rTdoY3>

diferentes zonas del planeta han afectado negativamente a la generación hidroeléctrica, por ejemplo en zonas como el continente americano o el sudeste asiático<sup>1</sup>.

La situación en España refleja precisamente esta situación, tal y como se ha discutido en el primer tema (“Introducción”), con una generación eléctrica renovable fuertemente dependiente del régimen de precipitaciones anual. En el apartado de potencia nominal disponible, cabe destacar por ejemplo la puesta en servicio en el año 2015 de la central hidroeléctrica de bombeo puro de La Muela II<sup>2</sup>.

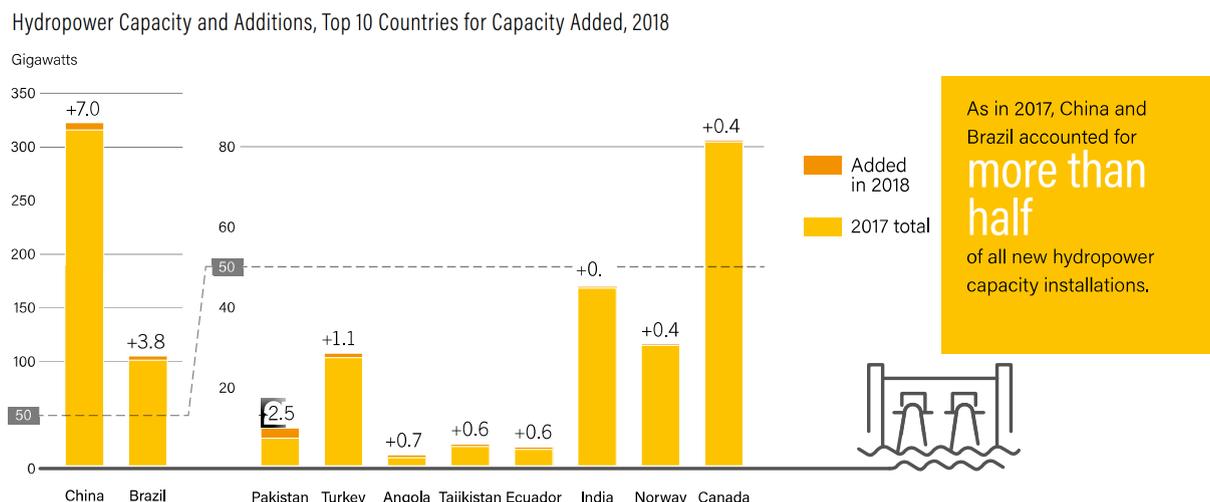
Tanto los posibles efectos del cambio climático como el aumento de relevancia de las renovables fluctuantes (eólica, solar, etc.) son factores que fuerzan una adaptación de las centrales hidroeléctricas. Las nuevas instalaciones y la expansión de algunas ya existentes están dirigidas a conseguir una mayor eficiencia y flexibilidad, con especial énfasis en la hidráulica de bombeo, por su relevancia como elemento de almacenamiento de energía.

**Cuestión 2.1: ¿Qué es la hidráulica de bombeo? (300 XP)**

Consulta el vídeo de Iberdrola sobre las centrales La Muela I y II y haz un breve resumen sobre los aspectos más relevantes comentados. ¿Cuáles son los principales retos técnicos a los que se enfrentaron los ingenieros en su construcción?

<sup>1</sup>En la Introducción de este parte del curso se ha hecho referencia a la disminución de la aportación hidráulica a la generación eléctrica en el último año, lo que ha llevado a un aumento del uso del carbón y, con ello, de las emisiones asociadas.

<sup>2</sup>Situada en el margen del Júcar, en Cortes de Pallás (Valencia), con una potencia nominal de 878MW (en el momento de su inauguración, en 2013, figuraba como la mayor central hidroeléctrica de Europa. Vídeo de Iberdrola sobre La Muela I y II: <https://youtu.be/1cq3Q1128bA>.



**Figura 4.3.** Potencia hidráulica instalada y añadida (2018). Top 10 de países según la potencia instalada en 2018. Fuente: Renewables 2019 Global Status Report (REN21). <http://bit.ly/2rTdoY3>

### RENEWABLE ENERGY INDICATORS 2018

		2017	2018
<b>INVESTMENT</b>			
New investment (annual) in renewable power and fuels <sup>1</sup>	billion USD	326	<b>289</b>
<b>POWER</b>			
Renewable power capacity (including hydropower)	GW	2,197	<b>2,378</b>
Renewable power capacity (not including hydropower)	GW	1,081	<b>1,246</b>
Hydropower capacity <sup>2</sup>	GW	1,112	<b>1,132</b>
Wind power capacity	GW	540	<b>591</b>
Solar PV capacity <sup>3</sup>	GW	405	<b>505</b>
Bio-power capacity	GW	121	<b>130</b>
Geothermal power capacity	GW	12.8	<b>13.3</b>
Concentrating solar thermal power (CSP) capacity	GW	4.9	<b>5.5</b>
Ocean power capacity	GW	0.5	<b>0.5</b>
Bioelectricity generation (annual)	TWh	532	<b>581</b>

**Figura 4.4.** Potencia renovable instalada a finales del 2018. Fuente: Renewables 2019 Global Status Report (REN21). <http://bit.ly/2rTdoY3>

Si quisiésemos establecer una clasificación de las instalaciones de energía hidráulica, podemos atender tanto al tipo como al tamaño de las mismas:

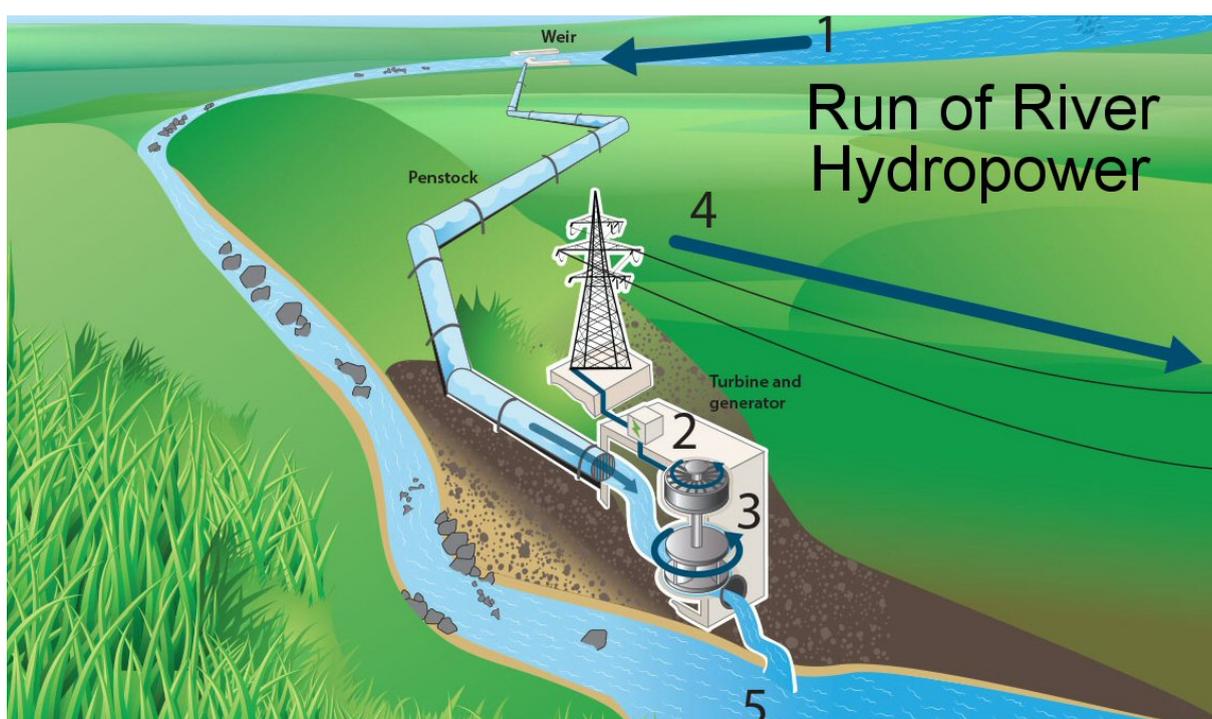
- Tipo:
  - Embalse
  - Modificación del cauce de un río
  - Bombeo

- Tamaño:
  - Gran Tamaño > 30MW
  - Pequeña escala = 100 kW a 30 MW
  - Micro-hidráulica < 100 kW

### 4.2.3. Energía Hidráulica: Tipos de Centrales

Las más conocidas son probablemente las grandes centrales hidroeléctricas de **embalse**, donde el agua es embalsada y forzada a pasar por un canal hacia un nivel de menor altura donde se generará energía eléctrica mediante el accionamiento de una turbina.

Otro tipo de instalación se puede obtener mediante la **derivación del cauce de un río**. En la imagen puede verse una explicación de su funcionamiento.

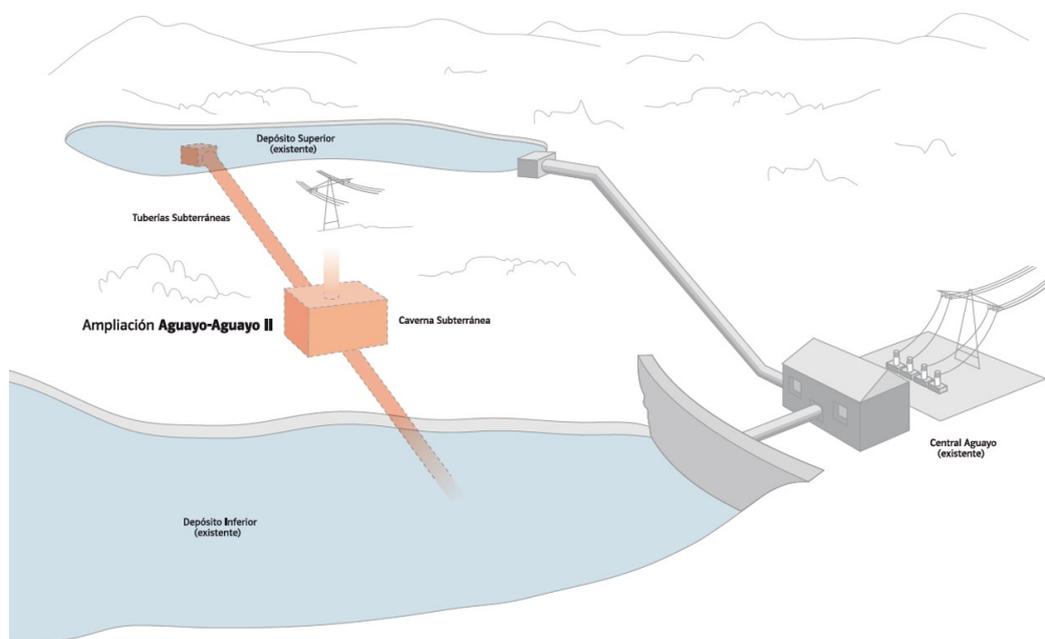


**Figura 4.5.** Ejemplo de central hidroeléctrica por modificación del cauce de un río. Fuente: <https://bit.ly/1tahjf8>

EL funcionamiento de una central hidroeléctrica por modificación del cauce de un río sería como sigue:

- El agua del río es redirigida a una canalización
- El agua es forzada a pasar por turbinas
- Las turbinas hacen que el generador asociado genere electricidad
- La electricidad se distribuye por la red eléctrica
- El agua es devuelta al cauce del río

El tercer tipo de central hidroeléctrica lo constituyen las **centrales de bombeo**, las cuales funcionan de manera algo diferente. Existe un embalse inferior que acumula el agua para que, en periodos de baja demanda eléctrica, esa agua sea subida mediante una turbina al embalse superior, permitiendo de esta manera generar electricidad cuando la demanda vuelva a ser mayor. Aunque lógicamente estas centrales se convierten en usuarios de energía eléctrica cuando el agua se bombea al embalse superior, también actúan como acumuladores de energía en la red, lo que resulta de gran interés, especialmente en el contexto actual donde la integración de las denominadas renovables “fluctuantes” está suponiendo un reto para las redes eléctricas actuales. La eficiencia total de estos sistemas, incluyendo la eficiencia de las turbinas y otros factores como pérdidas por rozamiento, se puede situar en el 75%.



**Figura 4.6.** Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo (Aguayo II). Fuente: EON España (Proyecto de ampliación de la central eléctrica Aguayo II)

#### 4.2.4. Energía Hidráulica: Otros Datos de Interés

Para comprender el origen de la energía hidráulica, basta con recordar que la potencia contenida en una masa de agua que desciende una altura  $h$  perderá una energía potencial tal que  $mgh$ , de tal manera que la potencia  $p$  generada por el agua en movimiento será la indicada en la siguiente ecuación, donde  $m$  y  $V$  (con el punto como superíndice) indican el flujo de agua por masa ( $kg/s$ ) y volumen ( $m^3/s$ ).  $\rho$  es la densidad del agua ( $1000kg/m^3$ ).

$$p = \frac{mgh}{t} = \dot{m}gh = \rho \dot{V}gh \tag{4.1}$$

Aunque no vamos a entrar en detalle en los **tipos de turbina** existentes, si es conveniente saber que existen fundamentalmente dos categorías: **de chorro o de acción simple o directa (impulse)**



**Figura 4.7.** Ejemplo de turbinas empleadas en centrales hidroeléctricas. Fuente: (Imagen izquierda: Audrius Meskauskas - Own work / The rotor of the water turbine. Taken in the plant that manufactures the water turbines, Zurich); (Imagen derecha: <https://bit.ly/2E4i1Wi>)

y de reacción o sobrepresión (*reaction*)<sup>1</sup>..

**En las turbinas de chorro** es la velocidad del agua la que genera el movimiento de la turbina, siendo convenientes para aplicaciones con grandes alturas en el salto de agua (*high head*) y flujos bajos (*low flow*)

**En las turbinas de reacción** se genera energía mediante la acción combinada de la presión y el movimiento del agua. En comparación con las turbinas de acción directa, las aplicaciones idóneas en este caso son las de *low head* y *high flow*

Por último, conviene hacer una reflexión: **¿existe impacto ambiental asociado a la energía hidráulica?** El hecho de que estemos hablando de una energía renovable, derivada de la energía potencial del agua, parece querer indicar que el impacto ambiental será cero. Sin embargo, aunque no exista un vertido directo de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en la generación de energía, sí hay que tener en cuenta algunos factores importantes asociados a este tipo de instalaciones:

- Inundación de grandes extensiones de terreno, en ocasiones fértiles.
- Inundación (desaparición) de pueblos enteros
- Impacto sobre los ecosistemas acuáticos
- Impacto sobre ríos “aguas abajo”

### 4.3. Energías derivadas del Mar

Cualquiera que se haya bañado en una playa o en un río habrá experimentado, con toda probabilidad, la “fuerza” o “energía” asociada al movimiento de grandes masas de agua, ya sea en forma de corrientes u olas, por ejemplo.

Las energías renovables “derivadas del mar” (*Marine/Ocean Energy*), si bien conocidas desde hace tiempo, han comenzado a tomar relevancia en los últimos años. Hay que tener en cuenta que se trata de diversos tipos de energía diferenciados dentro de un marco común, compartiendo en

<sup>1</sup>Para profundizar un poco más en este tema puedes consultar el siguiente vídeo: <https://youtu.be/k0BL0KEZ3KU>

términos generales la característica de que se trata de energías poco maduras, en fase experimental/investigación, en muchos casos con modelos y viabilidades diversas aún por definir y lejos de un punto de madurez que les permita ser, a día de hoy, generadoras de cantidades significativas de energía.

Una posible clasificación dentro las energías renovables derivadas del mar sería la siguiente:

- Energía Mareomotriz (*Tidal Power*)
- Energía Undimotriz (*Wave Power*)
- Energía Maremotérmica (*Ocean Thermal Energy Conversion*)



**Figura 4.8.** Olas en Pacífica (California). Fuente: Wikimedia/Brocken Inaglory. Licencia: CC BY-SA 4.0. <http://bit.ly/10C68IY>

### ¡Importante! 3.1: Instituto de Hidráulica (Hydraulics Institute)

En España Cantabria es una región puntera en la investigación de Energías del Mar a través del IH (Instituto de Hidráulica) emplazado en el Parque Tecnológico de Cantabria: <http://www.ihcantabria.com/WebIH/en/>

En la siguiente imagen se presenta una tabla en la que se establece una comparativa entre las fuentes de energía hidráulica convencional (*Freshwater hydro*) y las energías que nosotros hemos denominado “derivadas del mar”: undimotriz (basada en el aprovechamiento de la energía de las olas), mareomotriz (aprovechamiento de las corrientes marinas) y maremotérmica (aprovechamiento del gradiente térmico que existe a diferentes profundidades en grandes volúmenes de agua (OTEC)).

En este análisis destaca el gran potencial de la maremotérmica y su nula implementación a día de hoy, en contraste con la mareomotriz, la única de las derivadas del mar con algo de presencia “real” en la actualidad y, por supuesto, con la ya consolidada hidráulica.

A continuación se realizará una breve revisión de los conceptos fundamentales de los tres tipos de energías derivadas del mar ya citados.

Table 8.2 Relative Sizes of Some Various Hydro Resources			
Energy Source	Potential (GW)	Practical (GW)	To Date
Freshwater hydro	4,000	1,000	654
Waves	1,000–10,000	500–2,000	2.5
Tides	2,500	1,000	59
OTEC	200,000	10,000	0

Source: Tester, J.W. et al., *Sustainable Energy: Choosing among Options*, The MIT Press, Cambridge, MA, 2005.

Figura 4.9. Comparativa entre la energía hidráulica convencional y las derivadas del mar (potencial y la capacidad instalada en la actualidad) . Fuente: Renewable Energy: A First Course (Robert Ehrlich)

### 4.3.1. Energía Mareomotriz (*Tidal Energy/Power*)

Las mareas son variaciones cíclicas (y predecibles, ya que dependen de la posición de la Tierra y la Luna en sus órbitas respectivas .. ¡e incluso del Sol!) del nivel de mares y océanos.

La explicación fundamental al efecto de las mareas podemos encontrarla en la **Ley de la Gravitación Universal**, esto es, en la fuerza gravitacional que la Luna (y el Sol) ejercen sobre la Tierra en función de su posición. La fuerza asociada a las mareas depende de la inversa de la distancia (entre la Tierra y la Luna o el Sol) al cubo. Para encontrar la expresión de dichas fuerzas no es necesario más que partir de la expresión que, aplicando la Ley de la Gravitación Universal de Newton, nos da la fuerza gravitacional ejercida por la Luna sobre la Tierra:

$$F = \frac{GMm}{r^2} \tag{4.2}$$

Partiendo de esta expresión es sencillo llegar a:

$$F_x = \pm \frac{2GMmR}{r^3} \tag{4.3}$$

$$F_y = \pm \frac{GMmR}{2r^3} \tag{4.4}$$

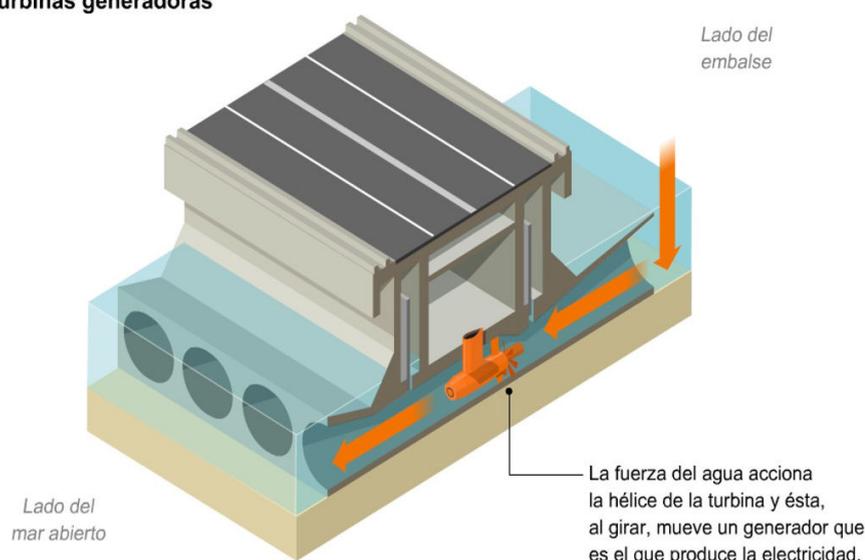
En las ecuaciones anteriores  $G$  sería la constante gravitacional,  $M$  la masa de la Tierra,  $m$  la de la luna,  $r$  la distancia entre la Tierra y la Luna y  $R$  el radio de la Tierra<sup>1</sup>.  $F_x$  indica las fuerzas de sentido opuesto que actúan sobre los extremos opuestos considerando el eje de la tierra resultante de prolongar la línea que uniría la Luna con la Tierra, ejerciendo un efecto de “alargamiento” de la misma; mientras que  $F_y$  supondría una “compresión” en el eje perpendicular al  $x$ .

<sup>1</sup>Puedes encontrar una explicación más detallada en el libro: “*Renewable Energy: A First Course*” de Robert Ehrlich.

Existen fundamentalmente dos tipos de aprovechamiento de la energía asociada a las mareas: **mediante embalsamientos o barreras y mediante el uso directo de turbinas**. Se estima que el potencial a nivel mundial de este tipo de energía renovable está en el entorno de los 3000GW, pero sólo un 3% de esa cantidad se encontraría en emplazamientos adecuados para su aprovechamiento por parte del hombre.



Las turbinas generadoras

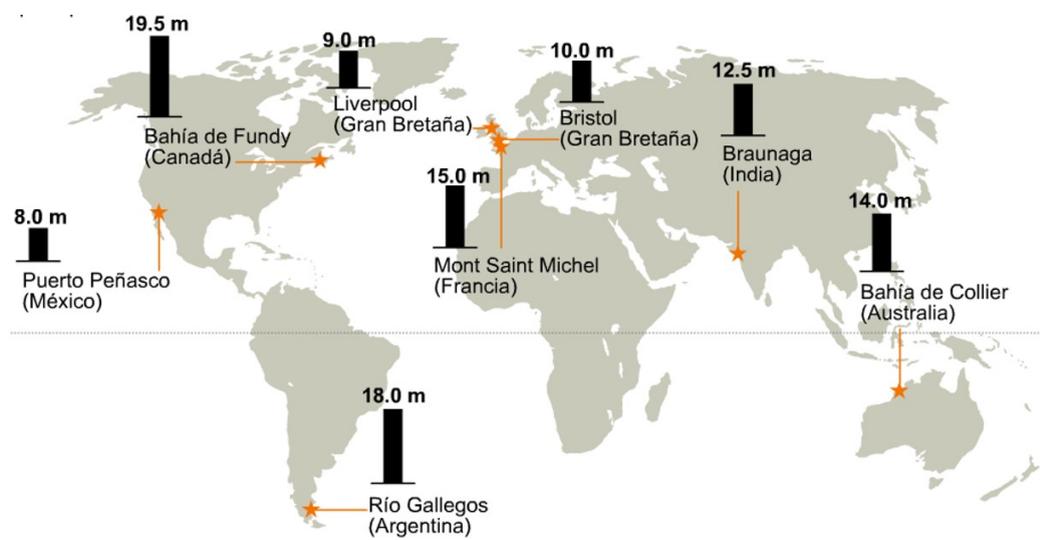


**Figura 4.10.** Esquema del funcionamiento de una central basada en la energía mareomotriz. Fuente: <https://bit.ly/1qsdtw0> (Licencia para usos docentes y formativos.)

Un problema o limitación de esta tecnología es que **no todos los emplazamientos son válidos**, ya que se necesita que la diferencia entre los niveles de marea baja y alta sean lo suficientemente significativos como para que la construcción de la central mareomotriz sea rentable. En términos generales se suele considerar un límite mínimo de 5 metros. Algunos de los emplazamientos principales a nivel mundial son los indicados en la Figura 4.11.

Desde el punto de vista de dónde ubicar los emplazamientos, los lugares idóneos los constituyen rías, bahías o zonas similares donde la construcción de un dique para la contención del agua sea viable.

Como curiosidad cabe mencionar que la diferencia media entre las mareas alta y baja en nuestro planeta está en 1 metro, pero hay emplazamientos con diferencias de hasta 16-20 metros (Bahía de Fundy, en Canadá, la mayor diferencia entre mareas conocida).



**Figura 4.11.** Mapa con emplazamientos idóneos para el aprovechamiento de la energía mareomotriz. Fuente: <https://bit.ly/1qsdtw0> (Licencia para usos docentes y formativos.)

A día de hoy uno de los principales ejemplos de centrales eléctricas basadas en la energía undimotriz lo constituye la **central situada en el estuario del río Rance (Bretagne, Francia)**<sup>1</sup>. Estas instalaciones están operativas desde 1966 y consta de 24 turbinas con generadores de 10MW. Se trata de una central reversible, ya que las turbinas funcionan en ambos sentidos (fase de llenado y vaciado del embalse).

Si bien el coste del kwh se estima similar al de las centrales eléctricas convencionales, el **impacto ambiental** fue bastante significativo (aterramiento del río, cambios de salinidad en el estuario en sus proximidades y cambio del ecosistema), lo que probablemente ha frenado el desarrollo de este tipo de instalación en otros emplazamientos favorables.

Las centrales como la del río Rance no son la única posibilidad de aprovechamiento de la energía mareomotriz, que pertenecería a la categoría que podría denominarse **presa de marea**. Existen diferentes propuestas para aprovechar la **energía de las corrientes (de marea)**, algunas de ellas basadas en generadores muy similares a los eólicos. Por ejemplo, la turbina Lanstrom, diseñada para tener un diámetro de rotor de unos 20 metros e ir fijada sobre el lecho marino, tal y como se muestra en la Figura 4.13. Estas turbinas están fabricadas por la empresa noruega Andritz Hydro Hammerfest, con unidades instaladas ya en el año 2003 y siendo las primeras turbinas de este tipo conectadas a la red (año 2004)<sup>2</sup>.

La misma filosofía, aunque con un diseño distinto, es seguido por las turbinas Seagen, propiedad del grupo Siemens. El fabricante también indica en este caso que se trata de las primeras turbinas accionadas por corriente marina fabricadas a escala comercial (2008). Cada sistema, equipado con dos turbinas, tiene una potencia nominal de 1.2MW (existen unidades instaladas en la costa de Irlanda del Norte)<sup>3</sup>.

<sup>1</sup><https://bit.ly/1GLZ08g>

<sup>2</sup>Video donde se muestra el proceso de instalación de este tipo de turbinas: <https://youtu.be/cHEXrBcdTck>.

<sup>3</sup>Video explicando el funcionamiento de las turbinas Seagen (audio en inglés):[https://youtu.be/AfGRBFdw2\\_g](https://youtu.be/AfGRBFdw2_g).



**Figura 4.12.** Imagen de la central eléctrica mareomotriz en el estuario del río Rance. Fuente : Wikimedia / Dani 7C3. License: CC BY-2.5 <http://bit.ly/1GLZQ8g>

El último sistema de aprovechamiento de las corrientes marinas que se va a presentar tiene un diseño distinto a las turbinas anteriormente presentadas. En el sistema Vivace se aprovechan las turbulencias generadas por el paso de las corrientes entre unos cilindros para provocar el movimiento de éstos. Este concepto se aprecia mejor en la Figura 4.15, **en particular en el siguiente vídeo:** <https://youtu.be/IcR8Hszac0E>. La figura muestra una imagen de una prueba en los laboratorios de la Universidad de Michigan de dicho sistema.

Una vez vistos algunos ejemplos de aprovechamiento de energía mareomotriz, puede ser un buen momento para repasar las principales ventajas y desventajas de esta energía renovable derivada del mar:

Ventajas	Desventajas
No emisiones de CO2	Emplazamientos específicos
Predecible	Distancia de la red
Bajas velocidades de fluido	Producción 40 del día/año
Eficiencias de $\approx 80\%$	Impacto ambiental
Bajo coste de operación	Deterioro de componentes
Periodos de vida $\approx 75/100$ años	Impacto visual

**¡Importante! 3.2: Energía Mareomotriz: Situación Actual (2019)**

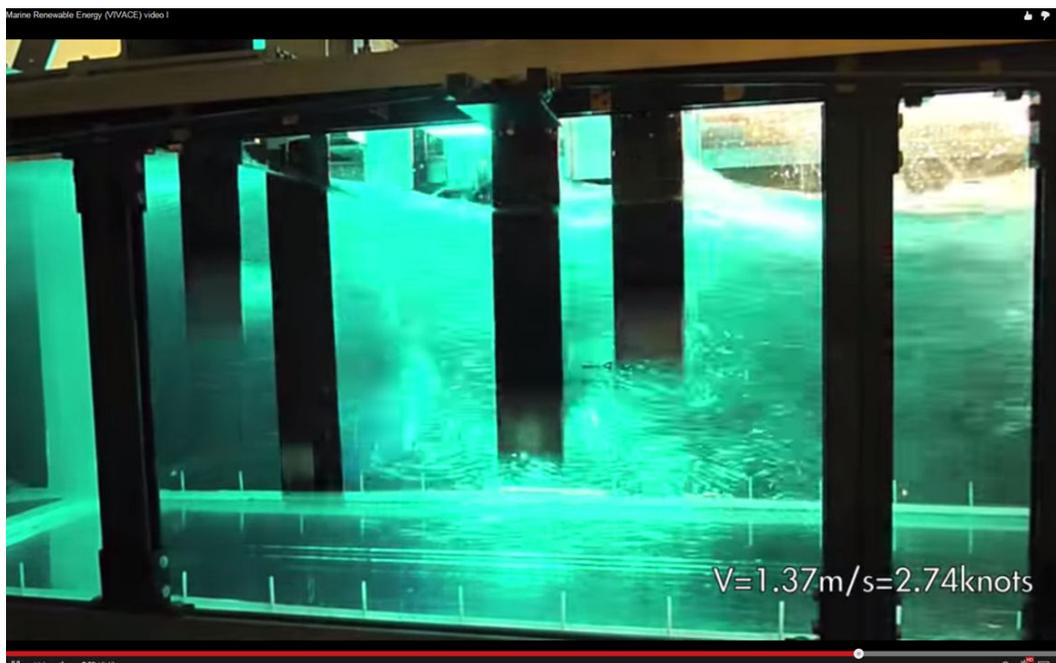
El desarrollo de sistemas mareomotrices, por ejemplo basados en turbinas, sigue vigente en la actualidad. Un ejemplo de ello es el desarrollo de la turbina Atlantis AR2000 de 2MW de potencia, desarrollada por SIMEC Atlantis Energy con participación de GE. Más información sobre esta turbina mareomotriz, a día de hoy la mayor del mundo: <https://bit.ly/2QqYLgk> y <https://bit.ly/30p1D0E>.



**Figura 4.13.** Imagen de la instalación de una turbina Lanstrom. Fuente: Imagen extraída del vídeo Andritz Hydro Hammerfest de hammerfeststrom. Licencia YouTube estándar <https://youtu.be/CHExRbCdTck>



**Figura 4.14.** Imagen de una turbina Seagen. Fuente: Marine Current Turbines Limited <https://bit.ly/2E8RVTr>



**Figura 4.15.** Funcionamiento del sistema Vivace. Fuente: Captura extraída del vídeo de UMVIVACE “Marine Renewable Energy (Vivace) Vídeo I”; Licencia YouTube estándar. <https://youtu.be/IcR8Hszac0E>

### 4.3.2. Energía Undimotriz (*Wave Energy/Power*)

La energía undimotriz trata de aprovechar la energía contenida en las olas generadas en mares y océanos. Las olas son generadas por el viento que sopla sobre la superficie de los mares. En muchos lugares del mundo las olas de mares y océanos son suficientemente consistentes como para generar energía de manera continua. Algunas estimaciones cifran la generación de energía (posible) con tecnologías disponibles actualmente en el entorno de los 140-750 TWh/año.

En la Figura 4.16 se presenta el resultado de un estudio realizado para tratar de estimar el potencial asociado a la energía undimotriz a nivel mundial, indicando la densidad de potencia media para cada emplazamiento.

Para entender un poco mejor la figura anterior conviene conocer la expresión que permite calcular la potencia asociada a una ola:

$$P_{avg} = \frac{\rho g^2 T H^2}{8\pi} \tag{4.5}$$

Como puede apreciarse, la potencia de una ola es directamente proporcional al cuadrado de su altura ( $H$ ) y a su periodo ( $T$ ) ( $\rho$  es la densidad del agua ( $1025\text{kg}/\text{m}^3$ )), y  $g$  la aceleración debida a la gravedad ( $9,81\text{m}/\text{s}^2$ ).

Dentro de la energía undimotriz existen diferentes tipos de dispositivos que pueden ser utilizados para aprovechar la energía de las olas. Una **clasificación típica** es la que presenta la Figura 4.17, con los **dispositivos activados por las olas** (*wave activated bodies*), los **dispositivos de desbordamiento** (*overtopping devices*) y las **columnas de agua oscilante** (*oscillating water columns*).

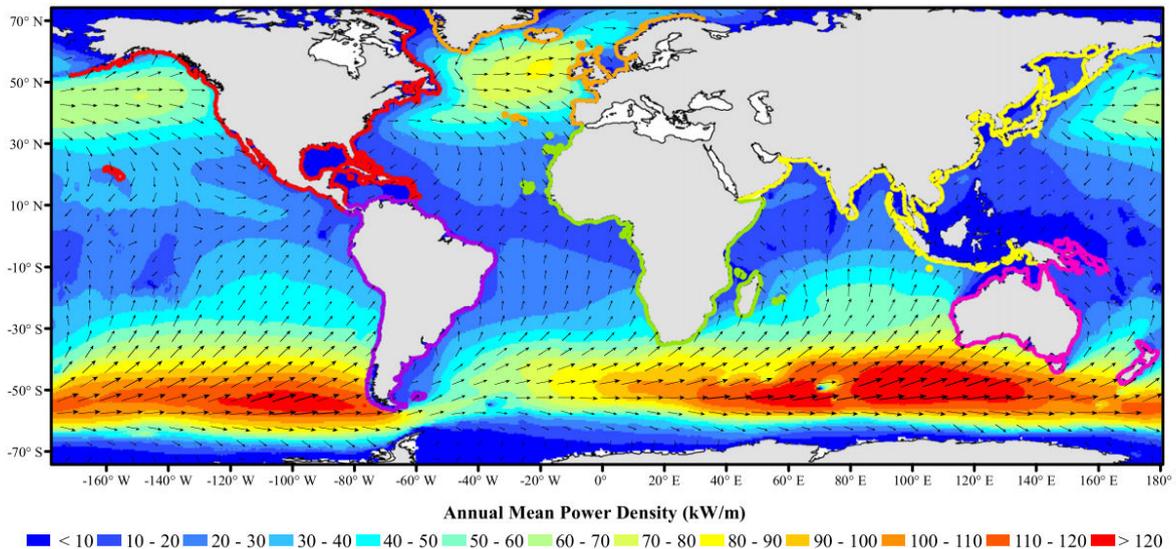


Fig. 1. Annual mean wave power density (colour) and annual mean best direction (→). The land buffers used to quantify the resource are also shown, coloured by continent (see Section 3). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

**Figura 4.16.** Densidad de potencia media (kW/m) (anual) asociada a las olas (las flechas indican la dirección prevalente media anual) . Fuente: Gunn y Stock-Williams (2012) “Quantifying the global power wave resource”. <https://bit.ly/2DL7mU4>

**¡Importante! 3.3: Ejemplo de potencia de una ola**

En una tormenta intensa las olas pueden llegar fácilmente a los 10m (pensemos en olas no necesariamente en la costa) y con un periodo de 15s. Utilizando la ecuación anterior, y considerando una densidad del agua de  $\rho = 1025kg/m^2$ , la potencia resultante sería  $P = 5.9MW$ .

**4.3.3. Wave activated bodies**

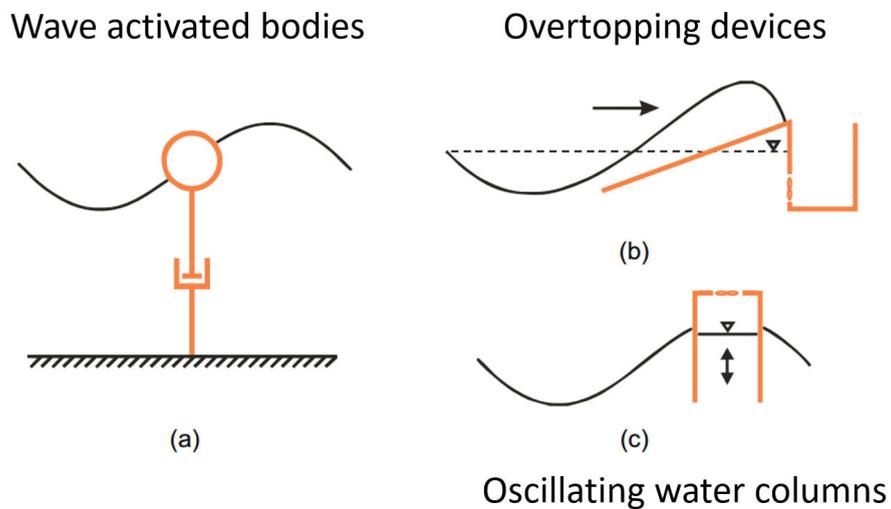
Los *wave activated bodies* son probablemente los **dispositivos undimotrices** más conocidos, especialmente las boyas con referencia fija, también denominados *point absorbers* o boyas con referencia fija. Su principio de funcionamiento sería el siguiente:

- Colocación de las boyas “ancladas” o fijadas en el fondo marino (en algunos de los modelos)
- La energía cinética de las olas mueve las boyas, lo que impulsa un eje que permite la generación de electricidad por medio de un generador lineal.

El ejemplo de la Figura 4.18 se corresponde con la boya instalada en **Santoña**: La boya cuenta con una bomba hidráulica que traslada la energía mecánica obtenida a un alternador, cuya corriente puede ser luego transmitida a tierra mediante un cable submarino.

La boya ubicada frente a la costa cántabra es capaz de generar una potencia de 40 KW, si bien la idea es probar su funcionamiento para poderle añadir más adelante más unidades.

Otro tipo de dispositivo similar son las **boyas con referencia móvil o atenuadores**, que son dispositivos que funcionan en una disposición paralela a la dirección de las olas. Los movimien-



**Figura 4.17.** Tipos de dispositivos basados en la energía undimotriz: a) *Wave activated bodies*, b) *Overtopping devices* y c) *Oscillating water columns*.



**Figura 4.18.** Ejemplo de boya undimotriz experimental instalada en Santoña. Fuente: Europapress <http://bit.ly/2DBFuhC>

tos generados entre los distintos segmentos son aprovechados para la generación de electricidad mediante bombas hidráulicas u otro tipo de generadores<sup>1</sup>.

Para entender el funcionamiento ayuda también ver las imágenes de la Figura 4.19. En la parte izquierda se presenta una recreación artística de un campo generador con varios dispositivos, mientras que en la derecha se presenta la imagen real de un “Pelamis” (serpiente marina), nombre con el que se suele conocer a esta tecnología.



**Figura 4.19.** Ejemplos de boyas undimotrices de referencia móvil: a) recreación artística de un campo de Pelamis (Fuente: Jumanji Solar (Flickr) <https://bit.ly/2DHM9dE>, b) Sistema Pelamis durante pruebas de campo en el EMEC (European Marine Energy Test Centre) (Fuente: <https://bit.ly/2rDoZjU> (Licencia: dominio público)).

Como se comentaba, el sistema **Pelamis** consiste en una serie de cilindros articulados y parcialmente sumergidos. La ola induce un movimiento relativo entre los cilindros, lo que activa un sistema hidráulico, y posteriormente, un generador eléctrico. Esta estructura prioriza la resistencia sobre la eficiencia en la conversión energética, ya que está pensada para zonas con condiciones marinas muy adversas. Se estima que 30 de estos sistemas podrían cubrir las necesidades energéticas de unos 20.000 hogares europeos. Existen instalaciones fundamentalmente experimentales, por ejemplo en la costa portuguesa, pero está aún por ver si se realizarán instalaciones a gran escala basadas en esta tecnología.

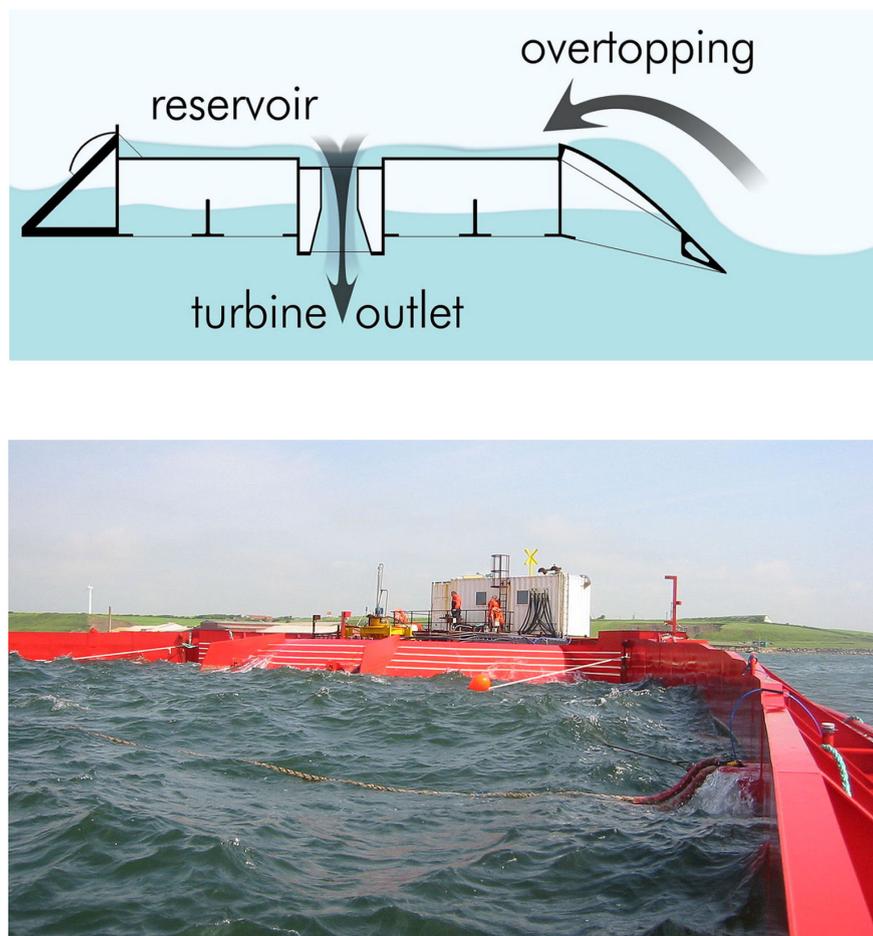
#### 4.3.4. *Overtopping Devices*

El funcionamiento de estos **dispositivos de desbordamiento** (*overtopping devices*) es muy sencillo, pudiendo hablar de dispositivos en la costa (*on-shore*) y en medio del mar (*off-shore*). Se trata de generar un embalse con una altura por encima del nivel medio del mar, que será llenado con agua proveniente de las olas. De este modo, el agua recogida en el embalse se hará pasar por un conducto en el que será devuelta al mar, pasando antes por una turbina que generará la electricidad deseada.

Uno de los principales ejemplos de este tipo de dispositivos lo constituye el Wave Dragon, comercializado por una empresa danesa y desarrollado por un consorcio europeo con participación de Austria, Dinamarca, Irlanda, Portugal, Suecia y UK. El primer prototipo fue conectado a la red en Dinamarca (Nissum Bredning) en 2003<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> En el siguiente enlace tenéis un vídeo que explica el funcionamiento de este tipo de dispositivos: <https://youtu.be/mcTNkoyvLFs>.

<sup>2</sup> Para más información: <https://bit.ly/2nbmz7g>.



**Figura 4.20.** Ejemplo de *overtopping device*: a) Esquema de funcionamiento (parte superior); b) Imagen del Wave Dragon (ejemplo de *overtopping device*). Fuente: Erik Friis-Madsen / Licencia: Creative Commons Attribution 3.0 Unported (ambas imágenes).

#### 4.3.5. *Oscillating Water Columns*

La energía de las olas también puede aprovecharse mediante estructuras o instalaciones ubicadas en la costa, denominadas **columnas de agua oscilante**. En la Figura 4.22 puede apreciarse como, en este caso, las olas van a impulsar el aire que se encuentra dentro de la cámara y que será el encargado de accionar la hélice de la turbina para generar energía eléctrica. Esto es, es el aire impulsado por las olas y no el agua el que realmente mueve la turbina, de hecho, la turbina se mueve tanto cuando la ola avanza como cuando se retira (la columna de aire se moverá en la dirección opuesta). Uno de los mayores retos para este tipo de instalaciones reside en el diseño de la turbina para conseguir una máxima eficiencia.

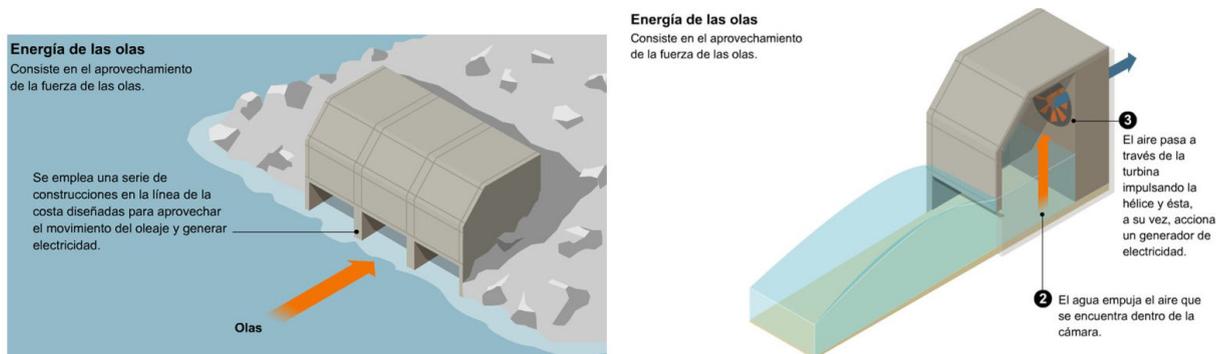
Un ejemplo de instalación OWC en España lo tenemos en Mutriku (País Vasco)<sup>1</sup>. Además, en el siguiente vídeo puedes ver una prueba de laboratorio ilustrando su funcionamiento<sup>2</sup>.

<sup>1</sup><https://bit.ly/2E8HS0k>

<sup>2</sup><https://bit.ly/2sEHFNb>

**Cuestión 3.1: Oscillating Water Columns (300 XP)**

Quando hablamos de esta tecnología: ¿Crees que se trata de una tecnología muy novedosa con pocas instalaciones o que ya existen varios ejemplos por el mundo? ¿Qué tipo de turbinas se emplean para la generación de energía eléctrica?



**Figura 4.21.** Esquema de funcionamiento de una columna de agua oscilante. Fuente: <https://bit.ly/1qsdw0> (Licencia para usos docentes y formativos.).

**4.3.6. Energía Maremotérmica (OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion)**

Si pensamos que los océanos cubren el 70% de la superficie del planeta y que la radiación solar que capturan se estima en aproximadamente unas 600 veces la demanda energética actual, podemos darnos cuenta del potencial que puede tener esta variante de las energías renovables derivadas del mar (que también puede entenderse como una variante de la energía solar térmica que veremos más adelante).

El principio de funcionamiento de la **energía maremotérmica**, también denominada **OTEC** *Ocean Thermal Energy Conversion* se basa en la diferencia térmica existente entre las diferentes “capas” o niveles de profundidad existentes en los océanos. En términos generales se pueden considerar las siguientes capas:

- La superficial: de 100 a 200 metros de espesor, que actúa como colector de calor, con temperaturas entre 25 y 30 grados.
- La intermedia: entre los 200 y 400 metros de profundidad, con una variación rápida de temperatura y que actúa como barrera térmica entre las capas superior y profunda.
- La profunda: en la que la temperatura disminuye suavemente hasta alcanzar 4°C a 1000 metros y 2°C a 5000 metros.

Como puede observarse en la imagen (Figura 4.22), en las zonas costeras tropicales existen gradientes de temperatura elevados. En la imagen también se han indicado las instalaciones actuales ya operativas o planificadas para los próximos años.

El **esquema de funcionamiento básico de una planta OTEC** se muestra en la imagen. Básicamente el sistema se basa en el denominada ciclo Rankine, donde un fluido (idealmente con un punto de ebullición más bajo y una presión de vapor más alta que el agua) es empleado para

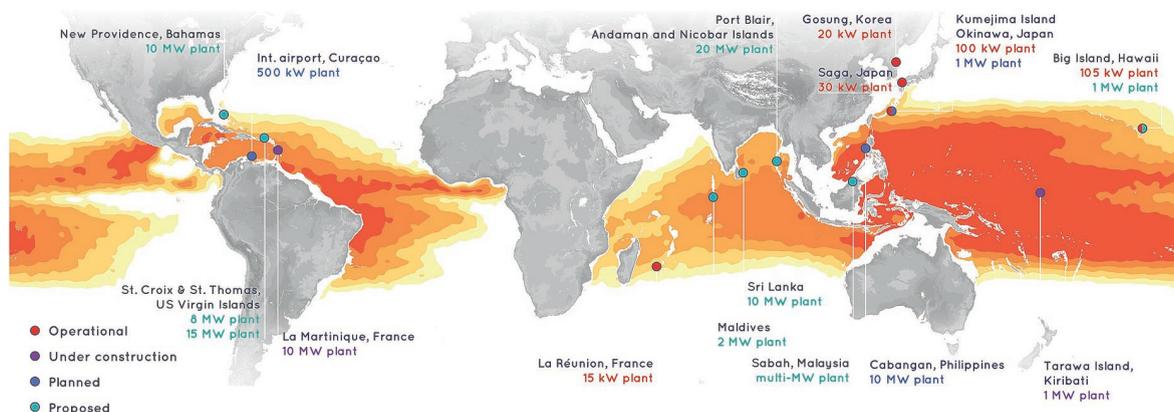


Figura 4.22. Mapa con la distribución de posibles emplazamientos para el aprovechamiento de instalaciones OTEC. Fuente: <http://bit.ly/2DCvTv5>. Licencia CC BY-SA 4.0.

accionar una turbina que generará electricidad. Inicialmente, el agua caliente capturada de la superficie oceánica se bombea a un intercambiador de calor, donde el calor se intercambia del agua del mar al fluido seleccionado, haciendo que éste se evapore, accionando así la turbina. Seguidamente, el agua del mar ya fría es llevada a un segundo intercambiador, donde el vapor se condensa a estado líquido para ser reutilizado.

Un aspecto a tener en cuenta por lo anteriormente comentado es que el agua no es el fluido más eficiente para este tipo de sistemas. El amoníaco, por ejemplo, es mucho más adecuado. En el primer caso estaríamos hablando de sistemas OTEC de **ciclo abierto** y en el segundo de **ciclo cerrado**<sup>1</sup>.

**Cuestión 3.2: Fluidos y ebullición (250 XP)**

Se han mencionado sistemas OTEC de ciclo abierto y cerrado, en función del fluido empleado. Como una de las claves es el punto de ebullición de estos líquidos: ¿sabrías indicar la temperatura de fusión del agua? ¿y del amoníaco? Estas temperaturas: ¿se pueden modificar de alguna manera?

Si bien el potencial de la tecnología OTEC es notable, está por ver que se produzca un desarrollo significativo en un futuro cercano. La relativamente baja eficiencia, la poca madurez de la tecnología (que deriva en unos costes altos de generación (*Levelized Cost of Energy*: LCOE) y el coste asociado a las instalaciones, entre otros factores, hacen que a día de hoy existan dudas sobre su evolución. Las plantas actuales se sitúan en cifras de generación del entorno de los KW, bastante modestas, mientras que las planificadas suben al entorno de los MW.

<sup>1</sup>En este caso *ciclo cerrado* hace referencia a la necesidad de confinar el amoníaco dentro del sistema OTEC debido al impacto ambiental que su vertido ocasionaría.

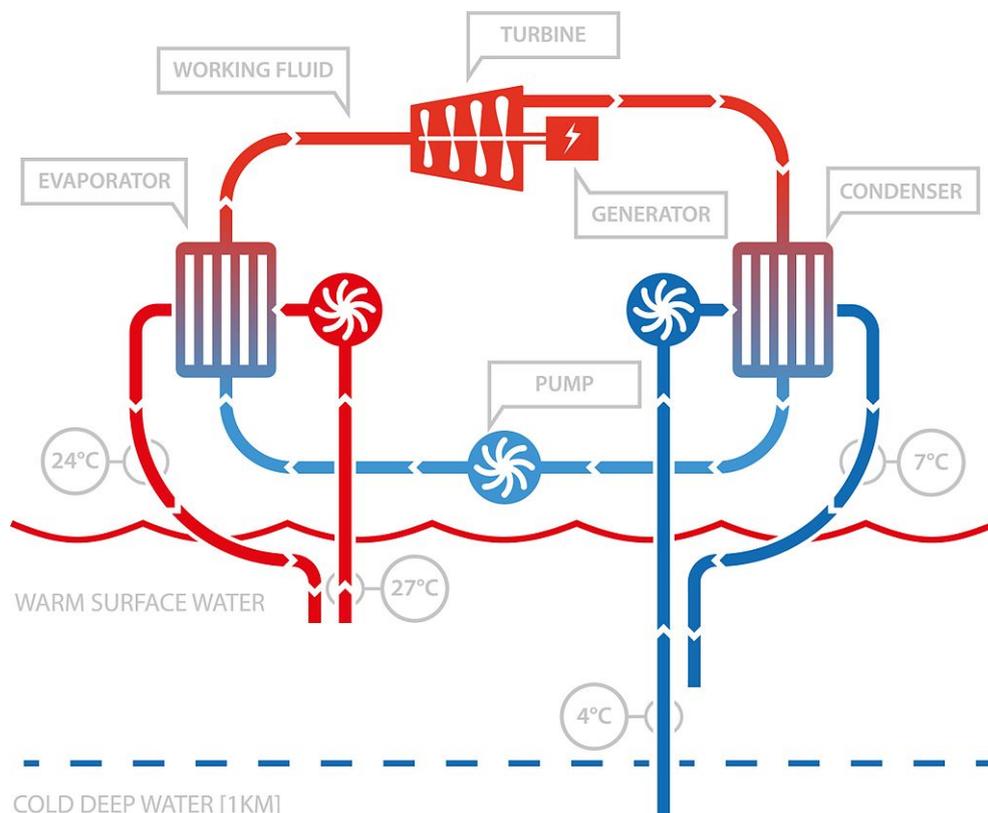


Figura 4.23. Esquema del principio de funcionamiento de un sistema OTEC. Fuente: <http://bit.ly/2DyHDdX>. Licencia CC BY-SA 4.0.

### 4.3.7. Evolución y perspectivas de las energías derivadas del mar

Una vez revisados los conceptos fundamentales de algunas tecnologías asociadas a las energías renovables derivadas del mar, es necesario realizar un análisis de la madurez tecnológica y perspectivas de evolución del sector. El informe del IDAE (2011) titulado “Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables”<sup>1</sup> es un documento realmente interesante para poder entender diferentes conceptos fundamentales a la hora de analizar con rigurosidad la situación de este sector.

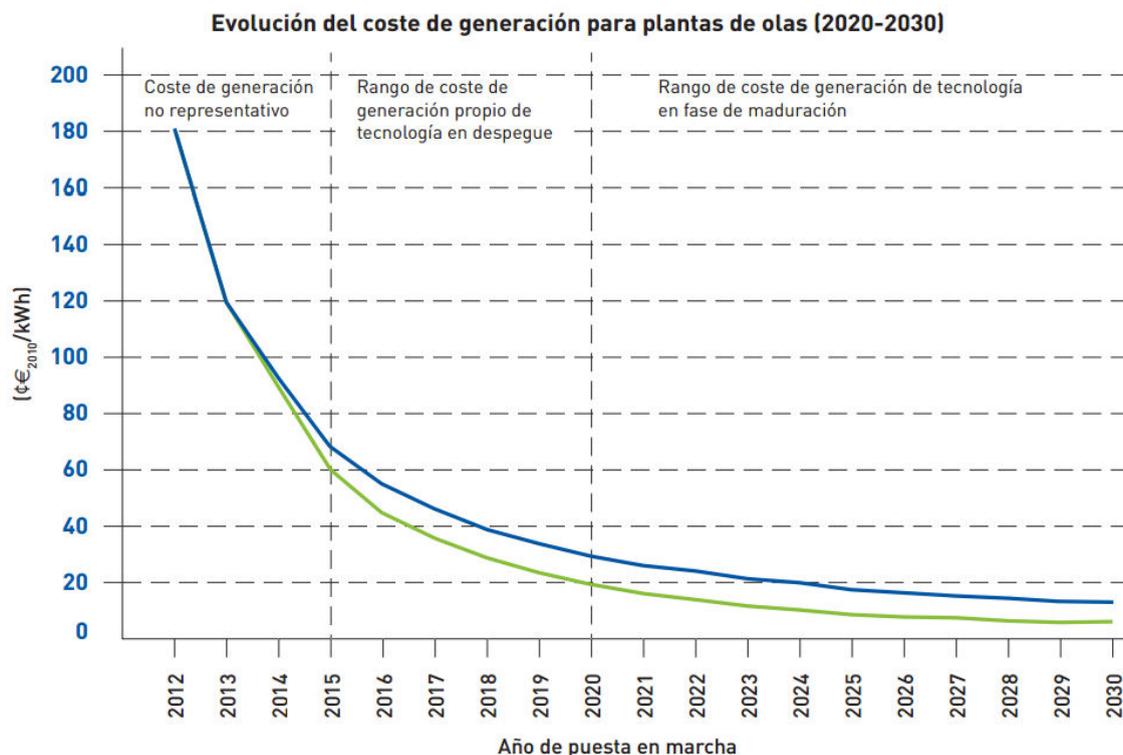
Tanto el coste asociado a la generación de energía como su grado de madurez son factores fundamentales que tienen una relación directa, tal y como se puede apreciar en la Figura 4.24.

Evidentemente, cuando una tecnología está en sus primeras fases de vida (experimental, investigación y desarrollo), el coste de generación será muy alto. Sin embargo, a medida que la tecnología vaya madurando y que se vayan seleccionando las mejores opciones y modelos disponibles, los costes irán disminuyendo hasta llegar a estabilizarse en la fase de maduración.

Sobre esta figura se han representado tres fases en el periodo de evolución de la tecnología (en este caso undimotriz, pero el ejemplo sería perfectamente extrapolable a cualquier otra EERR):

**Fase de confirmación de la fiabilidad** donde el desarrollo tecnológico no permite establecer conclusiones concluyentes sobre los periodos de vida útil, eficiencias o costes de generación.

<sup>1</sup><https://bit.ly/2nRALmR>



**Figura 4.24.** Evolución esperada para el coste de generación asociado a la energía undimotriz. Fuente: informe del IDAE “Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables” <https://bit.ly/2nRALmR>.

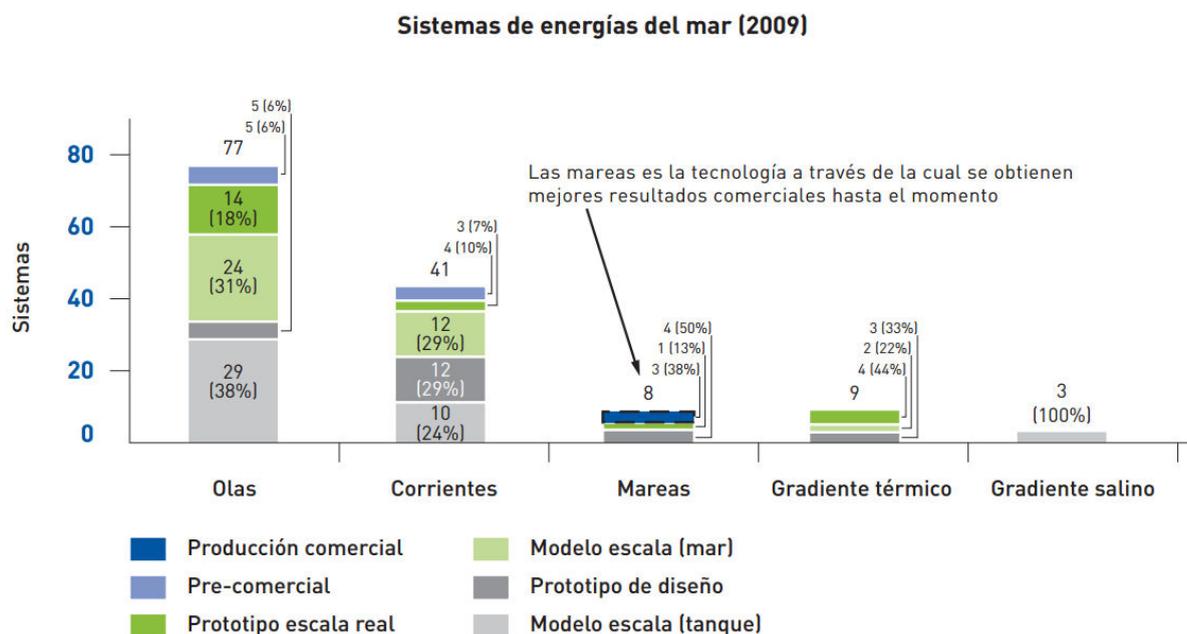
**Fase de despegue** donde la vida útil y la eficiencia aumentan y los costes de generación comienzan a acercarse a los de otras tecnologías más maduras.

**Fase de consolidación** donde la vida útil y la eficiencia se acercan a lo esperado y los costes de generación continúan descendiendo y equiparándose a otras EERR.

#### 4.3.8. Levelized Cost of Energy: LCOE

Tal y como se ha mencionado a lo largo del curso, el concepto de LCOE tiene una gran relevancia en el marco de las energías renovables, ya que permite comparar los costes por kWh generado y con ello la madurez de diferentes tecnologías. Entre diferentes fuentes de energía y tecnologías para la generación eléctrica, la comparativa de los costes implicados puede ser complicada. Para ello, el LCOE analiza todos los costes implicados en la construcción y gestión y mantenimiento de una central de generación a lo largo de su vida útil, dividiendo dicho coste por la energía total generada por dicha instalación también a lo largo de su vida útil.

Un análisis detallado del grado de madurez de las EERR derivadas del mar permite concluir que, **con la excepción de la energía mareomotriz, el resto de tecnologías asociadas se encuentra en estados lejanos a la madurez tecnológica (etapas pre-comercial, prototipos, etc.)**, como se muestra en la Figura 4.25. Como ejemplo, en el campo de la energía undimotriz existen muchos modelos diferentes de boyas con referencia fija, sin que aún esté claro cuáles serán los que se impongan en el mercado debido a sus características.



**Figura 4.25.** Grado de madurez tecnológica de las EERR derivadas del mar. Fuente: informe del IDAE “Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables” <https://bit.ly/2nRALmR>.

### 4.3.9. EERR derivadas del Mar: Ventajas e Inconvenientes

Como conclusión a este apartado vamos a analizar brevemente los puntos clave de estas EERR por medio de sus ventajas e inconvenientes. Como **ventajas** puede mencionarse que se trata de sistemas renovables al depender como recurso del agua de los mares, ríos o acumulada en embalses o estructuras similares. Por lo tanto, es un tipo de energía no contaminante y silenciosa. Finalmente, en sistemas eléctricos como el español, los sistemas insulares presentan grandes problemáticas con respecto a conseguir un suministro fiable y eficiente desde el punto de vista de su coste. En este sentido, estos emplazamientos pueden ser lugares idóneos para plantear este tipo de instalaciones y resolver así parte del problema de su abastecimiento eléctrico.

Con respecto a los posibles **inconvenientes** cabe mencionar el impacto visual, ambiental y estructural de algunas de estas variantes, como lo ya comentado sobre algunos de los sistemas mareomotrices. De igual modo hay que considerar el impacto sobre la fauna y flora (terrenos fértiles, ecosistemas marinos) asociados a los emplazamientos. Además, son sistemas que, al no presentar todavía un grado de madurez suficiente, no permiten típicamente generar potencias elevadas y presentan un coste por MW más elevado que otras tecnologías. Finalmente, se trata de sistemas que van a estar ubicados en emplazamientos hostiles, tanto por el efecto que el agua de mar puede tener sobre estructuras metálicas, electrónica, etc., como por lo complicado de su mantenimiento.

Ventajas	Inconvenientes
Renovable	Impacto ambiental, visual y estructural
No contaminante	Impacto sobre fauna y flora
Silenciosa	Potencia limitada
Apta para emplazamientos “problemáticos”	Alto coste
	Mantenimiento complicado
	Escasa madurez

**Cuestión 3.3: Problemas en la Energía Undimotriz (300 XP)**

Vamos a fijarnos en el caso particular de la energía undimotriz. Supón que trabajas en una ingeniería que te pide describir todos los problemas que pueden derivarse de la instalación y mantenimiento de este tipo de sistema. Haz una lista lo más larga posible de esos posibles problemas.

## 4.4. Energía Geotérmica

La **energía geotérmica** es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas: se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor y ligada a volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres.

A diferencia del resto de EERR cuyo origen es la radiación solar, ya sea de forma directa como la solar térmica y fotovoltaica o de forma indirecta como la eólica, hidroeléctrica y biomasa, la energía geotérmica proviene del calor interior de la Tierra; un calor que se alimenta, por un lado la desintegración de isótopos radiactivos; y, por otro, de movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra y del calor latente de la cristalización del núcleo externo.

Considerando toda la superficie de la Tierra, la potencia geotérmica total que nos llega desde el interior es de  $4,2 \times 10^{12} \text{ J}$ . Se trata de una cantidad inmensa de energía, pero solo una fracción de ella puede ser utilizada por la humanidad. La energía geotérmica es, en su más amplio sentido, la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre.

De este modo, se denomina **recurso geotérmico** a la porción del calor que, desprendido desde el interior de la tierra, puede ser aprovechado por el hombre en condiciones técnicas y económicas. Se clasifican en función de la temperatura del fluido geotermal que determinarán sus usos y aplicaciones. Por tanto, el objetivo de la geotermia es el aprovechamiento de esa energía calorífica del interior de la tierra.

### 4.4.1. Geotermia: un poco de Historia

Aunque sintamos la tentación de asociar la energía geotérmica a nuestra sociedad actual, lo cierto es que ésta ha sido usada desde hace mucho tiempo. Tomemos el ejemplo de **Bath**, ciudad situada al sur de Inglaterra y cuyo nombre se deriva precisamente por lo baños termales construidos por los antiguos romanos. No es hasta el siglo XX cuando el gran potencial de esta energía comienza a promover su explotación: la primera generación eléctrica mediante geotermia se realizó en 1904, y en 1911 se contruyó la **primera central de generación en Larderello**, al norte de Italia, cerca de Pisa y Florencia. Desde entonces, el aumento de instalaciones geotérmicas ha sido constante, con un crecimiento mucho más marcado desde el año 2000.

**¡Importante! 4.1: Larderello Geothermal Plant**

100 años tras su inauguración, la central geotérmica de Larderello continúa en funcionamiento. Operada por Enel, tiene una potencia instalada que equivale al 10% (4800 MW) de la capacidad global total.



**Figura 4.26.** Ejemplo de central geotérmica en Islandia. Fuente: Gretar Ivarsson – Edited by Fir0002 - Gretar Ivarsson, geologist at Nesjavellir. The Nesjavellir Geothermal Power Plant in Pingvellir, Iceland. Licencia: Public Domain <http://bit.ly/2nJVk0v>

Los recursos geotérmicos de alta temperatura se aprovechan principalmente para la producción de electricidad (temperaturas superiores a los 100–150°C). Cuando la temperatura del yacimiento no es suficiente para producir energía eléctrica, entonces sus principales aplicaciones son térmicas en los sectores industrial, servicios y residencial. En el caso de temperaturas por debajo de los 100°C puede hacerse un aprovechamiento directo o a través de bomba de calor geotérmica (calefacción y refrigeración). Cuando se trata de recursos de temperaturas muy bajas (por debajo de los 25°C) las posibilidades de uso están en la climatización y obtención de agua caliente<sup>1</sup>.

#### 4.4.2. Tipos de centrales geotérmicas

Cuando hablamos de generación eléctrica por medio de esta fuente de energía renovable, existen fundamentalmente **3 tipos de centrales**: de vapor seco (*dry steam*), tipo *flash* y de ciclo binario.

En la primera de ellas (**vapor seco**), probablemente la menos común, el vapor necesario para accionar una turbina emerge de manera espontánea del pozo de explotación, necesiéndose emplazamientos con gradientes de temperatura muy elevados.

En las centrales de tipo *flash*, agua caliente a alta presión surge del pozo de producción. Este agua se vaporiza cuando su presión se reduce y se genera un chorro de vapor que servirá para accionar una turbina. Este tipo de central es probablemente la más común dentro de las centrales

<sup>1</sup>Fuente: IDAE



Figura 4.27. Central geotérmica de Larderello en 1913. Fuente: manodemandiocaambiente <http://bit.ly/2DH8dG8>

de tipo geotérmico.

Por último, las centrales de **ciclo binario** extraen agua caliente y utilizan un paso intermedio, con un intercambiador que contiene un líquido con un punto de ebullición inferior al del agua (p.ej. butano), generando así vapor a temperaturas inferiores y accionando la turbina.

#### 4.4.3. Energía Geotérmica en el Entorno Residencial

La energía geotérmica se puede emplear también en viviendas y edificios para la generación del agua caliente sanitaria (A.C.S.) y para la calefacción. El principio de funcionamiento en este caso es el mismo que en el caso de las plantas generadoras, pero trabajando a menores profundidades y temperaturas. **Podemos estar hablando de profundidades típicas de sondeo de unos 100 metros, a partir de los cuales la temperatura permanece más o menos constante a unos 14°C.** Para poder establecer una comparación desde el punto de vista de la rentabilidad de la instalación de este tipo de sistemas, se estima que el coste de una instalación de calefacción geotérmica para una vivienda de unos 200 metros cuadrados puede estar en el entorno de los 50000 euros. Aunque puede parecer un precio elevado, una comparación con una instalación de gas natural puede arrojar un periodo de amortización en el entorno de los 14 a los 22 años, aproximadamente.

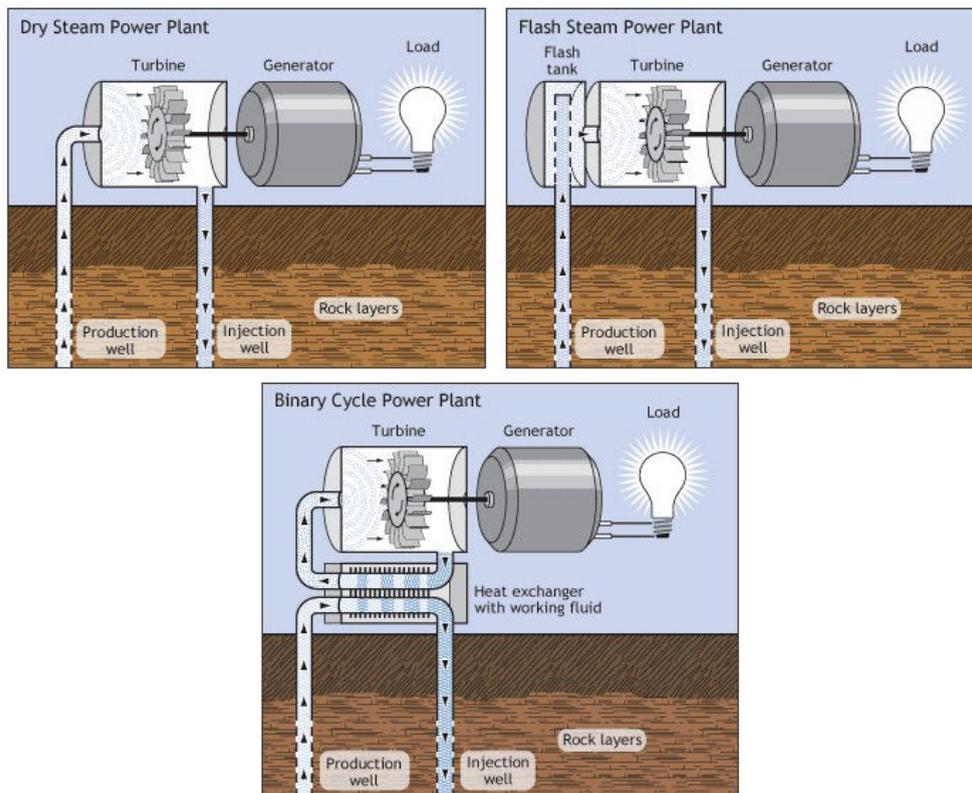


Figura 4.28. Tipologías de centrales geotérmicas. Fuente: <https://bit.ly/1N50wjm>

#### 4.4.4. Energía geotérmica: emplazamientos

Hay que tener muy en cuenta que, al igual que ocurre con otros recursos energéticos renovables (energía solar, eólica, etc.), el “recurso geotérmico” no se encuentra en cualquier lugar, sino que existen emplazamientos adecuados para las instalaciones de alta, media y baja temperatura. En España estos emplazamientos se encuentran principalmente en Andalucía y en las Islas Canarias.

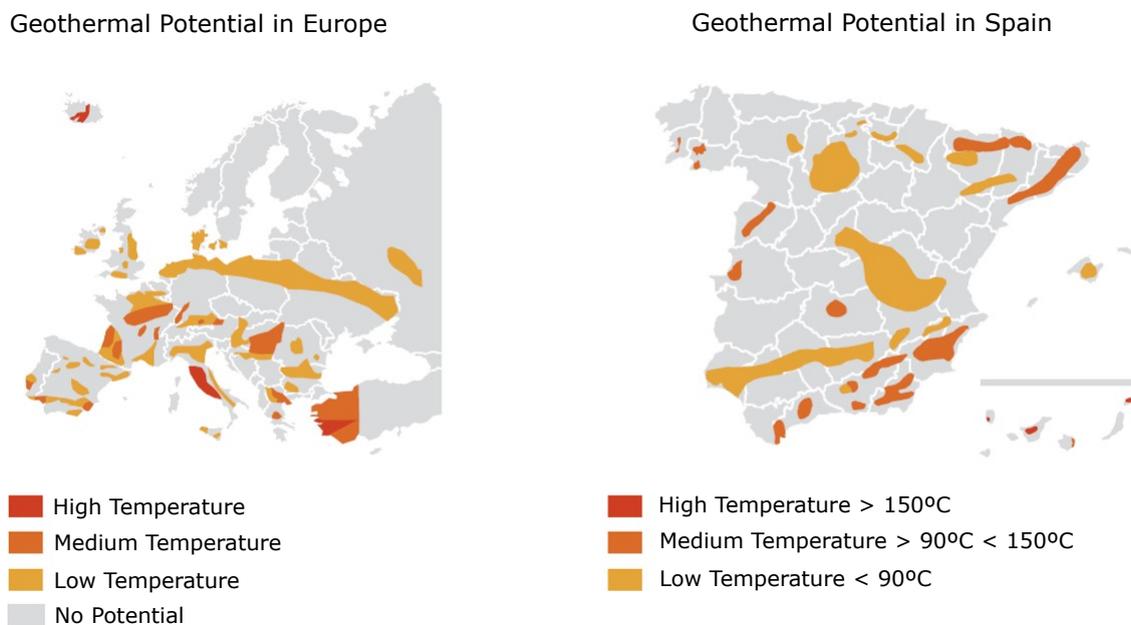
Aunque para detectar de manera segura un emplazamiento geotérmico idóneo es necesario excavar un pozo y medir la temperatura asociada, otro tipo de estudios pueden ser necesarios de antemano, como por ejemplo:

- Imágenes de satélites y/o aéreas
- Estudios de volcanes
- Mapeado geológico y estructural
- Estudios geo-químicos y geo-físicos

Una indicación de la existencia de emplazamientos geotérmicos pueden ser dados por la presencia de volcanes, géiseres, fumarolas o aguas termales.

#### 4.4.5. Energía Geotérmica: Impacto Ambiental

¿Existe impacto ambiental en las centrales de energía geotérmica? La respuesta es sí. La emisión de CO<sub>2</sub> o de gases de efecto invernadero es limitada e inferior a la generación de energía



**Figura 4.29.** Emplazamientos geotérmicos en Europa y España. Fuente: EGEC (European Geothermal Energy Council)

eléctrica mediante combustibles fósiles. Sin embargo, estos gases pueden contener pequeñas cantidades de radón, que aparece como producto derivado del decaimiento del uranio, uno de los principales isótopos responsables de gran parte del calor acumulado bajo la superficie de la Tierra. El radón es la segunda causa principal de cáncer de pulmón. No obstante, este problema es limitado, ya que en muchas instalaciones geotérmicas existen procesos de reciclaje y los gases no llegan a ser emitidos.

## 4.5. Biomasa

Por Bionergía, en su acepción de energía renovable, se entiende a toda aquella **energía proveniente de materiales derivados de fuentes biológicas**. Por biomasa se entiende toda aquella materia orgánica que ha sido capaz de acumular luz solar en forma de energía química (tras su transformación asociada).

Dentro del concepto de Biomasa hay que diferenciar los diferentes usos que se pueden presentar, al igual que ocurrirá con la Energía Solar Térmica. Para empezar deberíamos comenzar por mencionar la **biomasa tradicional**, esto es, la biomasa empleada para calefacción, cocina o usos similares típicamente en países poco desarrollados.

En el ámbito de la **biomasa “moderna”** podemos hablar de la instalación de calderas de biomasa en hogares, o bien en edificios de oficinas, gimnasios, colegios, etc. El principio de funcionamiento será el mismo, quemar residuos de origen forestal (por ejemplo convertidos a **pellets**<sup>1</sup>) para la generación de la energía necesaria para el suministro de agua caliente sanitaria y calefacción.

<sup>1</sup> Los pellets son un producto totalmente natural, catalogado como biomasa sólida (elaborados a partir de serrín natural), formado por cilindros muy pequeños, de unos pocos milímetros de diámetro. Pueden ser empleados para calefacción y agua caliente mediante calderas específicas. (Fuente: <https://bit.ly/2LkJ4k1>)



**Figura 4.30.** Ejemplo de esquema de una caldera de biomasa doméstica. Fuente: <https://bit.ly/2Gjping>.

Para tener una idea de los precios actuales de este tipo de tecnología, una caldera de 22 KW para una vivienda unifamiliar de unos  $250m^2$  puede costar unos 16.000 euros. El periodo de retorno estimado frente a una instalación convencional de gas puede rondar los 8 años.

Evidentemente, para consumos más elevados el periodo de retorno será más corto. Por ejemplo para una instalación central de 48 viviendas en Santander, con 2 calderas de 450 KW, sustituyendo las existentes de gasoil, el periodo de retorno puede establecerse en los 5 años<sup>1</sup>.

En el caso de las Plantas de Biomasa (de origen forestal) el principio es el mismo que en el caso de las calderas (simplificando el funcionamiento), pero en este caso el objetivo suele ser el calentar agua al quemar el combustible para mover una turbina y generar electricidad. Si bien la biomasa se suele considerar como una energía renovable, existen voces críticas debido a que estas centrales generan  $CO_2$  que es emitido a la atmósfera y, además, se necesita realizar tala de árboles para conseguir la materia prima para su posterior combustión. Es cierto que las empresas que se basan en la explotación de estos recursos realizan reforestaciones para continuar con su labor de manera sostenible.

Al margen de las posibles emisiones de GHG (gases de efecto invernadero), uno de los principales problemas de la biomasa es la emisión de partículas, que pueden ser potencialmente peligrosas para el ser humano, al igual que ocurre con las emisiones derivadas de los automóviles. Existen proyectos, como el asociado a la imagen que podéis ver a la derecha (Centro de Desarrollo de Energías Renovables (Ceder/Ciemat)) que trabajan en la detección en tiempo real de estas partículas, para tener una información más fiable sobre el impacto, en este caso ambiental, de esta fuente de energía<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Estos datos hay que tomarlos con cierta precaución, ya que han sido facilitados por una empresa específica y además la evolución y actualización de los costes es muy rápida.

<sup>2</sup><https://bit.ly/2revnvr>

**¡Importante! 5.1: Plantas de Bioamasa**

La mayor central de biomasa del mundo está en Drax (North Yorkshire, UK), donde se emplean 6 millones de toneladas de pellets al año como combustible para los 3 generadores de 600MW allí instalados<sup>a</sup>. Curiosamente el origen de los pellets es fundamentalmente USA y Canadá<sup>b</sup>.

<sup>a</sup><https://bit.ly/2DAKpj0>

<sup>b</sup><http://bit.ly/1qZxm3j>

**Cuestión 5.1: Biomasa ¿sostenible? (300 XP)**

Lee el artículo del siguiente enlace<sup>a</sup>. Indica tu opinión con respecto a la biomasa, añadiendo cualquier otra fuente de información que consideres oportuna.

<sup>a</sup><http://bit.ly/1qZxm3j>

**Cuestión 5.2: Brainstorming tecnológico (300 XP)**

En este apartado hemos visto varios ejemplos de EERR, al margen de las más conocidas como la solar fotovoltaica, solar térmica o eólica, que serán tratadas en más detalle en los siguientes capítulos. Partiendo de los ejemplos vistos y de vuestros conocimientos sobre otras EERR, una actividad muy interesante puede ser el tratar de “idear” nuevas tecnologías renovables.

## 4.6. Conclusiones

Aunque el foco en este curso se pondrá principalmente en la energía solar fotovoltaica, y en menor medida en la energía eólica, se ha considerado conveniente presentar los conceptos básicos asociados a otras EERR como la energía hidráulica, las energías derivadas del mar, la geotermia y la biomasa. De este modo, el conocimiento global sobre EERR contenido en este curso se hace más global y completo.

# Lista de Figuras

4.1. Ejemplo de planta hidroeléctrica en el curso de un río en Toba Montrose. Fuente: Alterrapower. Licencia CC BY-SA 3.0. <a href="https://bit.ly/2GaNtnN">https://bit.ly/2GaNtnN</a> . . . . .	2
4.2. Potencia hidráulica instalada (2018). Fuente: Renewables 2019 Global Status Report (REN21). <a href="http://bit.ly/2rTdoY3">http://bit.ly/2rTdoY3</a> . . . . .	3
4.3. Potencia hidráulica instalada y añadida (2018). Top 10 de países según la potencia instalada en 2018. Fuente: Renewables 2019 Global Status Report (REN21). <a href="http://bit.ly/2rTdoY3">http://bit.ly/2rTdoY3</a> . . . . .	4
4.4. Potencia renovable instalada a finales del 2018. Fuente: Renewables 2019 Global Status Report (REN21). <a href="http://bit.ly/2rTdoY3">http://bit.ly/2rTdoY3</a> . . . . .	4
4.5. Ejemplo de central hidroeléctrica por modificación del cauce de un río. Fuente: <a href="https://bit.ly/1tahjf8">https://bit.ly/1tahjf8</a> . . . . .	5
4.6. Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo (Aguayo II). Fuente: EON España (Proyecto de ampliación de la central eléctrica Aguayo II) . . . . .	6
4.7. Ejemplso de turbinas empleadas en centrales hidroeléctricas. Fuente: (Imagen izquierda: Audrius Meskauskas - Own work / The rotor of the water turbine. Taken in the plant that manufactures the water turbines, Zurich); (Imagen derecha: <a href="https://bit.ly/2E4i1Wi">https://bit.ly/2E4i1Wi</a> ) . . . . .	7
4.8. Olas en Pacífica (California). Fuente: Wikimedia/Brocken Inaglory. Licencia: CC BY-SA 4.0. <a href="http://bit.ly/10C68IY">http://bit.ly/10C68IY</a> . . . . .	8
4.9. Comparativa entre la energía hidráulica convencional y las derivadas del mar (potencial y la capacidad instalada en la actualidad) . Fuente: Renewable Energy: A First Course (Robert Ehrlich) . . . . .	9
4.10. Esquema del funcionamiento de una central basada en la energía mareomotriz. Fuente: <a href="https://bit.ly/1qsdtw0">https://bit.ly/1qsdtw0</a> (Licencia para usos docentes y formativos.) . . . .	10
4.11. Mapa con emplazamientos idóneos para el aprovechamiento de la energía mareomotriz. Fuente: <a href="https://bit.ly/1qsdtw0">https://bit.ly/1qsdtw0</a> (Licencia para usos docentes y formativos.) 11	11
4.12. Imagen de la central eléctrica mareomotriz en el estuario del río Rance. Fuente: : Wikimedia / Dani 7C3. License: CC BY-2.5 <a href="http://bit.ly/1GLZQ8g">http://bit.ly/1GLZQ8g</a> . . . . .	12
4.13. Imagen de la instalación de una turbina Lanstrom. Fuente: Imagen extraída del vídeo Andritz Hydro Hammerfest de hammerfeststrom. Licencia YouTube estándar <a href="https://youtu.be/cHEXRbCdTck">https://youtu.be/cHEXRbCdTck</a> . . . . .	13

4.14. Imagen de una turbina Seagen. Fuente: Marine Current Turbines Limited <a href="https://bit.ly/2E8RVTr">https://bit.ly/2E8RVTr</a> . . . . .	13
4.15. Funcionamiento del sistema Vivace. Fuente: Captura extraída del vídeo de UMVI-VACE “Marine Renewable Energy (Vivace) Vídeo I”; Licencia YouTube estándar. <a href="https://youtu.be/IcR8HszacOE">https://youtu.be/IcR8HszacOE</a> . . . . .	14
4.16. Densidad de potencia media (kW/m) (anual) asociada a las olas (las flechas indican la dirección prevalente media anual) . Fuente: Gunn y Stock-Williams (2012) “Quantifying the global power wave resource”. <a href="https://bit.ly/2DL7mU4">https://bit.ly/2DL7mU4</a> . . . . .	15
4.17. Tipos de dispositivos basados en la energía undimotriz: a) <i>Wave activated bodies</i> , b) <i>Overtopping devices</i> y c) <i>Oscillating water columns</i> . . . . .	16
4.18. Ejemplo de boya undimotriz experimental instalada en Santoña. Fuente: Europa-press <a href="http://bit.ly/2DBFuhC">http://bit.ly/2DBFuhC</a> . . . . .	16
4.19. Ejemplos de boyas undimotrices de referencia móvil: a) recreación artística de un campo de Pelamis (Fuente: Jumanji Solar (Flickr) <a href="https://bit.ly/2DHM9dE">https://bit.ly/2DHM9dE</a> , b) Sistema Pelamis durante pruebas de campo en el EMEC (European Marine Energy Test Centre) (Fuente: <a href="https://bit.ly/2rDoZjU">https://bit.ly/2rDoZjU</a> (Licencia: dominio público)). . . . .	17
4.20. Ejemplo de <i>overtopping device</i> : a) Esquema de funcionamiento (parte superior); b) Imagen del Wave Dragon (ejemplo de <i>overtopping device</i> ). Fuente: Erik Friis-Madsen / Licencia: Creative Commons Attribution 3.0 Unported (ambas imágenes). . . . .	18
4.21. Esquema de funcionamiento de una columna de agua oscilante. Fuente: <a href="https://bit.ly/1qsdtw0">https://bit.ly/1qsdtw0</a> (Licencia para usos docentes y formativos). . . . .	19
4.22. Mapa con la distribución de posibles emplazamientos para el aprovechamiento de instalaciones OTEC. Fuente: <a href="http://bit.ly/2DCvTv5">http://bit.ly/2DCvTv5</a> . Licencia CC BY-SA 4.0. . . . .	20
4.23. Esquema del principio de funcionamiento de un sistema OTEC. Fuente: <a href="http://bit.ly/2DyHDdX">http://bit.ly/2DyHDdX</a> . Licencia CC BY-SA 4.0. . . . .	21
4.24. Evolución esperada para el coste de generación asociado a la energía undimotriz. Fuente: informe del IDAE “Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables” <a href="https://bit.ly/2nRALmR">https://bit.ly/2nRALmR</a> . . . . .	22
4.25. Grado de madurez tecnológica de las EERR derivadas del mar. Fuente: informe del IDAE “Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables” <a href="https://bit.ly/2nRALmR">https://bit.ly/2nRALmR</a> . . . . .	23
4.26. Ejemplo de central geotérmica en Islandia. Fuente: Gretar Ivarsson – Edited by Fir0002 - Gretar Ivarsson, geologist at Nesjavellir. The Nesjavellir Geothermal Power Plant in Pingvellir, Iceland. Licencia: Public Domain <a href="http://bit.ly/2nJVk0v">http://bit.ly/2nJVk0v</a> . . . . .	25
4.27. Central geotérmica de Larderello en 1913. Fuente: manodemandiocaambiente <a href="http://bit.ly/2DH8dG8">http://bit.ly/2DH8dG8</a> . . . . .	26
4.28. Tipologías de centrales geotérmicas. Fuente: <a href="https://bit.ly/1N50wjm">https://bit.ly/1N50wjm</a> . . . . .	27
4.29. Emplazamientos geotérmicos en Europa y España. Fuente: EGEN (European Geothermal Energy Council) . . . . .	28
4.30. Ejemplo de esquema de una caldera de biomasa doméstica. Fuente: <a href="https://bit.ly/2Gjping">https://bit.ly/2Gjping</a> . . . . .	29