

El futuro de las renovables está en el mar

*Aspectos básicos y modelado
de dispositivos de conversión de energía marina*



DURCWAVE



Dr. Corrado Altomare
corrado.altomare@upc.edu

Índice

- Introducción
- Distribución de la producción de energía
- Propiedades de un sistema de producción de energía
- Energías renovables y energías renovables marinas
- Grado de madurez
- Aspectos físicos y ambientales a considerar
- Energía undimotriz y WECs
- Investigación en el campo de la energía undimotriz (modelling)

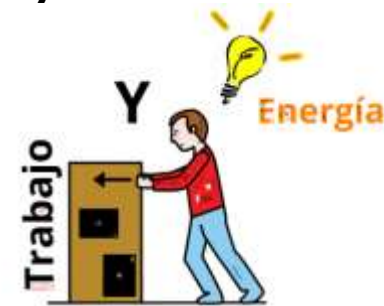
Introducción

- Energía: fundamental para satisfacer las necesidades humanas:



Introducción

- **Energía: capacidad de un sistema para realizar un trabajo.**
- Trabajo es la energía transferida a o desde un sistema y requiere una fuerza aplicada moviéndose cierta distancia → Trabajo requiere un gasto de energía.
- 1ª ley de la Termodinámica → energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.
- No generamos energía, sino que **convertimos energía y generamos potencia.**
- Potencia es la tasa a la que transformamos energía de una forma a otra (E / t).



Introducción. unidades

- Trabajo = fuerza x distancia
 - $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$
- Energía = Trabajo $\rightarrow$ Unidades: Joules
- Potencia = trabajo / tiempo
 - $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$
- Unidades de potencia: W y sus múltiplos:
 - $1 \text{ KW} = 10^3 \text{ W}$
 - $1 \text{ MW} = 10^3 \text{ KW} = 10^6 \text{ W}$
 - $1 \text{ GW} = 10^3 \text{ MW} = 10^6 \text{ KW} = 10^9 \text{ W}$
 - $1 \text{ TW} = 10^3 \text{ GW} = 10^6 \text{ MW} = 10^9 \text{ KW} = 10^{12} \text{ W}$

Introducción. unidades

- Unidades de energía producida o consumida: J no se utiliza
- En su lugar, se habla directamente de potencia (W y múltiples) o de la energía producida durante un cierto periodo de tiempo → unidades de potencia x tiempo (horas)
- **1KWh = 3.6×10^6 J**
 - MWh = 10^3 KWh
 - GWh = 10^3 MWh = 10^6 KWh
 - TWh = 10^3 GWh = 10^6 MWh = 10^9 KWh

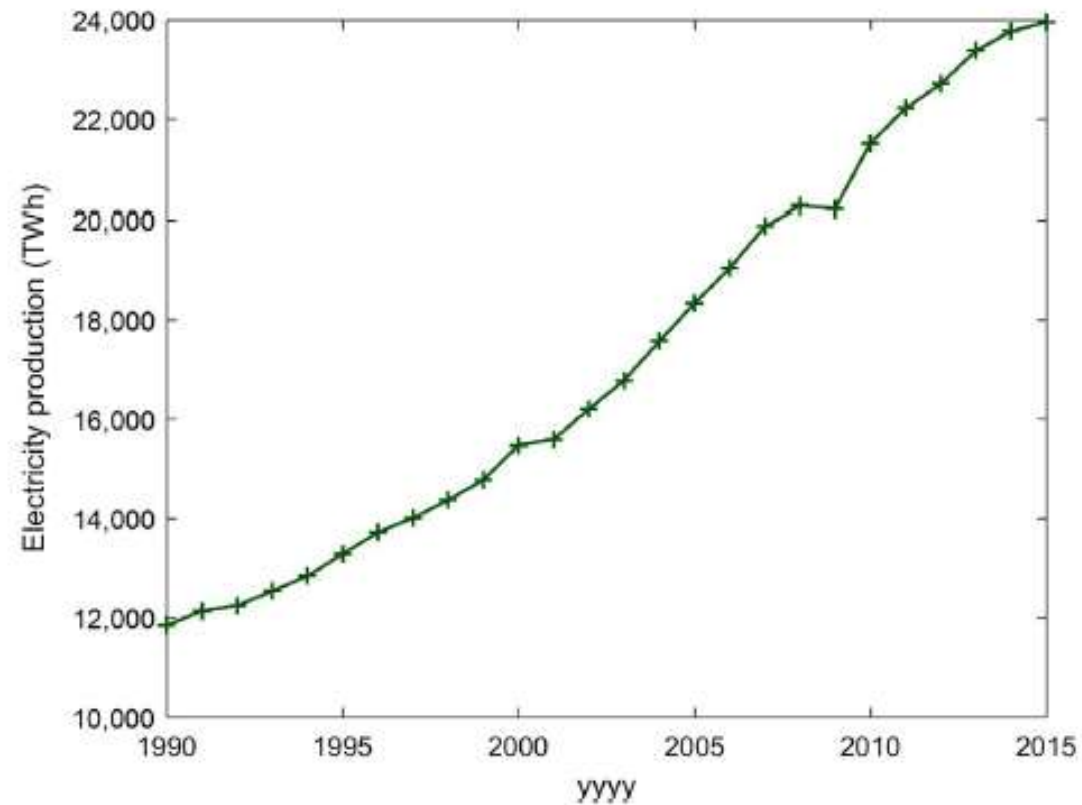


Introducción

- Consumo de electricidad per cápita → ligado a la calidad de vida.
- Suministro de E → **seguro, accesible y con poco impacto ambiental** (incluyendo emisiones de GHGs = gas de efecto invernadero, GEI).
- Factores que favorecen una transición hacia las energías renovables:
 - **Cambio climático** → crecimiento de la economía global (3.7%) ha llevado a un aumento de la demanda de energía (2.1%, 2017).
 - Los **combustibles fósiles** son responsables del 57% de las emisiones de GHGs (solo en 2017 aumentaron del 1.4%).
 - Reducción y potencial agotamiento de las reservas de combustibles fósiles.

Distribución de la producción de energía

Producción de electricidad (2015): 23950 TWh



Consumo de energía → uno de los indicadores más precisos de riqueza

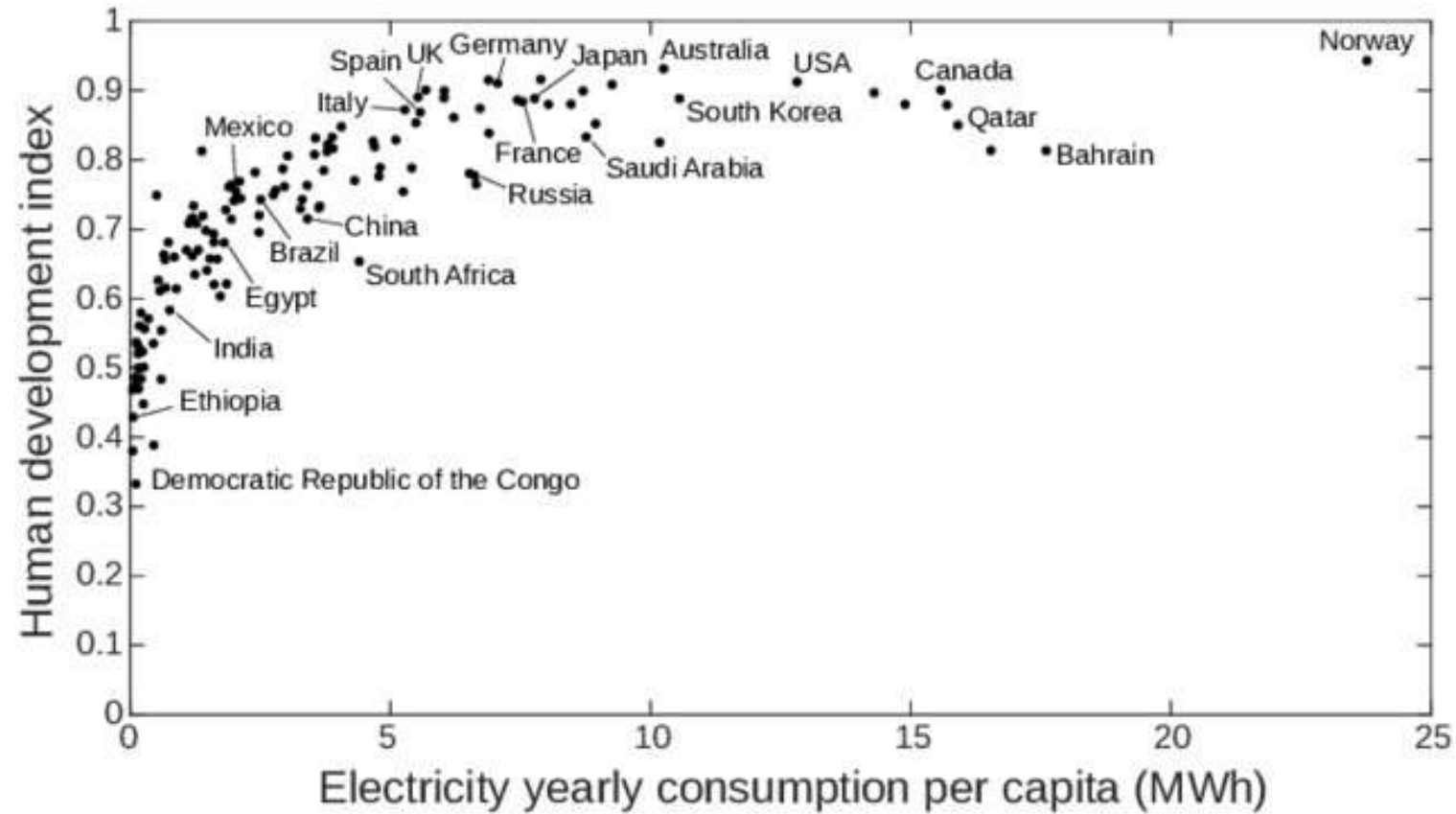


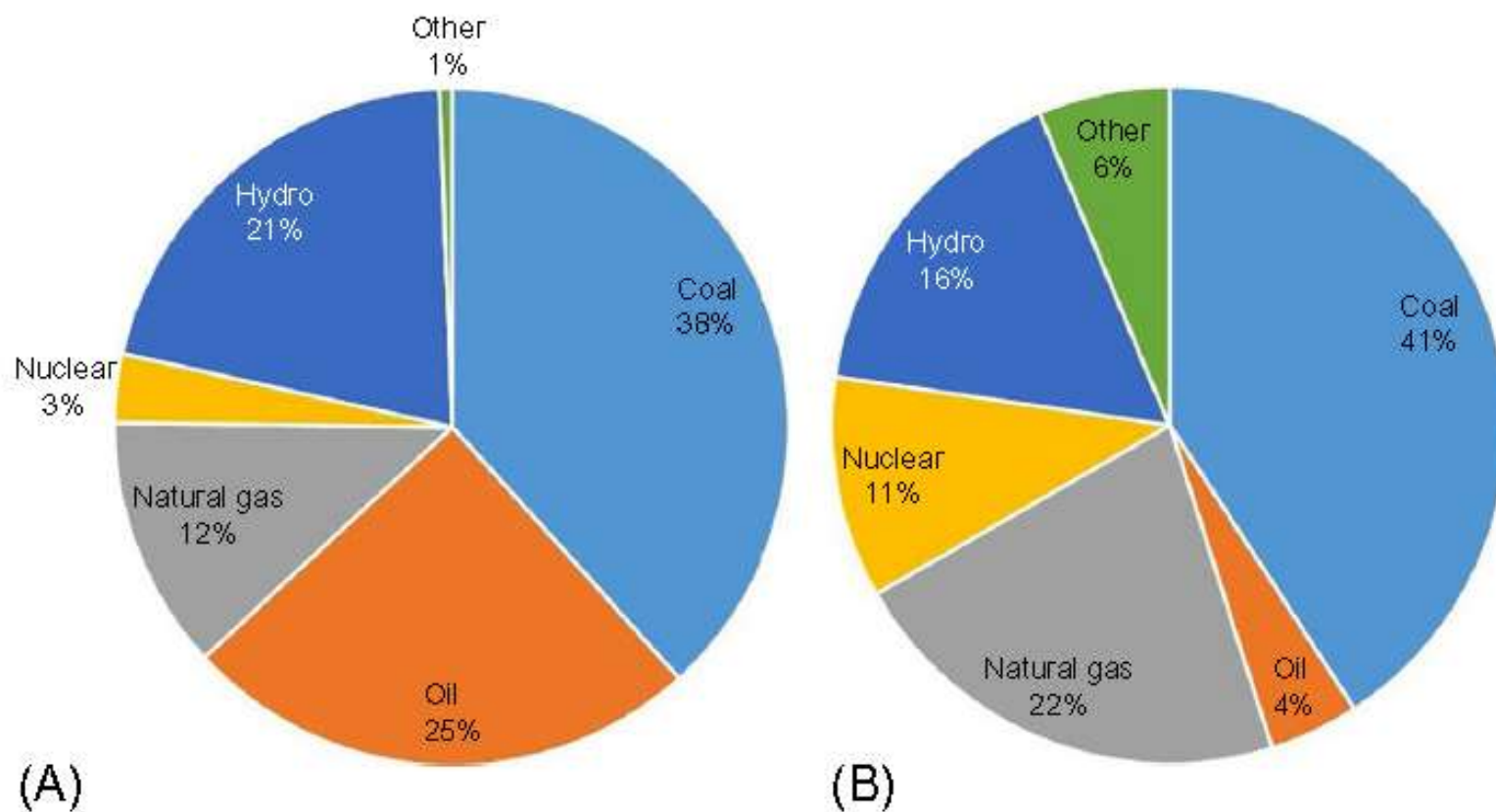
TABLE 1.1 Electric Power Consumption per Capita in 2013 for Selected Countries

Country	kWh per Capita
Iceland	54,799
Norway	23,326
Canada	15,519
Qatar	15,471
Sweden	13,870
United States	12,988
United Arab Emirates	10,904
Australia	10,134
Saudi Arabia	8741
Japan	7836
France	7374
Russia	6539
Ireland	5702
United Kingdom	5407
Spain	5401
Chile	3879

China	3762
Iran	2899
Brazil	2529
Mexico	2057
Costa Rica	1955
Peru	1270
Indonesia	788
India	765
Pakistan	450
Bangladesh	293
Sudan	159
Nigeria	142
Ethiopia	65
Niger	49
South Sudan	39

Source: Data from the World Bank (www.worldbank.org)

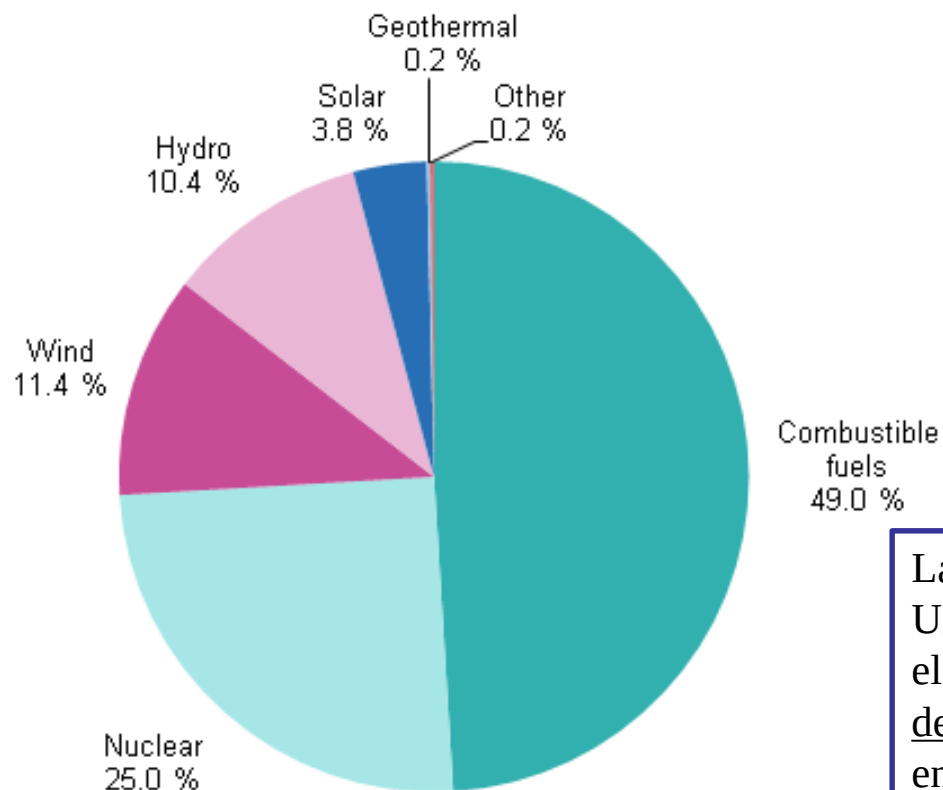
Producción de electricidad a nivel mundial. A: 1983, B: 2014



- Producción de electricidad a nivel UE

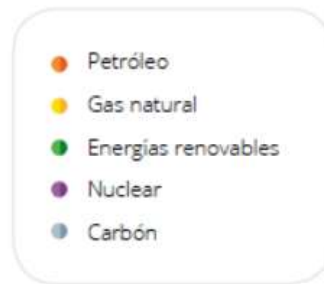
Net electricity generation, EU-28, 2017

(% of total, based on GWh)

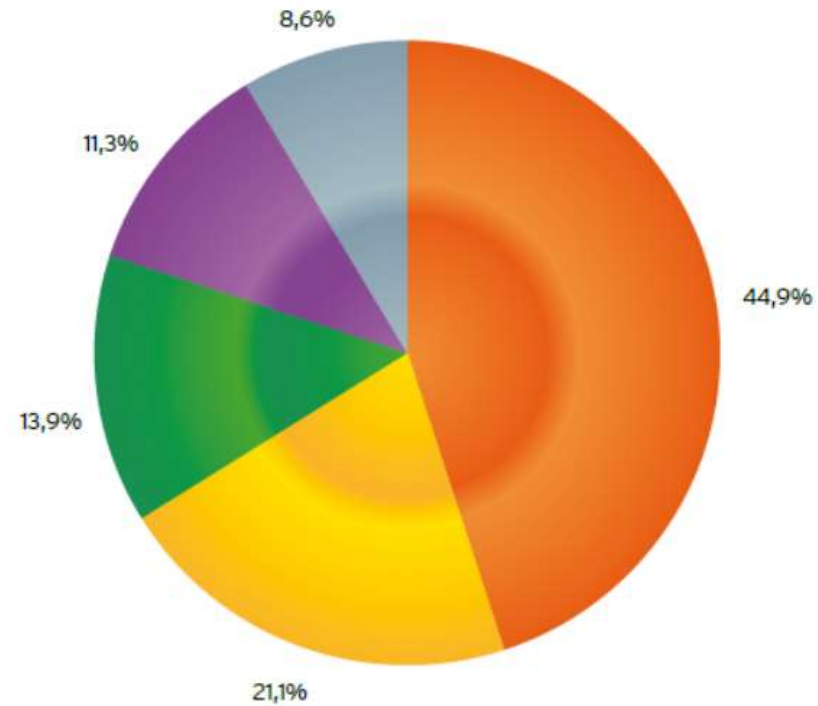


La directiva de energía renovable de la UE (2018/2001) establece que al menos el 32% de todo el consumo de energía debe generarse a partir de fuentes de energía renovables para 2030.

- Producción de electricidad en España



Crecimiento
renovable 8,2%



Propiedades de un sistema de producción de energía eléctrica

Predictibilidad:

- *Energía centrales térmicas* → **predecible**. Producción se puede controlar suministrando más combustible.
- Respuesta → a corto plazo en caso de gas y fuel. Carbón y nucleares necesitan un cierto tiempo de respuesta (varias horas) para ajustar la producción.
- *Energías renovables* → mayoría **poco predecibles**: solar, eólica, de las olas → dependen de las condiciones ambientales → son intermitentes. Importante hacer buenas predicciones (e.g. Velocidad del viento).
- Otras renovables como la energía de las mareas es muy predecible.

Propiedades de un sistema de producción de energía eléctrica

- Fiabilidad :

- Una red de energía eléctrica tiene que proporcionar un **nivel base** de potencia seguro para satisfacer unas mínimas necesidades, aunque no cubra los picos de demanda.
- Actualmente, este nivel base se cubierto con **carbón y nucleares**.
- Mayoría de renovables son poco fiables: eólica y solar dependen de condiciones ambientales y la hidroeléctrica puede estar influenciada por las sequías.
- Para mejorar la fiabilidad de las renovables hay que mejorar los sistemas de almacenamiento.

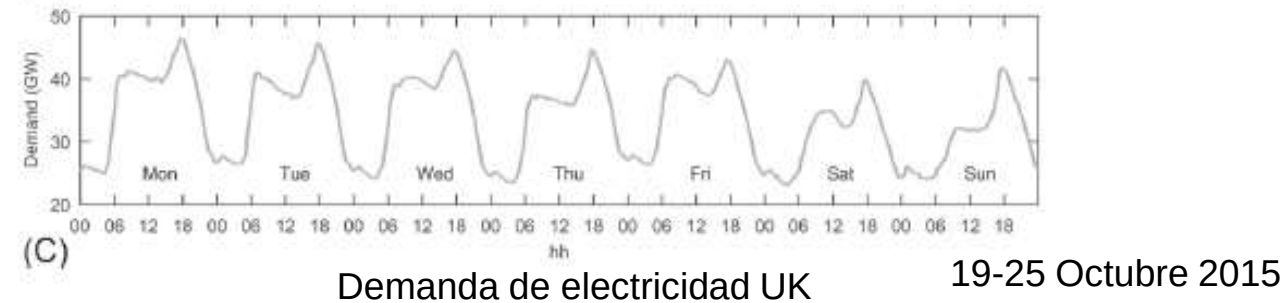
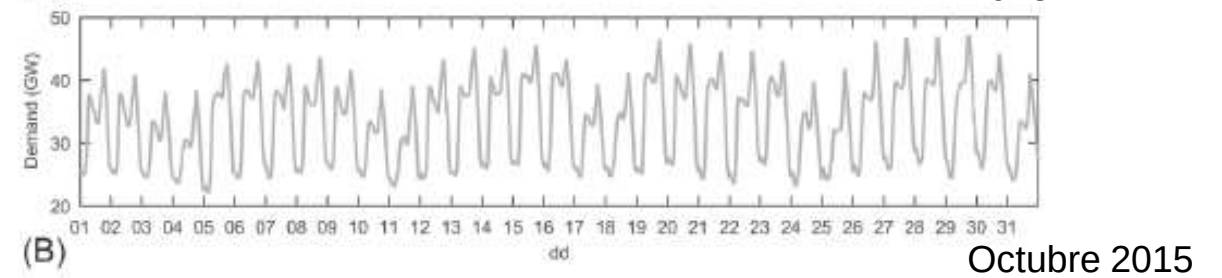
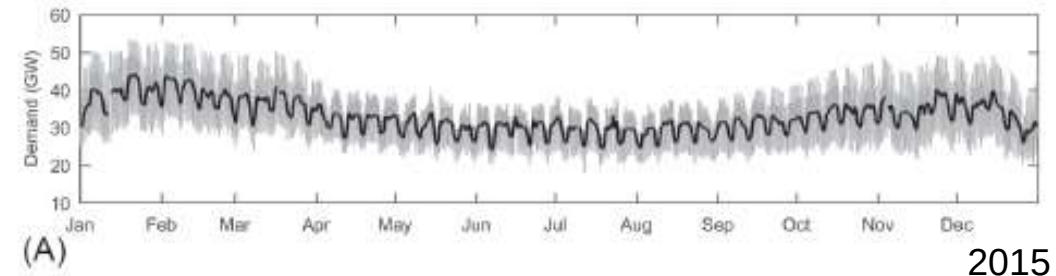
Propiedades de un sistema de producción de energía eléctrica

- Flexibilidad :

- Las plantas de energía que se pueden poner en marcha o parar, o que pueden variar su producción por Δ demanda se dice que son flexibles.
- Carbón y nucleares no lo son, porque necesitan unas horas para ajustar su producción.
- Térmicas de gas si lo son (en 30 min pueden pasar de parada en producción máxima).
- Renovables no lo son, excepto las **hidroeléctricas** → se puede ajustar el volumen de agua que se turбина.
- **Eólica es flexible en caso de viento fuerte** → se pueden ajustar las turbinas para dar producciones inferiores a las máximas.

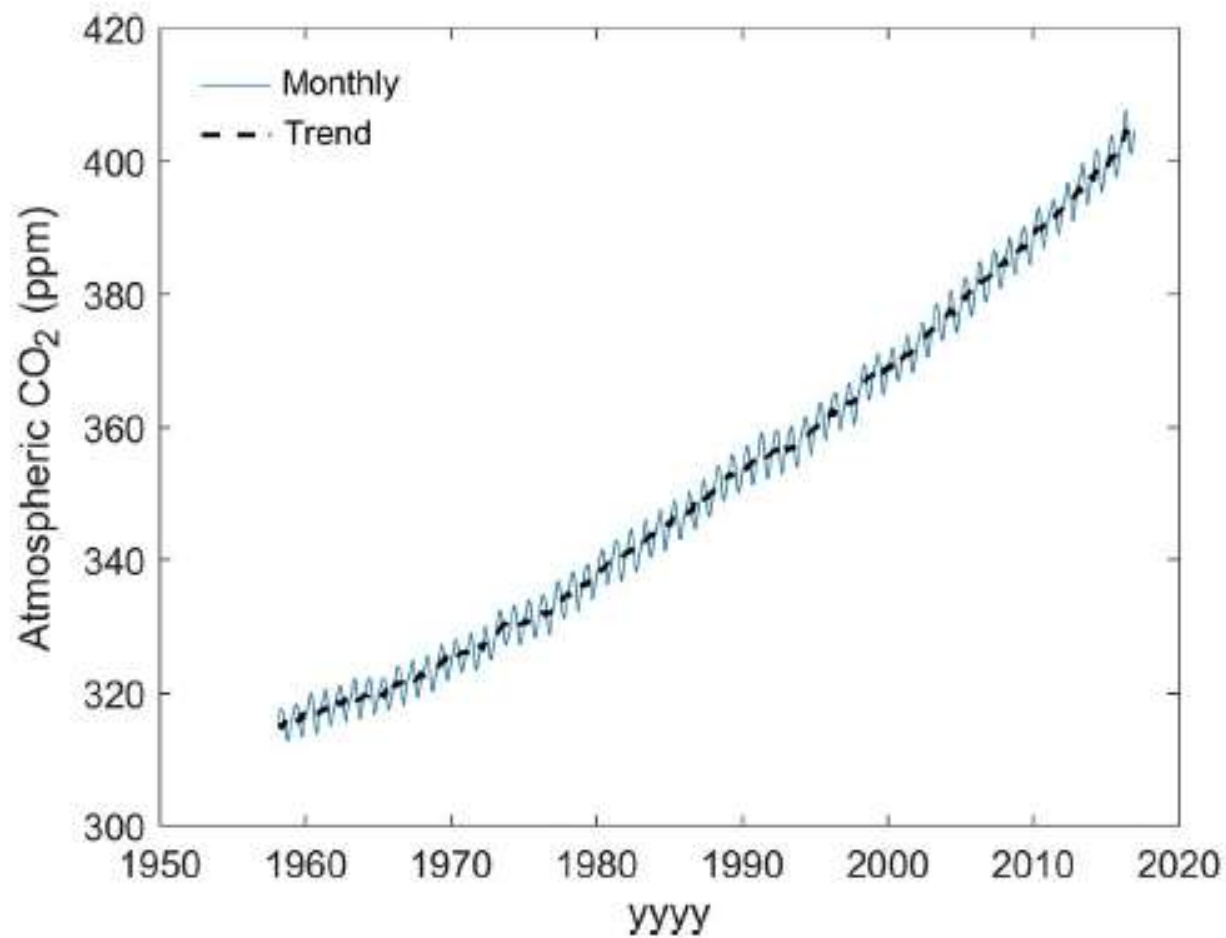
Propiedades de un sistema de producción de energía eléctrica

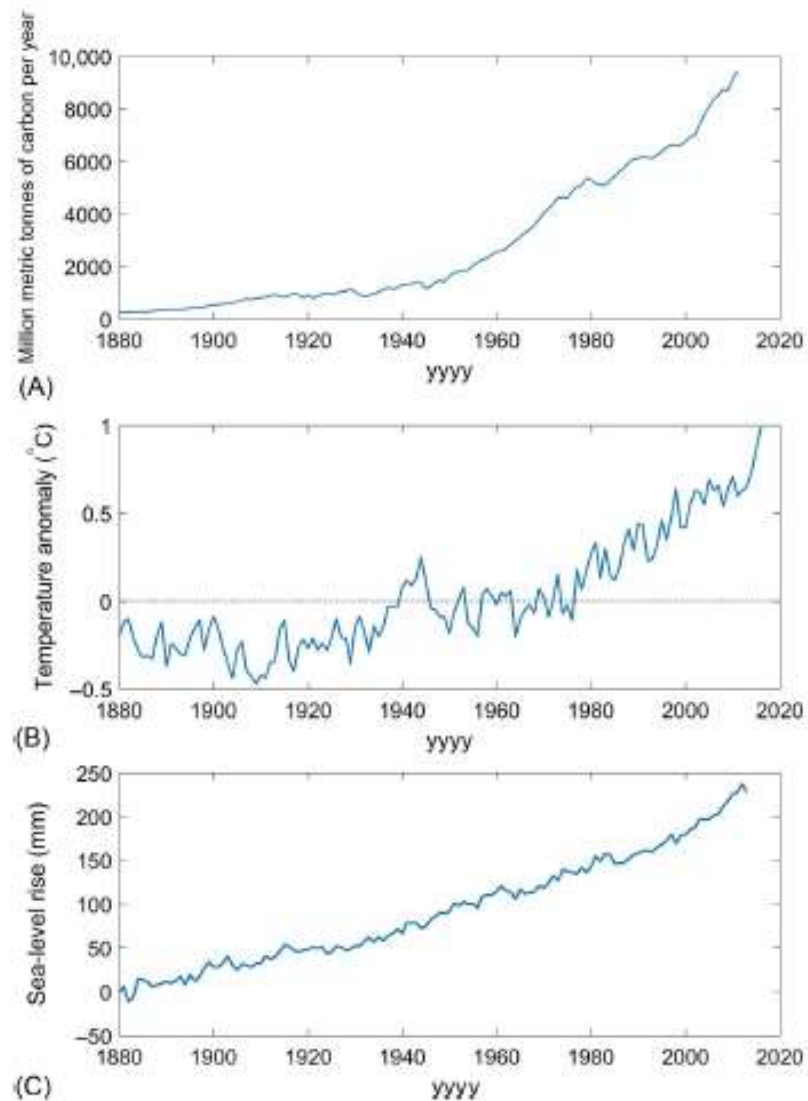
- **Suministro ↔ demanda**
- La cantidad de E eléctrica que se suministrada a la red tiene que igualar a la demanda.
- La demanda sigue un patrón predecible:
 - + Los meses de invierno (calefacciones)
 - + Jornada laboral → luz, calefacción, a / a, PCs, maquinaria ...



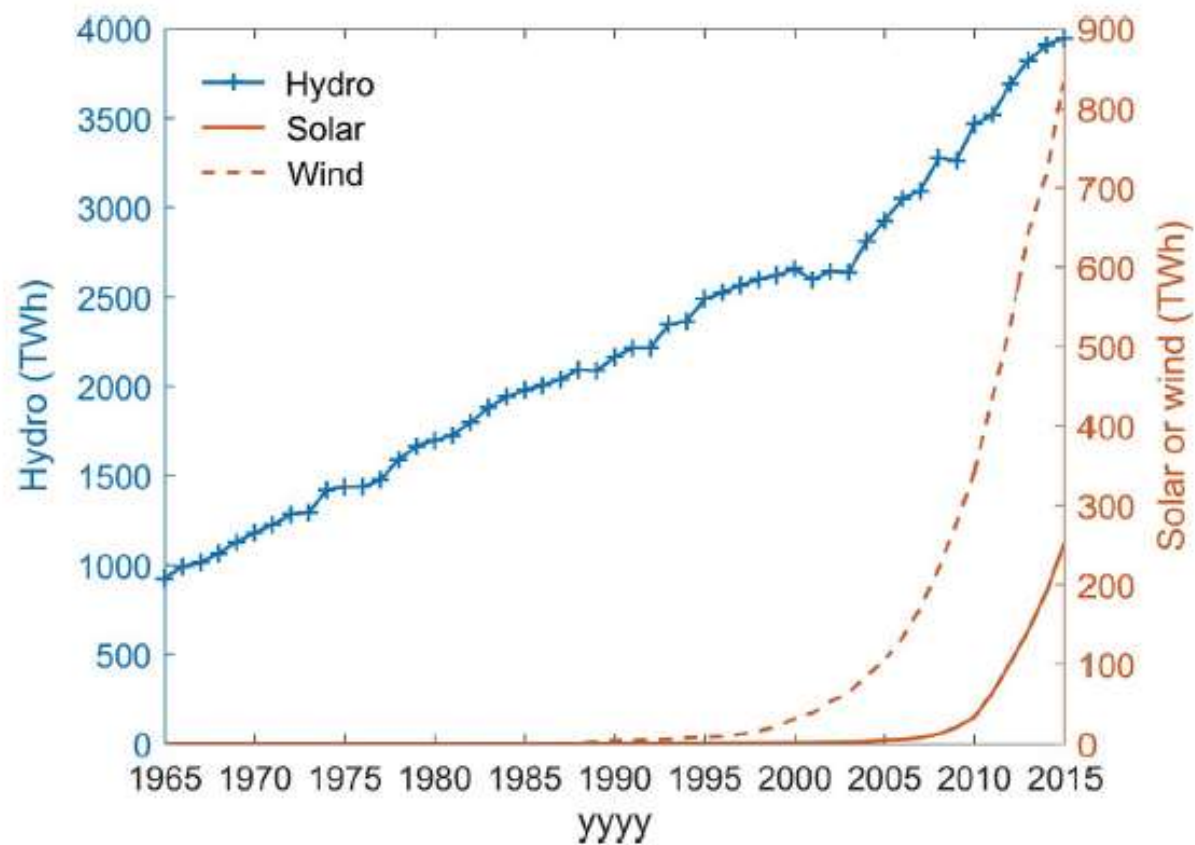
Energías renovables (ER)

- ER → Cualquier forma de E que puede ser repuesta a igual velocidad (o superior) que su consumo → biomasa, solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, oceánica (olas, mareas, térmica oceánica).
- Combustibles fósiles → no son ER porque no son repuestos a corto plazo a la misma tasa que la de su uso. Además reservas limitadas. A la actual tasa de consumo:
 - Carbón: 114 años
 - Gas natural: 53 años
 - Petróleo: 51 años
- ER → reducen las emisiones de CO₂ por unidad de E producida (1 a 10% de los combustibles fósiles).





Producción de electricidad con energías renovables



- Potencial teórico de las ER → mayor que toda E utilizada ($406 \text{ EJ / año} = \underline{113 \cdot 10^3 \text{ TWh / año}}$ en 2017)
- 1 **exajoule** (EJ) = $10^{18} \text{ J} = 277.8 \text{ TWh}$

Table 1.4 | Renewable energy theoretical potential expressed as annual energy fluxes of EJ/yr compared to 2008 global primary energy supply.

Renewable source	Annual Flux (EJ/yr)	Ratio (Annual energy flux/ 2008 primary energy supply)	Total reserve
Bioenergy	1,548 ^d	3.1	—
Solar Energy	3,900,000 ^a	7,900	—
Geothermal Energy	1,400 ^c	2.8	—
Hydropower	147 ^a	0.30	—
Ocean Energy	7,400 ^a	15	—
Wind Energy	6,000 ^a	12	—
Annual Primary energy source	Annual Use 2008 (EJ/yr)	Lifetime of Proven Reserve (years)	Total Reserve (EJ)
Total Fossil	418 ^b	112	46,700
Total Uranium	10 ^b	100–350	1,000–3,500
Total RE	64 ^b	—	—
Primary Energy Supply	492 (2008) ^b	—	—

Sources: a. Rogner et al. (2000); b. IEA (2010c) converted to direct equivalent method (Annex II; IEA, 2010d); c. Pollack et al. (1993); d. Smeets et al. (2007).

Energías renovables marinas

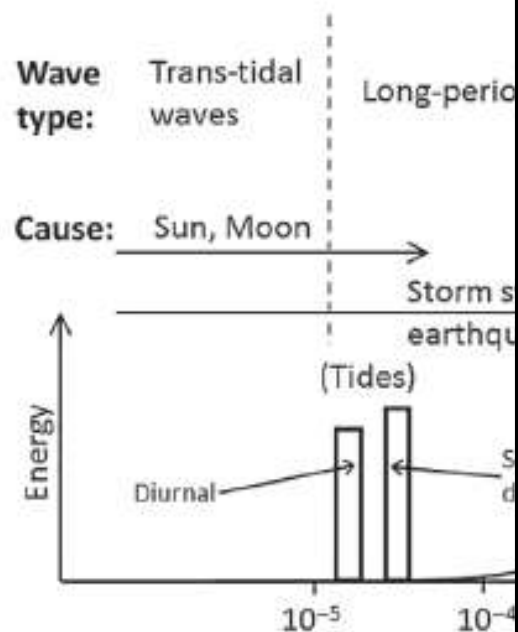
- Fuentes de ER marinas → viento, olas, mareas, corrientes, térmicas, otros
- Viento → muchas plantas ya operativas.



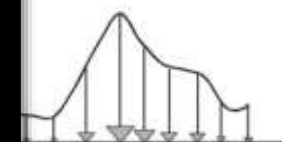
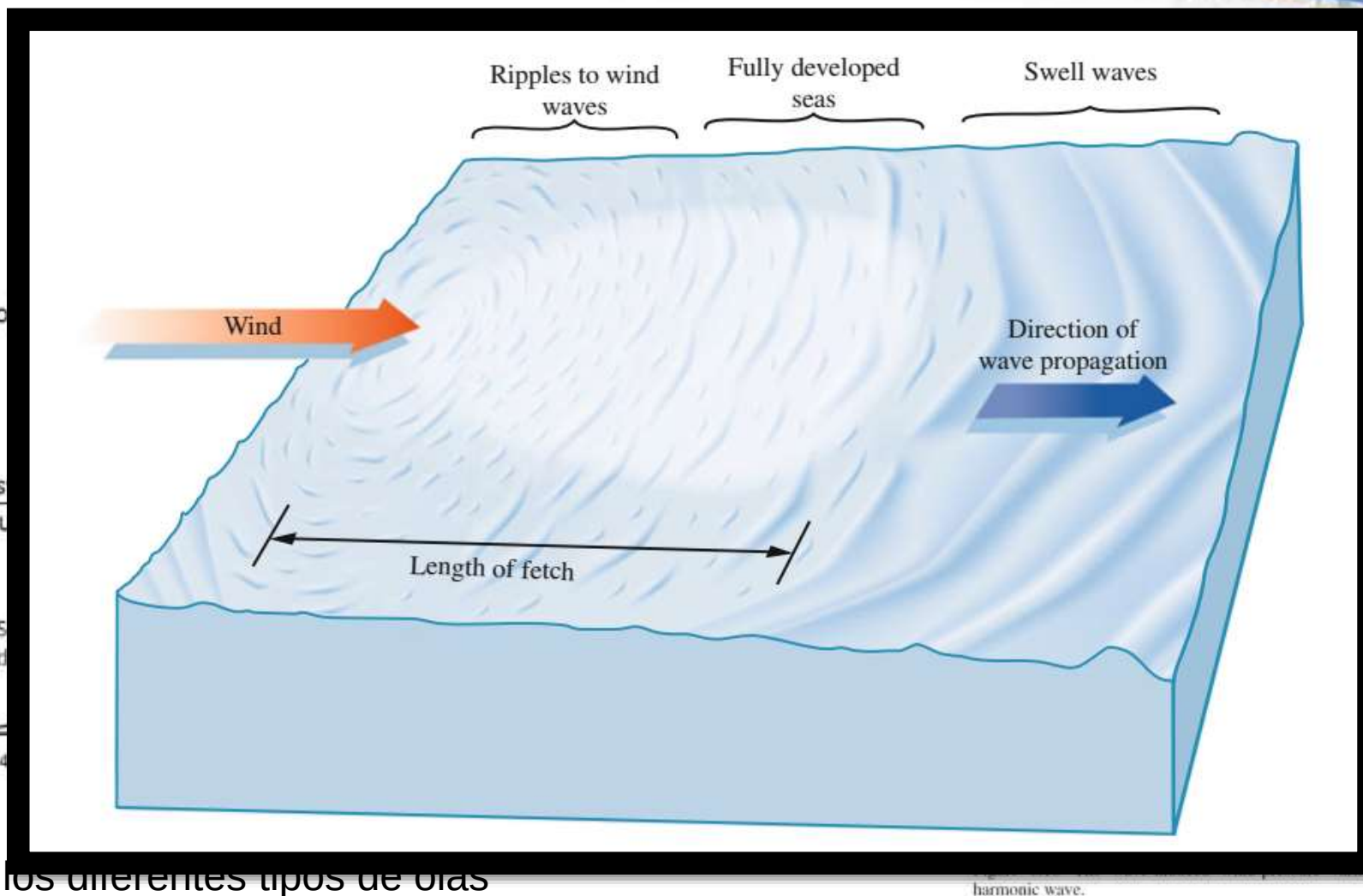
Energías renovables marinas

- El potencial global estimado para la producción anual de energía eléctrica a partir de energías marinas se acerca a los **100,000 TWh / año**.
- En particular, la energía de las olas presenta muchos aspectos positivos como:
 - i) el océano, que cubre alrededor del 75% de la Tierra, es muy accesible;
 - ii) **las olas contienen una enorme cantidad de potencial energético** (se forman y transportan y retienen energía constantemente durante miles de kilómetros), **24-70 KW / m de ola**;
 - iii) la energía de las olas tiene una mayor densidad y previsibilidad que la energía solar y eólica.
 - iv) que los dispositivos de energía de las olas pueden generar energía hasta el 90% del tiempo, en comparación con el ~25% de los dispositivos solares y eólicos.

- Olas $\rightarrow E_c$ y E_p



Energía relativa de los diferentes tipos de olas



ing as a (nearly) frozen dis-

huijsen (2007)



induced air pressure,
moving upwards

on over a propagating

harmonic wave.

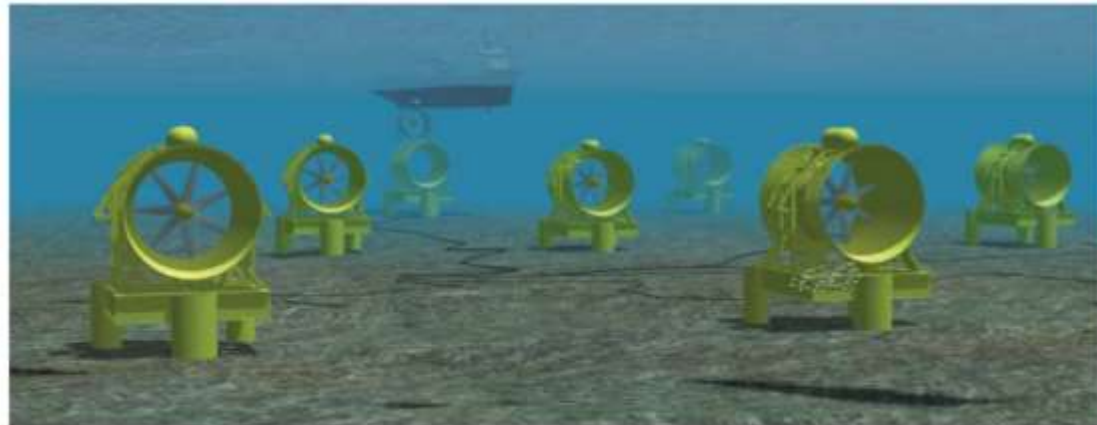
- Olas → sistemas en desarrollo (WECs) y plantas piloto.



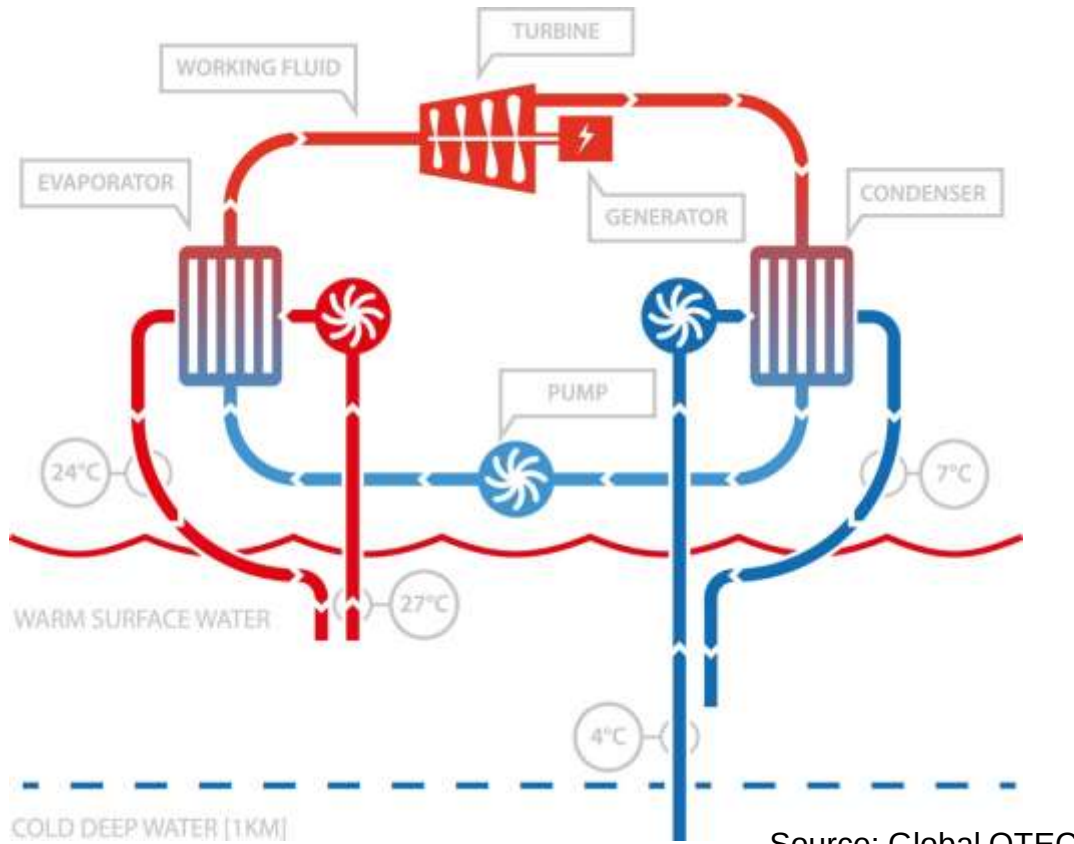
- Mareas (Ah) → existen desde hace muchos años pero muy pocas proyectadas debido a su impacto ambiental.



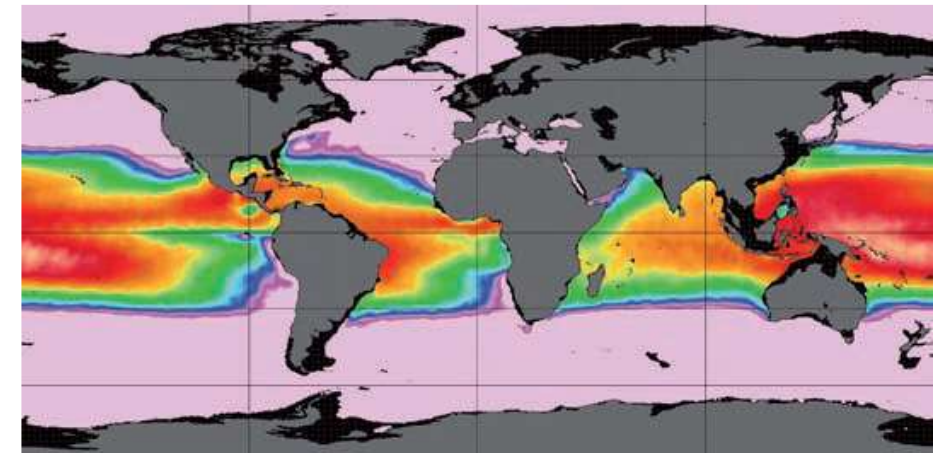
- Corrientes (oceánicas / mareas) → muchos sistemas desarrollados y algunos en fase de pruebas.



- Maremotèrmica → explota la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo (> 20°).



Source: Global OTEC



OTEC. Diferencias de T^a entre
20 m y 1000 m de profundidad

Órdenes de magnitud potencia y producción anual

- Turbina corrientes: 0.5 a 1 MW $\rightarrow$ 3 GWh
- Turbina viento offshore: 3 a 6 MW $\rightarrow$ 16 GWh
- Central marea La Rance: 240 MW $\rightarrow$ 550 GWh
- Central nuclear Vandellós II (Tarragona) 8 $\rightarrow$ 10 TWh
- Central Hidroeléctrica Itaipú (Brasil/Paraguay) $\approx$ 100 TWh
- Consumo electricidad en España: $>$ 200 TWh

Grado de madurez de las tecnologías (UE)

TRL	Descripción
1	Principios básicos observados
2	Formulado el concepto tecnológico
3	Prueba de concepto experimental (factibilidad, potencial práctico)
4	Tecnología (componentes) validada en laboratorio
5	Tecnología (integrada) validada en laboratorio
6	Tecnología demostrada en un ambiente relevante
7	Demostración del prototipo del sistema en un ambiente operacional
8	Sistema completado a nivel de diseño y cualificado para trabajar en las condiciones previstas.
9	Sistema real probado en ambiente operacional. Preparado para utilizarse a escala real.

fase desarrollo	TRL	indicadores
R & D	1 - 4	Aparato a pequeña escala validado en el laboratorio
		Ensayo y validación de los componentes
		Modelos a pequeña / mediana escala
Prototipo	3-6	Dispositivos individuales a escala real
		Desplegados en condiciones ambientales relevantes
		Capacidad para evidenciar generación de electricidad
Demostración	5-7	Pequeño conjunto de dispositivos a escala real
		Desplegados en condiciones ambientales relevantes
		Capacidad de evidenciar generación de electricidad para la red
Pre-comercial	6-8	Conjunto medio de dispositivos a escala real interaccionando
		Desplegados en condiciones ambientales / operacionales relevantes
		Conectado a la red (subestación)
Despliegue industrial	7-9	Planta de energía oceánica comercial
		Desplegada en condiciones operacionales reales
		Producción masiva de componentes y aparatos

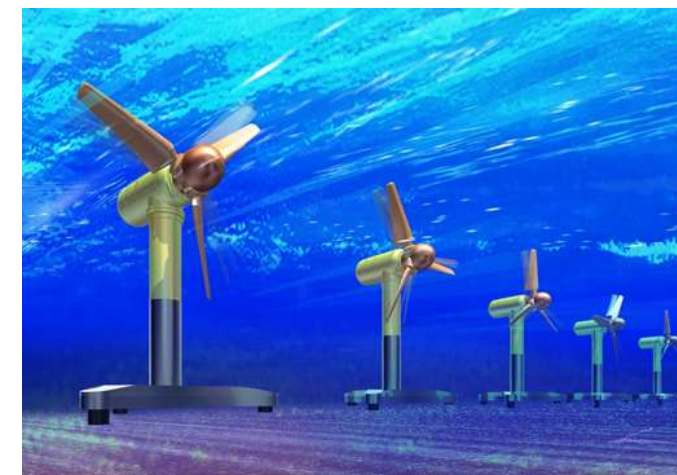
Marco temporal para el desarrollo de las tecnologías de energía oceánica



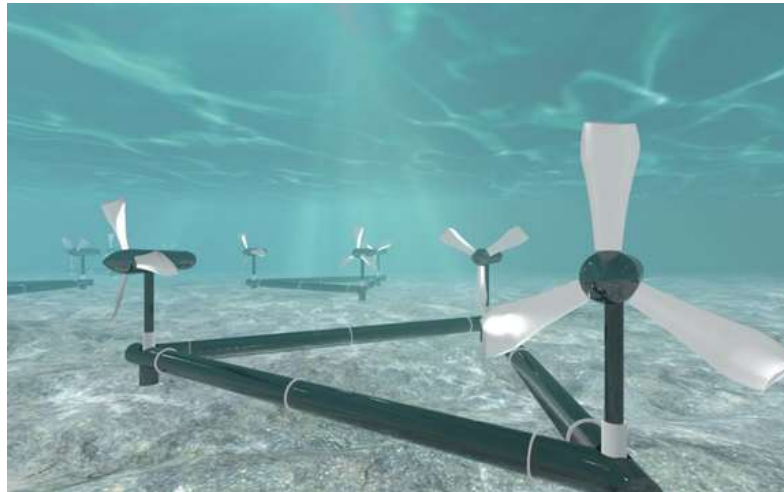
2015			2020			2030			2040			2050		
Prototipo	3-6	Dispositivos individuales a escala real												
		Desplegados en condiciones ambientales relevantes												
		Capacidad para evidenciar generación de electricidad												
Demostración	5-7	Pequeño conjunto de dispositivos a escala real												
		Desplegados en condiciones ambientales relevantes												
		Capacidad de evidenciar generación de electricidad para la red												

Condicionantes del medio marino y Aspectos físicos a considerar

- i1. profundidad:
 - Tecnologías sumergidas → tener en cuenta mínima profundidad para dejar pasar barcos.
 - Tecnologías fijadas al fondo marino → tener en cuenta máxima profundidad incluyendo marea, ondas, storm surge → condiciona dimensiones de la cimentación y coste.



- i1. profundidad:
 - Tecnologías flotantes ancladas al fondo → considerar ambos aspectos.
 - Preferentemente fondo regular, con pocos gradientes → facilita la instalación y la estabilidad de las cimentaciones.



- i1. profundidad:
 - Para turbinas de viento fijas → profundidades máximas de 30 m
 - Para turbinas de viento flotantes → necesitan una profundidad mínima para funcionar bien → 50 a 200 m o más.
 - Turbinas de corrientes sumergidas → depende del gálibo para navegación.
Mínimo de 20 m o 40 m para turbinas grandes ($\Phi = 20$ m)
 - Energía del oleaje nearshore → sólo regularidad del fondo.
 - Energía del oleaje offshore → mínimo 20 a 50 m.
 - OTEC → del orden de 1500 m.

- **i2. Naturaleza del fondo: rocas, guijarros, grava, arena, lodos.**
 - Técnicamente se pueden superar los inconvenientes para un fondo con poca capacidad portante, pero se incrementa el coste.
 - Ideal para aparato fijados al fondo (turbinas) → fondo arenoso.
 - Se debe estudiar el posible impacto en la dinámica sedimentaria y la morfodinámica de cimentaciones, anclajes, aparatos.

- **i3. Condiciones meteo-oceanográficas:**
 - Sobre todo condiciones extremas → viento y olas en grandes tormentas ($Tr = 100$ años), corrientes máximos, niveles del mar extremos.
 - condicionan:
 - Dimensiones de las estructuras.
 - La explotación de los recursos (rango de funcionamiento).
 - Operaciones de instalación y mantenimiento.



- **i4. Distancia a la costa:**
 - Determina la longitud de cable submarino → factor crucial en el coste del proyecto.
 - impacto paisajístico
 - Pueden cambiar los condicionantes administrativos

ii. Aspectos ambientales a considerar

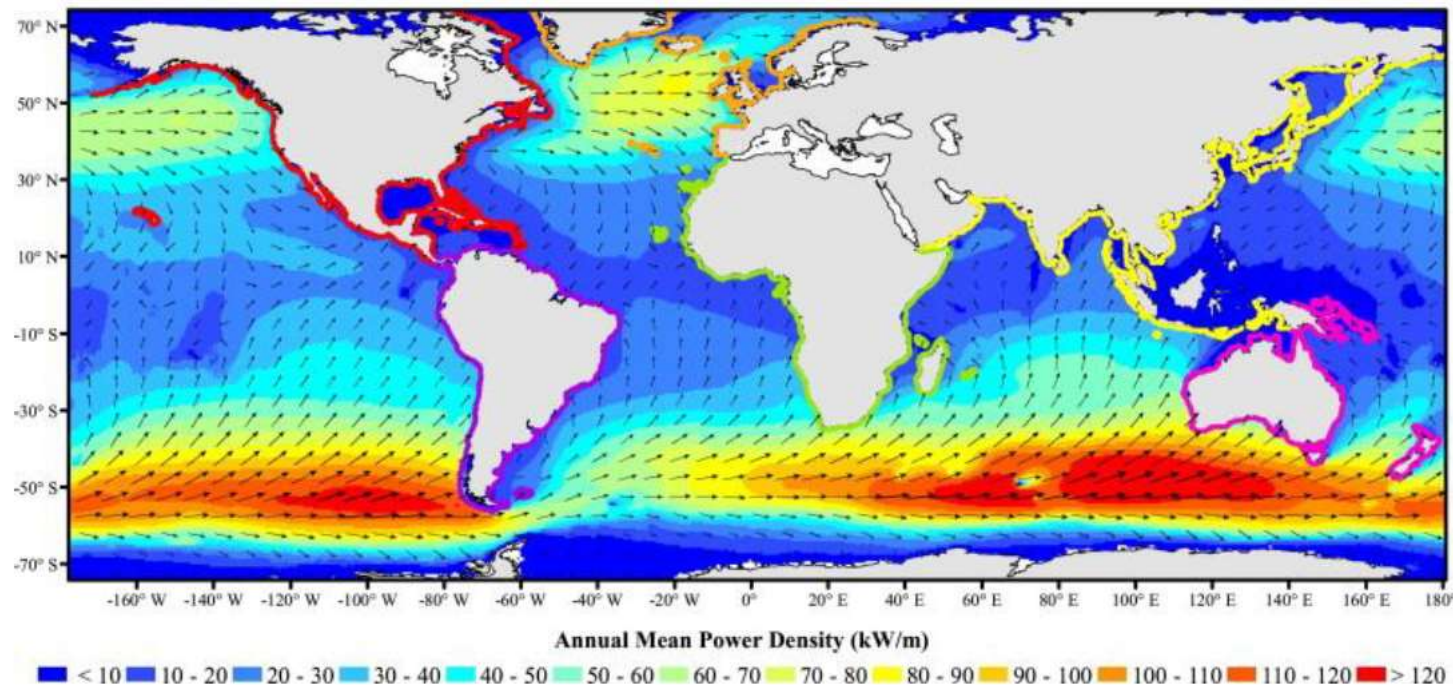
- Se deben caracterizar los siguientes aspectos y el potencial impacto del proyecto:
 - Sedimentos y morfodinámica
 - Flora marítima y costera
 - Fauna y avifauna marítima
 - Áreas protegidas → parques y reservas naturales, zonas protegidas, etc.

iii. Materiales en el medio marino

- Hasta ahora, muchos prototipos pero pocos conectados a la red eléctrica.
- Mucha experiencia en otros campos: industrias naval y del petróleo.
- 3 elementos principales en los aparejos de ERM:
 - 1. Piezas móviles (flotadores, aspas ...)
 - 2. Estructuras de apoyo (plataformas, torres ...)
 - 3. Anclajes (pantalanes, cables de amarre ...)
- Ambiente marino → hostil por los materiales que tienen que soportar:
- Corrosión de las partes metálicas
- Envejecimiento de los componentes basados en polímeros

Energías renovables marinas: undimotriz

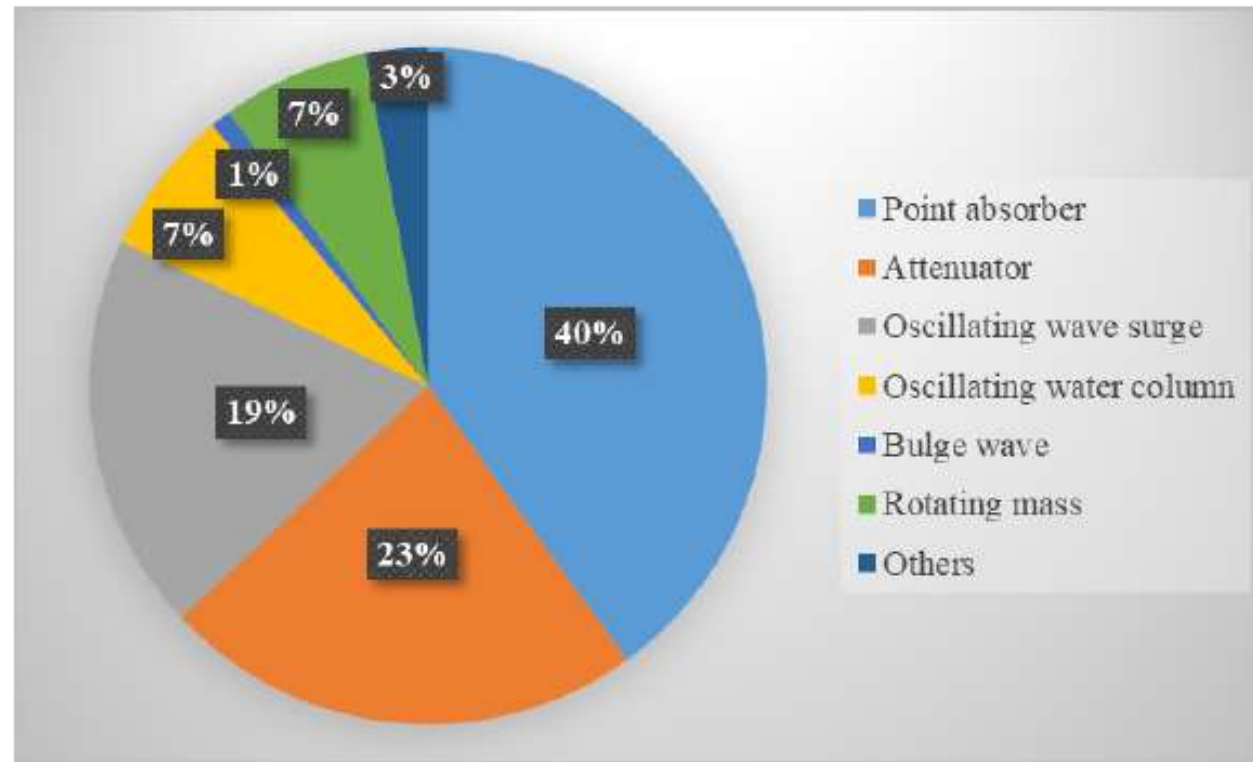
El "Consejo Mundial de la Energía" ha estimado que el doble de la producción mundial de electricidad actual, podrían producirse a partir de los océanos a través de la energía de las olas.



Map of worldwide wave resource. Source: [Gunn and Stock-Williams \(2012\)](#).

Energías renovables marinas: undimotriz

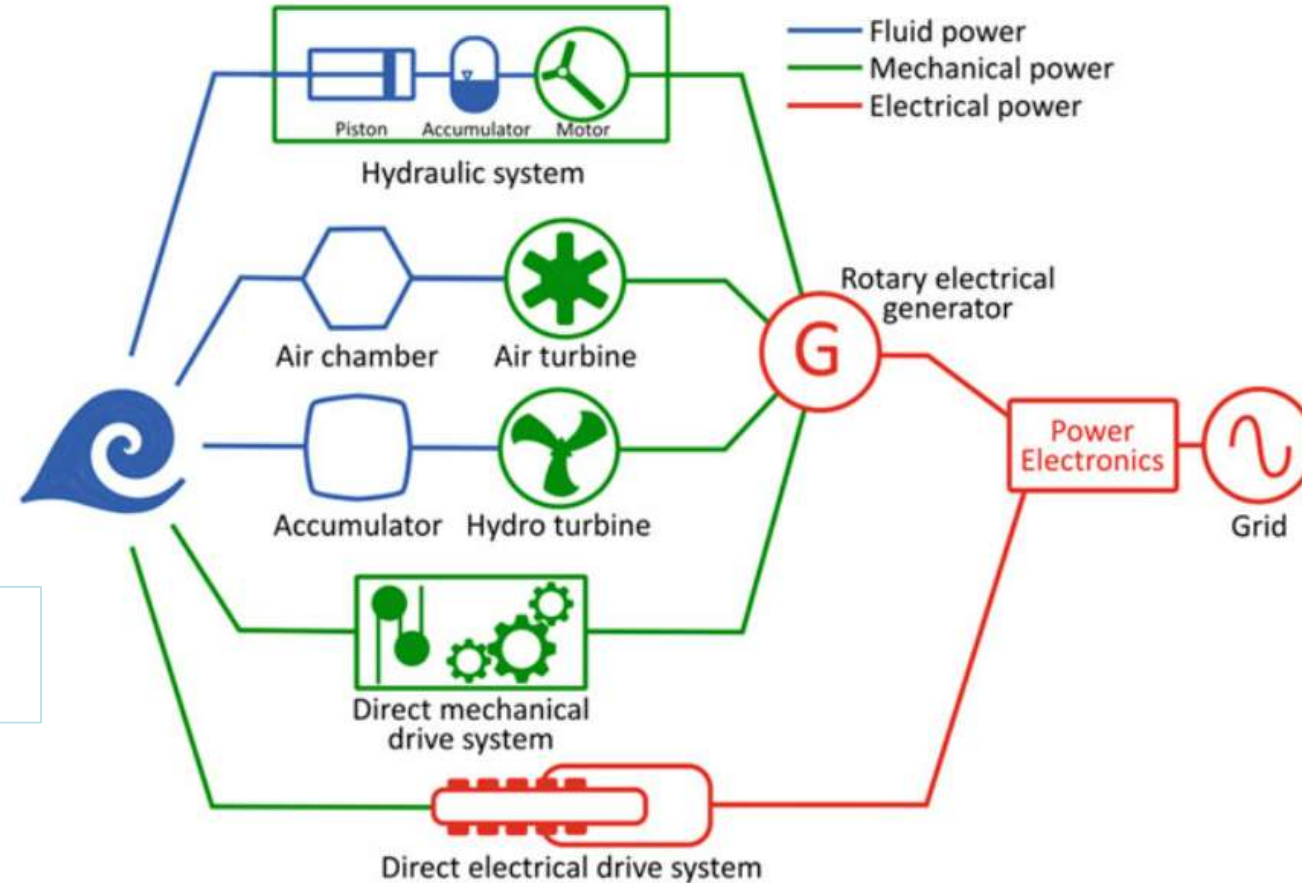
Distribución de los esfuerzos de investigación según el tipo de tecnología de energía undimotriz (European Marine Energy Centre, EMEC).



Power Take-Off (PTO)

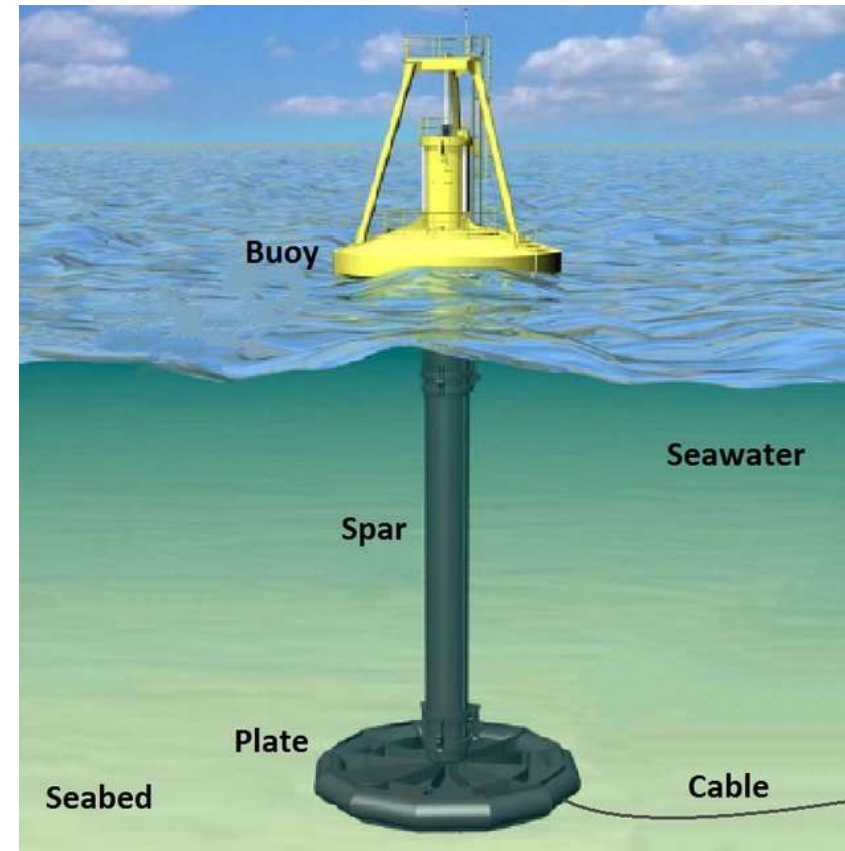
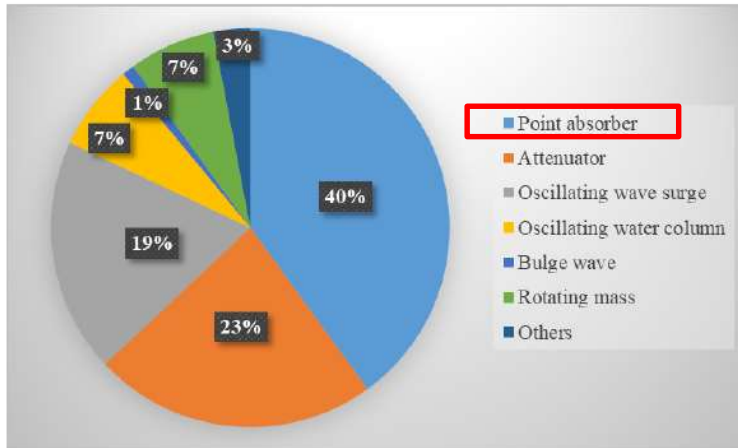
El sistema de PTO debe ser **robusto, fiable** y debe requerir el **menor mantenimiento posible**

WEC control → rigidez y / o la amortiguación del sistema → PTO



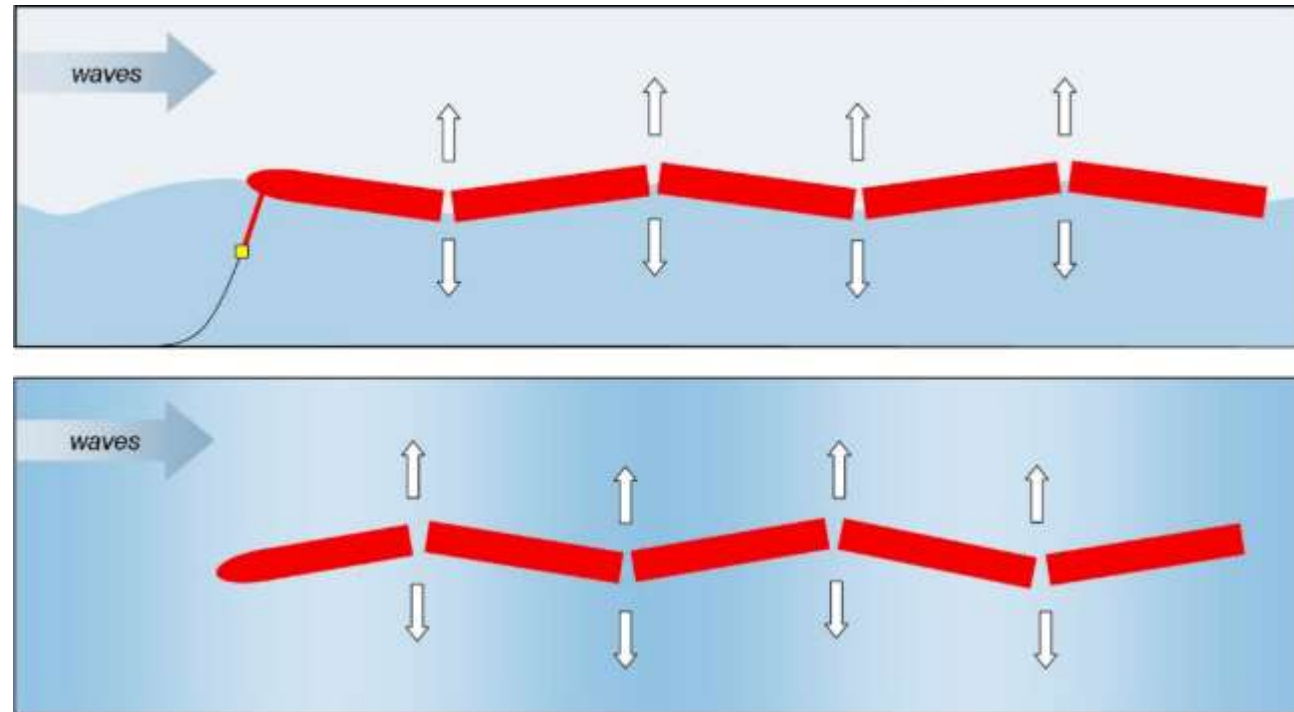
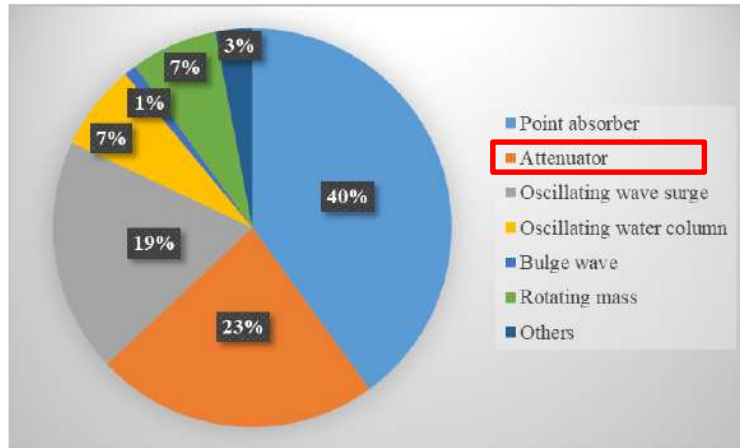
Handbook of Ocean Wave Energy, pp 203-220

Energías renovables marinas: undimotriz



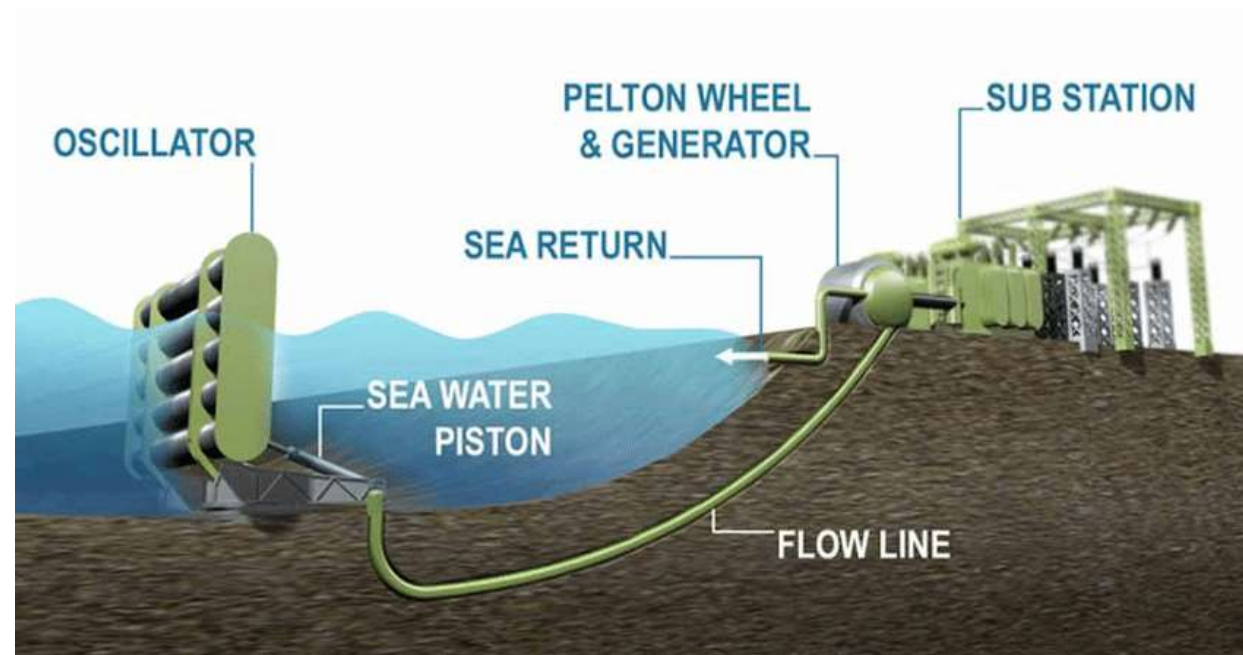
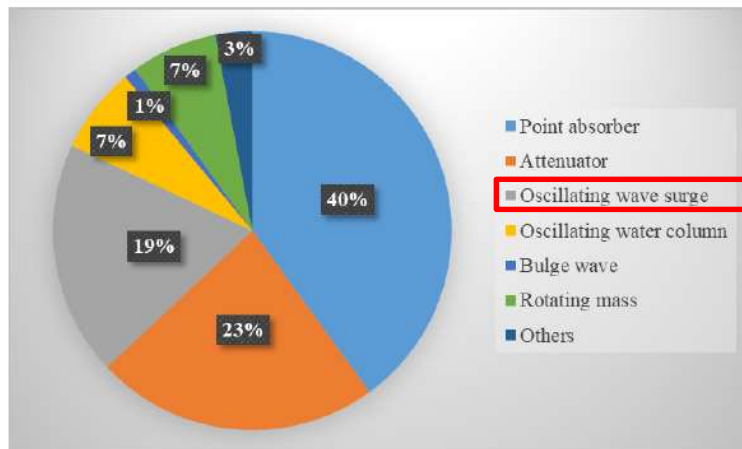
Source: Zou et al. (2016)

Energías renovables marinas: undimotriz



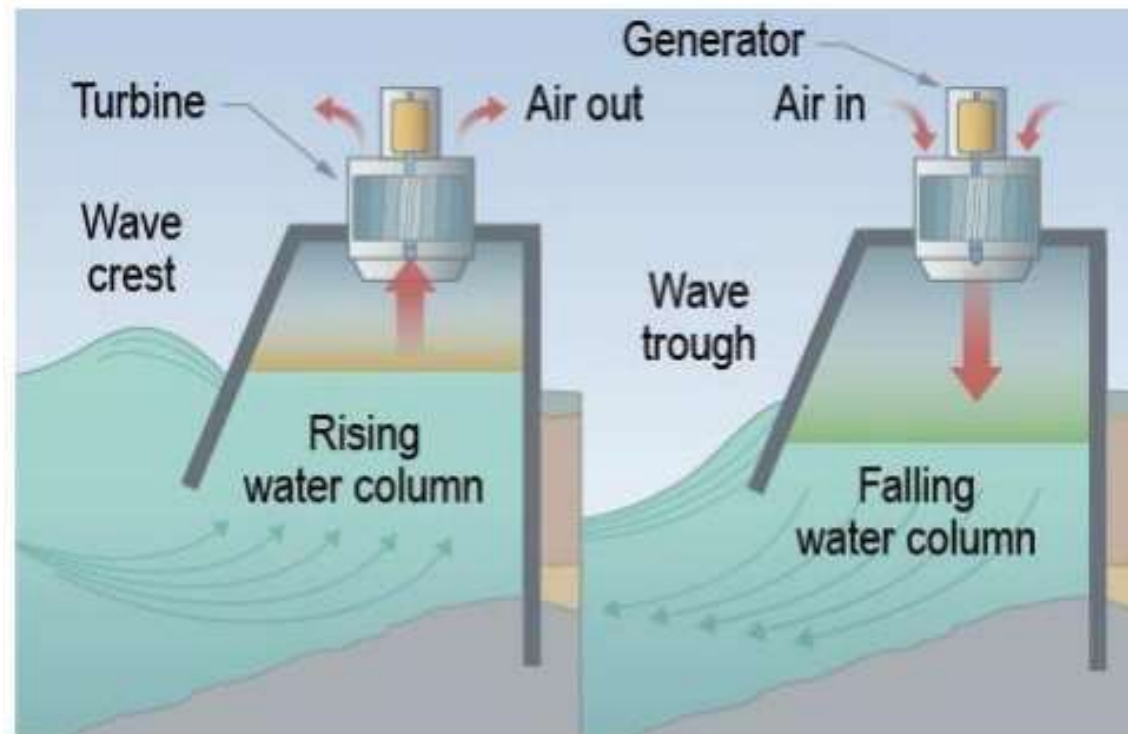
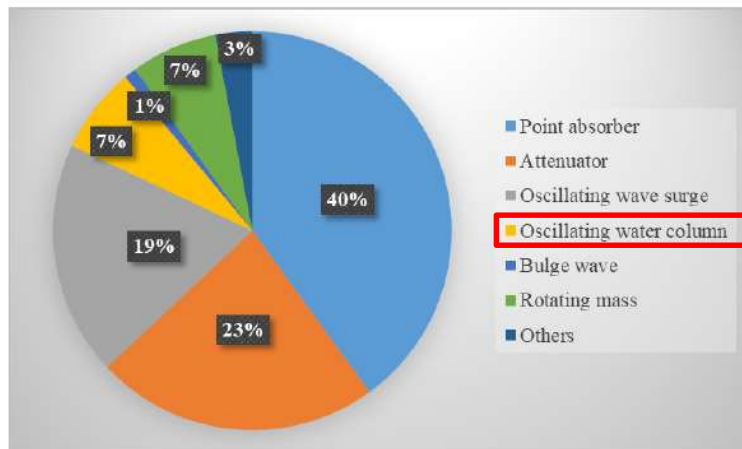
Source: Hong et al. (2014)

Energías renovables marinas: undimotriz



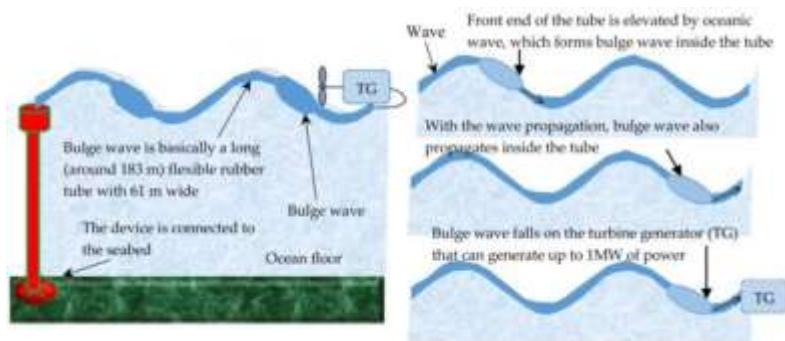
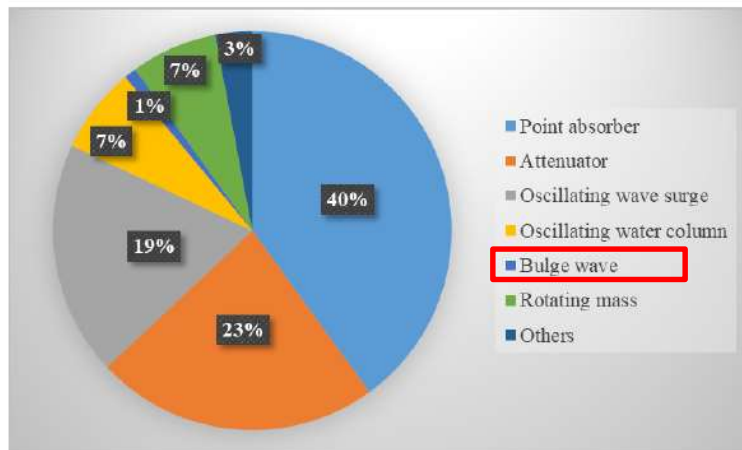
Source: Am Ghasemi (2013)

Energías renovables marinas: undimotriz



Source: <https://openei.org/>

Energías renovables marinas: undimotriz

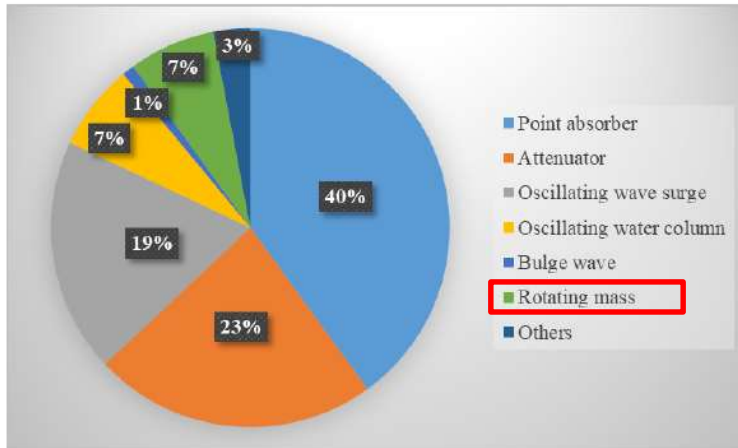


Source: Farrok et al. (2020)



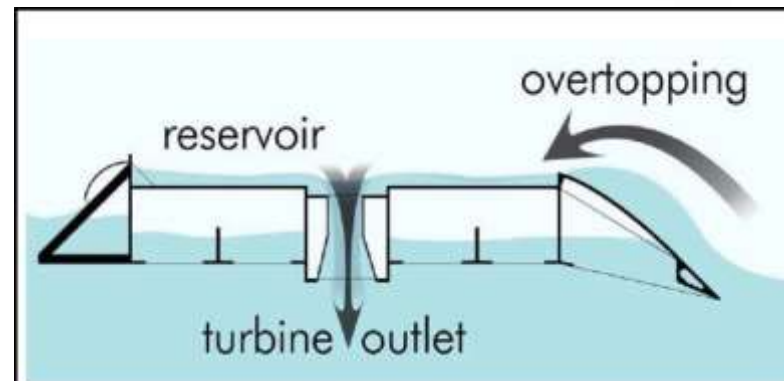
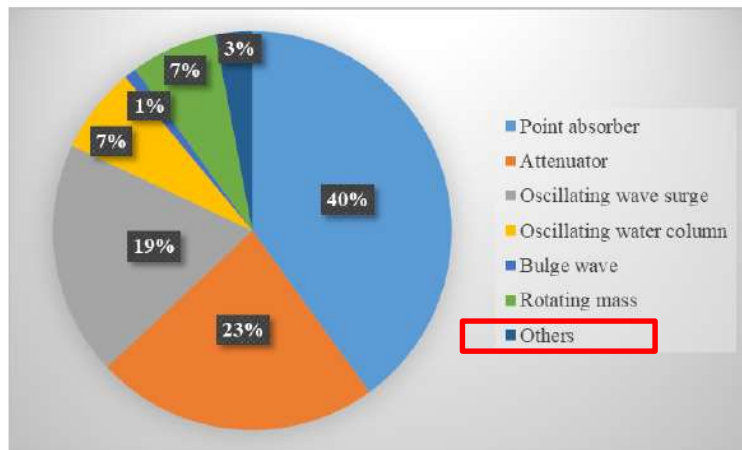
Source: Checkmate SeaEnergy Ltd

Energías renovables marinas: undimotriz



Source: <https://wello.eu/>

Energías renovables marinas: undimotriz



Source: Cusano et al. (2013)



Source: Todalshaug et al. (2015)



Source: ecowavepower.com

Energías renovables marinas: undimotriz

Desventaja de la energía undimotriz= es el coste de la tecnología involucrada.

Se estima que el costo por MWh obtenido de la energía de las olas es superior a más de 3 veces que la energía de las centrales eléctricas de carbón.

Se necesita más investigación sobre la tecnología de la energía de las olas para reducir los costos!

Energías undimotriz: investigación en marcha



WECANet COST Action CA17105
A pan-European Network for Marine
Renewable Energy with a Focus on Wave
Energy

La acción europea COST de WECANet tiene como objetivo un enfoque interdisciplinario, colaborativo e inclusivo para la energía de las olas.

WECANet pretende contribuir al despliegue de WEC Arrays a gran escala al hacer frente a los cuellos de botella actuales.

30 COST member countries and one COST international partner country (USA)

Energías undimotriz: investigación en marcha



WECANet COST Action CA17105
A pan-European Network for Marine
Renewable Energy with a Focus on Wave
Energy

82,9% socios de muchos campos del “mundo de la ingeniería”:

- 25,7% ingeniería civil (ingeniería costera y oceánica)
- 12,5% ingeniería mecánica; 19,6% de ingeniería ambiental y bioingeniería;
- El 18,8% ingeniería eléctrica, electrónica, informática y computacional;
- 6,3% ingeniería de arquitectura naval, tecnología marítima e ingeniería química

El resto (actualmente el 17,1%) incluye:

- matemáticas aplicadas, la física y la biología;
- ciencias de la economía y la administración de empresas, derecho, evaluación de políticas y medio ambiente, ciencias sociales y de género;
- etc



Energías undimotriz: investigación en marcha



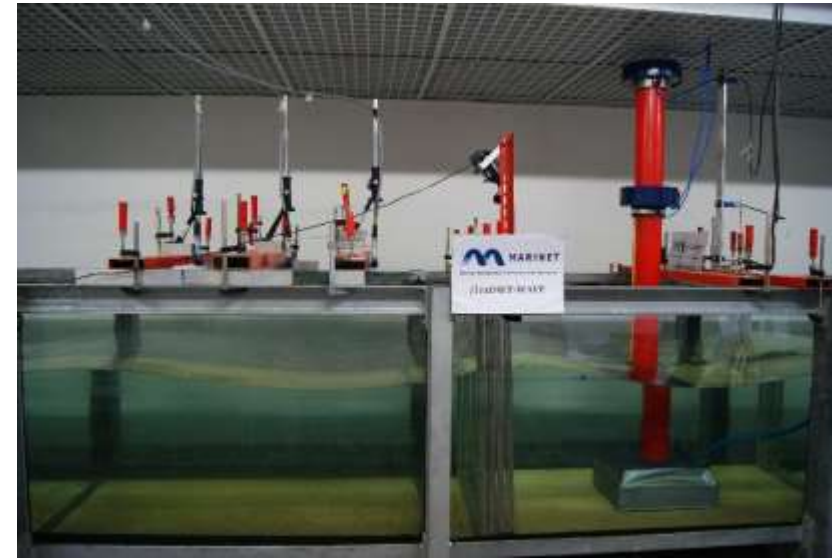
Programa de acceso trans-nacional a laboratorios de modelado físico enfocados en energía marina offshore



Energías undimotriz: investigación en marcha



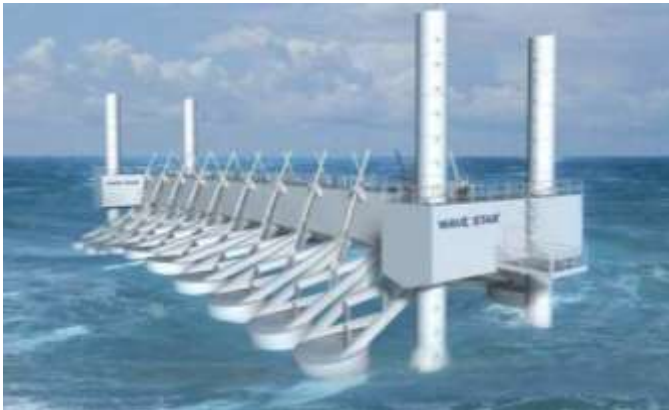
Programa de acceso trans-nacional a
laboratorios de modelado físico enfocados en
energía marina offshore



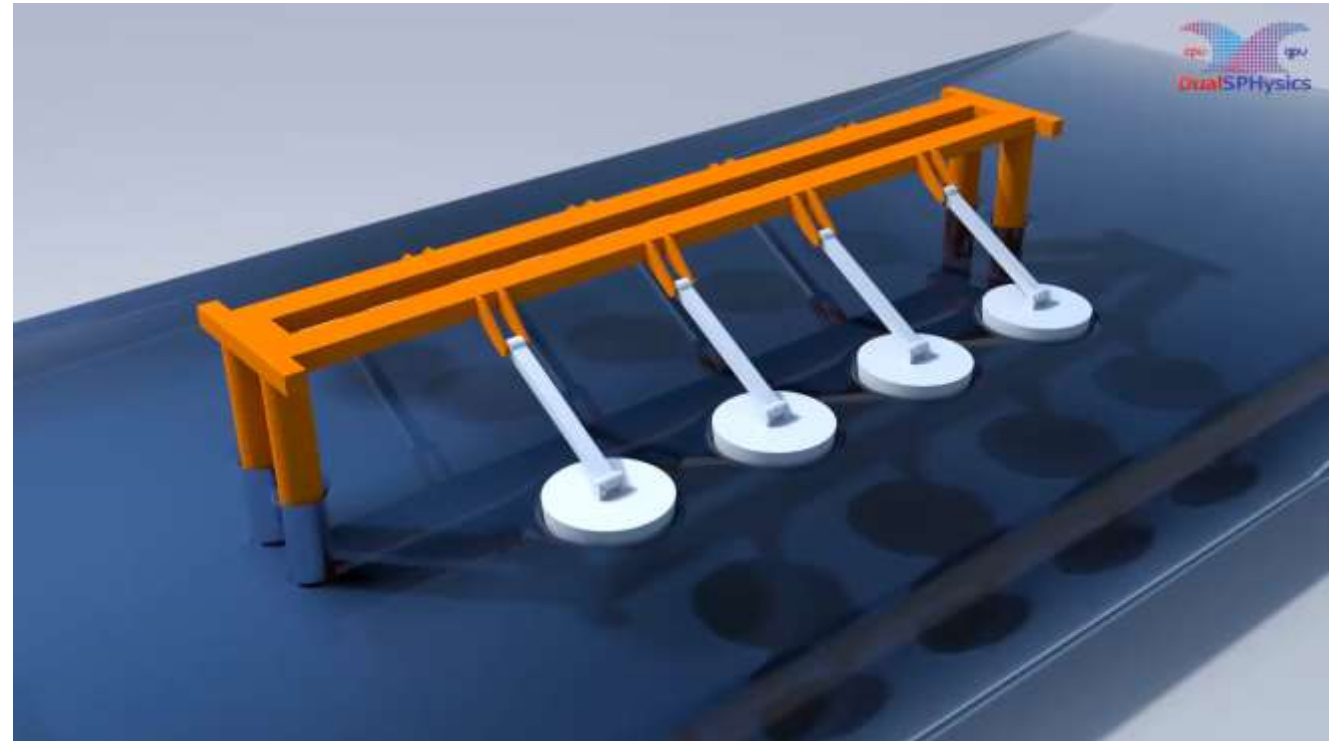
Energías undimotriz: investigación en marcha



Energías undimotriz: investigación en marcha



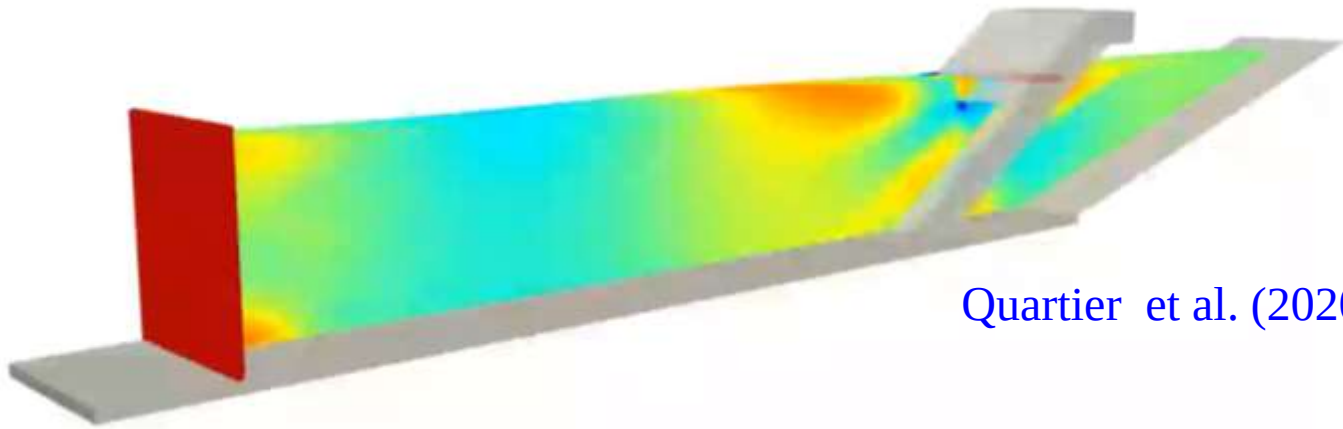
WAVESTAR



Canelas et al. (2018)

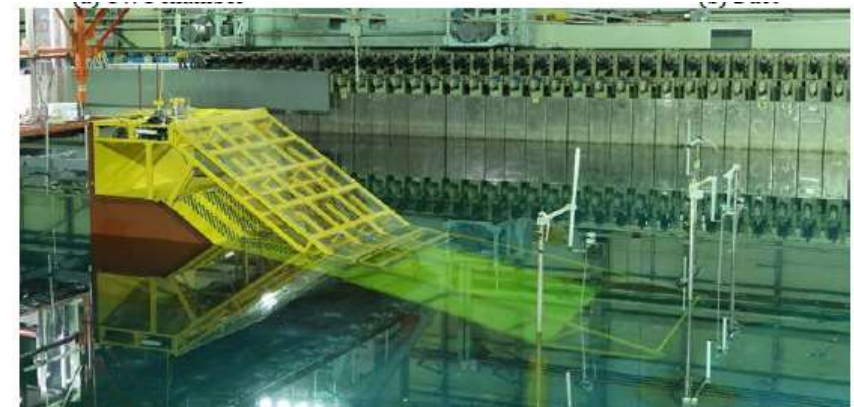
Revolute and spherical joints on the articulated arms and buoys

Energías undimotriz: investigación en marcha



Quartier et al. (2020)

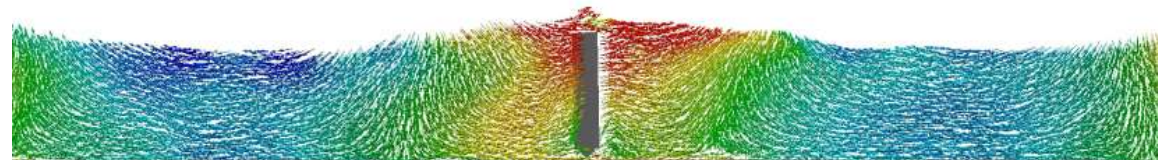
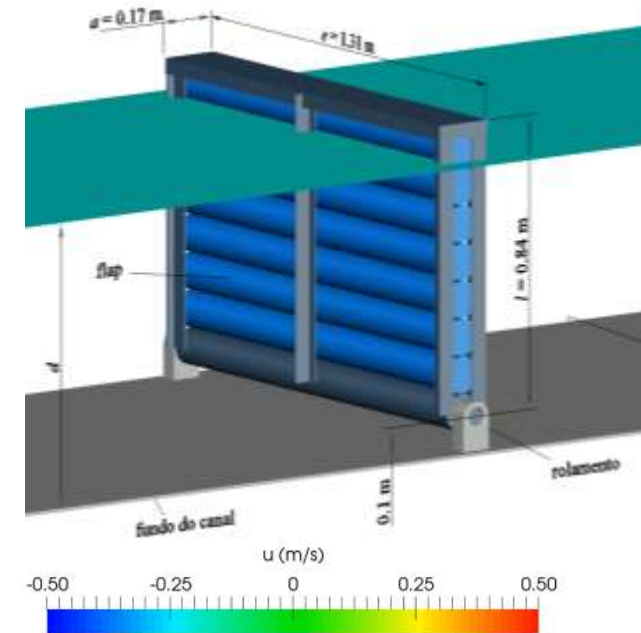
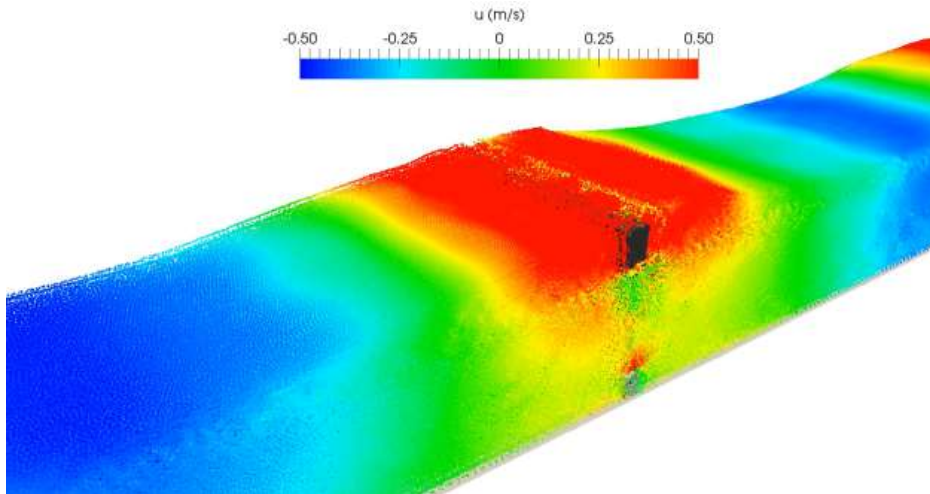
Fixed OWC tested in KRISO



Energías undimotriz: investigación en marcha



Brito et al. (2020)

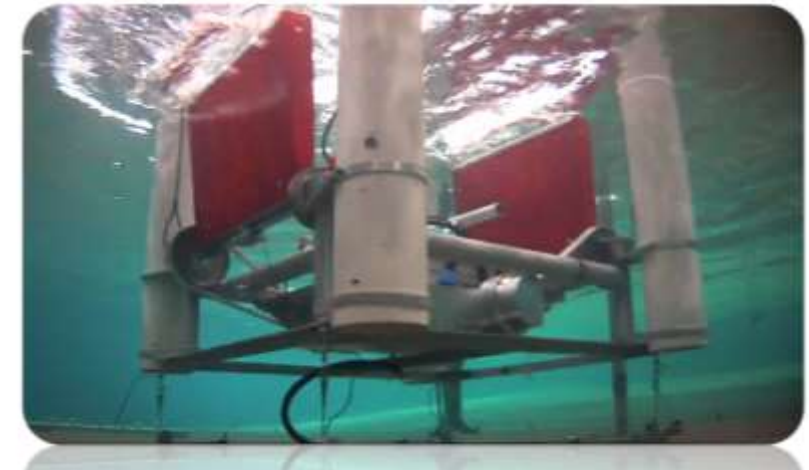
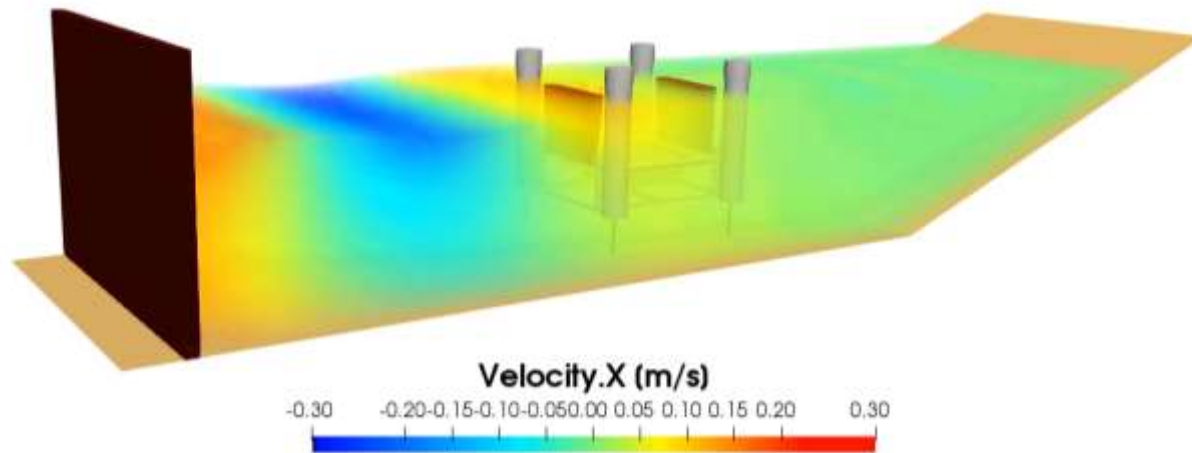


OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTER

Energías undimotriz: investigación en marcha



Time: 3.15 s

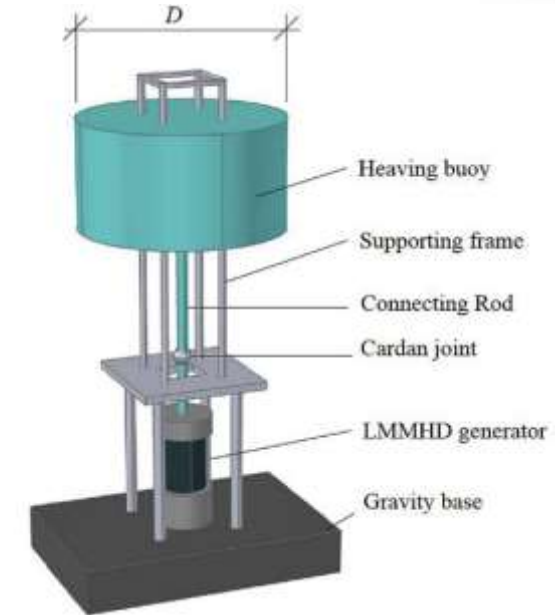
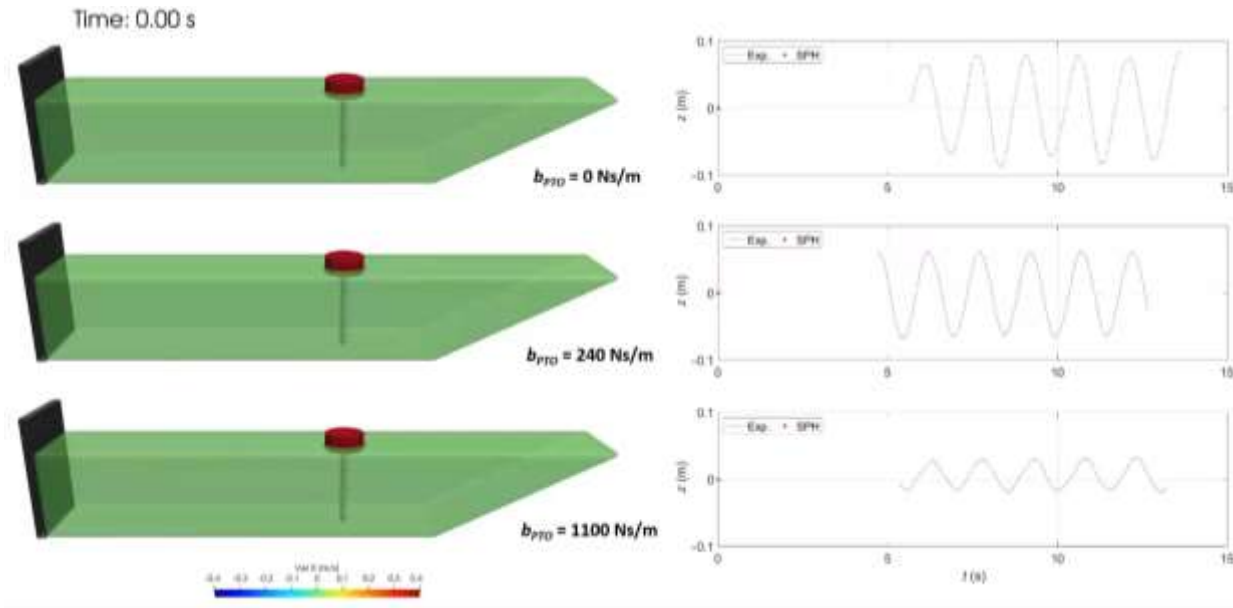


FOSWEC: Floating Oscillating Surge Wave Energy Converter

Energías undimotriz: investigación en marcha



Ropero-Giralda et al. (2020)



Zang et al. (2018)

HEAVING POINT-ABSORBER

Energías undimotriz: investigación en marcha

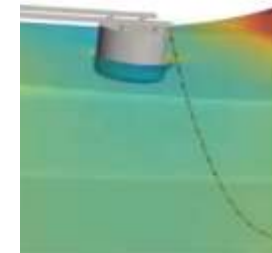
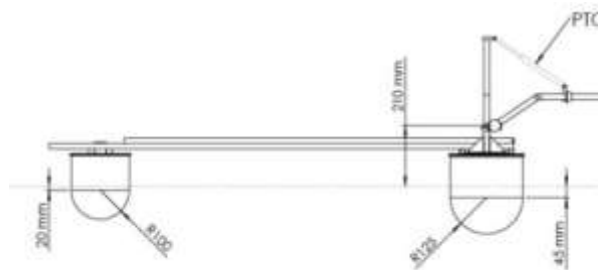
Carpintero Moreno et al. (2020)



Simulating M4 WEC with DualSPHysics
Focused waves: $T_D=1.0s$, $A_c=0.08m$

Time: 9.94 s

- Gravity
- Buoyancy
- Excitation from incident and diffracted waves
- Wave radiation (forces due to generated waves)
- Machinery forces (PTO force incl. friction)
- Drag: Form drag and skin friction
- Wave drift forces
- Current forces
- Mooring forces



MULTIFLOATER M4 ATTENUATOR (Stansby et al., 2017)

Energías undimotriz: investigación en marcha

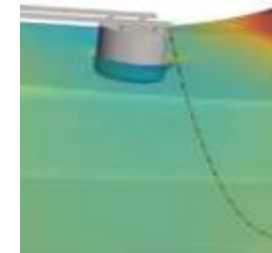
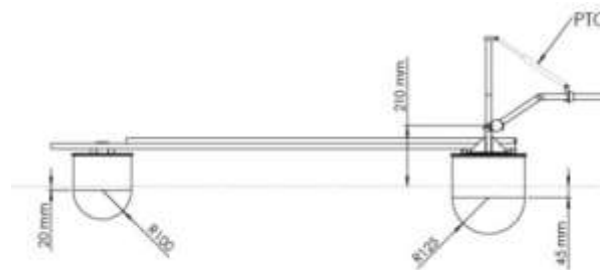
Carpintero Moreno et al. (2020)



Simulating M4 WEC with DualSPHysics
Focused waves: $T_D=1.0s$, $A_c=0.08m$

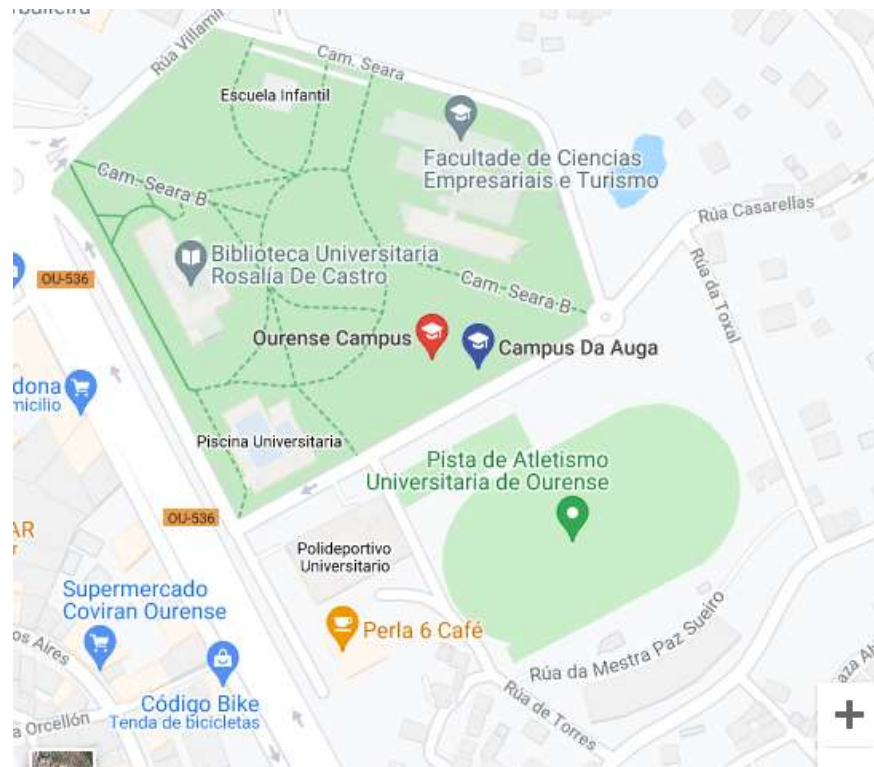
Time: 9.94 s

- Gravity
- Buoyancy
- Excitation from incident and diffracted waves
- Wave radiation (forces due to generated waves)
- Machinery forces (PTO force incl. friction)
- Drag: Form drag and skin friction
- Wave drift forces
- Current forces
- Mooring forces

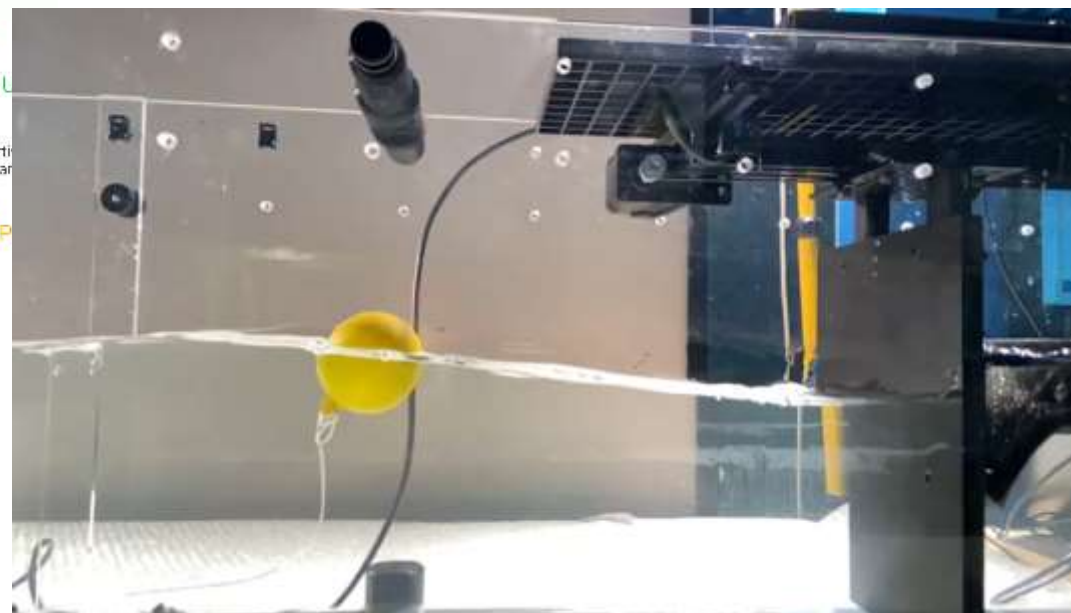
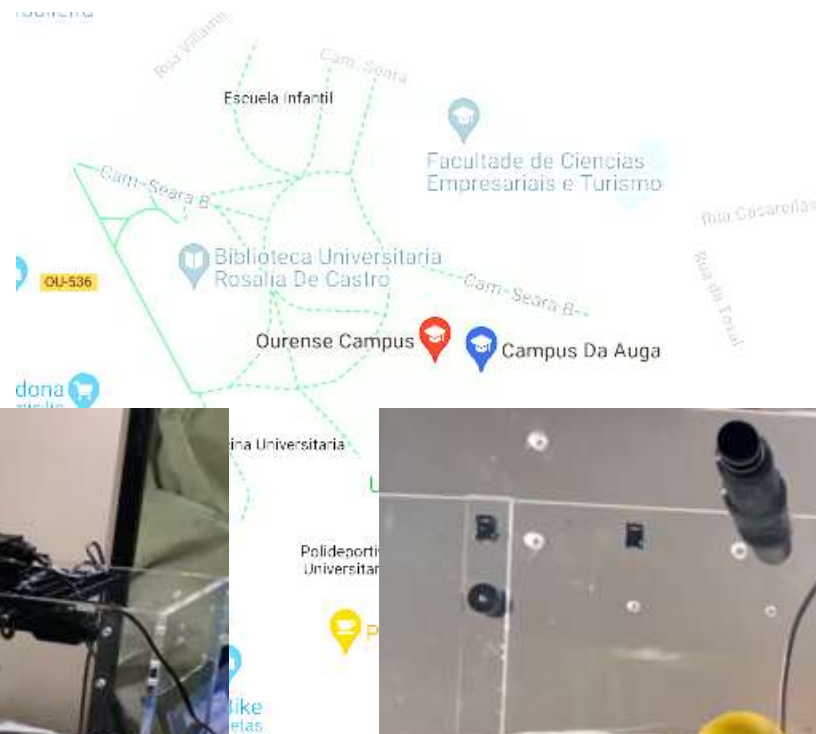


MULTIFLOATER M4 ATTENUATOR (Stansby et al., 2017)

Educación y divulgación



Educación y divulgación



GRACIAS



Postcard from a “wave motor” experiment off the coast of Santa Cruz from 1898 (Budal and Falnes, 1975)