



**Sala Dinámica 24**  
Puertos del Estado

**Cesar Vidal Pascual.**

Universidad de Cantabria



**Sala Dinámica 24**  
PUERTOS DEL ESTADO

**Cesar Vidal**

Universidad de Cantabria



Fuentes de energía marinas: Potencial,  
Aprovechamiento y problemática ambiental

César Vidal Pascual  
Profesor Titular de Universidad  
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas  
Universidad de Cantabria  
Avda. de los Castros s/n, 39005, Santander  
vidalc@unican.es



## FUENTES DE ENERGÍA MARINA: POTENCIAL RENOVABLE

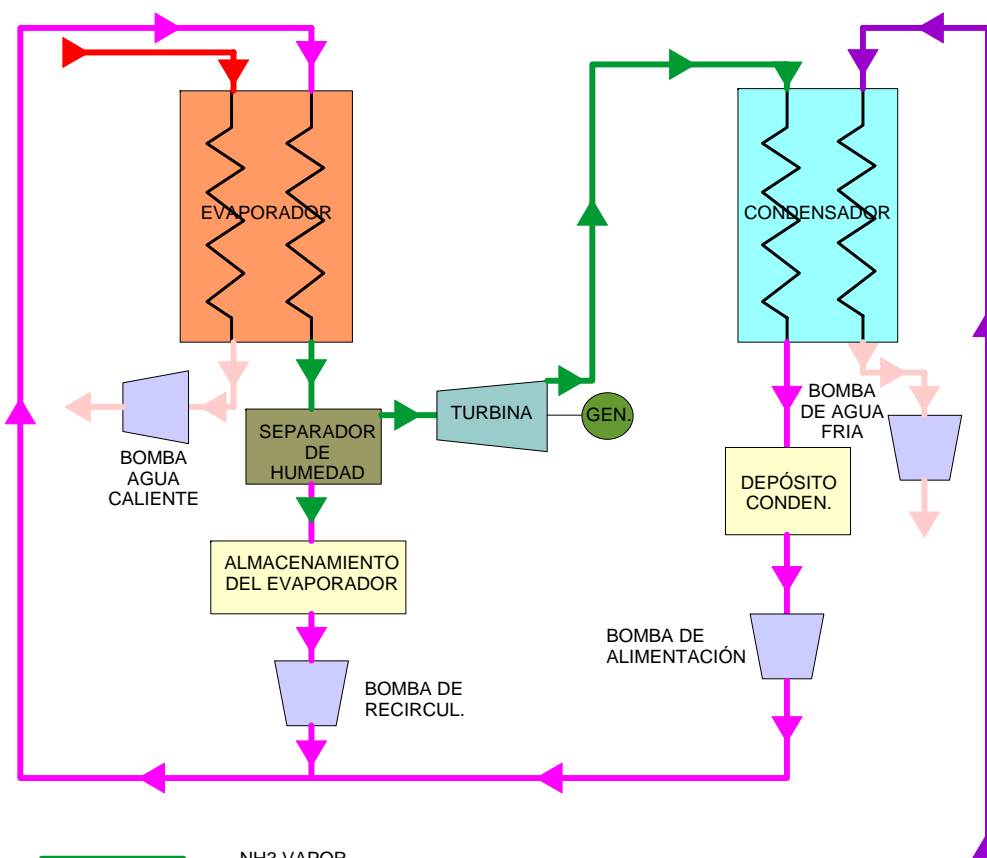
SOLAR	}	Oleaje de viento y mar de fondo	3
		Corrientes de viento	
		Corrientes de densidad	5
		Gradientes de salinidad	1400
		Gradientes térmicos	40000
		Biomasa	10
		Vientos oceánicos	> 20
ROTACIÓN DE LA TIERRA	}	Corrientes de marea	
		Variaciones de nivel de la marea	3

## FUENTES DE ENERGÍA MARINA: POTENCIAL RENOVABLE

Tipo de aprovechamiento	Potencial renovable (MW)	Localización	Densidad de energía	Desarrollo Técnico
Gradientes térmicos	40.000 10 <sup>6</sup>	Alta mar. Zonas tropicales	Elevada	Disponible
Gradientes de salinidad	1.400 10 <sup>6</sup>	Áreas muy localizadas	Elevada	2050?
Biomasa marina	10 10 <sup>6</sup>	Zonas costeras. Muy extendida	Baja	Disponible
Corrientes marinas	5 10 <sup>6</sup>	Áreas muy localizadas	Elevada	2020?
Mareas	3 10 <sup>6</sup>	Áreas muy localizadas de la costa	Elevada	Disponible
Oleaje	2.5 10 <sup>6</sup>	Muy extendido. Zonas costeras y alta mar	Media	Disponible
Vientos marinos	>20 10 <sup>6</sup>	Muy extendido. Zonas costeras y alta mar	Media	Disponible

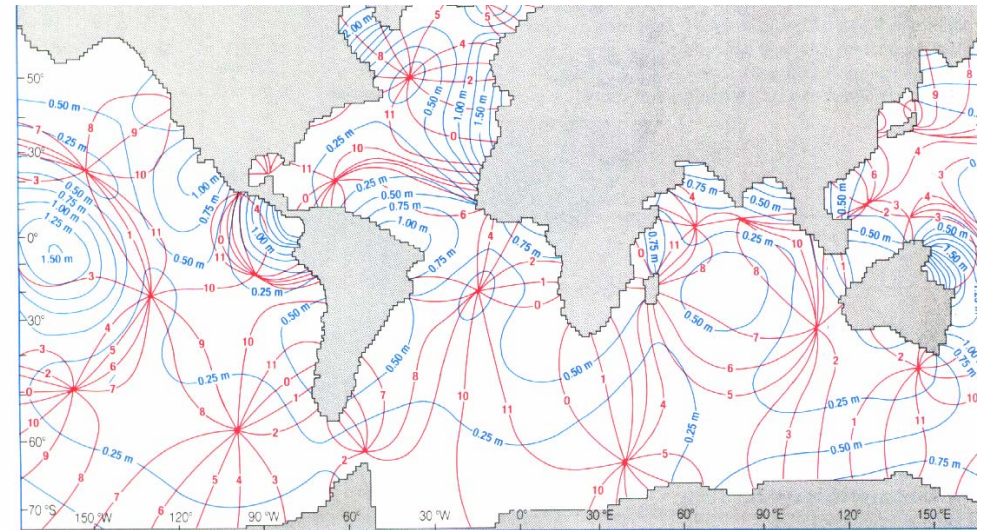
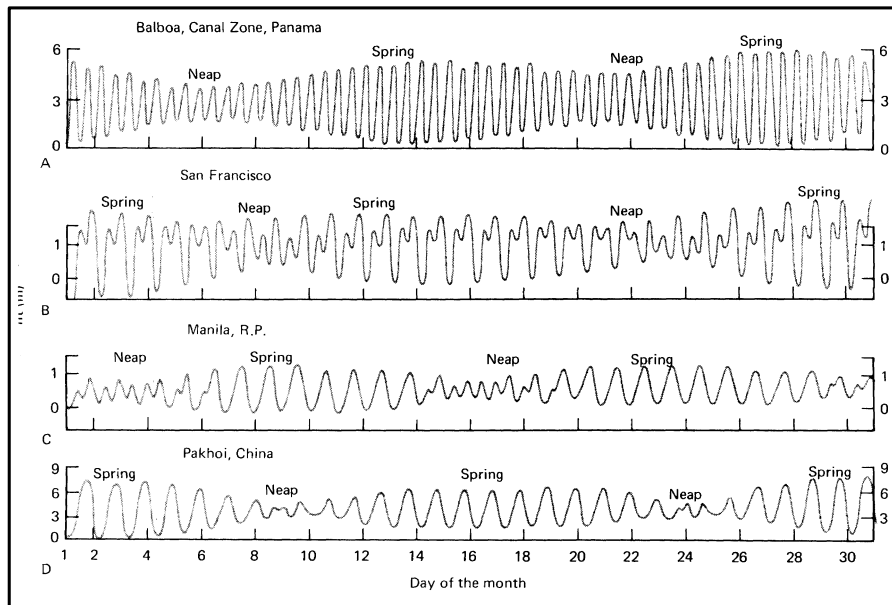
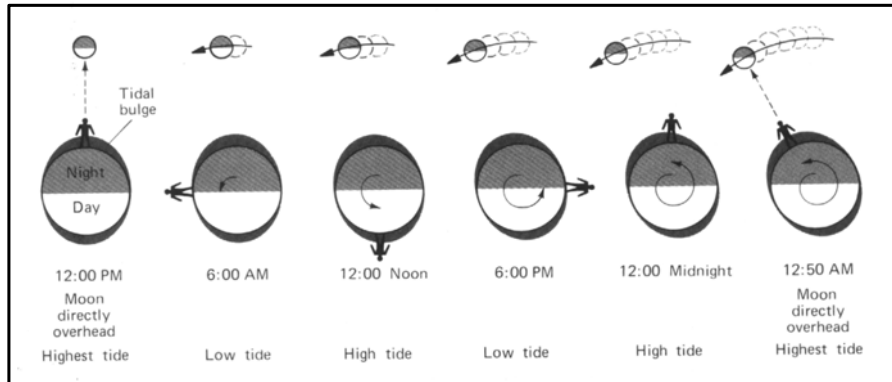
# ENERGÍA TÉRMICA OCEÁNICA

## CICLO OTEC



- NH<sub>3</sub> VAPOR
- NH<sub>3</sub> LÍQUIDO
- AGUA CALIENTE SUPERFICIAL
- AGUA TEMPLADA DE RETORNO
- AGUA FRÍA PROFUNDA

## GENERACIÓN DE LA MAREA ASTRONÓMICA



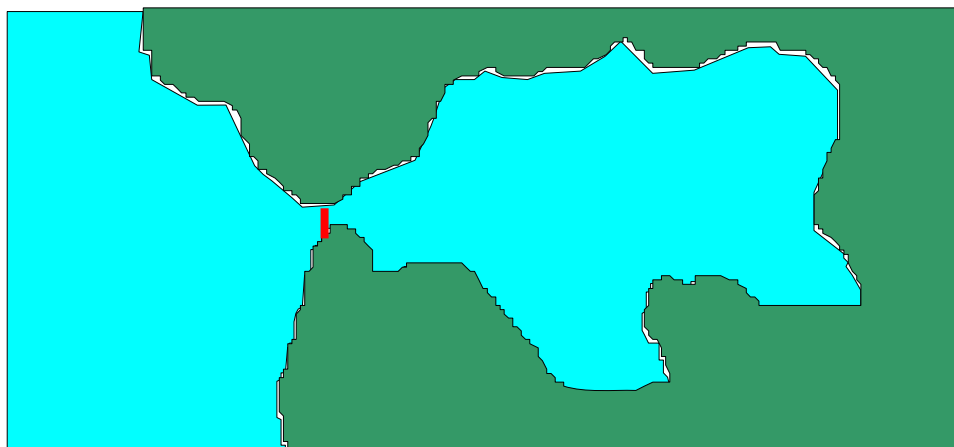


## MAREA ASTRONÓMICA: POTENCIAL APROVECHABLE EN UN ESTUARIO

$$E = 1.97 A R^2 10^6 \text{ Kwh/año}$$

A: Área del estuario a media marea en  $\text{Km}^2$

R: Carrera de marea en m



### Ejemplo: Bahía de Santander:

Área:  $22 \text{ Km}^2$

Carrera de marea media: 3.7 m

Potencial aprovechable: 593 Gwh año

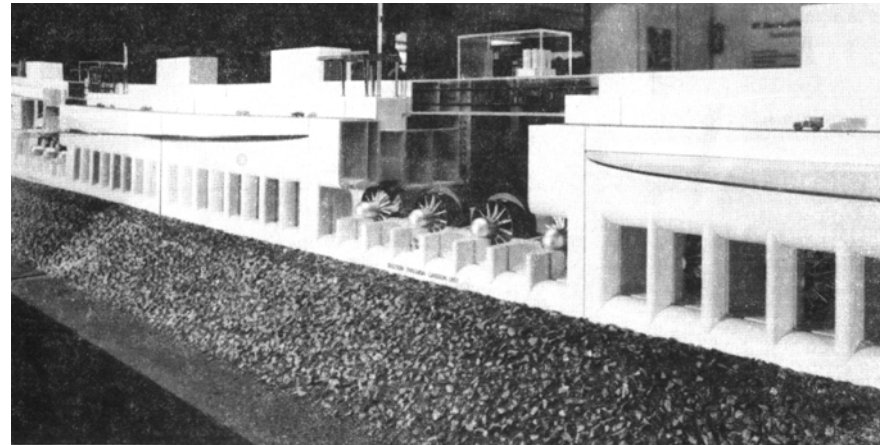
### Ejemplo: Estuario de la Rance

Área:  $22 \text{ Km}^2$

Carrera de marea media: 10 m

Potencial aprovechable: 4334 Gwh/año



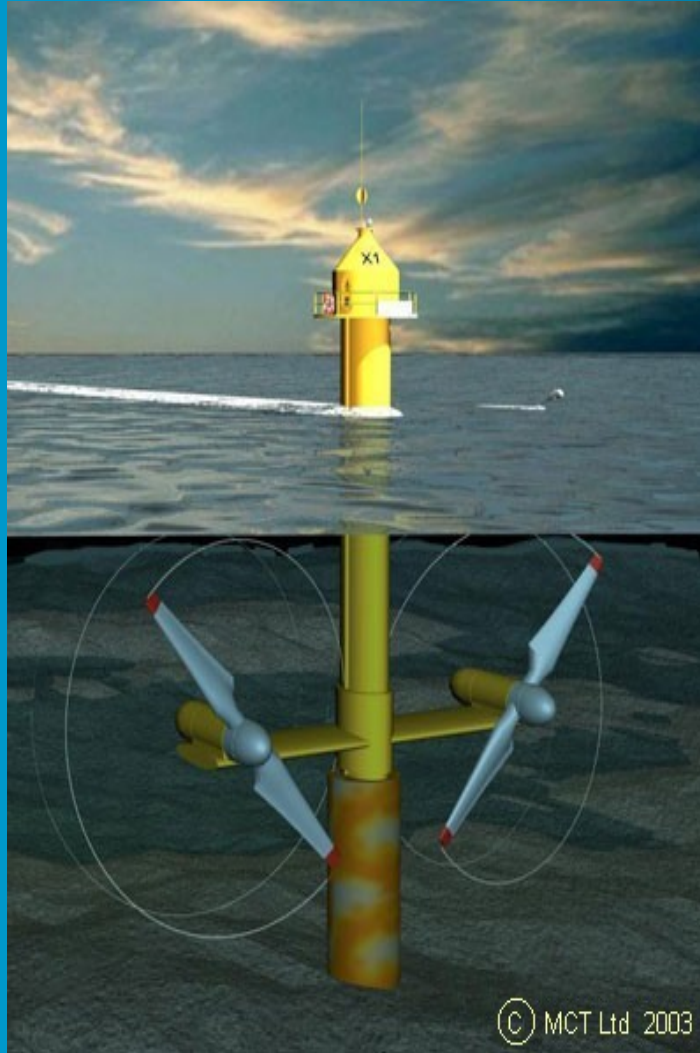


### CENTRAL DE LA RANCE

Área estuario:	22 Km <sup>2</sup>
Carrera de mare:	10 m
Potencial anual:	4400 Gwh.
Potencia bruta:	502 Mw.
Pot. instalada:	240 Mw
Nº grupos:	24
% pot. instalado:	48%
Producción anual:	540 Gwh
Factor utilización:	26%.
% pot. aprovechado:	12%.



## LA ENERGÍA DE LAS CORRIENTES MARINAS



### **Ventajas:**

- Tecnología disponible
- Zonas costeras
- Poca interferencia ambiental

### **Inconvenientes:**

- Zonas específicas
- Costo de instalación y mantenimiento

## ENERGÍA DE LAS MAREAS: PROBLEMAS DE IMPACTO

### IMPACTO AMBIENTAL

- Menor carrera de marea.
- Periodos más largos de nivel constante.
- Menor intercambio de agua con el mar.
- Reducción en las variaciones de salinidad y temperatura.
- Reducción de las áreas intermareales.
- Aumento de la producción primaria, pero no de la biodiversidad.

### IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO

- Mejora de las comunicaciones entre ambas orillas.
- Tráfico marítimo a través de las esclusas. (En la Rance, aumento tráfico de refugio)
- Disminución de las actividades pesqueras, salvo el cultivo de ostras.

## GENERACIÓN DEL OLAJE POR EL VIENTO

Limitaciones al crecimiento del oleaje

Fetch: Distancia de generación  
Duración  
Velocidad del viento

**Entrepeñas:**

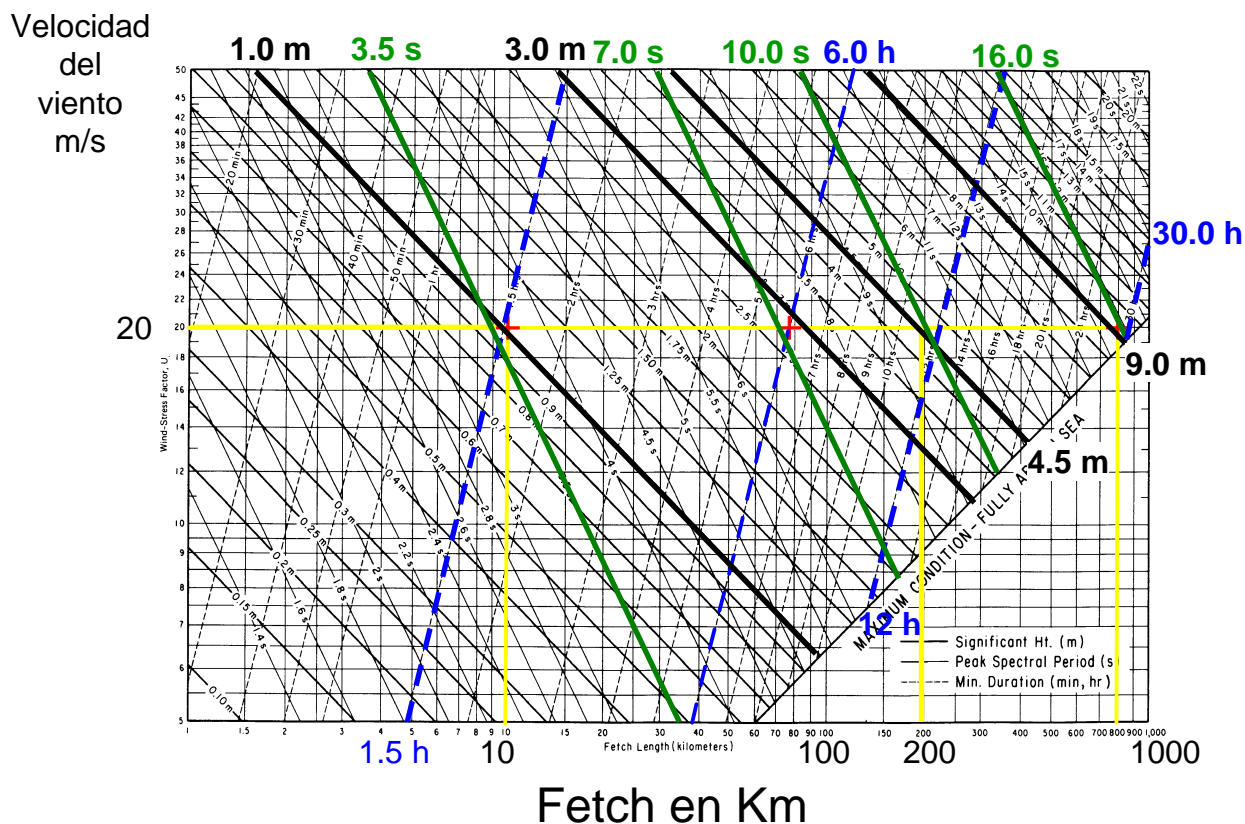
U = 20 m/s  
F = 10 Km  
D = 6 h  
Hs = 1m  
Tp = 3.6 s

**Gerona:**

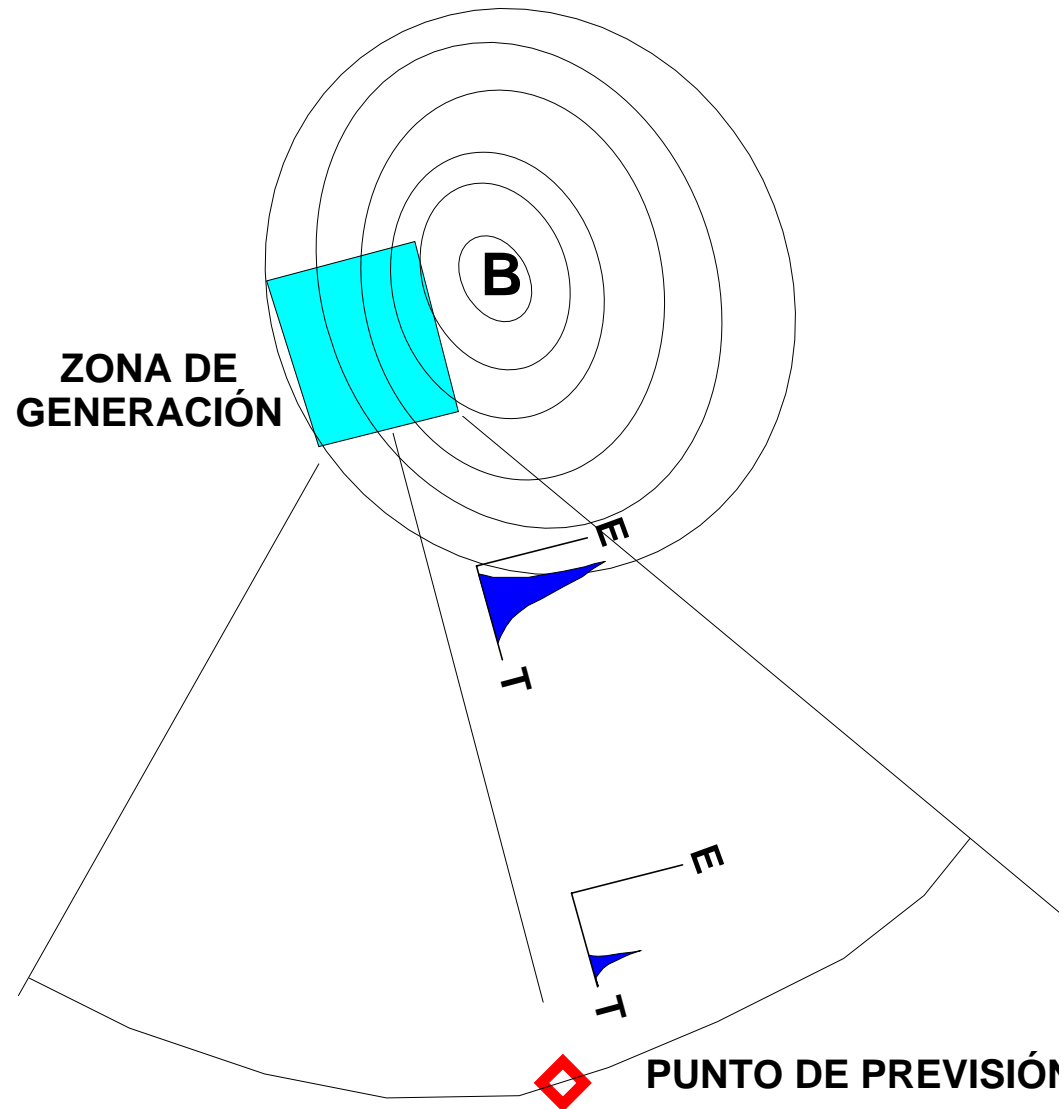
U = 20 m/s  
F = 200 Km  
D = 6 h  
Hs = 2.8 m  
Tp = 7.2 s

**Bilbao:**

U = 20 m/s  
F = 800 Km  
D = 30 h  
Hs = 9.1 m  
Tp = 15.8 s



## PROPAGACIÓN DEL OLAJE: DISPERSIÓN RADIAL Y ANGULAR



## EL FLUJO DE ENERGÍA DEL OLEAJE

Tren monocromático  $F = 981 H^2 T$  (W / m) H (m), T (s)

Oleaje escalar  $F = 550 H_s^2 T_z$  (W / m) Hs (m), T (s)

Oleaje direccional  $F = \rho \cdot g \cdot \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} S(\omega, \theta) \cdot C_g(\omega) \cdot d\omega d\theta$  (W / m)  $\left\{ \begin{array}{l} S(\omega, \theta) \text{ (m}^2\text{/rad/grd)} \\ C_g(\omega) = \text{m/s} \end{array} \right.$

Marejadilla en el pantano de Entrepeñas:  $F = 550 \times 12 \times 3.6 / 1.2 = 1650 \text{ W/m}$

Fuerte marejada en el Cabo de Creus:  $F = 550 \times 2.82 \times 7.2 / 1.2 = 25872 \text{ W/m}$

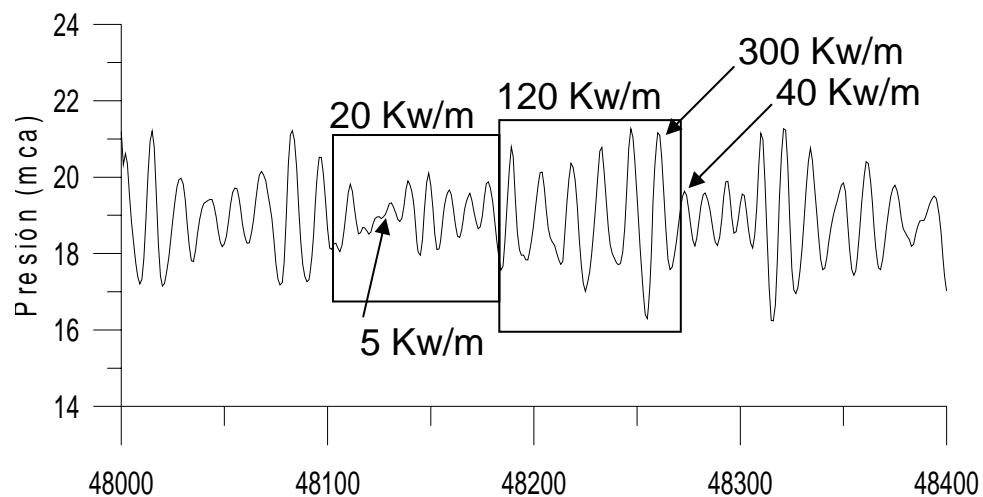
Mar montañosa en el Cantábrico  $F = 550 \times 9.12 \times 15.8 / 1.2 = 599682 \text{ W/m}$

## VARIABILIDAD TEMPORAL DEL FLUJO DE ENERGÍA

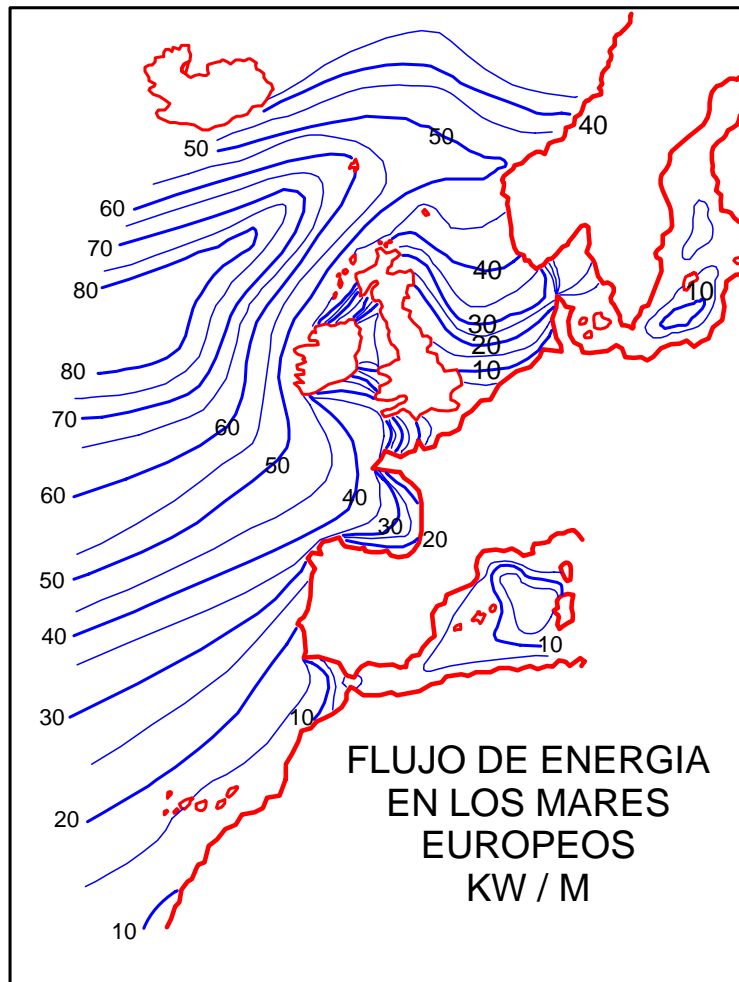
Variabilidad a medio y largo plazo similar a otras fuentes de energía del mismo origen, como es el caso de la eólica.

## VARIABILIDAD INTRÍNSECA ASOCIADA LOS GRUPOS DE ONDAS

Variaciones en el flujo medio de energía de hasta dos órdenes de magnitud en periodos del orden de 1 a 3 minutos, asociados a los grupos de ondas



## DISPONIBILIDADES DE ENERGÍA DEL OLEAJE





## SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO: TERMINADORES

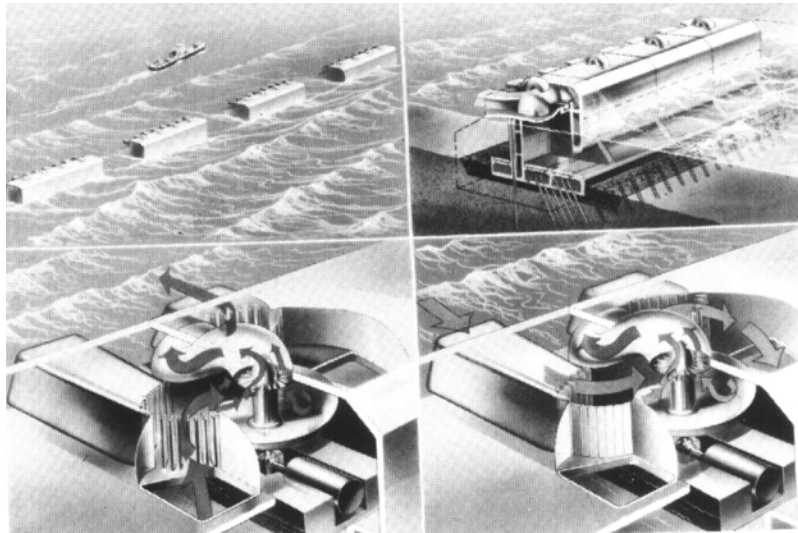


Figura 9. Terminador. NEL OWC

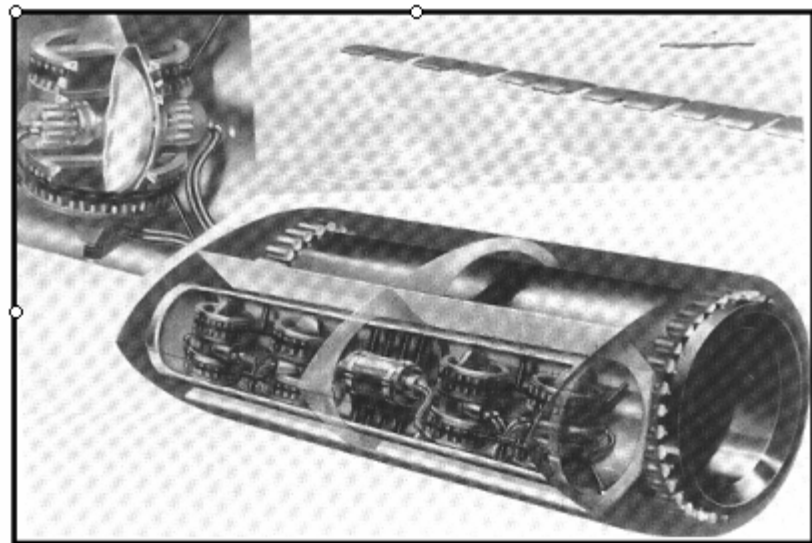


Figura 10: Terminador. Salter's Duck

## SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO: TERMINADORES

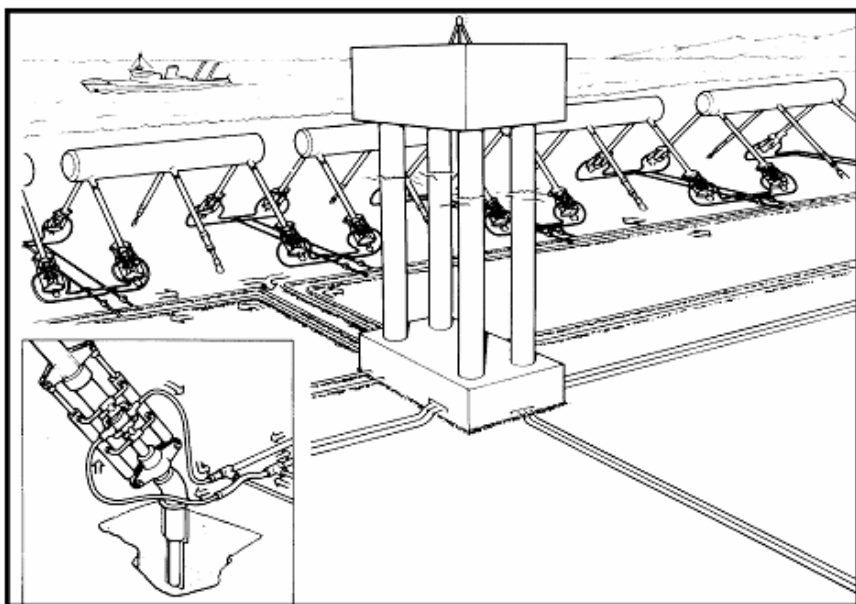


Figura 11. Terminador. Cilindro de Bristol

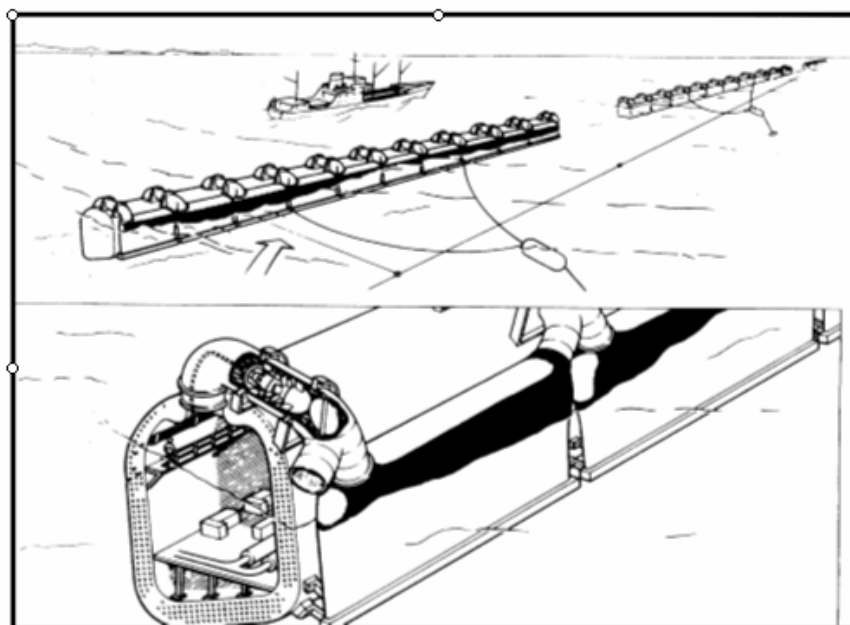


Figura 14. Sistema terminador con circuito cerrado de aire. SEA CLAM.



## SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO: ATENUADORES

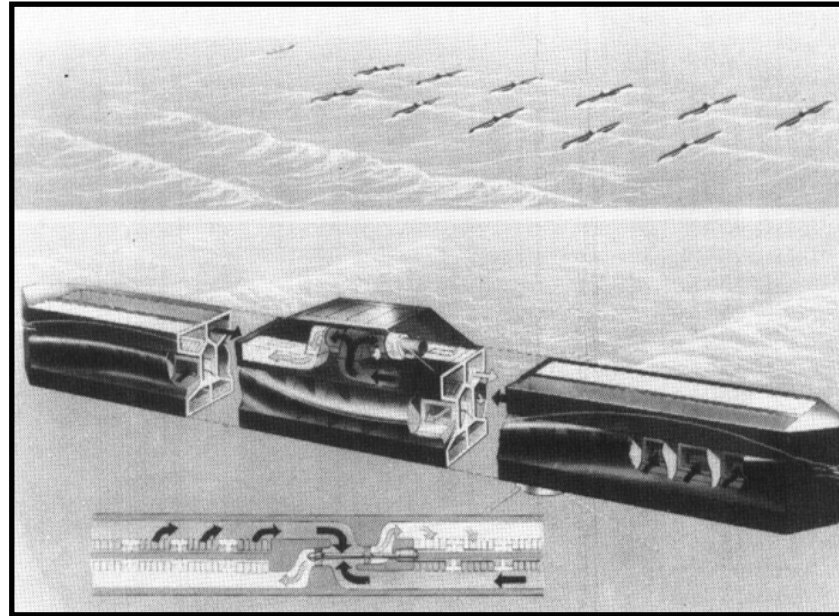


Figura 12. Atenuadores. Lancaster Flexible Bag

## SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO: ABSORBEDORES PUNTUALES

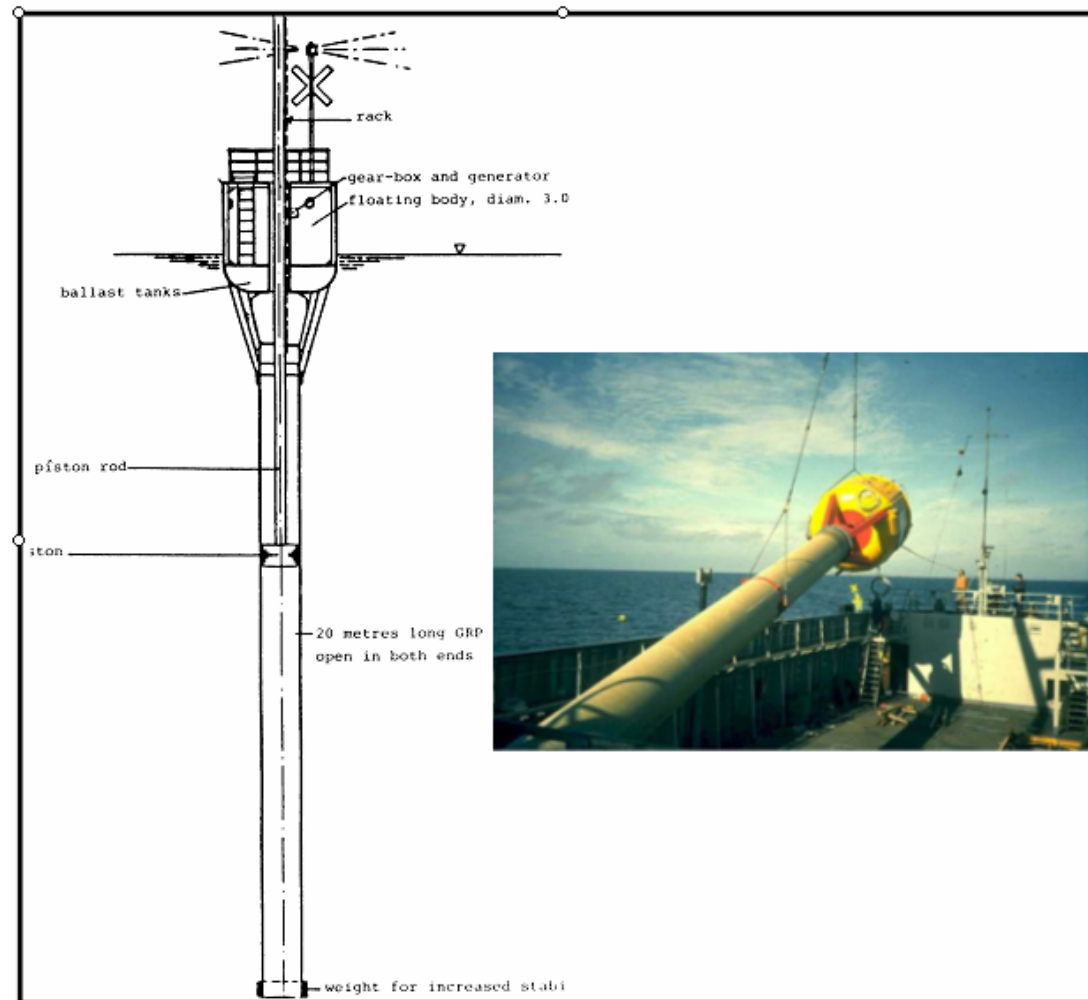


Figura 13. Boya sueca. Sistema IPS OWEC

## RENDIMIENTOS Y COSTOS DE PRODUCCIÓN

Escenario: Dique de Punta Lucero construido con cajones OWC

Longitud del dique: 2000 m

Energía bruta anual disponible: 350 Gwh (40 MW de potencia media)

Rendimiento primario (agua – aire): 60 %

Rendimiento secundario (aire – eléctrico): 70 %

Potencia a instalar para igualar el costo del Kwh producido al costo marginal del Kwh en central térmica de carbón

**Hipótesis de trabajo: la Autoridad Portuaria paga el costo de la infraestructura**

Potencia a instalar: 32 MW.

Número y potencia de los grupos: 32 de 1 MW.

Producción en el año medio: 84 GWH

Factor de utilización: 30% (2628 horas/año)

% de la energía bruta aprovechada: 24 %

## RENDIMIENTOS Y COSTOS DE PRODUCCIÓN

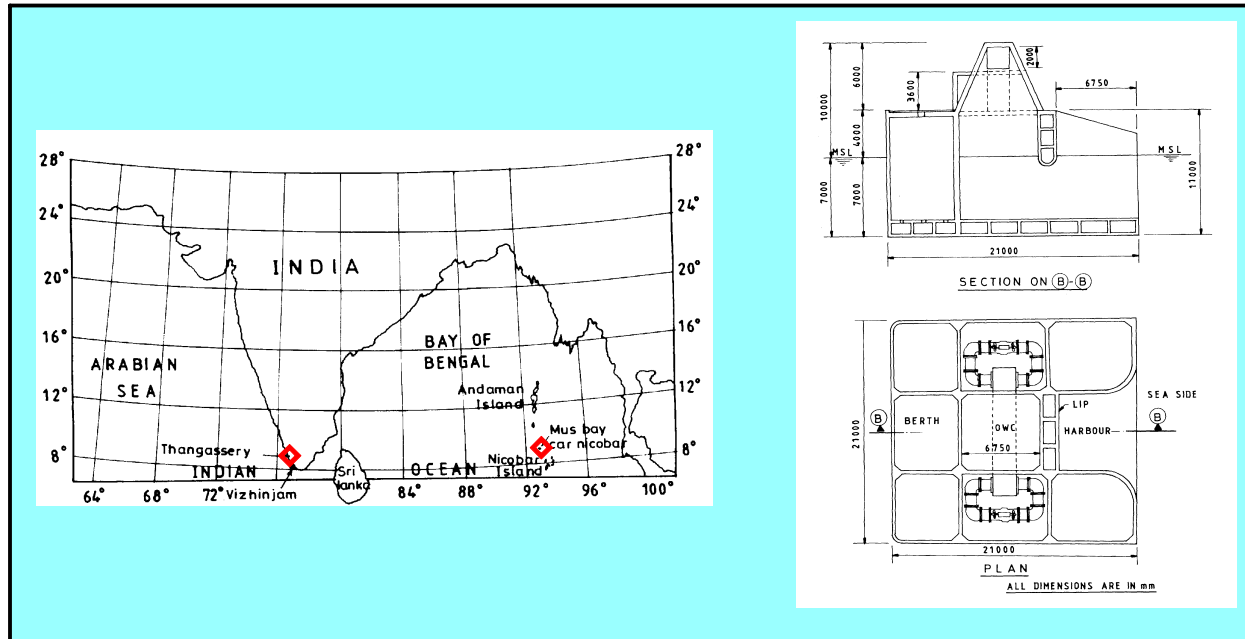


Figura 15. Centrales OWC en Thangasarey y Mus Bay, India.

Costo del Kwh de la generación diesel: \$ 0.2

Costos del Kwh OWC:

Thangassery: \$ 0.13

Mus Bay: \$ 0.0831

## ENERGÍA DEL OLEAJE: PROBLEMAS DE IMPACTO

### IMPACTO AMBIENTAL

#### Terminadores no rebasables fijos al fondo:

- Reducción casi total de la agitación en la zona abrigada
- Aumento de la agitación por reflexión en la zona expuesta
- Alteración considerable del ecosistema costero
- Alteración considerable de la dinámica costera
- Para disminuir impactos: separación entre las unidades

#### Terminadores sumergidos, atenuadores y absorbedores puntuales

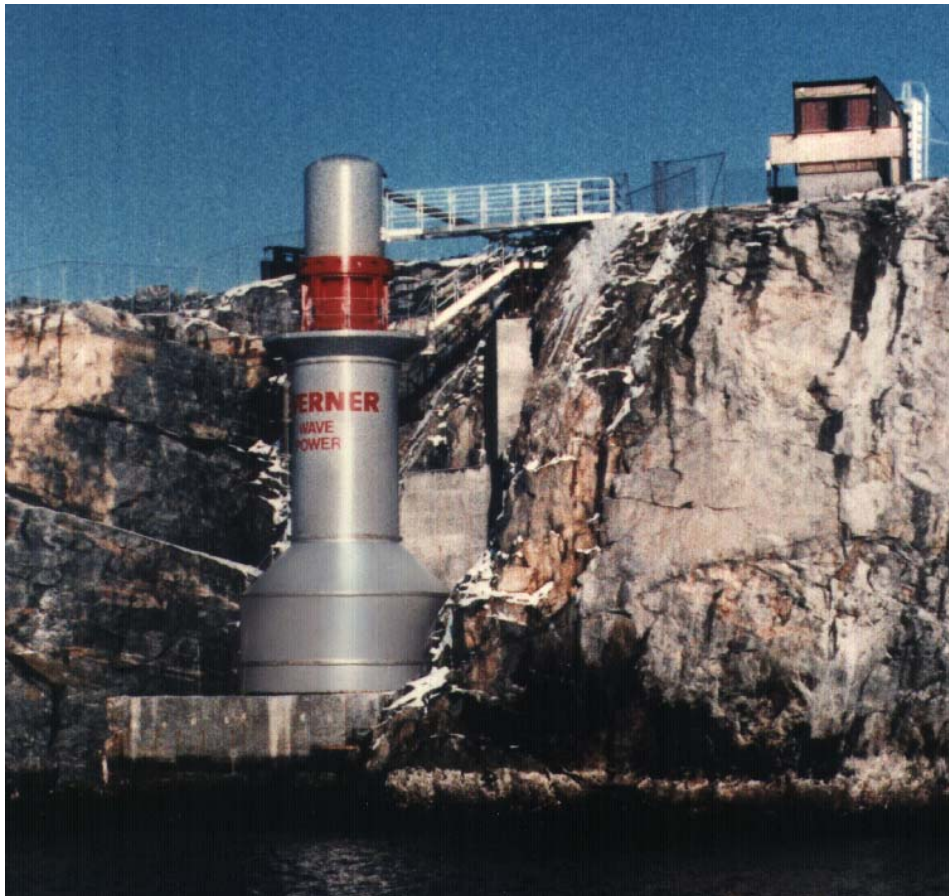
- Reducción moderada de la agitación en la zona abrigada
- Casi nula alteración del oleaje en la zona expuesta
- En temporales transmiten la mayor parte de la energía

### IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO

- Los sistemas flotantes y sumergidos en alta mar suponen un peligro para la navegación
- Los terminadores pueden sustituir a las estructura de protección de puertos y costas
- En gran escala, suponen una limitación a la navegación y actividades pesqueras
- En gran escala, al alterar la dinámica costera, interfieren con los usos establecidos en la costa



## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS



### KWENER BRUGS OWC

#### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:

Profundida a pie de cámara: 7 m

Área de la cámara: 50 m<sup>2</sup>

Oscilación vertical máxima en la cámara:  $\pm 3.5$  m

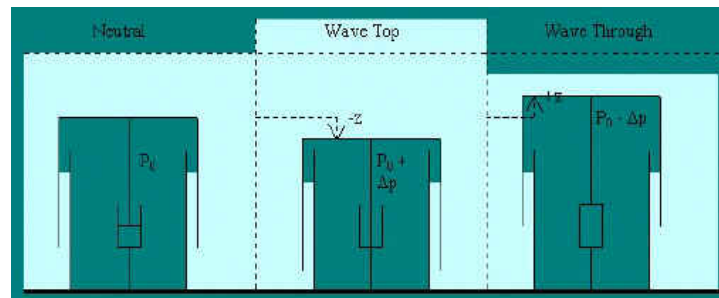
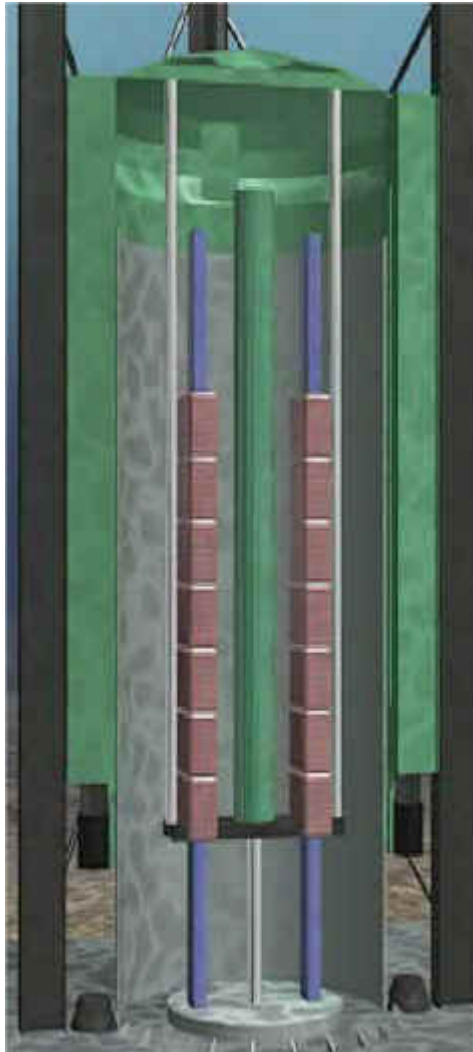
Turbina aire: Wells autorrectificadora 1 Mw

Alternador: 600 KVA a 1500 rpm

Conexión a la red: Convertidor ac – dc - ac



## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS

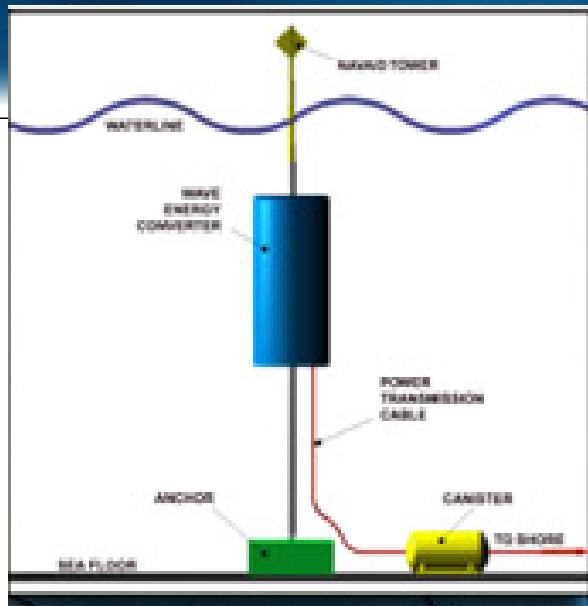
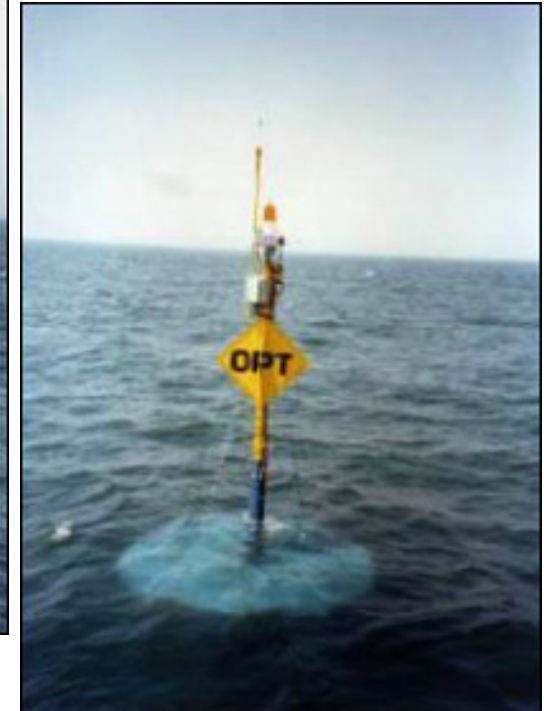
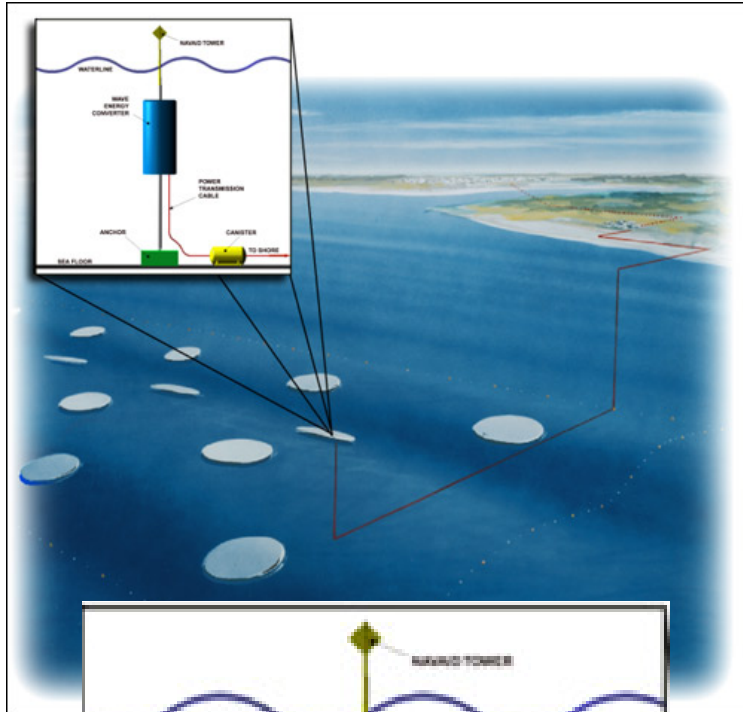


### ARCHIMEDES WAVE SWING

#### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

- Sumergido en tensión o anclado fondo
- Cámara interior presurizada N<sub>2</sub>
- Muelle: presión de nitrógeno
- Extracción energía: Motor lineal 2 MW

## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS



### SISTEMA OCEAN POWER TECHNOLOGIES

#### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Eje fijo flotante en tensión

Boya neutra

Extracción de energía: muelle – amortiguador hidráulico

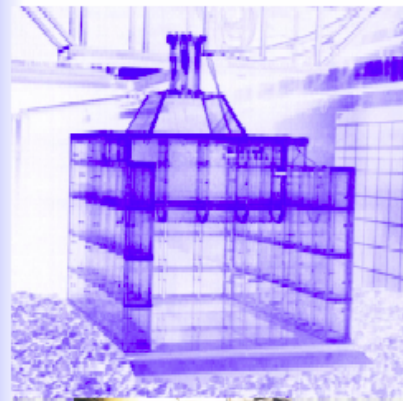
Turbina de aceite

Alternador 125 KVA

Tranmisión: Convertidor ac – dc colección de flujos.

## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS

### India: OWC breakwater converts wave power to electricity



#### OWC-Breakwater:

- prototypes, at present the most promising idea for the technical use of wave power
- today in Europe: development as power stations in the Atlantic Ocean
- today in Asia: plans for combined structure - a breakwater containing the power station

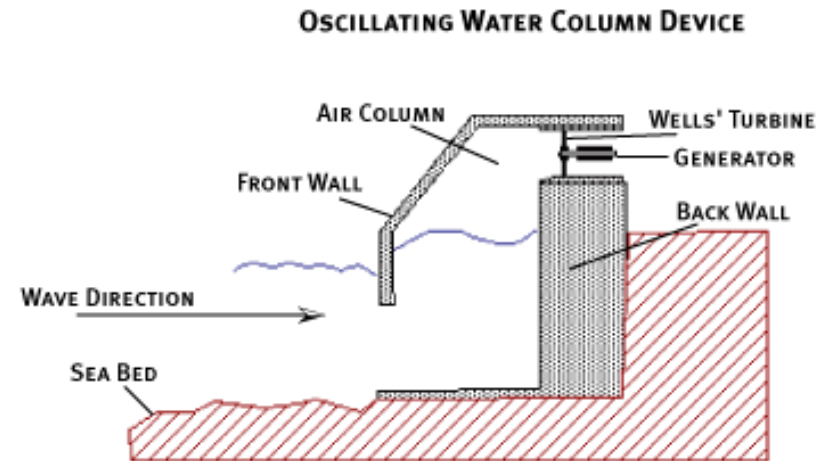


Large-scale model experiments in the scale 1:10 as part of the general cooperation programme of the Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit with the Ocean Engineering Center at IIT Madras

Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Graw, University of Leipzig, Faculty of Economics,  
Civil Engineering Department Geotechnics and Hydraulic Engineering,  
Marschnerstraße 31, D-04109 Leipzig  
Tel.: +49 (0341) 97-33 830, Fax: +49 (0341) 97-33 839  
E-mail: gwbau@wifa.uni-leipzig.de  
Homepage: <http://www.uni-leipzig.de/~grw>



## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS



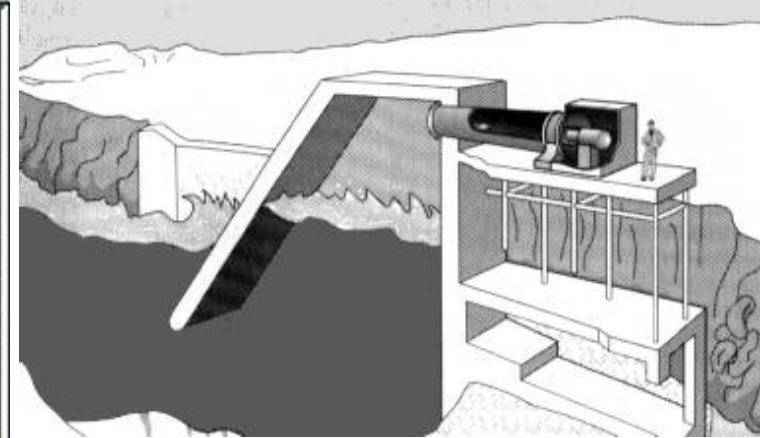
OWC Isla del Pico, Azores  
European Pilot Plant

### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:

Área de la cámara: 144 m<sup>2</sup>  
Turbina Wells 400 KW 700 a 1500 rpm  
Conexión a la red: ac – dc - ac



## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS



Wavegen Limpet OWC Islay, Irlanda del Norte  
Queens University of Belfast  
European pilot plant

### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:

Caméra (3 tubos de 36 m<sup>2</sup>, total 108 m<sup>2</sup>)

2 turbinas Wells contrarrotantes de 250 KW cada una. Velocidad variable

Conexión a la red ac – dc - ac

## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS



Sistema boya sueca  
IPS OWEC

### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:

Boya con anclaje elástico.

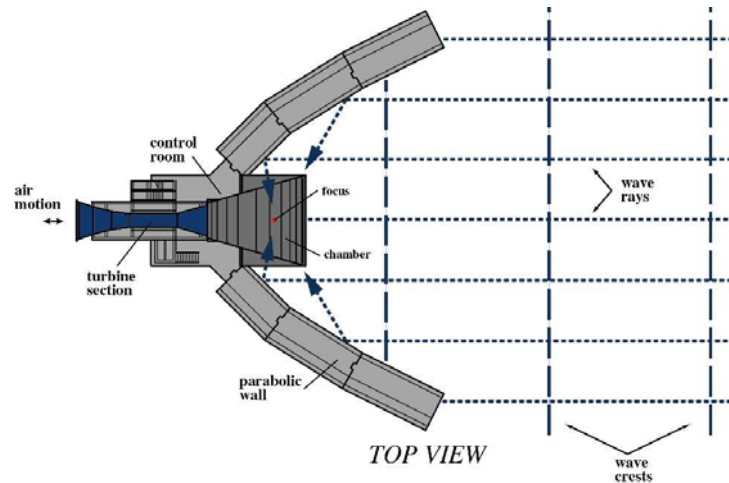
Masa reactiva: Agua en el tubo

Pistón hidráulico – pistón aceite – turbina de aceite de hasta 150 KW. Alternativa bomba de manguera-turbina de agua

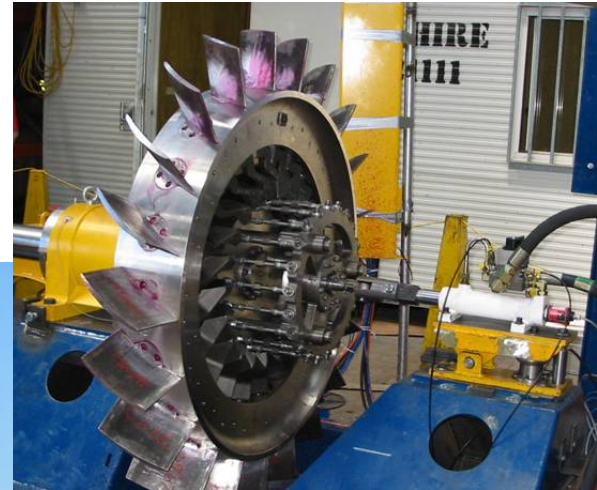
Conexión de varias boyas vía ac – dc – conversión en tierra a ac.

Estiman costo producción en condiciones óptimas de 0.035 \$/Kwh

## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: PROTOTIPOS



Sistema OWC flotante de Energetech



### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL PROTOTIPO DE PORT KEMBLA (AL SUR DE SYDNEY):

- Instalado a 200 m barlomar del dique Este
- Turbina Energetech de 1.6m diámetro, 21-álabes, 500RPM
- Potencia de pico instalada: 500kW
- Conexión a la red Supply via cable submarino 11kV.
- Producción simultánea de 75 l/hora de agua dulce

## CENTRAL DE SANTOÑA

Ubicación: batimétrica -40, al N del faro del Pescador (Buciero, Santoña)  
 10 boyas OPT 150 KW (1.25 MW) toroidal 8 m diámetro. Calado 24 m

Oleaje – boya – bomba – circuito hidráulico – turbina – alternador – colector-transformador – transporte a tierra por cable submarino –conexión a la red.



Socios: Iberdrola (70%) y SODERCAN

Primeras pruebas de mar previstas en 2007





## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE: RETOS DE LA EXPLOTACIÓN

### 1- MODELOS DE INTERACCIÓN OLEAJE – ESTRUCTURA – SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA

Modelado de la hidrodinámica de estructuras móviles y del comportamiento del sistema extractor de energía:

OWC:

Oleaje – columna de agua oscilante – Aire en la cámara – válvulas – turbina – alternador

Boyas hidráulicas:

Oleaje – boya – sistema de extracción hidráulico – circuito hidráulico – turbina – alternador

Modelado de la hidrodinámica de campos de boyas con interacción

## APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLAJE: RETOS DE LA EXPLOTACIÓN

### 2- SUAVIZADO DE LAS OSCILACIONES TEMPORALES DEL FLUJO DE ENERGÍA

Suavizado por colección de los flujos eléctricos en continua de varios equipos en línea.

Suavizado por acumulación de flujos (de aire o de fluido hidráulico)

Suavizado por acumulación de energía cinética (?giróscopos?)

