



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# PROYECTO FIN DE CARRERA

**TÍTULO:** Estudio de las centrales de aprovechamiento de la energía mareomotriz

**AUTOR:** Joan Marc Torres Martínez

**TITULACIÓN:** E.T.I. Mecánica

**DIRECTOR:** Fransec Xavier Villasevil

**DEPARTAMENTO:** Expresión Gráfica

**FECHA:** 25/6/2012

|

|

**TITULO:** Estudio de las centrales de aprovechamiento de la energía mareomotriz

**APELLIDOS:** Torres Martínez

**NOMBRES:** Joan Marc

**TITULACIÓN:** Ingeniería Industrial Técnica

**ESPECIALIZACIÓN:** Macánica

**PLA:** 95

**DIRECTOR:** Francesc Xavier Villasevil Marco

**DEPARTAMENT:** Expresión Gráfica

**QUALIFICACIÓN DEL PFC**

TRIBUNAL

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

FECHA DE ENTREGA

**Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales:**  Si  No

# PROYECTO FIN DE CARRERA

## RESUMEN (máximo 50 líneas)

Este proyecto trata de ampliar el conocimiento sobre las centrales que convierten la energía del mar en energía eléctrica. Para ello, se han creado diferentes modelos virtuales, con los que se pretende facilitar la comprensión de los conceptos que se muestran en el proyecto. En la elaboración de este, se diferencian cuatro partes:

-La primera parte consta de un estudio del medio del que se extrae la energía, el mar, con el fin de conocer la fuente de energía y evitar así errores de concepto a la hora de hacer estudios posteriores.

-La segunda parte, es un estudio de los diferentes tipos de centrales que extraen energía del mar, con una breve explicación del funcionamiento de cada una, con tal de dar una perspectiva del estado actual de la tecnología usada en estas centrales.

-En la tercera parte, se han elegido dos de las centrales que se han nombrado en el punto anterior, haciendo un estudio exhaustivo del funcionamiento de ambas y mostrando cada uno de los componentes por los que están formadas. Para facilitar la comprensión del funcionamiento de estas centrales, se ha hecho una animación en 3D de estas, en las que se muestran los diferentes pasos de conversión por los que pasa la energía del mar hasta que es convertida en energía eléctrica

-En la última parte, se han cogido los mecanismos o conceptos técnicos considerados como más eficientes de los diseños de las dos centrales estudiadas en la anterior parte y se ha creado una nueva con el fin de que el rendimiento de esta sea superior al de las anteriores, además se han usado elementos estudiados en la segunda parte del proyecto que se han considerado que podrían ayudar a mejorar el rendimiento de esta. De igual manera que en el apartado anterior, se ha creado una animación virtual de esta central con el mismo objetivo que los hechos con anterioridad, hacer al lector más fácil la comprensión del funcionamiento de cada uno de los elementos que forman esta central y aclarar detalles, que de estar solamente en formato escrito, serían más difíciles de entender

## Palabras clave (máximo 10):

Central	Mareomotriz	Conversión	Energía
Pelamis	Marmotor	Oleaje	Modelado
Virtual			



# Índice

1.	Introducción.....	9
1.1	Objetivos.....	10
2	Conceptos previos .....	11
2.1	El medio.....	11
2.1.1	Las mareas .....	11
2.1.2	Las olas .....	15
2.1.2.1	<i>Tipos de olas</i> .....	16
2.1.2.2	<i>Características de las olas</i> .....	17
2.1.2.3	<i>Estudio de las olas por José Barrufet</i> .....	19
2.1.3	Las corrientes.....	21
3	Sistemas de aprovechamiento.....	25
3.1	Aprovechamiento de las mareas .....	25
3.1.1	Molino de mareas .....	25
3.1.2	Central de aprovechamiento de las mareas.....	28
3.2	Aprovechamiento de las olas .....	29
3.2.1	Marmotor.....	29
3.2.2	Rotor Savonius .....	29
3.2.3	Central Undimotriz o Columna de agua Oscilante.....	29
3.2.4	Boya Masuda .....	30
3.2.5	Pato de Salter .....	30
3.2.6	Balsa de Cockerell .....	30
3.2.7	Tapchan .....	31
3.2.8	Rectificador Russel.....	31
3.2.9	Péndulo Wave Power Conversion (1999) .....	32
3.2.10	Columpio de olas de Arquímedes.....	32
3.2.11	Wave dragon.....	32
3.2.12	Anaconda.....	33
3.2.13	Pelamis .....	33
3.2.14	Boyas de energía.....	34
3.2.15	Boya EPAM.....	34
3.2.16	Mighty Wale .....	34
3.3	Aprovechamiento de corrientes .....	35
3.3.1	Turbinas marinas o de generación axial .....	35
3.3.2	Turbina mareomotriz .....	35
3.3.3	WaveRoller.....	35
4	Elección previa de sistemas a modelar .....	36
4.1	Análisis del Marmotor .....	36
4.1.1	Introducción.....	36
4.1.2	Estudio del funcionamiento del Marmotor Barrufet.....	37
4.1.3	Dispositivos .....	39
4.1.4	Proceso de conversión de energía.....	44
4.2	Análisis del Pelamis .....	45
4.2.1	Introducción.....	45
4.2.2	Estudio del funcionamiento .....	46

4.2.3	Dispositivos .....	47
4.2.4	Proceso de conversión de energía.....	49
4.3	Análisis de los sistemas y propuestas de mejora .....	50
4.3.1	Mejoras propuestas .....	51
4.3.1.1	<i>Substitución de material del flotador</i> .....	51
4.3.1.2	<i>Situación de la estructura</i> .....	54
4.3.1.3	<i>Cambio del material de la estructura del dispositivo</i> .....	57
4.3.1.4	<i>Substitución del sistema de cremallera</i> .....	58
4.4	Idea final propuesta .....	60
4.4.1	Avance del diseño.....	60
4.4.2	Estudio de funcionamiento .....	63
4.4.3	Dispositivos .....	67
4.4.4	Proceso de conversión de energía.....	69
4.4.5	Cálculos y comprobaciones .....	70
4.4.5.1	<i>Comprobación del movimiento de bajada del flotador</i> .....	70
4.4.5.2	<i>Funcionamiento del circuito hidráulico de la nueva central</i> .....	74
4.4.6	Dimensionado de componentes .....	77
4.4.6.1	<i>Elección del tipo de turbina</i> .....	77
4.4.6.2	<i>Elección del generador hidráulico</i> .....	78
4.4.6.3	<i>Dimensionamiento de los pistones</i> .....	79
4.4.6.4	<i>Dimensionamiento de la turbina</i> .....	81
4.4.6.5	<i>Potencia útil del conjunto</i> .....	87
4.4.6.6	<i>Comprobación del oleaje soportado por el generador</i> .....	88
4.4.7	Estudio de impacto ambiental del sistema propuesto .....	94
4.4.8	Valoraciones .....	96
5	Temporización .....	98
6	Conclusiones.....	98
7	Presupuesto.....	100
8	Planos	
9	Modelos virtuales	
10	Bibliografía.....	101





# 1. Introducción

En la actualidad, una de las grandes preocupaciones de nuestra sociedad es el cuidar el medioambiente, ya que se ha demostrado lo perjudicial que sería para esta el seguir con el estilo de vida que se llevaba hasta ahora. Todo el mundo está haciendo todo lo posible para que el impacto medioambiental que conllevan nuestras actividades cotidianas sea el menor posible, como gran reflejo la sociedad actual, tenemos la industria del automóvil, que está haciendo un gran esfuerzo por renovar el parque automovilístico actual, alimentado por los nocivos combustibles fósiles, por los nuevos automóviles que funcionan directamente con energía eléctrica.

Aunque si analizamos en profundidad el ejemplo de la industria del automóvil, podemos preguntarnos de donde procede esta energía eléctrica; puede ser obtenida a partir de combustibles fósiles o mediante centrales nucleares, cosa que nos llevaría al punto de partida, ya que seguimos emitiendo gases y produciendo residuos nucleares. Pero también puede obtenerse mediante las energías renovables, ya sea energía hidráulica, energía solar térmica, biomasa, energía solar, energía eólica, energía geotérmica, etc. Entonces, si obtenemos la energía eléctrica mediante fuentes de energía renovables, veremos que lo que antes era un automóvil que emitía una gran cantidad de gases nocivos a la atmósfera, en la actualidad se está haciendo el esfuerzo de que todo esto cambie y las emisiones producidas por estos se reduzcan al mínimo, este ejemplo puede equipararse a una gran cantidad de productos, procesos, industrias, etc.

Este es uno de los principales motivos por el que se ha elegido elaborar un proyecto de construcción de un central de obtención de energía mediante fuentes renovables, para intentar ser partícipe de este cambio de conciencia social, con el valor añadido de que es en las primeras etapas de obtención de la energía y con una fuente de energía poco explotada, la energía mareomotriz.

Una de las ventajas de utilizar el mar como fuente de energía, es que tiene varios elementos de los cuales se puede extraer energía: las olas, las mareas y las corrientes marinas. Este hecho, propicia que los sistemas utilizados para la obtención de este tipo de energía sean de lo más variado. A lo largo de la historia, las centrales mareomotrices han tenido varios impedimentos que han hecho más difícil su progresión. Uno de ellos es la corrosión provocada por el agua del mar, cosa que impedía el funcionamiento de estas centrales durante largos periodos de tiempo. Otro de los grandes impedimentos, era el transporte de la energía obtenida, por ello los únicos sistemas que tuvieron éxito, eran los situados cerca de tierra firme, ya que transformaban la energía obtenida directamente

a energía mecánica. En la actualidad, estos problemas se han solucionado, el de la corrosión gracias al uso de materiales sintéticos, aleaciones, etc. y el problema del transporte de energía se ha solucionado, transformando la energía obtenida en electricidad, mucho más fácil de transportar, motivo por el cual se este experimentando un mayor crecimiento de este tipo de centrales.

## **1.1 Objetivos**

Con la elaboración de este proyecto, se pretende ampliar los conocimientos de los tipos de centrales que aprovechan el mar como fuente de energía. Basándome en mi propia experiencia, en cuanto al temario escolar, cuando se ha tratado el tema de las energías renovables, siempre se mencionan otros tipos de centrales más eficientes en la actualidad, pero en muy pocas ocasiones o de manera muy superficial se estudia la energía mareomotriz.

No olvidemos que los océanos ocupan sobre un 70% de la superficies terrestre, por lo que tiene un gran potencial que todavía no ha sido explotado, por lo tanto, es una buena ocasión para aplicar los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera, analizando la tecnología usada hasta ahora en este tipo de centrales e intentar optimizar el rendimiento de alguna de ellas, no solo con los conocimientos antes mencionados, sino también aprovechando las grandes posibilidades que ofrecen todos los medios que tenemos a nuestro alcance en la actualidad para obtener información .

Para conseguir que el análisis de las centrales que se escojan sea lo más detallado posible, se hará un estudio a fondo de cada una de ellas explicando su funcionamiento y los diferentes elementos que las componen, para ello, se creará un modelo virtual animado que ayudará visualmente al lector y facilitará la tarea de comprensión del funcionamiento de los sistemas.

Además, a partir de estas dos centrales elegidas, aprovechando el conocimiento de estas, se propondrá una nueva central, aunque también aprovechando otras tecnologías que puedan parecer interesantes de las estudiadas al principio del proyecto en el estudio global. El objetivo de esta nueva central, será el de conseguir un rendimiento y un índice de aprovechamiento de la energía mareomotriz superior a las centrales en las que se basará, para ello, se hará un estudio del funcionamiento, acompañado de un modelo en 3D complementario a la su explicación, y se expondrán cada uno de los cálculos.

## 2 Conceptos previos

### 2.1 El medio

Con un promedio de 4 Km. de profundidad, mares y océanos cubren las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta. Constituyen un enorme depósito de energía siempre en movimiento. En la superficie los vientos provocan las olas que pueden alcanzar hasta 12 metros de altura, 20 metros debajo de la superficie, las diferencias de temperatura (que pueden variar de  $-2^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ ) crean corrientes; por último, tanto en la superficie como en el fondo, la conjugación de las atracciones solar y lunar.

#### 2.1.1 Las mareas

Marea es el cambio periódico del nivel del mar, producido principalmente por las fuerzas gravitacionales que ejercen la Luna y el Sol. Otros fenómenos pueden producir variaciones del nivel del mar. Uno de los más importantes es la variación de la presión atmosférica. La presión atmosférica varía corrientemente entre 990 y 1040 hectopascales y aún más en algunas ocasiones. Una variación de la presión de 1 hectopascal provoca una variación de 1 cm del nivel del océano, así que la variación del nivel del mar debido a la presión atmosférica es del orden de 50 cm.



Figura 1. Mapa mundial de las mareas más grandes

Términos empleados en la descripción de las mareas:

*-Marea alta o pleamar:* momento en que el agua del mar alcanza su máxima altura dentro del ciclo de las mareas.

-*Marea baja o bajamar*: momento opuesto, en que el mar alcanza su menor altura.

El tiempo aproximado entre una pleamar y la bajamar es de 6 horas 12 minutos, completando un ciclo de 24 horas 50 minutos.

-*Flujo*: el flujo es el proceso de ascenso lento y continuo de las aguas marinas, debido al incremento progresivo de la atracción lunar o solar.

-*Reflujo*: el reflujo es el proceso de descenso de las aguas marinas, lento y progresivo, debido a la decadencia de la atracción lunar o solar.

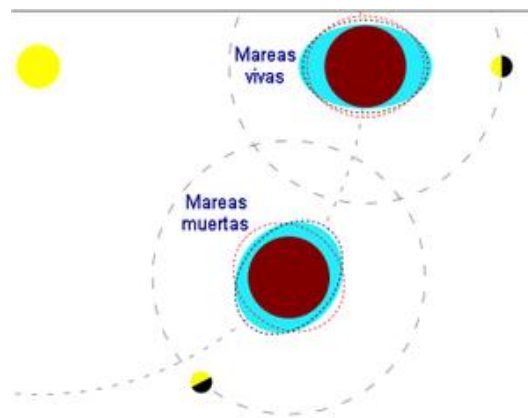


Figura 2. Influencia del sol y la luna en las mareas

- *Fenómeno físico de las mareas*

La explicación completa del mecanismo de las mareas, con todas las periodicidades, es extremadamente larga y complicada. Así que se comenzará empleando todas las simplificaciones posibles para luego acercarse a la realidad suprimiendo algunas de estas simplificaciones.

Se considerará que la Tierra es una esfera sin continentes rodeada por una hidrosfera y que gira alrededor del Sol en una trayectoria elíptica sin girar sobre su eje. Por ahora no se tendrá cuenta la Luna.

Cuando un astro está en órbita alrededor de otro, la fuerza de atracción gravitacional entre los dos viene dada por la ley de gravitación de Newton:

$$F_g = G \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

donde:

- $G=6,67 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$  es la constante de gravitación universal.
- $M_1$  y  $M_2$  son las masas de los dos cuerpos.
- $d$  es la distancia entre los centros de masas de los dos astros.

Esta fuerza de atracción es la fuerza centrípeta que hace que el astro describa una circunferencia.

$$F_c = M_2 \omega^2 R_1 = G \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

donde:

- $M_2$  es la masa del astro.
- $\omega = \frac{2\pi}{T}$  es la velocidad angular del astro y  $T$  su período orbital.
- $R_1$  es la distancia entre el centro de masas del astro y el centro de rotación, que coincide con el centro de masas de los dos astros. Si el otro astro es mucho más masivo ( $M_1 \ll M_2$ ), el centro de rotación está muy cerca del centro de masas del astro masivo y  $R_1 \simeq d$ . Es el caso que ocurre con la Tierra y el Sol.

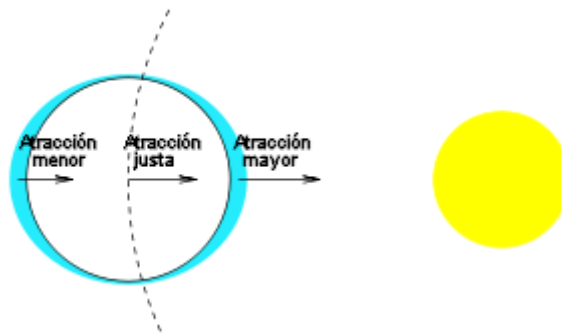


Figura 3. Diagrama de la fuerza de atracción solar

La fuerza de atracción asociada a la órbita y al período solamente se ejerce sobre puntos situados a la misma distancia que el centro de masas. Las zonas más lejanas están menos atraídas y las más cercanas lo están más.

El valor de la aceleración de gravedad debida al Sol es exactamente el que corresponde a una órbita con la velocidad angular  $\omega$  con el centro de masas terrestre a una distancia  $d$  del Sol. Todas las

partes de la Tierra tienen la misma velocidad angular alrededor del Sol, pero no están a la misma distancia. Las que están más lejos que el centro de masas sentirán una aceleración de gravedad menor que la necesaria y las que están a una distancia inferior sentirán una aceleración mayor que la necesaria.

Existe otra fuerza, del mismo orden de magnitud, debida al hecho que las fuerzas de atracción convergen hacia el centro del Sol, que se encuentra situado a una distancia finita. Se describirá más adelante.

En algunas fuentes se comete el error de añadir las aceleraciones centrífugas. Si opta por utilizar un sistema de referencia inercial, no se deben tener en cuenta las fuerzas centrífugas, que son fuerzas ficticias y que sólo aparecen en sistemas de referencia acelerados. Un observador en la Tierra ve fuerzas centrífugas porque la Tierra está en caída libre hacia el Sol. En cambio, para un observador exterior fijo, sólo existen las fuerzas reales, como la fuerza de atracción que constituye la fuerza centrípeta.

El resultado de este pequeño desequilibrio de fuerzas es que el agua de los océanos situada en el lado opuesto al Sol siente una fuerza que la empuja hacia el exterior de la órbita, mientras que el agua situada en el lado orientado hacia el Sol siente una fuerza que la empuja hacia dicho astro. La consecuencia es que la esfera de agua que recubre a la Tierra se alarga ligeramente y se transforma en un elipsoide de revolución cuyo eje mayor está dirigido hacia el Sol. Se verá que este alargamiento relativo es muy pequeño: del orden de uno entre diez millones.

- *Mareas solares*

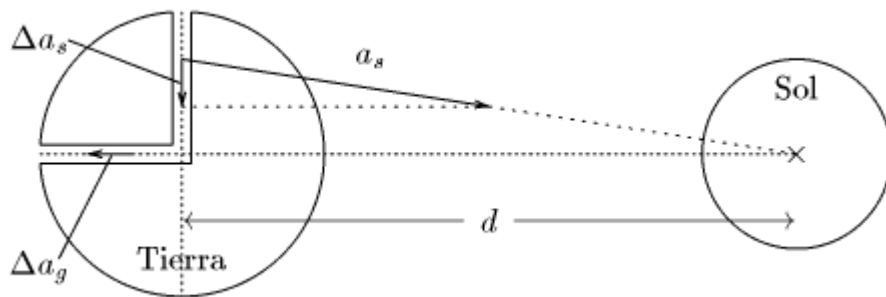


Figura 4. Esquema de las mareas solares

El agua del pozo vertical siente una aceleración hacia el centro porque la atracción del Sol está dirigida hacia el centro del Sol.

Esta aceleración da un aumento de la altura del océano de 16,28 cm. Con la suma de los dos efectos, es 24,4 cm. Como la Tierra gira, un punto situado en el Ecuador ve la altura del mar llegar a un máximo (pleamar) dos veces por día: cada vez que dicho punto pasa por el semieje mayor. De la misma manera, cada vez que el punto pasa por un semieje menor, la altura del mar pasa por un mínimo (bajamar). La diferencia entre la pleamar y la bajamar es de 24,4 cm. Pero no hay que olvidar que esto sólo es la parte debida al Sol, que no hay continentes y que no se ha tenido en cuenta la inclinación del eje de rotación de la Tierra.

- *Mareas lunares*

La Luna gira alrededor de la Tierra, pero esta última no está inmóvil. En realidad, tanto la Luna como la Tierra giran alrededor del centro de masas de las dos. Este punto se sitúa a 4.670 km del centro de la Tierra. Como el radio de la Tierra es de 6.366 km, el centro de masas se encuentra a unos 1.700 km de profundidad bajo su superficie. La Luna tiene una masa  $M_{\ell}=7,349 \cdot 10^{22}$  kg y está a una distancia media de la Tierra de  $d_{\ell}=3,84 \cdot 10^8$  m.

La diferencia de longitud debido a las mareas lunares es de 35,6 cm. Por tanto, la amplitud de las mareas lunares es, aproximadamente, dos veces mayor que las de las mareas solares. Como para las mareas solares, la variación de la altura del mar en un punto de la superficie terrestre se puede aproximar por una senoide. Esta vez, el período es 12 horas, 25 minutos y 10 s.

### 2.1.2 Las olas

Las olas son lo que en física se conoce como ondas mecánicas, y que se definen como la propagación en un medio material (el aire, el agua o cualquier sólido), de una perturbación como puede ser un cambio de densidad o presión, propagación que a su vez traslada consigo una cantidad de energía.

Al contrario de lo que se pueda pensar las olas no transportan agua, lo que si producen a su paso es un movimiento circular en las partículas de agua, y cuando la ola ha pasado las partículas vuelven al mismo lugar donde se encontraban antes de llegar la ola.

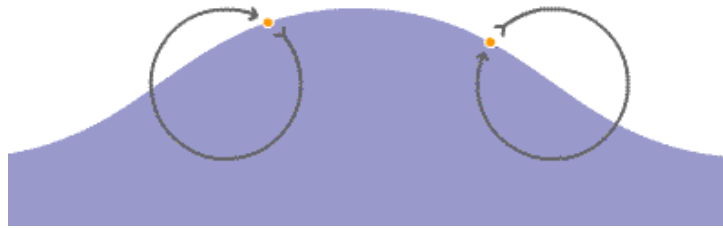


Figura 5. Comportamiento de dos partículas de agua al paso de una ola

Las olas se originan por el rozamiento del viento sobre la superficie del mar. El viento ejerce un empuje sobre la superficie del mar que hace que se forme creando pequeñas ondas, ondas que a su vez ofrecen más resistencia al viento lo que hace que se vayan transformando en ondulaciones cada vez mayores, es un proceso de retro-alimentación, es decir, contra mayor sea la onda mayor será el empuje que el viento podrá hacer sobre ella.

Las olas se originarán por tanto dependiendo de la fuerza del viento, el tiempo durante el cual esté soplando y el área oceánica a la que afecte ese viento.

La gravedad terrestre también juega un papel ya que después de que el viento eleve la superficie del mar, la gravedad la vuelve a empujar hacia abajo, con lo que al subir y bajar se va acumulando una energía cinética asociada a la ola que forma.

Yendo más allá, nos podemos preguntar que origina el viento, pues bien, el viento se produce cuando existen variaciones de presión en la atmósfera, lo que se conoce como borrascas (área de bajas presiones) y anticiclones (área de altas presiones). Estos fenómenos son a su vez producidos por diferencias en la temperatura del aire, que a su vez depende del modo en que las radiaciones solares inciden sobre la atmósfera y los movimientos de rotación de la tierra.

### 2.1.2.1 Tipos de olas

Las olas, cuando llegan a tierra firme pueden ser de tres tipos, mar de fondo o swell, olas de viento y mixtas.

-El mar de fondo o swell son olas que originariamente se crearon por incidencia del viento en alguna área del océano, pero que a medida que viajan por el mar dejan de estar afectadas por el viento que las originó, se alisan y se ordenan, pero mantienen su tamaño. Son generalmente olas de calidad porque cuando llegan a la costa lo hacen sin necesidad que haya un viento.



-Las olas de viento son las que llegan a la costa sin tiempo para ordenarse. Esto es así porque se originan cerca de la costa por vientos que la afectan desde que se crean mar adentro hasta que rompen en la playa. Son olas de peor calidad ya que no han podido ordenarse, llegan con muy poco intervalo entre ola y ola. Son por lo general olas pequeñas.



Figura 6. En las fotos se puede apreciar olas de mar de fondo o swell en comparación a olas de viento.

-También puede ocurrir que las olas que llegan a la costa sean el resultado de ambos tipos de olas, es decir que se asocia un mar de fondo con un fuerte viento en la costa dando lugar a un tipo de ola mixta. En ocasiones también se pueden asociar varios swells procedentes de distintas partes del océano.

### 2.1.2.2 Características de las olas

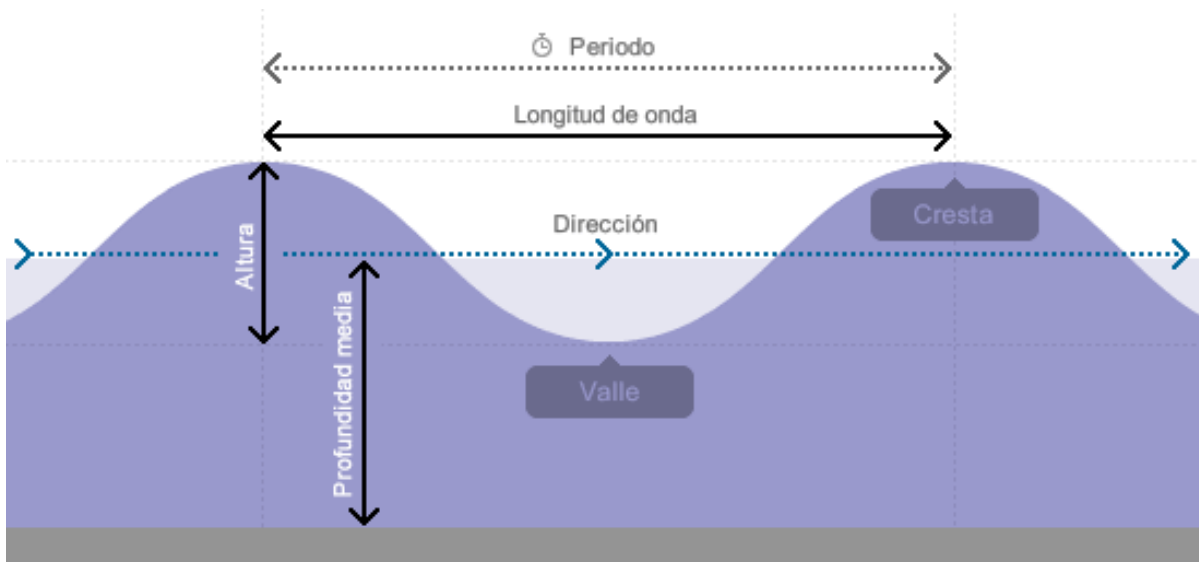


Figura 7. Estructura de una ola

#### -Altura o tamaño

La altura es la distancia entre la cresta y la base o valle de la ola. Es quizá el parámetro más importante para describir las olas, y generalmente la podemos calcular a ojo mirando la ola de frente cuando va a romper.

La altura significativa es un concepto creado para la predicción de olas que equivale a la media de altura de un tercio de las olas más grandes en un determinado espacio de tiempo.

#### -Periodo o intervalo

Periodo es el tiempo medio en segundos que transcurre entre que las crestas de dos olas consecutivas pasan por un punto fijo. Un intervalo alto puede significar dos cosas, un tamaño de olas grande ya que a mayor altura la distancia entre la cresta de dos olas consecutivas es mayor, o, independientemente del tamaño de las olas, un mar de fondo con olas ordenadas. Se considera un periodo alto al que supera los 9-10 segundos, aunque esto dependerá también del tamaño de las olas.

#### -Longitud de onda

Es la distancia entre las crestas de dos olas consecutivas.

#### -Dirección

La dirección es el sentido en el que se propagan las olas en el mar y está relacionado con la dirección del viento que las originó. Contra más frontal sea la dirección de las olas respecto a la orientación de la costa mayor tamaño tendrá la ola al romper.

#### -Fuerza

La fuerza es la violencia con la que rompe la ola al llegar a la costa. Una ola con fuerza es la que rompe de manera hueca, formando tubo. La fuerza depende del tamaño de la ola, la energía que lleve consigo y en buena parte del fondo sobre el que rompe la ola así como el punto de marea. Un cambio brusco en la profundidad del fondo puede producir una elevación repentina de la altura de la ola y que esta rompa con fuerza, por el contrario un fondo que vaya elevándose de manera gradual hará que la ola rompa más suavemente.

### 2.1.2.3 Estudio de las olas por José Barrufet

Uno de los inventores de un sistema de aprovechamiento del oleaje Barcelona en 1885, José Barrufet llevo a cabo un estudio sobre las olas, con el que mediante la observación de las mismas consiguió recoger una serie de datos que le eran de utilidad para averiguar cuál sería el tipo de instalación más óptimo para el tipo de mar que él estaba observando y así sacar el máximo rendimiento a su instalación. Los datos que sacó de esta observación eran los espacios temporales entre olas, altura y ancho de las olas y la velocidad de caída de las mismas en diferentes condiciones.

En primer lugar, clasifica las olas según su movimiento, pueden ser oscilatorias u ondulatorias. Las primeras, deben su origen a los choques producidos por movimientos encontrados, y sus efectos son proporcionales a las masas que chocan y se repelen, produciendo esas elevaciones y depresiones, dando lugar a la formación del segundo, o sea al movimiento ondulatorio. Esta clase de oscilaciones u olas, a que daremos nombre de **estables**, solo producen efectos de consideración en altas mares, pues en las orillas apenas se notan. Por otro lado, las ondulaciones tienen su origen en la influencia de los movimientos terrestres, gravitación de los astros y en la acción del viento sobre la superficie líquida. Esta forma ondulatoria se propaga a grandes distancias, y con ella el movimiento y su fuerza, que llega hasta las playas para perderse en ellas al descomponer y romperse en una blanquecina masa de atronadora y turbulenta espuma. Pero estas ondulaciones pueden ser un producto de acciones presentes y locales o de acciones pasadas y lejanas, razón por la que debemos distinguir a las primeras con el nombre de olas **transitorias**, y llamaremos **grecarias** o de **propagación** a las segundas:

- Las olas **transitorias** llegan a la orilla, perpendiculares a la dirección del viento, son de poca extensión y de movimientos bruscos y frecuentes, desapareciendo tan pronto como cesa la causa local que las promueve.

- Las olas de **propagación** marchan en dirección a la playa, más o menos paralelas, según la distancia de su origen y a la configuración de los fondos y orillas de los mares que recorren. Su forma es algo alongada y el volumen proporcionado a los fondos, a la persistencia e intensidad del viento y a la distancia recorrida. De modo que la magnitud de estas olas además de su extensión, depende de las causas anteriormente dichas.

Debemos hacer notar que las olas de **propagación** o **grecas** no cesan como las **transitorias** después de pasar la causa perturbadora, sino que continúan ondulando o trasladando unas a otras moléculas su forma por espacio de un tiempo igual a la persistencia o duración que tuvo el viento al formarlas, si bien modificadas por otras muchas causas que no creemos necesario en este momento determinar.

Llamamos olas **solitarias** o de **traslación** a aquellas que continúan el movimiento de propagación que recibieron, porque al cesar la acción del viento sobre las masas líquidas que habían oscilado en un mar gregario, viene a quedar en ellas, como vibraciones de un eco, el movimiento y fuerza que habían adquirido durante el periodo de propagación.

Dos causas pueden influir y observarse sobre las olas de **traslación** al estar formada: que el viento marche en la misma dirección o que vaya en dirección contraria. En el primer caso encontraremos olas **transitorias** y **grecas** que aparecen cual si fuesen cabalgando sobre las solitarias. Unas y otras acumulan entonces sus distintas acciones en verdadero tumulto, confusión y desorden para lanzarse luego sobre sí mismas erguidas y turbulentas, produciendo ese imponente y terrible estado que llamamos temporal. En el caso segundo, o sea cuando el viento ejerce su presión en sentido contrario, se observará que la **solitaria** decrece, que paulatinamente va restableciéndose el orden y que cada nueva ola que llega a la orilla deposita al descomponerse en ella la fuerza que tiene acumulada, continuando el decrecimiento hasta que el mar llega a su estado natural de relativo equilibrio. Ahora bien: a estas olas de aparentes y opuestos movimientos que chocan, luchan y se enlazan sobre sí mismas, las distinguiremos con el nombre de **coexistentes**.

Tipos de ola	Estado de la mar	Espacios (s)	Altura de la ola (m)	Ancho de la ola (m)	Velocidad de caída (m/s)
Transitorias	Calma o viento flojo	De 1 a 2	De 0.2 a 0.5	De 3 a 4	0.23
	Mar agitado o viento fuerte	De 2 a 3	De 0.5 a 0.8	De 4 a 6	0.26
De traslación	Calma completa	De 3 a 4	De 0.3 a 0.6	De 8 a 12	0.13
	Mar lleno	De 3 a 5	De 0.4 a 0.8	De 10 a 14	0.17
	Mar de fondo	De 4 a 6	De 0.8 a 1	De 12 a 16	0.20
Coexistentes	Con transitorias	De 6 a 8	De 1 a 2	De 14 a 18	0.44
	Con propagación	De 7 a 9	De 2 a 3	De 16 a 20	0.56
	Con estado completo	De 9 a 11	De 3 a 5	De 20 a 24	0.89

Figura 8. Tabla de los tipos de olas y sus características

### 2.1.3 Las corrientes

Una corriente oceánica o marina es un movimiento de traslación, continuado y permanente de una masa de agua determinada de los océanos y en menor grado, de los mares más extensos. Estas corrientes tienen multitud de causas, principalmente, el movimiento de rotación terrestre (que actúa de manera distinta y hasta opuesta en el fondo del océano y en la superficie) y por los vientos constantes o planetarios, así como la configuración de las costas y la ubicación de los continentes.

Tipos de corrientes:

-Según su temperatura

- **Cálida:** flujo de las aguas superficiales de los océanos que tiene su origen en la Zona Intertropical y se dirige, a partir de las costas orientales de los continentes (América del Norte y Asia) hacia las latitudes medias y altas en dirección contraria a la rotación terrestre, como por ejemplo la Corriente del Golfo o la de la Kuroshio o Corriente del Japón. En el hemisferio sur, estas corrientes son casi inexistentes, por la configuración de las costas y por el hecho de que en las latitudes de clima templado y frío no existen casi tierras.
- **Fría:** flujo de aguas frías que se mueven como consecuencia del movimiento de rotación terrestre, es decir de este a oeste, a partir de las costas occidentales de los continentes por el ascenso de aguas frías de grandes profundidades en la zona intertropical y subtropical. Ejemplos de corrientes frías: la de Canarias, la de Benguela, la de Humboldt o del Perú, y la de California, todas ellas en las costas occidentales de los continentes de la zona intertropical y subtropical. Las corrientes de Oyashio (en el océano Pacífico y la de Groenlandia o corriente del Labrador, también se producen por el ascenso de aguas frías y podrían definirse como una compensación al efecto de las corrientes cálidas cuando alcanzan las altas latitudes en las costas occidentales de los continentes. Estas corrientes frías sólo se presentan en la zona ártica ya que la zona antártica es mucho más uniforme y solo tiene una corriente continua circumpolar en la que no existe un ascenso de aguas frías provocado por el relieve submarino.
- **Mixta:** algunas corrientes que surgen en las costas occidentales de los continentes en las zonas próximas a los trópicos se desplazan hacia el este como corrientes frías pero, en la medida en que se desplazan por los océanos más amplios, se van calentando superficialmente y se convierten en cálidas. Por ejemplo, las corrientes de Canarias y de Benguela, que son de aguas frías, se transforman en la corriente ecuatorial del norte y del

sur (respectivamente) que son de aguas cálidas. Y lo mismo podemos decir de la de California y la del Perú en el Océano Pacífico.

-Según sus características

- Corrientes oceánicas, son producidas por el movimiento de rotación terrestre por lo que presentan un movimiento constante, en general, en sentido este - oeste en la zona intertropical o en sentido inverso, de oeste a este, es decir, contrario a la rotación terrestre en las latitudes medias o altas. Se trata, lo mismo que sucede con los vientos constantes o vientos planetarios, de desplazamientos producidas por efecto de la inercia: en la zona intertropical, las corrientes se mueven en sentido contrario a la rotación terrestre, las aguas del fondo oceánico acompañan a nuestro planeta en el movimiento de rotación de oeste a este, pero las aguas superficiales se van quedando atrás por inercia, lo que significa una corriente ecuatorial de gran amplitud y la de mayor volumen de agua que se produce en nuestro planeta. Dicho en otros términos: la corriente ecuatorial se desplaza de este a oeste por inercia ya que las aguas presentan una resistencia a acompañar a nuestro planeta en su movimiento de rotación. Pero en las latitudes medias y altas, las corrientes se mueven de oeste a este debido también al mismo principio de inercia, aunque en este caso, se trata de un efecto inercial que va aumentando progresivamente a medida que aumente la latitud, incrementándose su velocidad y llegando a superar ligeramente a la propia velocidad de la rotación terrestre. Por otra parte, como esta circulación oceánica tiene un patrón similar al de los vientos planetarios, interactúan mutuamente, tanto en su velocidad de desplazamiento como a la cantidad de calor que trasladan. Involucran el movimiento de grandes masas de aguas, afectando la temperatura de la capa superior y repartiendo una enorme cantidad de humedad y, por ende, de calor, en el sentido de los meridianos. Por esta razón, las corrientes oceánicas son las que explican las enormes diferencias climáticas entre las costas americanas y europeas del Atlántico Norte.
- Corrientes de marea, son corrientes periódicas con ciclo diario que son producidas por la atracción lunar y en menor grado, del sol.
- Corrientes de oleaje, son las que modifican en gran parte el litoral y son producidas por los vientos, en especial, por las tempestades o huracanes que se asocian al movimiento de las masas de aire tanto de origen continental como marítimo.
- Corrientes de deriva litoral: constituyen la resultante de la acción de las corrientes oceánicas al llegar a las costas cuyo trazado presenta alguna inclinación o desviación con respecto a la dirección original de las mismas. El ejemplo de la corriente ecuatorial atlántica

al llegar a las costas del Brasil es muy claro en este sentido, ya que casi todas las aguas de la misma son desviadas hacia el noroeste porque las costas tienen esta dirección.

- Corrientes de densidad, es la presencia vertical de dos masas de agua con distinta densidad y se presentan en los lugares de contacto entre aguas de distinta temperatura: una fría a mayor profundidad (por su mayor densidad) y otra cálida en la superficie. Generalmente, se desplazan en sentido contrario, por ejemplo, en el estrecho de Gibraltar suelen presentarse muchas veces unas corrientes superficiales hacia el oeste, mientras que en el fondo penetra en el Mediterráneo una gran cantidad de agua procedente del Atlántico mucho mayor en proporción porque el Mar Mediterráneo es deficitario en volumen de agua (es mayor la evaporación que el caudal aportado por los ríos y las lluvias).

-Según el nivel del mar

- Corrientes de profundidad, son corrientes generadas debajo de los 1000 metros de profundidad (pinoquina), principalmente debido a la rotación terrestre, que da origen a la surgencia de aguas profundas, y por lo tanto frías, en las costas occidentales de los continentes en las latitudes intertropicales.
- Corrientes de superficie, son las corrientes que se ven afectadas por los vientos predominantes, que les transmiten gran cantidad de energía y por la acción giratoria de la Tierra, generando corrientes circulares o en forma de espiral.

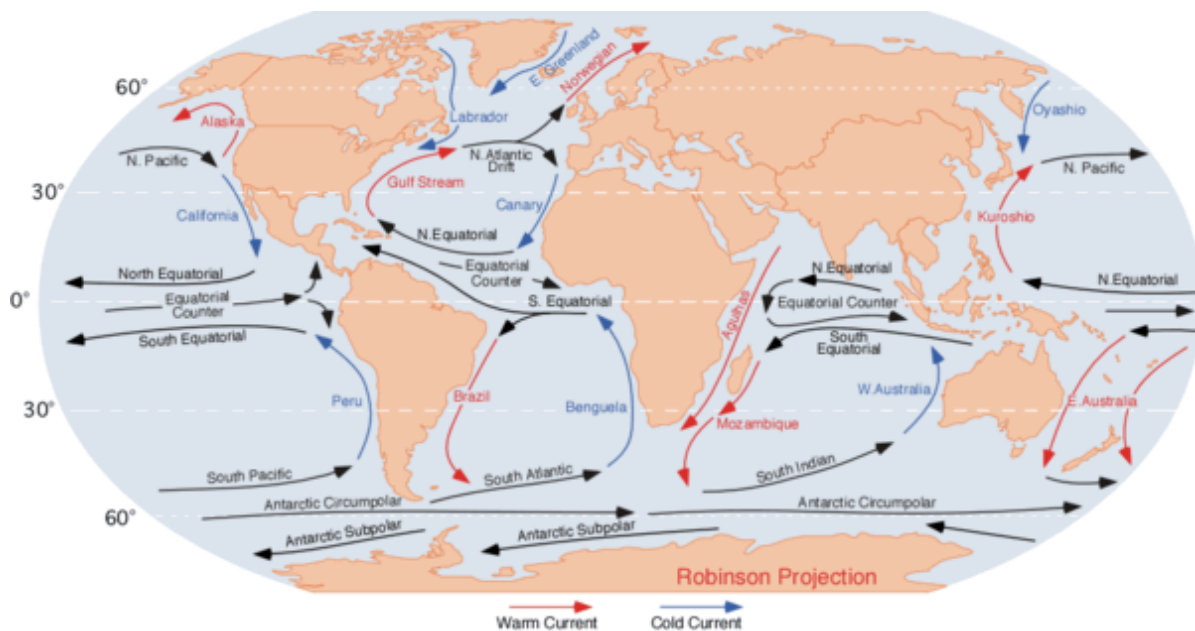


Figura 9. Mapa mundial de corrientes marinas

Estas corrientes influyen mucho en el clima regulando las temperaturas de las regiones por donde pasan. A su vez, estas corrientes dependen en parte de la dirección de los vientos.

Para entender el fenómeno de las corrientes marinas se usa el *efecto Coriolis*, descrito en 1835 por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis, es la aceleración relativa que sufre un objeto que se mueve dentro de un sistema de referencia en rotación cuando varía su distancia respecto al eje de giro. El efecto Coriolis hace que el objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotación tienda a acelerarse o a frenarse con respecto a ese disco según si el movimiento es hacia el eje de giro o alejándose de éste, respectivamente. Por el mismo principio, en el caso de una esfera en rotación, los movimientos de un objeto en movimiento en cualquier dirección sobre la esfera también en movimiento (de rotación) resultan afectados por este efecto ya que, aunque la velocidad angular de la rotación terrestre se mantiene siempre igual ( $15^\circ$  de longitud geográfica por hora), cuando nos referimos a la velocidad real (lineal), varía considerablemente desde el ecuador, donde es máxima (1.674 km/h) hasta los polos, donde se anula. Así pues, cuando un móvil se desplaza sobre la superficie terrestre siempre se moverá desde un punto con una velocidad real de rotación dada hasta otro punto con una velocidad diferente (mayor si el objeto en movimiento se desplaza de este a oeste, es decir, al contrario que el movimiento de rotación que es de oeste a este; y menor en caso contrario, es decir, cuando el móvil se desplaza de oeste a este).

La magnitud física subyacente al efecto Coriolis es la inercia del cuerpo -denominada conservación del momento angular, en el caso de cuerpos girando alrededor de un eje-, que hace que la aceleración que tiene el marco de referencia, al no ser aplicada al cuerpo, produzca la apariencia de que éste se está acelerando absolutamente.

En términos más rigurosos, se denomina fuerza de Coriolis a la fuerza que hay que ejercer sobre un cuerpo para que no modifique su velocidad angular cuando varía su distancia respecto al eje. Esto es análogo al caso de la fuerza necesaria para que un cuerpo con una distancia fija respecto al eje la mantenga, fuerza que se denomina fuerza centrípeta y cuya ausencia produce la apariencia de llamada fuerza centrífuga.



### 3 Sistemas de aprovechamiento

En este apartado, procederemos a nombrar la mayor parte de centrales que existen en la actualidad, encargadas de producir energía a partir del mar, ya se obteniéndose de las mareas, de las olas o de las corrientes.

#### 3.1 Aprovechamiento de las mareas

##### 3.1.1 Molino de mareas

El primer dato fidedigno sobre un molino de marea nos lleva a la localidad inglesa de **Dover**, molino que fue construido entre los años 1067 y 1082. El funcionamiento de este tipo de molinos es: cuando la marea sube, se abren las compuertas del dique que cierra el estanque natural, cuando la marea llega a plena mar estas compuertas se cierran. Cuando la marea esta en su nivel mas bajo, se abren las compuertas, en la misma zona donde se encuentran las compuertas, hay una rueda con paletas que es movida por el flujo del agua, el movimiento de esta rueda se aprovecha para mover las pesadas piedras para moler.



Figuras 10, 11 y 12. Imágenes de molinos de mareas

En noticias documentales recogidas sobre molinos, se aprecia que los primeros molinos de mareas conocidos en el golfo de Gascuña están fechados en el siglo XII, y posteriores son los de Bizkaia, Gipuzkoa, Galicia y costas portuguesas. Aunque estos molinos funcionaban de manera ligeramente diferente, funcionaban de la siguiente manera: cuando la marea sube, el agua inunda las zonas altas de las marismas y mediante un sistema de compuertas el agua queda retenida. Cuando la marea comienza a bajar y hay un desnivel suficiente, se abren las compuertas, liberando el agua hacia el

mar. Este flujo de agua hace girar una rueda que transmite la energía a los engranajes que accionan las piedras del molino, para moler el cereal. Cuando baja la marea pierde potencia y se detiene.



Figuras 13 y 14. Esquemas de funcionamiento de molinos de mareas

Algunos de estos son:

- Se tiene constancia de que el **molino de Cerroja** ya estaba en funcionamiento en el año 1047.
- Desde el siglo XI se documenta en **Trasmiera (Molino de Santa Ojala)** la existencia de molinos de marea, usaban la energía de las mismas, el flujo y reflujos de la pleamar y la bajamar, para mover sus ruedas, girar y moler el grano. En **Noja** se conservan restos de dos molinos del siglo XVII, uno en las marismas de **Victoria** y otros en las del **Joyel**. Llegaron a estar activos hasta la postguerra española, después de más de 10 siglos de existencia. Existen muy pocos restos de un tercer molino en las marismas de Victoria.



Figuras 15 y 16. Molinos de Noja (Victoria y Joyel)

- Otro de estos molinos se encuentra en Cantabria, el **molino de Jado, Argoños**, pequeño pueblo pesquero. Este molino tiene fecha del siglo XVII, aunque a lo largo de la bahía de Santoña se han contabilizado, en la actualidad, un total de dos docenas de molinos de este tipo.

- El molino de **Portu Errota**, está situado en el mar Cantábrico, en el País Vasco, construido en el año 1683, es un fiel reflejo de la arquitectura rural vasca de la época, con su estructura muros de mampostería, piedra, y vigas de castaño y roble. La turbina del molino está construida en una única pieza de piedra. El diámetro es de ciento cuarenta centímetros. El grosor es de veinte centímetros, y dispone de trece álabes esculpidos en la piedra.

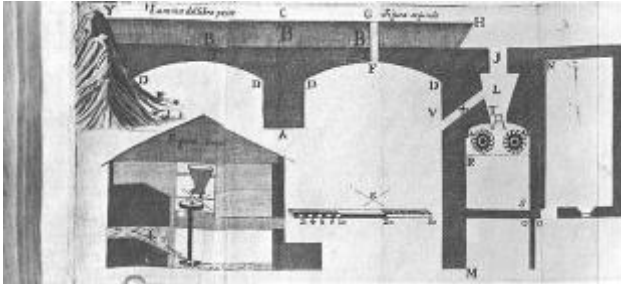


Figura 17. Plano del molino de Portu Errota



Figura 18. Alabes del molino de Portu Errota

- El molino de **Isla Cristina (Huelva)** fecha del siglo XVIII y se empleaba para moler cereales y hacer harinas de pescado, que se usaban como fertilizante de los campos circundantes. El sistema se basa en que cuando el mar sube (marea ascendente), llena una cuenca de reserva para el molino, en la cual el agua queda retenida durante la marea descendente. Durante la marea baja, las válvulas que regulan la salida de agua se abren y el agua retenida se vierte hacia el mar, impulsando la rotación de la rueda del molino.



Figura 19. Molino de isla Cristina

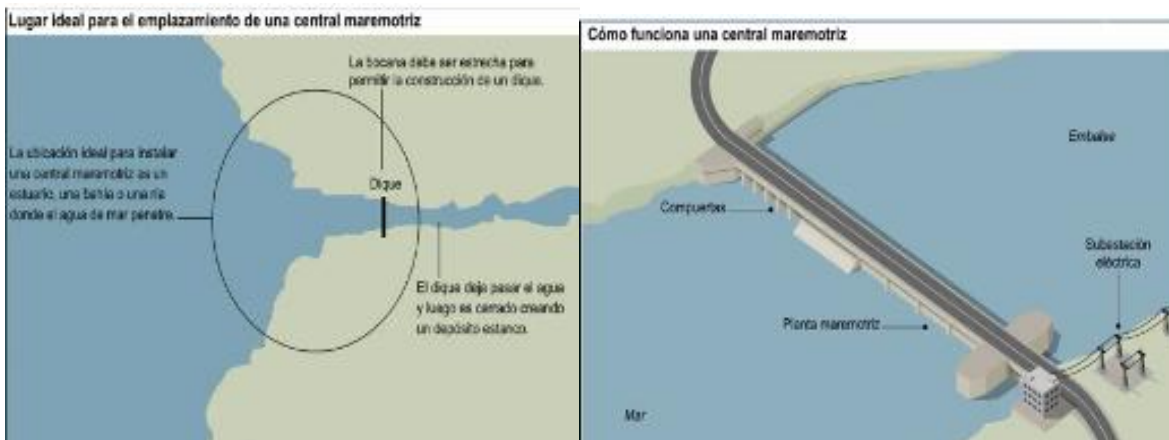
-La Bahía de Cádiz llegó a contar, a finales del siglo XIX, con más de una docena de molinos de mareas que producían toneladas de harina. De ellos, el del **Río Arillo**, con sus doce piedras para la molienda, era uno de los más grandes de la Península Ibérica. Con la llegada de la energía eléctrica, este tipo de construcciones cayó en el desuso y con él, en el abandono.



Figura 20. Molino de la bahía de Cádiz

### 3.1.2 Central de aprovechamiento de las mareas

Este tipo de centrales se sitúan en estanques naturales en los que el movimiento de las mareas es considerable, en la entrada de dichos estanques se sitúa el dique con el cual se retendrá el agua. Su funcionamiento se basa en que cuando sube la marea, deja entrar el agua, cuando la marea llega a su nivel máximo se cierran las compuertas y, aprovechando la bajada de la marea la cual crea una diferencia de altura, se hace circular el agua estancada por unos canales colocados en el dique, en los cuales se encuentran unas turbinas que son actuadas por la circulación del agua, estas están conectadas a unos generadores que transforman el movimiento de las turbinas en energía eléctrica. La primera gran central mareomotriz para la producción de energía eléctrica comercial no se construyó hasta 1967 en el Estuario de Rance (Francia).



Figuras 21, 22 y 23. Imágenes de Central de aprovechamiento de las mareas

## 3.2 Aprovechamiento de las olas

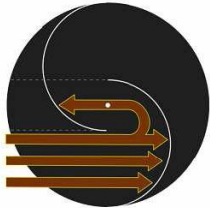
### 3.2.1 Marmotor

El Marmotor fue inventado por José Barrufet en 1885. En él se empleaban unos flotadores que suben libremente a impulso de las olas. Al bajar, y a través de un mecanismo de trinquete, transmiten su energía al eje horizontal situado entre las vigas de madera y que está asociado al volante de inercia.



Figura 24. Imagen del Marmotor

### 3.2.2 Rotor Savonius

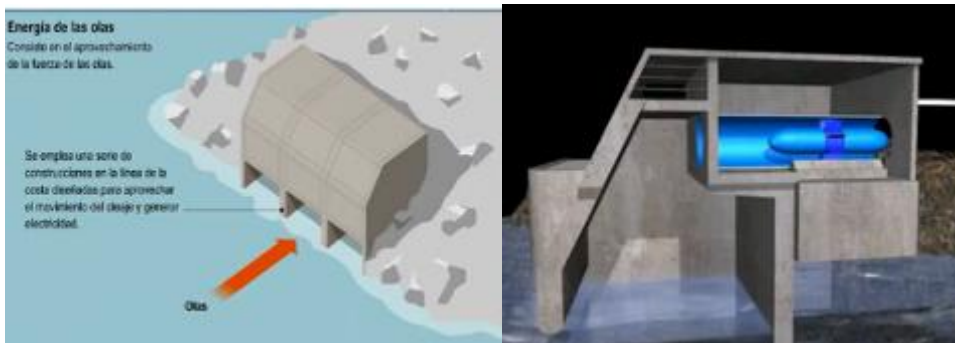


En 1929 se llevó a la práctica el primer proyecto para utilizar la fuerza horizontal de las olas, empleándose para ello el rotor de Savonius. Consiste en una rueda formada por dos semicilindros asimétricos montados sobre un chasis. Inutilizado por la acción corrosiva del agua.

Figura 25. Rotor Savonius

### 3.2.3 Central Undimotriz o Columna de agua Oscilante

La Columna de Agua Oscilante (1947, Masuda) (Oscillating Water Column ó OWC) genera electricidad en un proceso de dos pasos. Cuando la ola entra en la columna, fuerza al aire de la columna a pasar por la turbina e incrementa la presión dentro de la columna. Cuando la ola sale, el aire vuelve a pasar por la turbina, debido a la disminución de la presión de aire. Sin importar la dirección de la corriente de aire, la turbina (conocida como turbina Wells) gira hacia la misma dirección y hace que el generador produzca electricidad.



Figuras 26 y 27. Imágenes de la central de columna de agua oscilante

### 3.2.4 Boya Masuda

Este proyecto fue diseñado en 1971 en Japón, consistente en un dispositivo flotante donde el movimiento de las olas se aprovecha para aspirar e impulsar aire a través de una turbina de baja presión que mueve un generador de electricidad. Sería el equivalente al actual a Columna de agua oscilante.

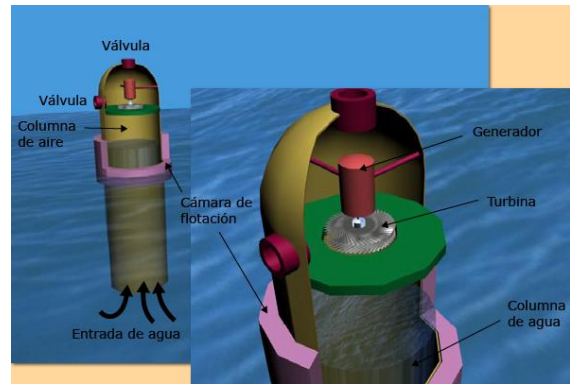


Figura 28. Image de una Boya Masuda

### 3.2.5 Pato de Salter

El ingeniero Stephen Salter, presentó un proyecto conocido como el «pato» de Salter, en 1973. Este es un tipo de estructura cuya sección transversal tiene forma de leva, asemejándose a un pato flotando en el agua. La zona de mayor diámetro permanece dentro del agua, opera como pivote frente al embate del mar y en ella se ubica un grupo de bombas que impulsan el agua a máquinas hidráulicas que están unidas a generadores eléctricos.

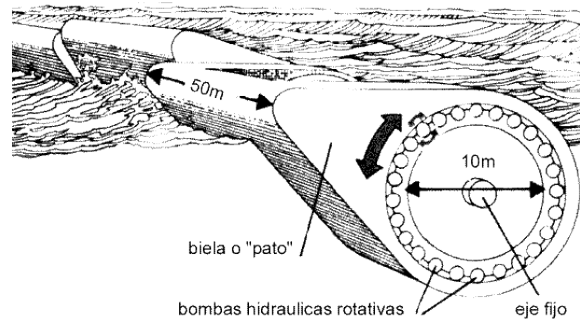
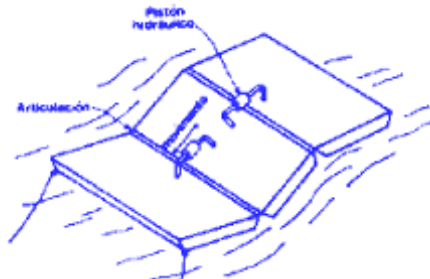


Figura29. Esquema de un Pato de Salter

Este diseño implica el uso de un grupo de estos patos, que se articulan por medio de una espina dorsal apoyada en sus extremos en grandes boyas, y se fijan al fondo del mar. Este eje se construyó con 15 m de diámetro para soportar la potencia máxima de las olas.

### 3.2.6 Balsa de Cockerell



Consta de un conjunto de plataformas articuladas que reciben el impacto de las crestas de las olas. Las balsas ascienden y descienden impulsando un fluido hasta un motor que mueve un generador por medio de un sistema hidráulico instalado en cada articulación. Sería el equivalente a las actuales Pelamis. Fue diseñado en 1973.

Figura 30. Dibujo de una Balsa de Cockerell

### 3.2.7 Tapchan

El sistema Tapchan, o sistema de canal estrechado, consiste en un canal estrechado que alimenta a un embalse que está construido en un acantilado. El estrechamiento del canal hace que las olas aumenten su amplitud (altura de las olas) cuando se acercan a la pared del acantilado. Eventualmente las olas se desbordan sobre las paredes del canal dentro del embalse, que está ubicado varios metros por debajo del nivel del mar. La energía cinética de la ola en movimiento se convierte en energía potencial cuando el agua se conserva en el embalse. La generación de electricidad es similar a la de una planta hidroeléctrica. El agua en depósito pasa por una turbina Kaplan. Existe una mezcla entre este sistema y el OWC llamado convertidor de Kvaerner (1985)

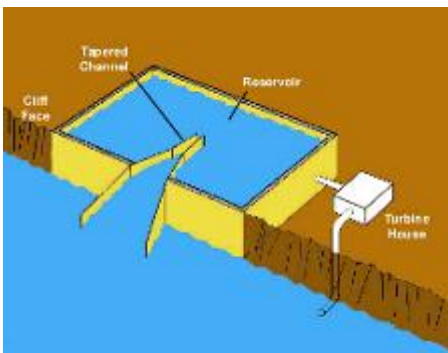


Figura 31 (a la derecha). Sistema TAPCHAN

Figura 32 (a la izquierda). Convertidor de Kvaerner



### 3.2.8 Rectificador Russel

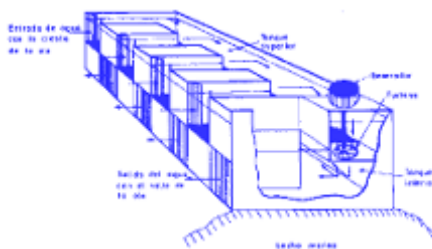


Figura 33. Imagen de Rectificados Russel

Se trata de un aparato constituido por módulos, cada uno constituido por dos tanques situados a alturas diferentes, los cuales se comunican a través de una turbina de pequeño salto. El dispositivo se fija al fondo del mar en zonas de poca profundidad. Las crestas de las olas introducen el agua en el tanque superior, la cual pasa, por acción de la fuerza de gravedad, a través de los alabes de la turbina, al tanque inferior. Un sistema de válvulas unidireccionales es el encargado de permitir la entrada de agua en el tanque superior y la salida de la misma por el inferior. Generadores eléctricos, mecánicamente conectados a las turbinas, son los encargados de producir electricidad (1990, Robert Russell, Oxford Inglaterra).

### 3.2.9 Péndulo Wave Power Conversion (1999)

Consiste en una caja rectangular, que está abierta al mar en un extremo. Una aleta gira pendularmente sobre esta abertura, de modo que la acción de las olas la hace pivotar hacia adelante y hacia atrás. Este movimiento entonces se utiliza para accionar una bomba hidráulica y un generador. Por todo el mundo, solamente se han desplegado dispositivos pequeños.

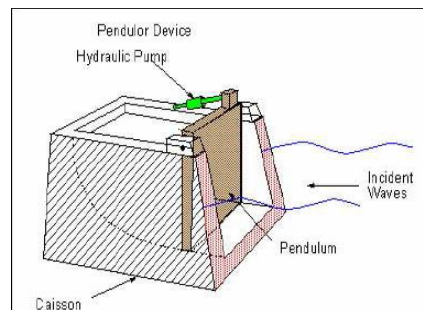


Figura 34. Esquema Péndulo Wave Power Conversion

### 3.2.10 Columpio de olas de Arquímedes



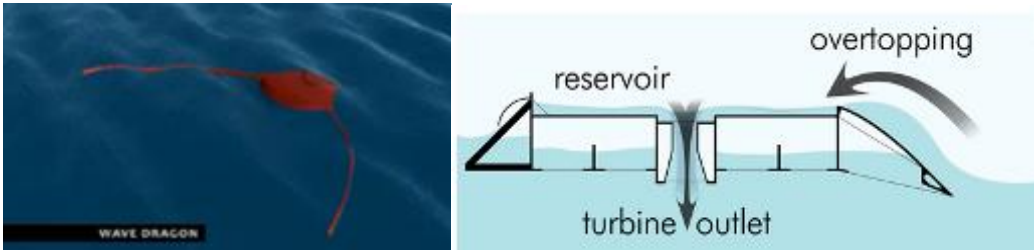
Este sistema consiste de dos cilindros. El cilindro inferior está fijado al lecho marino, mientras que el cilindro superior se mueve hacia arriba y abajo bajo la influencia de las olas. En forma simultánea, los imanes, que están fijados en el cilindro superior, se mueven a lo largo de una bobina. Como resultado, el movimiento del flotante se reduce y se genera electricidad. El interior está lleno de aire y cuando

Figura 35. Imagen de columpio de olas Arquímedes el cilindro superior se mueve hacia abajo, el aire interior se presuriza. Como resultado, se genera una fuerza contraria que fuerza al cilindro superior a subir nuevamente. Para las olas largas, la amplificación puede ser de tres veces la elevación de la ola, y es mayor para las olas cortas. La amplificación puede compararse con el efecto de un columpio. Si uno empuja el columpio en el momento exacto, el movimiento se ampliará. Fue ideado en 2002, Holanda.

### 3.2.11 Wave dragon

La idea básica del dragón de olas, que se desarrollo en 2005, es usar principios bien estudiados en otros sistemas hidroeléctricos, pero en el contexto de una plataforma flotante. El mecanismo es muy sencillo: Una barrera captura el agua de las olas que sobrepasan un cierto nivel y la almacena en un estanque flotante. Al pasar por unas turbinas hidroeléctricas, su energía potencial se convierte en energía eléctrica, completando el ciclo de tres fases (absorción, almacenamiento y conversión).





Figuras 36 y 37. Imagen del funcionamiento del Wave dragon

### 3.2.12 Anaconda

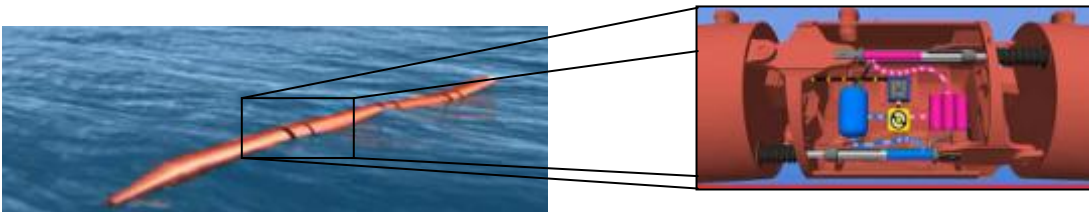
El sistema de la anaconda, consiste en un tubo de plástico por el cual, aprovechando la llegada de una ola se hace circular un fluido líquido, el cual, gracias a la baja presión de la cresta de la ola, recorre el tubo hasta llegar al final donde se encuentra una turbina que gira gracias a la llegada del fluido. Este sistema fue inventado en 2006.



Figuras 38 y 39. Imágenes del sistema Anaconda

### 3.2.13 Pelamis

El funcionamiento del sistema pelamos, creado en 2006, se basa en el movimiento de los diferentes módulos que lo forman aprovechando el movimiento provocado por las olas, estos módulos están conectados entre si, los cuales, cada dos llenos de aire, en medio se coloca otro en su interior hay dos pistones hidráulicos (conectados con los módulos contiguos), un motor y un generador. Para producir energía eléctrica, los dos pistones hidráulicos mueven los fluidos que llevan a través de un sistema cerrado al motor aprovechando el movimiento de los módulos, estos fluidos mueven la turbina del motor, el cual transmite el movimiento circular al generador.



Figuras 40 y 41. Imágenes del sistema Pelamis

### 3.2.14 Boyas de energía

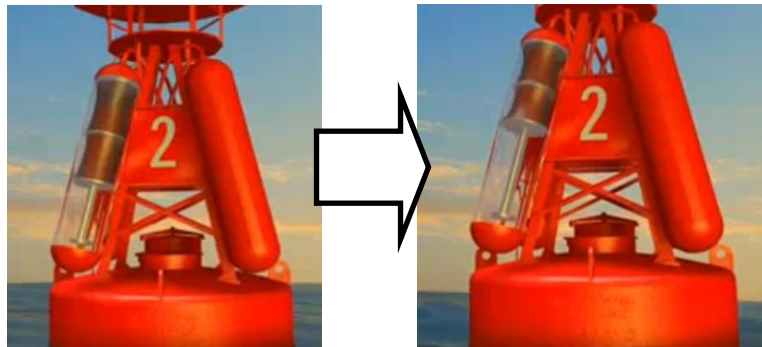
El levantamiento y el caer de las ondas de orilla hace que la boya se mueva libremente hacia arriba y hacia abajo. El rozamiento mecánico resultante que se produce en el interior de la boya activa el generador eléctrico. La corriente alterna generada se convierte en la c.c. del alto voltaje y se transmite en tierra vía un cable de transmisión subacuático



Figura 42. Imagen de boyas de energía

### 3.2.15 Boya EPAM

La Boya EPAM consiste en una boya convencional, en la que en su propia estructura, se colocan uno o más cilindros, en los que en su interior se coloca una especie de pistón con un polímero llamado EPAM (electroactive polymer artificial muscle). El movimiento de las olas hacen que el pistón suba y baje comprimiendo el polímero. La propiedad por la que se usa ese tipo de polímeros es que son capaces de generar electricidad al comprimirlos y son capaces de volver a su estado original. Este proyecto fue probado con éxito a finales de 2008 en Santa Cruz, California.



Figuras 43 y 44. Funcionamiento de la boya EPAM

### 3.2.16 Mighty Whale

El Mighty Whale genera electricidad cuando la ola entra a las 3 cámaras de aire ubicadas en la parte delantera del dispositivo. La superficie interna del agua se mueve hacia arriba y abajo generando una presión neumática, lo que hace girar las turbinas de aire. Esto hace que los generadores conectados a las turbinas generen electricidad.

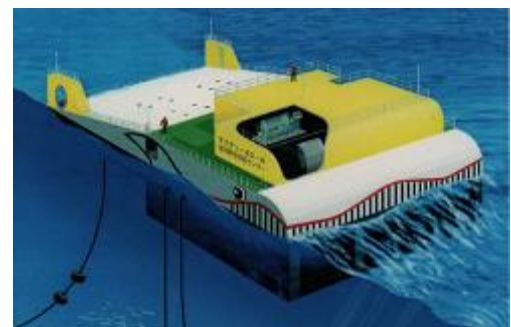


Figura 45. Imagen de Mighty Whale

### 3.3 Aprovechamiento de corrientes

#### 3.3.1 Turbinas marinas o de generación axial

Este sistema dispone de una hélice debajo del agua que funciona en un solo sentido, la cual está sujeta a una estructura que se apoya en el fondo, aunque el dispositivo sobresale del nivel del agua. El movimiento de la hélice se transmite mediante unos engranajes al generador que está en la parte de arriba. El transporte de la energía eléctrica se efectúa a través de un cable sumergido.



Figuras 46 y 47. Imágenes de turbinas marinas

#### 3.3.2 Turbina mareomotriz

Este sistema aprovecha las corrientes marinas, ya que estas suelen ir siempre en la misma dirección. Su funcionamiento se basa en colocar una turbina en el lecho marino y aprovechando estas corrientes se hace mover la turbina, el movimiento de la turbina es transformado en energía eléctrica.

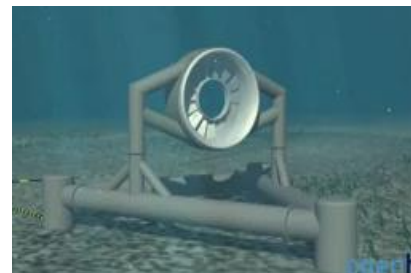


Figura 48. Imagen de turbina mareomotriz

#### 3.3.3 WaveRoller

El dispositivo WaveRoller es una placa amarrada al fondo del océano por su parte inferior que pivota hacia atrás y adelante. El movimiento de las olas bajas mueve la placa, y la energía cinética producida se recoge en una

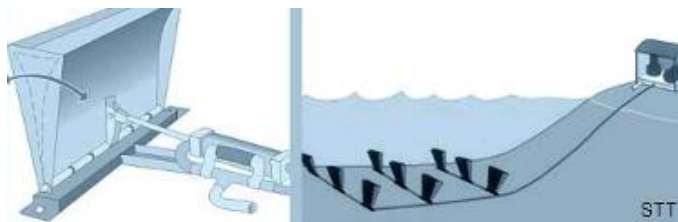


Figura 49. Imagen de Waveroller

bomba de pistón. Esta energía puede ser convertida en electricidad ya sea por un generador unido a la unidad WaveRoller, o por una sistema hidráulico cerrado en combinación con un sistema de generador / turbina.

## 4 Elección previa de sistemas a modelar

A partir de los sistemas estudiados en el apartado anterior, 3. *Sistemas de aprovechamiento*, se han elegido dos sistemas, los cuales se van a analizar en profundidad y se va a crear el modelo virtual de los mismos con la finalidad de facilitar la comprensión del funcionamiento de estos.

Los sistemas elegidos para la ejecución de este apartado son el Marmotor y el Pelamis. Los motivos principales por los que se han escogido estos dos sistemas, es que los dos obtienen la energía de la misma fuente, de las olas, pero su diseño es muy distinto, en primer lugar porque el Marmotor fue diseñado en 1885 y el Pelamis en 2006, en segundo lugar, aunque los dos obtengan la energía de las olas, las tecnologías que usan cada uno de ellos a la hora de tratar la obtención y transporte de energía es totalmente diferente.

### 4.1 Análisis del Marmotor

#### 4.1.1 Introducción

El sistema que se va a analizar es el Marmotor Barrufet, extraído de las publicaciones “Aprovechamiento del movimiento de las olas del mar como fuerza motriz por el Marmotor Barrufet” y “Las olas del mar. Apuntes que se relacionan con el movimiento de las mismas” por el Dr. José Barrufet y Veciana, publicados en Barcelona en 1885, en esta segunda, además de la explicación del funcionamiento del sistema inventado, se puede encontrar un amplio estudio sobre el comportamiento de las olas del mar que facilita la comprensión y la dificultad que implica el centrarse en este tipo de sistema de aprovechamiento de energía, este estudio puede encontrarse en apartado 2.1.2.3 *Estudio de las olas por José Barrufet*. Existen informes en los que se confirma la construcción de esta infraestructura, pero que su resultado no fue el esperado a causa de la degradación prematura de los componentes del sistema causando, por consiguiente, el fracaso de la idea y su posterior abandono. La energía extraída por esta central, según el propio Barrufet, plantea varias finalidades, entre ellas, convertirla en energía eléctrica, convertirla, en aire comprimido, por último y más destacado por el autor, sería la de transportar la energía mediante cables metálicos. Cabe destacar que los documentos consultados, anteriormente mencionados, solo existen en formato papel original en la Biblioteca Pública Arús, aunque en internet se menciona la existencia de estos documentos, no se puede encontrar en la red, cosa que ha dificultado este apartado.

#### 4.1.2 Estudio del funcionamiento del Marmotor Barrufet

El funcionamiento del Marmotor Barrufet se basa en aprovechar el movimiento del oleaje, las subidas y bajadas de las crestas y los valles de las olas respectivamente, para convertir este movimiento de vaivén en un movimiento circular, mediante un sistema de engranajes, transmitido a un eje, y aprovechar el movimiento circular del eje para convertirlo en trabajo, con la mentalidad de que como mencionaba Barrufet: “[...] funcionando con todas las irregularidades, pueda absorber el trabajo de las olas en todos los casos, y transmitirlo en forma aprovechable. [...]”.

El mecanismo expuesto por José Barrufet dispone de dos sistemas bien diferenciados: el impulsor y el receptor, unidos por un sistema de cremallera que permite transformar el movimiento del movimiento de vaivén de las olas en un movimiento circular, montados sobre un armazón o estructura del dispositivo que soporta toda la estructura sobre el nivel del mar. El impulsor está formado por el flotador, el trinquete y la barra guía, y el receptor lo forman los engranajes, el eje transversal, el eje del volante de inercia y el volante de inercia

La idea en sí presenta algunos problemas, como son los planteados por el propio Barrufet: “[...] la irregularidad, en el tiempo, forma y magnitud de las olas bien pronto viene a demostrar la imposibilidad de esta disposición [...]”, por ello, efectúa un estudio sobre la forma y comportamiento de las olas, y mediante este estudio se

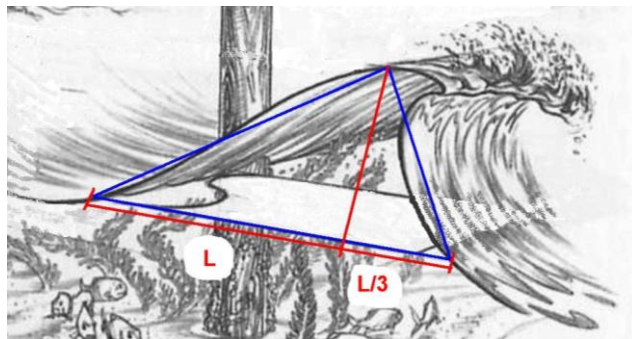


Figura 50. Esquema de una ola

plantea el aprovechar el movimiento de las olas de forma directa o indirecta; “[...] los espacios que separan una ola de otra están formados por una curva mucho más pronunciada en la parte anterior, o sea desde el punto en que se inicia hasta el más elevado que en la posterior; de manera que si bajamos una perpendicular desde el punto en que se inicia hasta el más alto a su proyección sobre la línea de nivel normal, la dividiremos en dos partes iguales, siendo la longitud de la primera aproximadamente un tercio de la segunda, y por dos planos inclinados, resultará que siendo igual la altura de ambos, al plano anterior, le corresponde una base que será un tercio de la posterior; y como el flotante se ve obligado a verificar su ascenso y descenso en el tiempo que tardará en pasar una ola por debajo del mismo, deduciremos fácilmente que el tiempo en que puede verificarse el descenso de un flotante es tres veces mayor que el necesario para el ascenso, en una misma

*ola.[...]”. “[...] si se aprovechara el trabajo directamente, los movimientos serían bruscos; el efecto del choque por la fuerza de traslación molecular muy sensible, y su trabajo más desigual en los mismos estados del mar; mientras que con el aprovechamiento indirecto, haciendo que la boya termine su carrera en menos tiempo que el necesario para pasar el espacio que separa una ola de otra, el cual nunca es menor de dos segundos, se obtiene un movimiento suave, la acción de choque insignificante, y el trabajo muy poco variable en un mismo estado del mar. [...]”.*

Otro de los problemas que tiene el aprovechamiento de las olas mediante este sistema es que solo se puede extraer energía de uno de los dos movimientos del flotador; o del de subida o del de bajada, ya que al transmitir el movimiento de forma directa al eje que transformará su movimiento en trabajo, el movimiento contrario al que originaría el movimiento del eje provocaría una confrontación entre la dirección de rotación del eje y la dirección de movimiento del flotante como expone el propio Barrufet: *“Si la boya no ha depositado o transmitido el trabajo que tiene acumulado, durante el tiempo de un intervalo, o sea durante el espacio que media entre dos olas, su carrera es interrumpida, verificándose un choque entre la boya que baja y la ola que sube. La inercia de la boya en este caso, obrando como resistencia, hace que suba el nivel del liquido sin mover el flotante en el primer momento, y cuando este comienza a verificarlo, la ola siguiendo su carrera, ha salido ya del contacto, dejando sin efecto útil su trabajo para convertirse en causa destructora del emplazamiento en general, y en particular de los órganos más inmediatos al flotante. Por consiguiente, para que el trabajo de la ola sea aprovechado, es preciso que el mecanismo destinado a recibirlo le permita su descenso con una velocidad que no le impida recorrer toda la distancia que medie entre los diferentes niveles del agua, cuya velocidad debe ser variable e independiente del régimen de la máquina, aumentando al propio tiempo el trabajo que no se haya transmitido”.*

El funcionamiento del aparato de Barrufet persigue el eludir estos problemas mencionados y permitir la conversión de este movimiento discontinuo en otro más heterogéneo para así poder usar el movimiento transformado a partir del oleaje. Barrufet expone que, *“El mecanismo, pues, de que tratamos y que distinguimos con el nombre de receptor, debe reunir:*

- 1º. Velocidad distinta e independiente del régimen de la máquina y de los demás receptores.*
- 2º. Debe recibir el trabajo del flotador y transmitir sólo el necesario para conservar la marcha uniforme de la máquina.*
- 3º. Acumular el exceso y transmitirlo cuando convenga.”*

### 4.1.3 Dispositivos

Para analizar el funcionamiento del Marmotor, solo se disponía de la información mostrada únicamente de las publicaciones que hizo José Barrufet y de una imagen contenida en las mismas y que mostramos seguidamente (Figura 51). En estas publicaciones no existían planos ni nada por el estilo que pudiera facilitar mayor información.

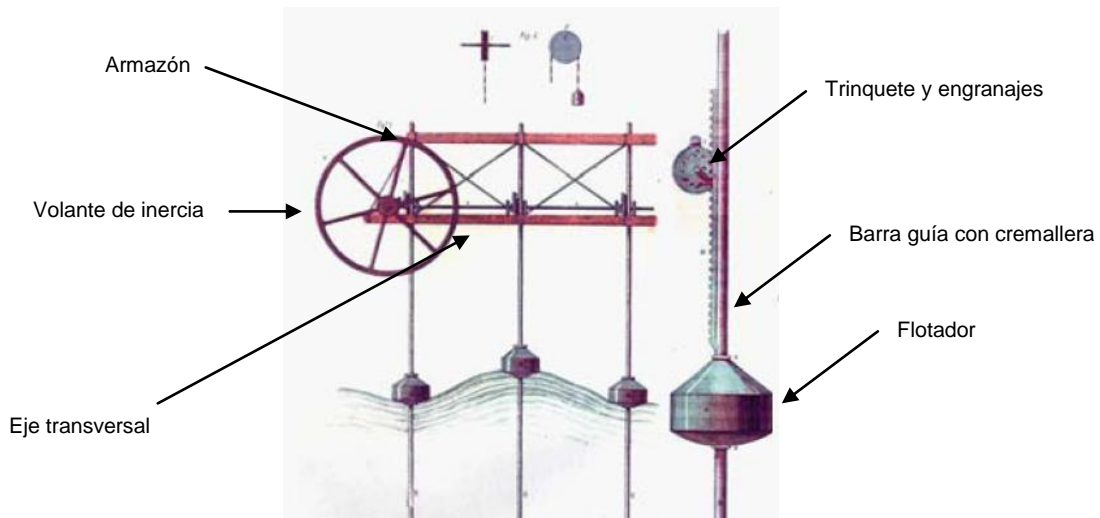


Figura 51. Imagen del marmotor

A continuación mostramos la imagen del modelado virtual del Marmotor creado para este proyecto. Como hemos comentado anteriormente, no existían planos con cotas, especificaciones, listado de componentes etc., por lo que si se aprecian diferencias con la Figura 51, es debido a estos motivos, en ocasiones se han tenido que elaborar ciertos elementos según el criterio que convenía a la hora de modelar a causa de la falta de información.

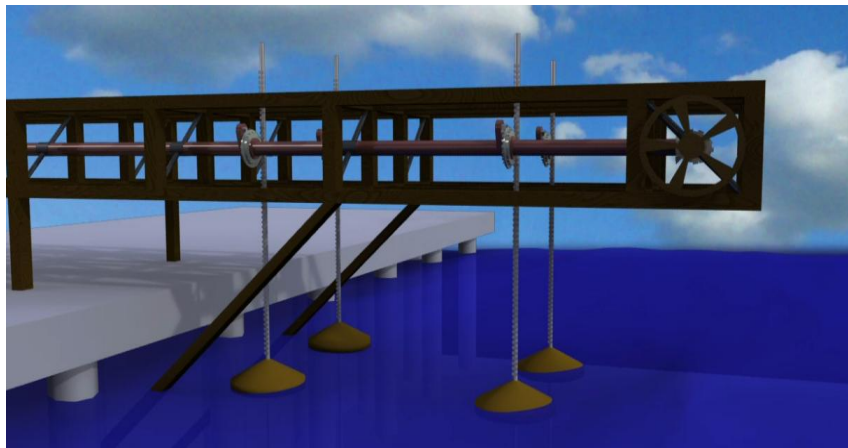


Figura 52. Imagen extraída del modelado del Marmotor

. A continuación se dispondrá a explicar por separado cada uno de los elementos (gran parte de las imágenes mostradas en este apartado proceden del modelo virtual creado):

-Armazón: Es la estructura sobre la cual se soporta todos los mecanismos, estos han de estar situados a una distancia suficiente sobre el nivel del mar para asegurar que los flotadores no colisionen con la propia estructura y así evitar posibles daños en cualquiera de los dos elementos, esta distancia sobre el nivel del mar tiene que ser mayor o igual a la distancia desde el lecho marino hasta la superficie del agua, en las condiciones en que el nivel del agua sea máximo. Podría ser de madera, hierro o de ambas combinadas. Sobre donde se montaba no se menciona nada, por lo que se podría suponer que esta estructura estuviera flotando en la superficie del agua o bien que el armazón estuviera montado en parte en tierra. Basándonos en otros diseños de centrales actuales, como puede ser la TAPCHAN (mencionada anteriormente); que monta parte de su estructura en tierra y parte en el agua. Refiriéndonos a la carta al lector que incluye Barrufet en la memoria descriptiva, en la que menciona que se monto un primer proyecto en la playa de la Mar Vieja en Barcelona, con lo que deduciremos que parte del armazón estaba montado en tierra y parte en el agua, cosa que soluciona el problema de una altura excesiva a causa de un fondo marino profundo.

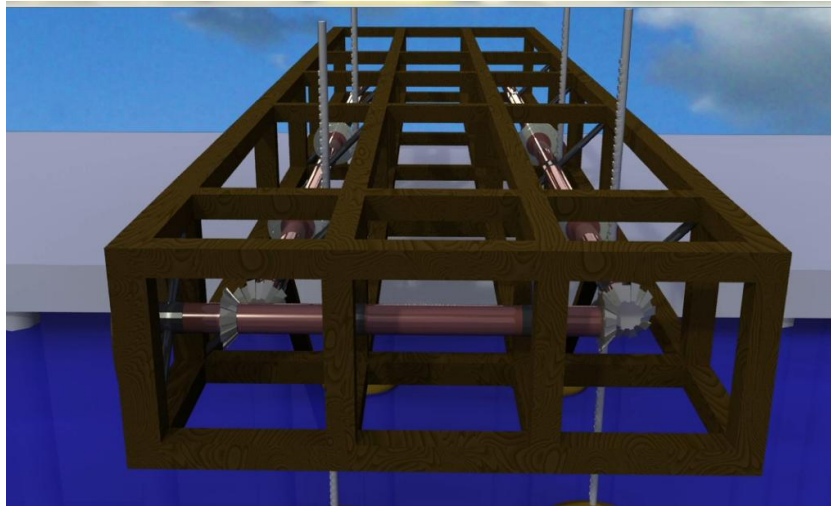


Figura 53. Imagen del armazón



-Flotador: Este elemento es el que, aprovechando el movimiento del oleaje, hace que se ponga en funcionamiento el mecanismo, convirtiendo el movimiento no continuo de las olas, en un movimiento rectilíneo de subida i bajada, con la ayuda de la guía y la estructura sobre la que se monta. Para diseñar la propia pieza, el mismo José Barrufet efectuó un estudio para sacar el máximo rendimiento a los flotadores según el tipo de mar donde se localizara el Marmotor. En el estudio se decía que “[...] *El flotador es indiferente a la forma para dar impulso; pero no debe despreciarse el estudio de esta para luchar con ventaja en las playas bravas y de mucho fondo, para cuyo caso hemos optado por la de dos conos unidos por sus bases mayores a un cilindro [...], si bien en playas dulces y de menor profundidad puede utilizarse otra forma de más base i menos calado [...]*”. El material por el cual estaban formados era de gres.

-Barra guía: Para asegurar el movimiento rectilíneo del flotador, este iba unido solidario a una barra guía, esta, a la misma vez estaba sujeta al armazón por su parte superior mediante una guía, y por la parte inferior seguía el recorrido de un cilindro hueco que estaba fijado al fondo marino.

-Cremallera: Solidaria a la barra guía, se encuentra la cremallera, un sistema de dientes de hierro, encargados de transmitir el movimiento de bajada del flotador al engranaje del sistema receptor.

-Engranajes: Son los encargados de transmitir y transformar el movimiento rectilíneo de la cremallera, a un movimiento de rotación al eje transversal. Se encuentran montados sobre el eje transversal unidos al sistema del trinquete.

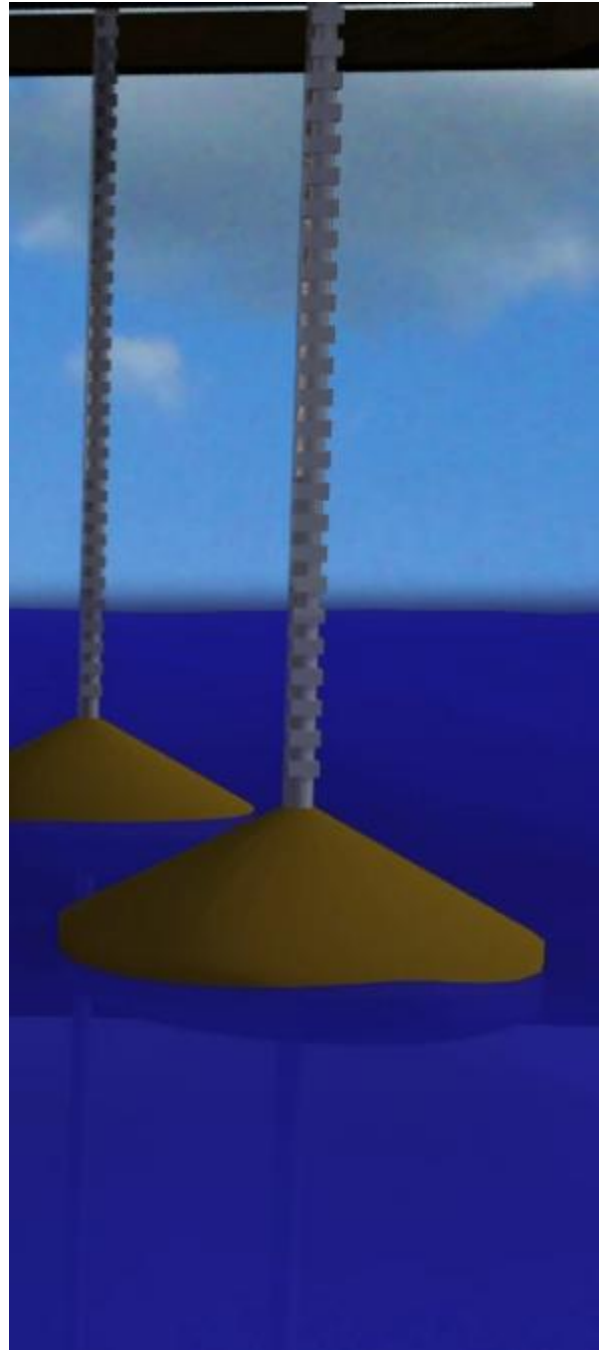
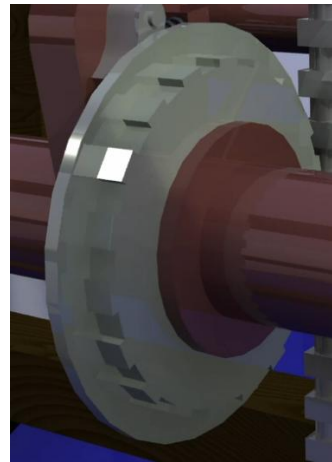


Figura 54. Imagen del sistema flotante

-Trinquete: Este mecanismo es el que asegura que solo se va a transmitir el movimiento de bajada al eje transversal, ya que si no fuera así, cuando el eje transversal girara en una dirección y de la cremallera recibiera el movimiento contrario, el mecanismo acabaría por romperse a causa de los violentos impactos que esto produciría. El soporte en el que se monta el trinquete, se encuentra montado solidario al eje transversal.



Figura 55. Imagen de un trinquete



Figuras 56 y 57. Imágenes extraídas del modelado del sistema formado por el trinquete y el engranaje

-Eje transversal: Es el que recibe el movimiento de los engranajes que están montados sobre él y es el encargado de transmitir el movimiento al sistema de aprovechamiento al que se vincule el Marmotor. Como ya hemos mencionado, solidario este se monta el soporte de trinquete, es decir la parte en la que se situarían el gancho y el muelle que harían posible o no el giro solidario del eje y el engranaje.



Figura 58. Imagen del eje transversal

-Engranajes helicoidales: Son los encargados de transmitir el movimiento de rotación del eje transversal al eje del trinquete, ya que estos se encuentran colocado a  $90^\circ$  el uno del otro.



Figura 59. Imagen extraída del modelado del eje del volante de inercia con los engranajes helicoidales

-Eje del volante de inercia: es el encargado de recibir el movimiento de uno o más ejes transversales, según si la central dispone de más de uno, en caso de haber más de uno, se tendrían que montar más engranajes helicoidales a lo largo del eje del volante de inercia para poder recibir el movimiento de los diferentes ejes transversales.

-Volante de inercia: Es el encargado de mantener un velocidad de giro constante en el eje transversal, en el caso de que el oleaje no fuera muy continuo, así el movimiento originado por los flotadores ya tiene una cierta velocidad inicial, cosa que facilita la obtención de energía.



Figura 60. Imagen extraída del modelado del volante de inercia

#### 4.1.4 Proceso de conversión de energía

A continuación, procederemos a localizar los diferentes cambios que sufre la energía desde que se extrae de la ola, hasta que esta, en el caso concreto del Marmotor, es aprovechada para hacer tareas

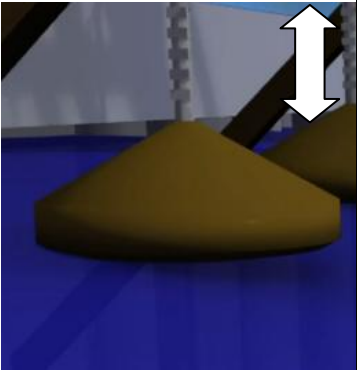
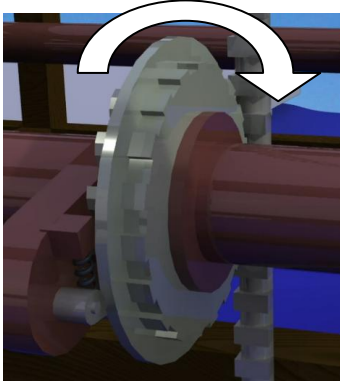

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
		
<p>La primer etapa de conversión, es la de transformar el movimiento de vaivén de la ola en un movimiento rectilíneo mediante la ayuda del flotador.</p>	<p>La segunda, mediante la ayuda de una cremallera, se convierte el movimiento de subida i bajada del flotador, en un movimiento circular, además, al engranaje que transmite el movimiento rotatorio, se le une un trinquete para aprovechar únicamente el movimiento de bajada.</p>	<p>Por ultimo, el movimiento de rotación del eje, ayudado a ser constante gracias a la ayuda de un volante de inercia, es aprovechado para hacer gran diversidad de tareas, considerándose las tareas del año de creación de esta central, 1885. Se plantea convertirse a energía eléctrica, a aire comprimido, pero la que se plantea como mas viable, es la de transportar la energía mediante cables metálicos, para por ejemplo, desplazar pesadas cargas.</p>

Figura 61. Tabla de conversiones de energía del Marmotor

## 4.2 Análisis del Pelamis

### 4.2.1 Introducción

El **convertidor de energía de las olas Pelamis** es un ejemplo de tecnología emergente que usa el movimiento del oleaje oceánico, para crear electricidad. Es un ejemplo práctico de generador undimotriz.

El Pelamis Wave Energy Converter es una estructura articulada, semi-sumergida, compuesta de secciones cilíndricas unidas por juntas con bisagras. La ola produce un movimiento inducido de estas articulaciones que es

resistido por cilindros hidráulicos, que la bomba de fluido de alta presión a través de los motores hidráulicos de los acumuladores suaviza. Los motores hidráulicos de disco son generadores eléctricos. La potencia de todas las articulaciones es



Figura 62. Imagen de una granja de Pelamis

alimentada por un cable en el lecho marino. Varios dispositivos pueden conectarse entre sí y vinculados a la costa a través de un cable único de los fondos marinos. Un parque puede evitará la emisión de más de 6.000 toneladas de dióxido carbono que de otra manera sería producido por la producción de electricidad a partir de fuentes fósiles. La energía producida por Pelamis depende de las condiciones del lugar de instalación. Dependiendo de los recursos de onda, las máquinas producen en promedio el 25-40% de la potencia nominal total sobre el curso de un año.

Las máquinas de producción actuales son 180m de largo y 4 m de diámetro, con módulos de conversión de energía. Cada máquina está valorada en 750 Kw. La energía producida por Pelamis depende de las condiciones del lugar de instalación. Cada máquina puede proporcionar energía suficiente para satisfacer la demanda anual de electricidad de aproximadamente 500 hogares.

## 4.2.2 Estudio del funcionamiento

El sistema Pelamis de obtención de energía, está diseñado más desde el punto de vista de resistencia a las condiciones marinas, que para obtener la máxima eficiencia de conversión de energía posible. Por tanto, en vez de intentar absorber toda la energía disponible en cada ola, convierte solo una porción. El objetivo es que el sistema pueda sobrevivir casi sin mantenimiento en condiciones meteorológicas marinas muy adversas (tormentas, ciclones) que podrían dañar un sistema optimizado solamente para la eficiencia de conversión.

Consiste en una serie de secciones cilíndricas parcialmente sumergidas, unidas por bisagras. La ola induce un movimiento relativo entre dichas secciones, activando un sistema hidráulico interior que bombea un fluido hidráulico a alta presión a través de un sistema de motores hidráulicos, equilibrándose el contenido por unos acumuladores.

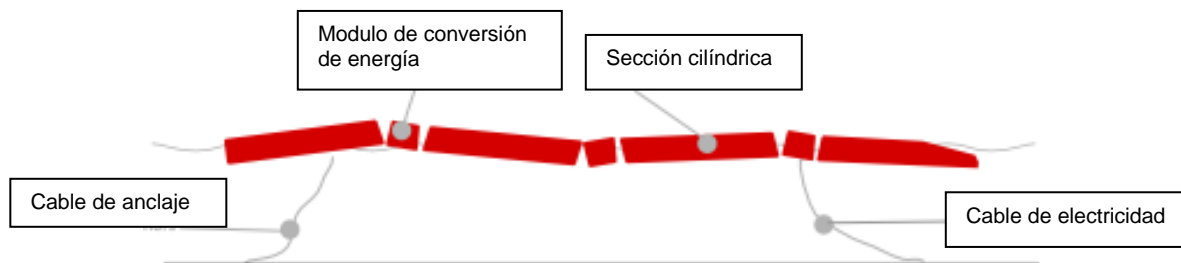


Figura 63. Esquema de los elementos de un pelamis

Los motores hidráulicos están acoplados a un generador eléctrico para producir electricidad. Se estima que la cantidad de energía obtenida por 30 de estos sistemas, podría abastecer aproximadamente 20.000 hogares con un consumo medio europeo.

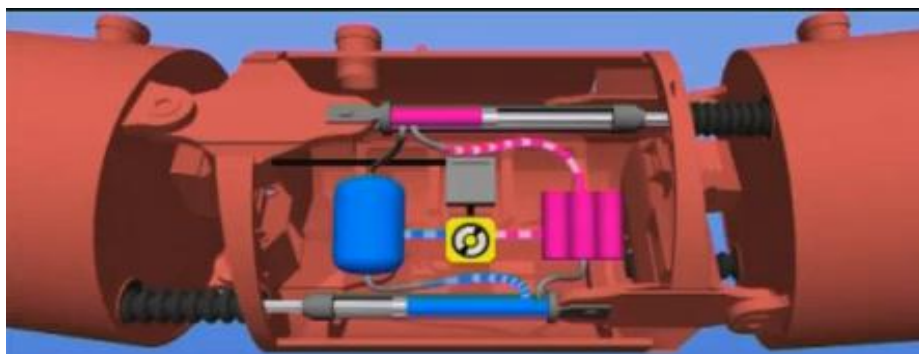


Figura 64. Contenido del modulo de conversión de energía de un pelamis

La potencia de todos los sistemas hidráulicos de un elemento, se transporta mediante un solo cable a una base situada en el lecho oceánico. Varios elementos se pueden interconectar a una misma base para unir su potencia de generación y trasladar la energía producida mediante un solo cable submarino hacia la costa.

### 4.2.3 Dispositivos

Las granjas de sistema Pelamis, están divididas en unidades Pelamis, que a su vez cada unidad está compuesta por:

-Secciones cilíndricas huecas: estas secciones, son las encargadas de reproducir el movimiento del oleaje.



Figura 65. Imagen de la sección cilíndrica hueca

-Módulos de conversión de energía: Estos módulos, están articulados mediante unas bisagras a las secciones cilíndricas huecas, estas bisagras son las que hacen posible el movimiento relativo entre ambos módulos. En el exterior, están hechas del mismo material que las secciones cilíndricas, pero a diferencia de estas, además de su menor tamaño, son las encargadas de contener los motores hidráulicas encargados de producir energía.



Figura 66. Modulo de conversión de energía

El funcionamiento de estos motores, se podría asemejar al de las turbinas que se usan en las centrales hidroeléctricas, en las que la circulación del agua actúa una turbina, esta turbina gira solidaria a un estator que es el encargado de producir electricidad. En el caso de los Pelamis, el

movimiento relativo entre las secciones, actúa unos pistones, estos pistones hacen circular un fluido hidráulico por un sistema de tubos que se encuentran conectados a los generadores hidroeléctricos, los cuales están formados por un motor hidráulico, que actuado por los fluidos hidráulicos mueve un eje que esta solidario a un generador, que es el encargado de producir la electricidad. Como los fluidos que recibe el motor provienen de diferentes pistones los cuales no se mueven a una misma velocidad, se colocan unos acumuladores de presión, para que la presión de llegada de los fluidos en el motor sea la misma, asegurando así un correcto funcionamiento del mismo.

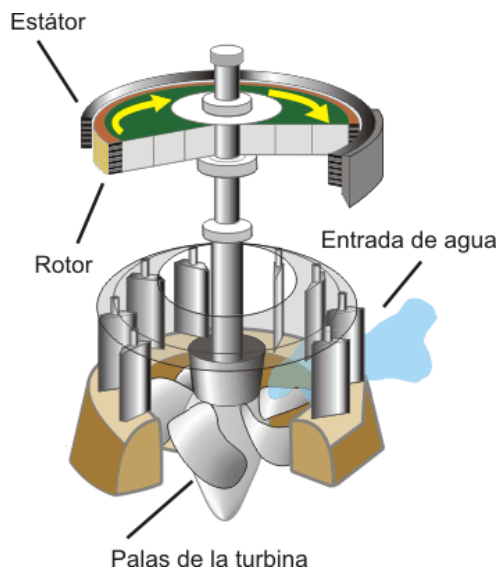
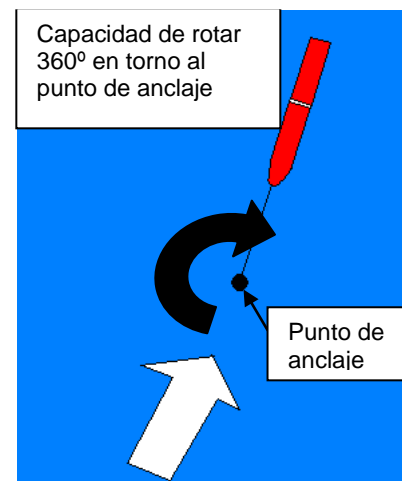


Figura 67. Esquema de un generador hidroeléctrico

-Cable de anclaje: la nariz (parte frontal) del Pelamis, se encuentra anclada al fondo marino mediante un cable de anclaje. Al estar anclado de esta manera, lo que se garantiza es que sea libre de hacer pivotar sobre su puerto, apuntando hacia la dirección del oleaje dominante.

-Cable de electricidad: Es el cable responsable de llevar la electricidad producida por los generadores hidroeléctricos desde las granjas hasta tierra. Los cables que salen del las unidades de Pelamis, se conectan a otros cables situados en el lecho marino, de tal forma que, varias unidades puedan estar conectadas a un mismo cable.

Figura 68. Esquema del sistema de anclaje





#### 4.2.4 Proceso de conversión de energía

De igual manera que se hizo con el Marmotor, explicaremos cada una de las fases por las que pasa la energía, desde que se aprovecha de la ola, hasta que se convierte en electricidad en la central Pelamis.

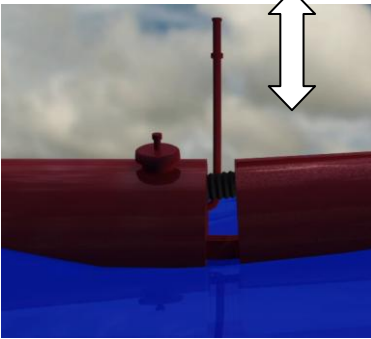
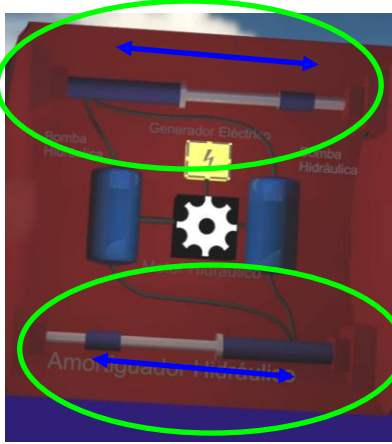
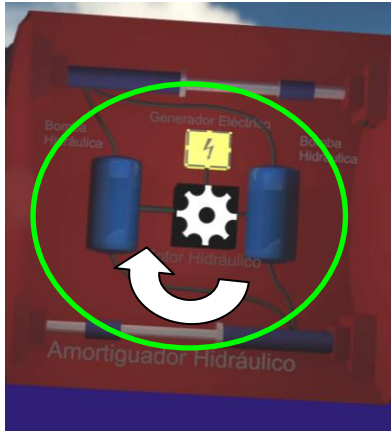
Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
		
<p>En la primera etapa, las secciones cilíndricas huecas, transmiten el movimiento del oleaje de alta mar, a las secciones de conversión de energía</p>	<p>El siguiente paso, es el de convertir el movimiento entre las secciones, en el movimiento de unos pistones, que a su vez accionan unos fluidos que se encuentran en su interior.</p>	<p>Los fluidos accionados en la anterior la etapa, accionan una turbina que al girar crean electricidad mediante un generador, Antes de llegar a la turbina, los fluidos pasan por unos acumuladores con tal de que la presión de los fluidos que llega a la turbina sea igual</p>

Figura 69. Tabla de conversiones de energía del Pelamis

### 4.3 Análisis de los sistemas y propuestas de mejora

A continuación, procederemos a valorar la diferencias entre los sistemas Pelamis y Marmotor, comparando los rasgos que diferencian a uno del otro, con el fin de proponer una nueva central, la cual estará compuesta por lo que se consideraran los aspectos que más positivamente pueden influir en la mejora del rendimiento.

Tomaremos como punto de partida el Marmotor, ya que, como fue diseñado hace más de un siglo, las mejoras que se pueden aplicar ya solo con el avance de la técnica, nos ofrece un gran abanico de posibilidades, aunque la gran mayoría de mejoras irán enfocadas a la tecnología usada por el sistema Pelamis, a causa de que ha sido el otro sistema analizado en los apartados anteriores y del que disponemos mayor información.

Con tal de facilitar al lector la comparación de los sistemas Marmotor y Pelamis, a continuación encontraremos una tabla (figura 70) en la cual contraponemos los dos sistemas anteriormente mencionados, mostrando los principales aspectos en los que podemos encontrar diferencias y así tener más claro donde se puede hacer especial hincapié a la hora de proponer las mejoras para la nueva central y para aquellas propuestas en las que la mejora del rendimiento desde un principio pueda considerarse insuficiente.

Características	Marmotor	Pelamis
Año de diseño	1885	2006
Situación	Costa	Alta mar
Fuente de obtención de energía	Oleaje (con flotadores)	Oleaje (con módulos flotantes)
Material de elementos en flotación	Gres	Hierro dulce
Energía obtenida	Energía mecánica (eje en rotación)	Energía eléctrica (mediante generador hidráulico)
Transmisión del movimiento	Mediante diferentes tipos de engranajes	Mediante pistones (sistema hidráulico)
Materiales usados en la estructura	Madera	La estructura está compuesta por los mismo módulos de flotación - hierro dulce
Anclaje al lecho marino	Tubo fijado al suelo	Cable de fijación

Figura 70. Tabla comparativa de los sistemas Marmotor y Pelamis

### 4.3.1 Mejoras propuestas

#### 4.3.1.1 *Substitución de material del flotador*

En el diseño inicial del Marmotor, el flotador, estaba elaborado con gres, una pasta compuesta principalmente de minerales arcillosos, minerales fundentes y arenas silíceas, que cocida a elevadas temperaturas, permite fabricar objetos con alta compacidad, gran dureza y mejores propiedades mecánicas que otras pastas cerámicas más convencionales, pero como la mayoría de elementos cerámicos es muy frágil. Aunque en la memoria descriptiva elaborada para el proyecto del Marmotor redactada por José Barrufet no especifica que tipo de gres se utilizó para construir el flotante, tomaremos un valor medio de la densidad del gres que nos podemos encontrar en la actualidad de  $2500 \text{ Kg/m}^3$  y con una resistencia mecánica de  $100 \text{ N/mm}^2$ . En cuanto el precio del gres, ronda los  $0.89 \text{ €/Kg}$ .

Conociendo que el sistema Pelamis, utiliza un sistema similar al Marmotor en cuanto a funcionamiento, los dos sistemas flotan al nivel del mar para aprovechar el movimiento del oleaje, aunque uno lo haga de manera directa y el otro de manera indirecta, la base es la misma, los dos se han de mantener parcialmente por encima del agua. Los módulos del sistema Pelamis, que son los que hacen que el sistema sea capaz de flotar, están formados por hierro dulce, es decir, un acero prácticamente sin carbón, las principales propiedades mecánicas de este material es su gran ductilidad y poca dureza. La densidad de este tipo de acero es de  $7870 \text{ Kg/m}^3$  y con una resistencia mecánica de  $350 \text{ N/mm}^2$ , con un precio que ronda  $0.75 \text{ €/Kg}$ .

Si comparamos los datos de los materiales usados en los diferentes sistemas, en un principio, podríamos concluir que el hierro no sería válido debido a su mayor densidad, es del orden de 3 veces mayor. Aunque si observamos la funcionalidad que se le tiene que dar, veremos que este es un factor irrelevante, porque lo que ha de asegurar el flotador es la flotabilidad (Un objeto flotará sobre un fluido, ambos bajo el efecto fuerza de una gravedad dominante, siempre que el número de partículas que componen el objeto sea menor al número de partículas del fluido desplazadas.), por lo que el peso no es el factor más crítico, ya que un aumento de peso puede ser compensado por un mejor diseño capaz de asegurar la flotabilidad. Otro de los factores que hacen que el aumento del peso no tenga gran importancia, es que no hay ningún elemento del sistema que tenga que soportar el peso del flotador, sino que este mantiene su posición dependiendo del nivel del agua, así que, como hemos mencionado anteriormente, mientras mantenga la capacidad de flotar no supone un problema el incremento del peso.

Por otra parte, si nos fijamos en las propiedades mecánicas, observamos que son materiales totalmente opuestos, el gres tiene una gran dureza y fragilidad, en cambio el hierro dulce es un material de poca dureza y gran ductilidad. Conociendo la funcionalidad que se le va a dar a este elemento, la propiedad que resulta más importante es la fragilidad, ya que es un elemento que se encuentra en mar abierto y puede tener cierto riesgo de impacto (elementos que flotan en la superficie del agua del mar, barcos, etc.); si un objeto de cierto tamaño impactara con el flotador de gres, casi con toda seguridad este sería totalmente destruido, pero si se usa uno de hierro dulce, este recibiría daños en la superficie, pero podría seguir funcionando.

Otro de los factores a tener en cuenta es el económico. Si tenemos en cuenta los precios de las materias primas, el precio del hierro dulce sería un 15% más barato que el del gres, aunque de aquí no podríamos sacar ninguna conclusión, ya que los precios están en base a un kilogramo de material, y como hemos visto el gres es 3 veces más ligero que el hierro dulce, y las propiedades mecánicas de ambos no son las mismas. Tomando el flotador creado por José Barrufet, que era de 200 Kg, con el precio del gres de 0.89 €/Kg, este flotador costaría 178€. Si construyéramos el mismo flotador con hierro dulce, este pasaría a pesar 629,6 Kg, aunque como se puede apreciar a continuación de la figura 71, para asegurar las mismas propiedades mecánicas que el gres, las paredes del flotador hechas con hierro dulce pueden ser 3.5 veces más estrechas, por lo que el flotador pasaría a pesar 179.9 Kg, con el precio del hierro dulce a 0.75 €/Kg, este costaría 134.9 €, lo que supone una reducción del coste de un 24.2%.

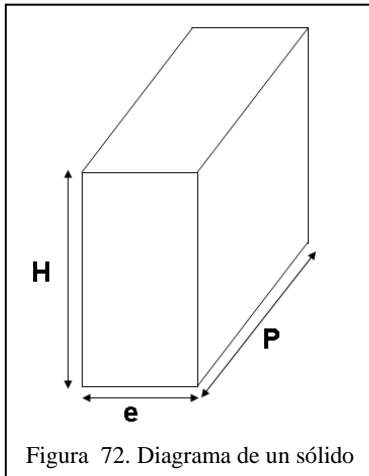
Como conclusión a esta mejora, la consideraremos como aceptable, ya que la sustitución del flotador de gres por la del flotador de hierro dulce, conlleva a una reducción del peso del flotador, y a lo que consideramos más crítico, una reducción de coste del mismo sin poner en riesgo su diseño.

Flotador 		
Material	Gres	Hierro dulce
Densidad	2500 Kg/m <sup>3</sup>	7870 Kg/m <sup>3</sup>
Propiedades mecánicas	100 N/mm <sup>2</sup>	350 N/mm <sup>2</sup>
Precio	0.89 €/Kg	0.75 €/g
Peso del diseño	200 Kg	179.9 Kg
Precio final	178 €	134.9 €
Juicio	-	+

Figura 71. Tabla comparativa de los materiales para el flotador

### *Cálculo de resistencia mecánica de los flotadores*

Para conocer la relación de espesores entre los flotadores hechos con gres y los flotadores de hierro dulce, hemos de partir de la idea de que, el diseño del flotador va a ser el mismo para ambos materiales, y que el único factor, en cuanto a medidas del flotador, que se puede variar es el espesor.



Como el cálculo real para este apartado sería muy extenso, vamos a basar el estudio en un modelo simplificado, pero no por ello menos válido. Para este estudio, simplificaremos el diseño del flotador al del gráfico 72, donde H (altura) y P (profundidad) de nuestro modelo, serán la forma del flotador, y e (espesor) será el factor que diferencie a ambos. Como hemos mencionado anteriormente, los valores de las medidas del flotador, a excepción del espesor no se van a tocar, lo que se traduciría en que H y P van a ser valores constantes.

Centrándonos en los valores de resistencia mecánica de los dos materiales que vamos a estudiar ( $100\text{N/mm}^2$  del gres y  $350\text{N/mm}^2$  del hierro dulce), observaremos que las unidades de medida se dan en unidad de fuerza (N) aplicada en un espacio ( $\text{mm}^2$ ), para hacer un símil con nuestro caso, nuestro espacio de aplicación de fuerza sería  $H \times e$ , y esta situación se repetiría en los infinitos puntos que forman P. Por lo que si queremos obtener una relación de espesores para los dos materiales, llevaremos a cabo un sistema de dos ecuaciones con tres incógnitas:

Ecuación del flotador de gres:

$$F / (H \times e_g) = R \rightarrow F (H \times e_g) = 100$$

Ecuación del flotador de hierro dulce:

$$F / (H \times e_h) = R \rightarrow F (H \times e_h) = 350$$

Como en estas ecuaciones, los valores F y H van a ser valores fijos, las agruparemos como una única variable, obteniendo así nuestra tercera incógnita (a):

$$a / e_g = R \rightarrow a = 100 \times e_g$$

$$a / e_h = R \rightarrow a = 350 \times e_h$$

Quedándonos así nuestro sistema de dos ecuaciones con tres incógnitas, substituiremos el valor  $a$  para poder encontrar la relación de espesores:

$$100 \times e_g = 350 \times e_h$$

$$e_h = 100 / 350 \times e_g = 3.5 \times e_g$$

$$e_h = 3.5 \times e_g$$

### **Conclusión**

Para que el diseño de la pared del flotador de hierro dulce pueda soportar las mismas sollicitaciones en cuanto a resistencia mecánica que la del flotador de gres, la pared del mismo tiene que ser 3.5 veces más delgada.

#### *4.3.1.2 Situación de la estructura*

Una de las grandes diferencias entre los dos sistemas estudiados, es el lugar donde están situados. El Marmotor se ha de situar en la costa, ya que parte de su estructura tiene que estar situada en tierra. Por el contrario, las granjas de Pelamis se encuentran ancladas mar adentro, debido principalmente, a que cada uno de sus unidades son de grandes dimensiones, además de que cada granja esta formada por más de una unidad para asegurar un nivel mínimo de generación de energía.

La memoria descriptiva del Marmotor hecha por José Barrufet, sitúa el sistema en una playa de Barcelona. A continuación, pasamos a valorar que propuesta sería mejor, la de situarlo en la costa o en altamar, en primer lugar valoraremos esta última:

-En primer lugar, el Marmotor esta diseñado para convertir la energía del vaivén de las olas en un movimiento rotatorio que se aprovechado mediante un útil mecánico situado solidario al eje, como por ejemplo, para mover objetos mediante un sistema de poleas, movimiento de molas y otros usos. Por lo que, si se situara en altamar, debería tener una utilidad muy específica para sacarle algún provecho, ya que ninguna de las anteriores funciones podría ser utilizada, por lo que no se le podría dar el mismo uso que se le puede dar en tierra. Si se convirtiera el dispositivo para que este transformara el movimiento rotatorio en energía eléctrica, nos encontraríamos con el mismo

inconveniente que el sistema Pelamis, las largas distancias a recorrer por los cables que transportan la electricidad hasta tierra.

-Otro de los puntos a estudiar, es el de la estructura del dispositivo del Marmotor, ya que se trata de una estructura de gran altura a causa del recorrido de la cremallera, dimensionado para poder absorber cualquier altura de ola con la que se pueda encontrar. El primer problema, lo encontraríamos en que, cuanto mas alejado de la costa se encuentre el Marmotor, más grande debería de ser la estructura, (como se muestra en la figura 73), con el consiguiente aumento económico.

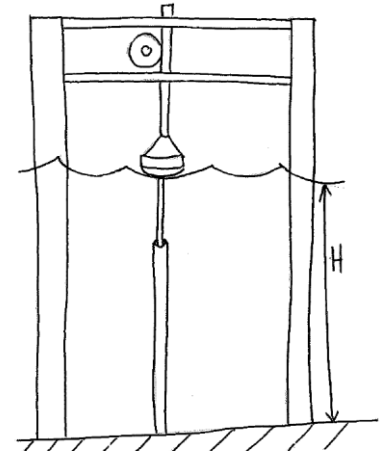


Figura 73. Esquema de la situación de la central

-Por último estaría el tema del anclado; las granjas de Pelamis se encuentran ancladas al lecho marino, permitiéndoles un cierto movimiento. En el caso del Marmotor, el flotante tiene que ir anclado al lecho marino, y por otra parte el armazón del Marmotor tendría que estar anclado independientemente del flotante, pero sin permitir ningún movimiento relativo entre ellos, cosa que haría que el sistema dejase de funcionar. Esta gran precisión necesaria, haría que el coste del proyecto aumentara, cuando lo que interesa es optimizar el coste.

A continuación, pasamos a valorar el situar el sistema en la costa. Aunque se menciona que se construyó en una playa, seguramente se construyó en un puerto o algún emplazamiento similar que se encontraría en dicha playa, para construir la estructura del dispositivo. Esta idea tiene también sus inconvenientes; en primer lugar tiene un gran impacto visual, ya que colocar un sistema de estas proporciones en un lugar como este destacaría del resto, ya que no suelen haber grandes construcciones cerca del agua,

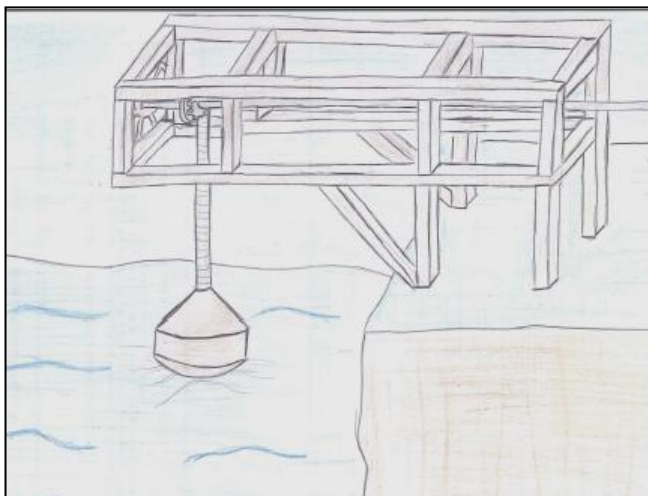


Figura 74. Dibujo de situación de la nueva central

exceptuando sitios especialmente usados para este tipo de edificaciones como puertos comerciales. Otro inconveniente sería que podría ocasionar cierto malestar a los usuarios de la zona donde se coloque. En una zona con tráfico marítimo sería peligroso por el riesgo de impactos y debería tener una zona de seguridad que limitaría el acceso de los barcos, y en una zona donde la gente tuviera acceso,

también se tendría que limitar el mismo, ya que este mecanismo podría causar lesiones a personas ajenas al funcionamiento de este. Por eso, remitiéndonos a uno de los primeros apartados del proyecto “3 Sistemas de aprovechamiento”, en el que si observamos el sistema Tapchan, se encuentra construido en acantilados, cosa que se podría aprovechar para el Marmotor ya que nos resuelve la gran parte de los problemas encontrados:

-Se encuentra cerca de tierra, por lo tanto podríamos montar el armazón en tierra como en la idea original, con el consiguiente ahorro en el transporte de energía.

-Se encuentra en un lugar de difícil acceso para las personas y tráfico marítimo.

-El impacto visual se reduciría, ya que en los acantilados no suele haber una gran concurrencia de personas.

<i>Valoración de la situación del sistema: en altamar o en la costa (acantilado)</i>				
Propuestas	Diseño	Impacto económico	Impacto medioambiental	Conclusión
Funcionalidad (transporte de energía)	El situar la estructura del dispositivo en la costa, se reduce la distancia de transporte. Por lo que cuantos menos procesos intermedios de transporte más óptimo será.	Al usarse menos distancia de cables, se reduce el coste económico situándolo en la costa.	El impacto ambiental de colocarlo en altamar es mayor, ya que se ha de trabajar sobre el lecho marino para colocar el cable hasta tierra.	En cuanto al transporte de la energía, cuanto menor sea el trayecto, menor es el impacto en todos los aspectos, por lo que sería mejor en la costa.
Situación (Altamar o costa)	Aunque técnicamente ambas propuestas son viables, cuanto menor sea la distancia de calado, menor serán las solicitudes.	Cuanta mas profundidad tenga la situación del sistema, más material se tendrá que usar, por lo que el precio aumentará.	El impacto medioambiental de ambos sería similar, ya que los dos modificarían el lecho marino, se tendría que tener en cuenta la ubicación por las rutas marinas, etc.	Para esta propuesta, el tema más relevante sería el aspecto económico, cuanto más a la costa se sitúe el sistema, más económico sería.

Figura 75. Tabla de valoración de la situación de la central



#### 4.3.1.3 Cambio del material de la estructura del dispositivo

El material usado en las vigas que forman la estructura del dispositivo del Marmotor era de madera, según especifica la memoria descriptiva del mismo. Se tienen evidencias de que el proyecto del Marmotor fue construido y fracasó a causa del deterioro prematuro de sus componentes. Aunque no hay ningún documento que explique específicamente los motivos de este deterioro, seguramente, uno de los principales motivos del fracaso fue el uso de vigas de madera para construir el emplazamiento.

El uso de la madera en las vigas era común en las estructuras de la época, ya que la madera puede soportar grandes esfuerzos a tracción, lo que no sucede con otros materiales tradicionales pétreos y cerámicos, como el ladrillo, pero la madera presenta ciertos inconvenientes: es un material ortotrópico que presenta diferentes rigideces y resistencias según los esfuerzos aplicados sean paralelos a la fibra de la madera o transversales. Además presenta una gran degradación bajo condiciones de alto grado de humedad, además de una disminución de la resistencia a la compresión hasta el punto de saturación bajo la influencia de la humedad, como eran las condiciones de trabajo del Marmotor.

Por este motivo, se procederá a valorar diferentes tipos de materiales usados en vigas, para sacar una conclusión de cual sería el mejor de estos para substituir el material usado por el Marmotor. A continuación, encontraremos una tabla en la que se comparan diferentes tipos materiales usados en la construcción de vigas en la actualidad:

<b>Especificaciones</b>	<b>Madera (Abeto)</b>	<b>Acero Inoxidable (AE-25)</b>	<b>Madera de teca</b>
Compresión transversal o paralela a las fibras (N/mm <sup>2</sup> )	11	450	46
Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	1.4 ( se reduce un 60% con saturación de humedad)	250	8.7
Modulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	11000	210000	12590

Figura 76. Tabla comparativa de las propiedades de acero y madera

Para la elaboración de esta tabla, se ha usado las propiedades de la madera laminada de abeto, muy usada en la construcción en la actualidad, que nos servirá como referencia, ya que José Barrufet no indica que tipo de madera se usó en la construcción del Marmotor.

Otro de los materiales propuestos es el acero, no usadas hasta la revolución industrial (mediados del siglo XIX), y que en la actualidad es uno de los materiales más usados en la construcción, en gracias a su relación entre bajo precio y altas propiedades mecánicas. Otro de los materiales propuestos es la madera de teca, este tipo de madera se caracteriza por tener unas propiedades mecánicas ligeramente superiores a las maderas comunes, pero que destaca su por su alta resistencia al ataque de organismos que aparecen en condiciones de alta humedad, llamados xilófagos, que contribuyen al rápido deterioro de la madera.

Valorando los dos materiales propuestos, comparándolos con la madera, veremos que ambos son superiores en cuanto a propiedades mecánicas, por lo que estos materiales serían capaces de hacer la misma función que el material usado en el Marmotor, la madera, aunque observaremos que el acero es del orden de 10 veces mayor, ahora bien, tenemos que tener en cuenta uno de los factores más importantes a la hora de la elección de estos materiales, una vez comprobado que son capaces de resistir las sollicitaciones, y no es otro que el de mantener las propiedades físicas con el mínimo grado de alteración bajo condiciones de alta humedad. Es aquí cuando nos decantaríamos por la madera de teca, ya que, al contrario que la madera convencional y el acero, es capaz de mantenerse casi inalterable bajo estas condiciones, no tiene el problema que tiene la madera, que en condiciones de un 70% de humedad o superior reduce sus propiedades notablemente, ni la prematura degradación ocasionada por los hongos y demás organismos que se alimentan de esta. Tampoco tiene los problemas de oxidación que tiene el acero en estas condiciones de humedad.

#### *4.3.1.4 Substitución del sistema de cremallera*

Por último, una de las mejoras que tendría un mayor impacto en el diseño del Marmotor, sería la de substituir el sistema de transmisión del movimiento del flotante, por un generador eléctrico accionado por pistones hidráulicos, basándonos en la tecnología que usa el sistema Pelamis.

Este cambio, supondría un cambio drástico en el diseño del Marmotor, ya que cambiaría casi por completo los elementos utilizados, aunque se mantendrán, tanto la idea principal de su

funcionamiento, la de aprovechar el oleaje de manera directa, como la de mantener ciertos elementos usados en su diseño inicial como explicaremos a continuación:

-La sustitución del sistema inicial del Marmotor por un generador eléctrico supondría la eliminación del sistema de cremallera, engranajes, eje principal, volante de inercia y el eje del volante de inercia, encargados de transmitir el movimiento de las olas, ya que al usar un sistema hidráulico, el movimiento de las olas sería convertido directamente en electricidad. Esta sería una de las principales ventajas de esta mejora, ya que lo que se obtendría directamente es energía eléctrica, suprimiendo todos los elementos mecánicos que intervenían en el antiguo sistema y las consecuentes pérdidas de rendimiento mecánico. Concretamente, este nuevo sistema consistiría en la colocación de pistones que se montarían solidarios al flotador del Marmotor, con una guía para asegurar el movimiento rectilíneo de los mismos. Estos pistones, a semejanza del sistema usado en los Pelamis, harían circular el fluido hidráulico por un sistema de conductos secundarios, que llegaría a un motor hidráulico situado en la estructura del dispositivo, que produciría electricidad.

-Una de las mayores ventajas de utilizar este sistema, sería la eliminación de la guía del flotador que se encuentra anclada al fondo marino. Como hemos comentado anteriormente, el movimiento rectilíneo del flotante, ya estaría asegurado al mantener la barra donde se encontraba anteriormente la cremallera, por lo que la función de la guía que se encuentra por debajo del nivel del agua, se vería inutilizada, a causa de esto podría eliminarse. La eliminación de este elemento, a parte del ahorro económico que conllevaría, reduciría considerablemente el impacto medioambiental, en la construcción del sistema no se tendría que modificar el lecho marino, y no existirían partes móviles en el medio acuático que pudieran poner en peligro la fauna del lugar.

-Otra de las ventajas de usar este sistema es que se podría aprovechar tanto el movimiento de subida como el de bajada del flotador, al contrario al del Marmotor que solo obtiene energía del movimiento de bajada. Se podría hacer esto porque no habría impactos bruscos en las piezas, ya que el motor hidráulico obtiene la energía al hacer circular un fluido gracias al movimiento del pistón, además que el movimiento del pistón puede ser parcial para obtener energía.

## 4.4 Idea final propuesta

### 4.4.1 Avance del diseño

La nueva central que se propone a partir de las anteriores y que usará los sistemas estudiados en 4.3.1 *Ideas propuestas*, se han encontrado con varias dificultades que han hecho que ciertos componentes hayan tenido que ser rediseñados con tal de que se adaptaran al funcionamiento de la nueva central. Dos han sido los sistemas que han dado más dificultades, se exponen a continuación:

-Sistema de pistones

Inicialmente, tomando como referencia el sistema de pistones usado por el sistema Pelamis y el sistema del flotador del Marmotor, se colocó un pistón solidario al flotador mediante un soporte, y otro soporte fijado a la estructura y una barra guía para asegurar el movimiento rectilíneo del pistón, pero la primera impresión de las fuerzas que afectarían a este sistema sería muy desfavorable al tratarse de un sistema de fuerzas excéntrico, lo que produciría pares de fuerza, con lo que los elementos tendrían que soportar grandes esfuerzos, así que se optó por colocar otro pistón con el objetivo de crear un sistema simétrico como se muestra en la figura 77:

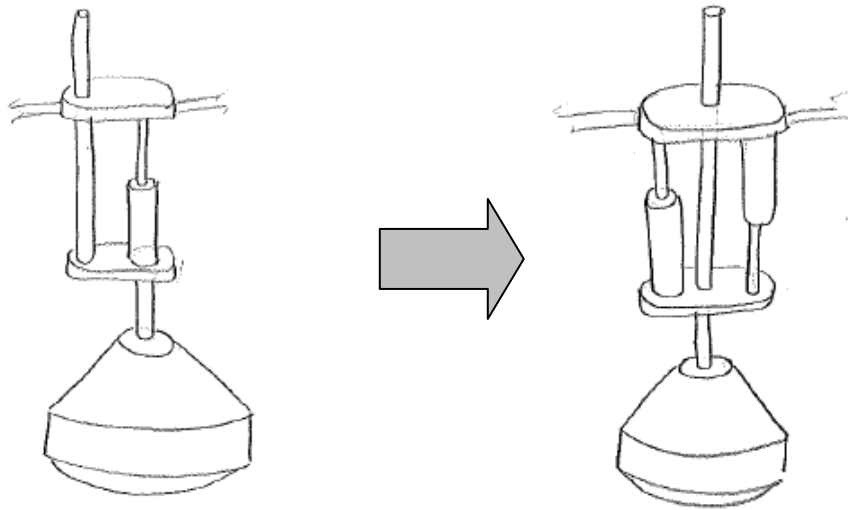
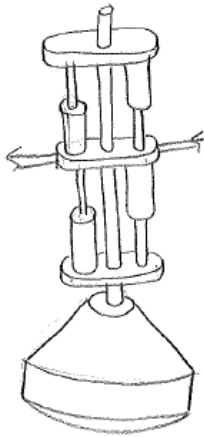


Figura 77. Esbozos de los diseños de la nueva central

Una vez solucionado el tema de las fuerza ocurría otro contratiempo, y es que estos pistones, hacen que se mueva el fluido que llevan dentro para accionar una turbina, con el objetivo de que, mientras los fluidos de un pistón entran, los del otro sales, pero con el diseño actual, cuando el flotador sube,

se comprimen ambos pistones y viceversa, para arreglar este problema se rediseño el sistema de la siguiente manera:



La solución fue incorporar dos pistones más en la parte superior, de tal manera que el soporte que sostiene los pistones de la parte media se encuentra fijado a la estructura y los soportes inferior y superior se encuentran fijados a la barra solidaria al flotador, por lo que, cuando el flotador sube, los pistones inferiores se comprimen, expulsando así los fluidos hacia la turbina, y los pistones superiores se expanden, absorbiendo así los fluidos procedentes de la turbina

Figura 78. Esbozo del sistema final de los pistones

#### -Armazón

Como se hizo con el sistema de pistones, para el armazón se cogió una estructura similar a la usada en el Marmotor, aunque en este no existan planos, se puede intuir en las imágenes de manera que el armazón, inicialmente era como el que se muestra en la figura 79:

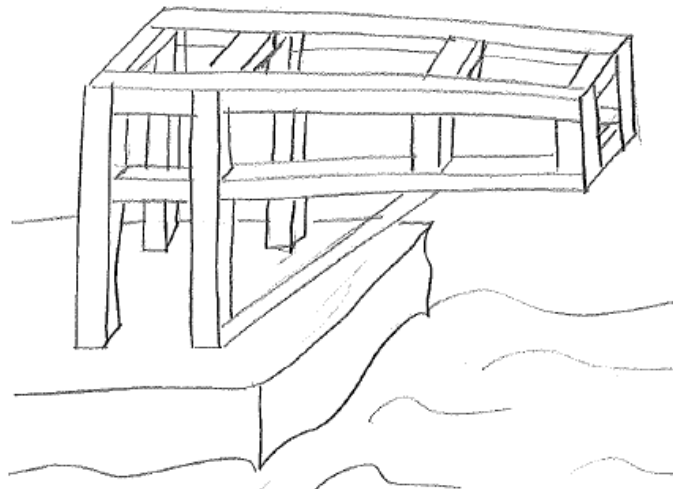


Figura 79. Diseño inicial del armazón

Más adelante, planteándose los componentes usados en el Marmotor y en la nueva central, con la eliminación de todos los ejes que transmitían el movimiento del primero, hacen que el peso que tiene que soportar el armazón es mucho menor; en la nueva central solo tendrá que soportar el peso del generador y la turbina, con lo que la estructura puede ser simplificada, como se puede ver a continuación:

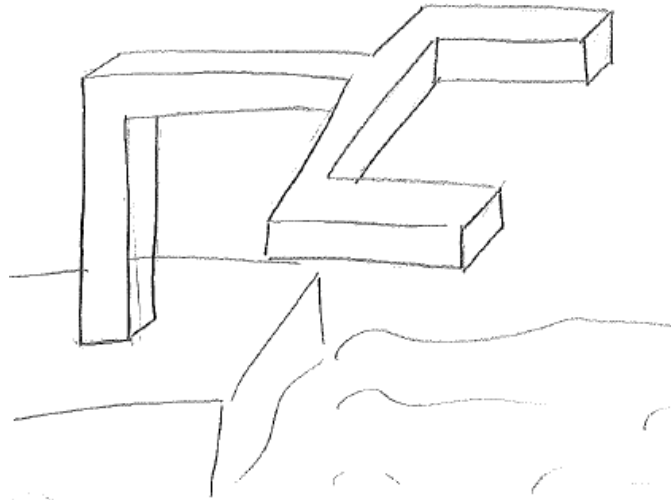


Figura 80. Diseño mejorado del armazón

Finalmente, después de analizar el funcionamiento y los requerimientos de la nueva central, tal como se explica detalladamente en el siguiente apartado *4.4.2 Estudio de funcionamiento*, se tubo que añadir un pistón neumático que permitiera rotar la parte del armazón que se encuentra horizontal, para pasar a una posición que se acerque mas a la vertical, añadiendo una articulación en la viga que se encuentra fijada al suela y la viga horizontal, quedando como resultado el diseño que se muestra en la figura 81, añadiéndole además algunos cambios estéticos:

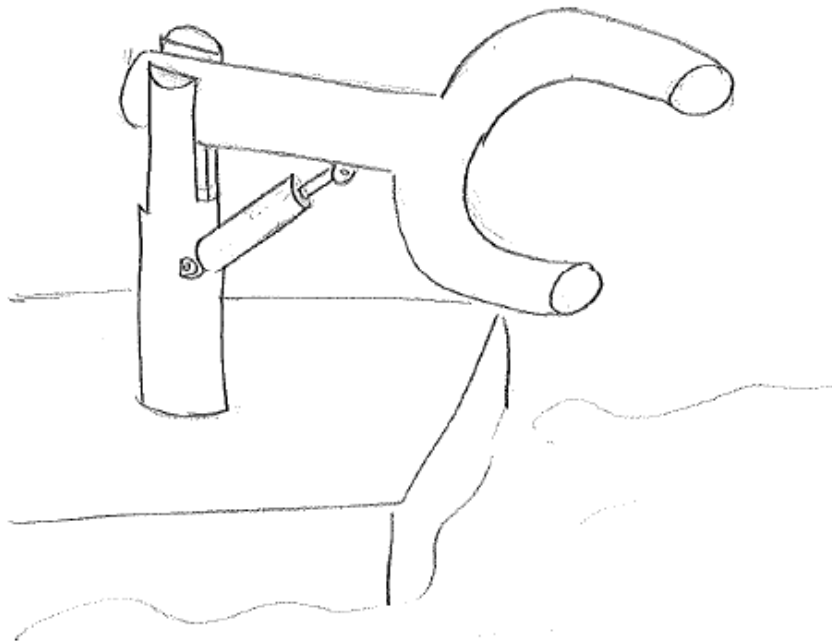


Figura 81. Diseño final del armazón

#### 4.4.2 Estudio de funcionamiento

Considerando las propuestas del apartado anterior, obtendríamos una central que, aprovechando el movimiento del oleaje marino, produciría electricidad, mediante un generador hidráulico. En la figura 82, que encontramos a continuación, podremos encontrar un esquema de cómo sería la nueva central:

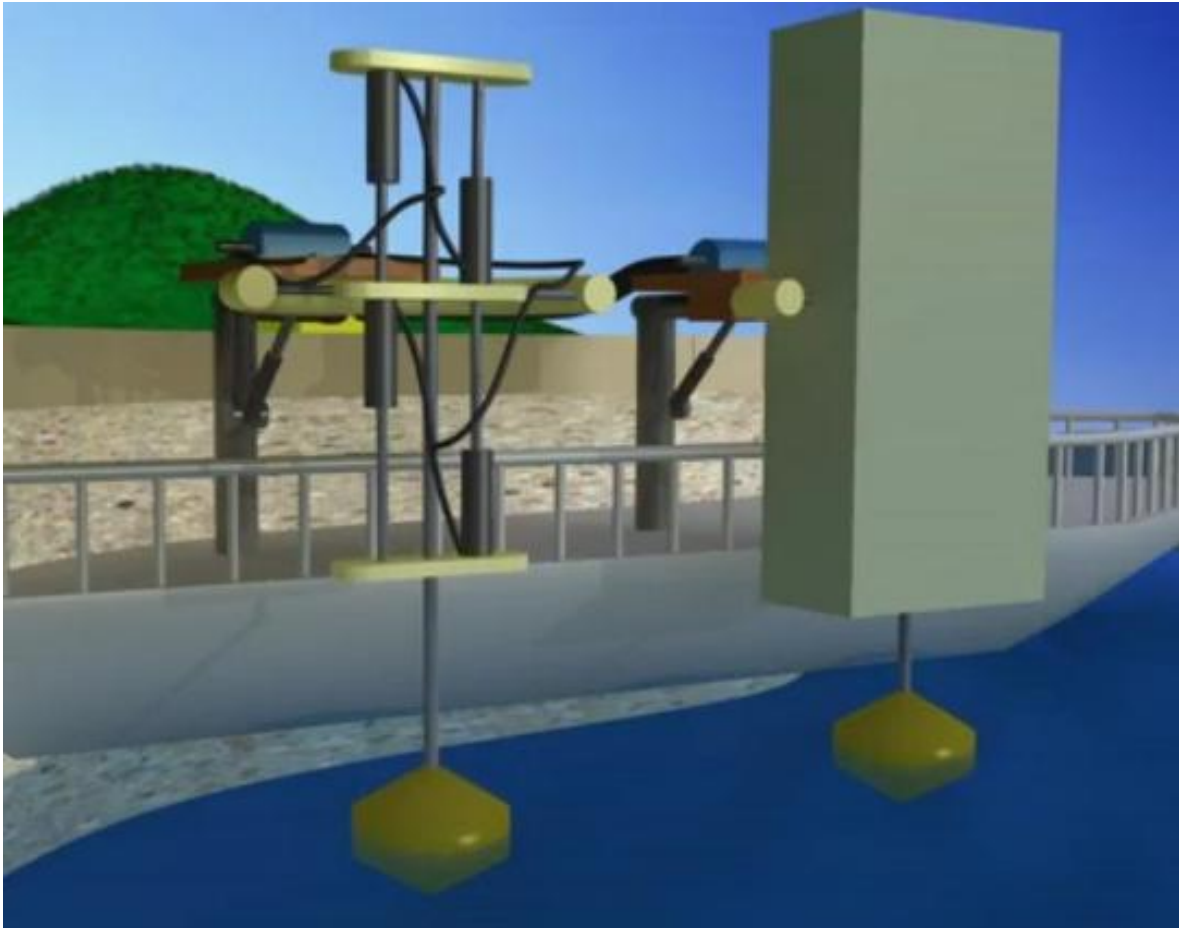


Figura 82. Imagen extraída del modelado de la nueva central propuesta

Como hemos comentado, la central dispondrá de un generador hidráulico encargado de producir energía. A continuación, en la figura 83, veremos un esquema del funcionamiento del generador hidráulico y todos los elementos que lo actúan y procederemos a explicar el funcionamiento:

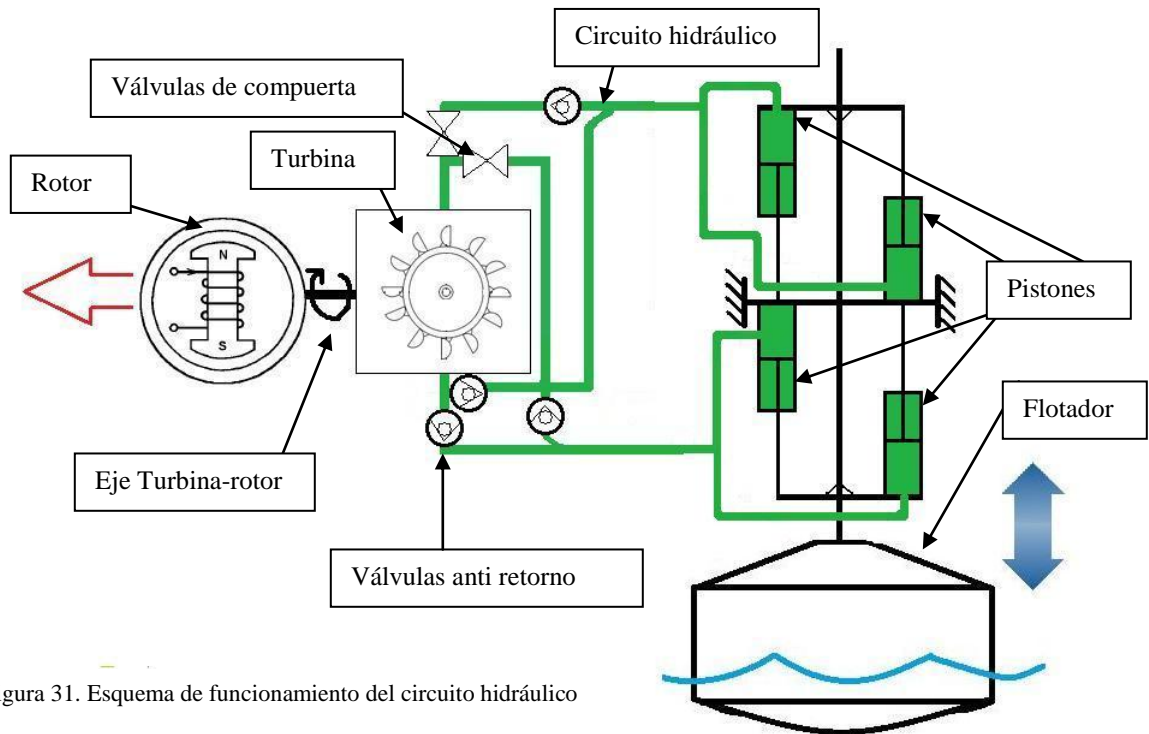


Figura 31. Esquema de funcionamiento del circuito hidráulico

Como observamos en la imagen, el movimiento es iniciado por el movimiento de las olas, el flotador imita el movimiento del oleaje y pone en movimiento los pistones que se encuentran solidario al mismo, como hemos comentado con anterioridad, una de las ventajas de este sistema con respecto al Marmotor de Barrufet, es que puede aprovechar tanto el movimiento de subida como el de bajada del flotador, que solo aprovechaba el movimiento de bajada. El movimiento de los pistones hace circular el fluido hidráulico por el circuito hidráulico de la misma manera que los hace el sistema Pelamis, y aquí es donde encontramos un pequeño inconveniente al usar tanto el movimiento de subida como el de bajada del flotador, y es que los pistones causaran que el fluido hidráulico se mueva en un sentido cuando suba el pistón, y en sentido contrario cuando baje, cuando la turbina, que es la que es actuada por el fluido hidráulico solo puede trabajar en un sentido, para ello se ha diseñado un circuito hidráulico mediante válvulas anti retorno y válvulas de compuerta, con el objetivo de que la dirección del fluido hidráulico al llegar a la turbina siempre sea igual (en el apartado 4.4.5.2 *Funcionamiento del circuito hidráulico de la nueva central*, podréis encontrar la explicación detallada del funcionamiento del circuito hidráulico). Como ya hemos mencionado, la circulación de este fluido hidráulico accionará una turbina que girará solidaria al un rotor mediante un eje, que será el encargado de producir la energía eléctrica.



Contemplando la estructura del sistema del flotador y pistones veremos que es bastante simple. El diseño del flotador es el mismo que el que usó Barrufet en el Marmotor, con la única diferencia del cambio de material, de gres a hierro dulce (demostrada la optimización del cambio de material en el apartado 4.3.1.1 *Substitución de material del flotador*). El flotador se encuentra solidario a un eje en el que se montan los pistones, el diseño de los pistones se basa en el usado por el sistema Pelamis, se usan dos pistones en cada sentido para alimentar una misma bomba, el uso de este diseño se justifica por:

-Al usar un mayor número de pistones, se reduce el tamaño de los mismos, ya que para mover el mismo caudal de fluido hidráulico usamos un mayor número de pistones. Este aumento de componentes nos favorece en la reducción del tamaño de los mismos y una mejor organización, no se esta tan limitado a la hora de ubicar.

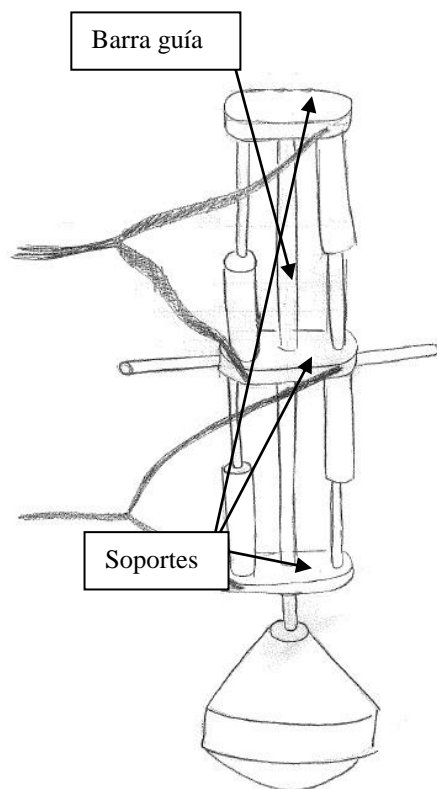


Figura 84. Esquema del sistema de pistones

Es más favorable para el diagrama de fuerzas como comprobaremos a continuación. Inicialmente, plantearemos que, como el esfuerzo recibido de las olas nos es totalmente perpendicular al movimiento de los pistones, se colocará una barra guía que será la encargada de absorber los esfuerzos de torsión, evitando así un deterioro prematuro de los pistones, se ve en la imagen 84.

La función de la barra guía se cumple gracias a que, el soporte de la parte central está fijo a la estructura del sistema pero no a la propia barra lo que le permite movimiento, en cambio, la barra se encuentra fijada a los dos soportes superior e inferior, cosa que asegura el movimiento rectilíneo de la barra, y por consiguiente de los pistones.

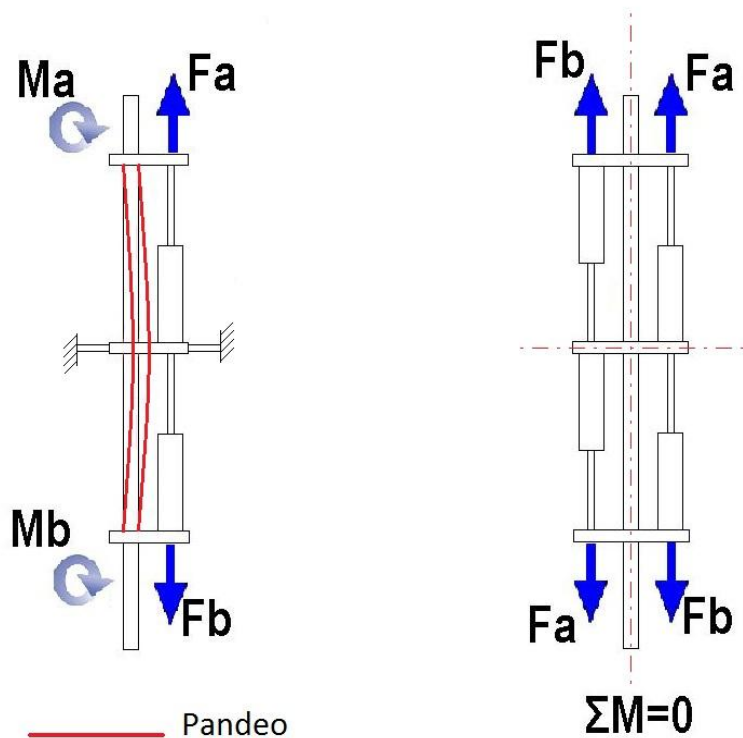


Figura 85. Diagrama de fuerzas en caso de tener uno o dos pistones

Si usáramos dos pistones, podría existir un posible pandeo de la guía, como se muestra en la figura 85, ya que la fuerza recibida ( $F_a$  y  $F_b$ ) sería excéntrica, cosa que provocaría un momento ( $M_a$  y  $M_b$ ). En cambio, si usamos cuatro pistones, conseguiremos un sistema simétrico, con lo que las fuerzas de ambos lados se verán compensadas, por lo tanto, la barra guía solo cumpliría la función de evitar pandeos ocasionados por las fuerzas no paralelas al movimiento de los pistones, ocasionada por las olas, con lo que las solicitaciones que ha de aguantar esta barra de reducirán.

Otra de las ideas que adoptaremos, procedentes del sistema Pelamis, es la de recubrir el sistema de los pistones y el generador hidráulico con una caja hecha de hierro dulce, el mismo material que el usado en el sistema Pelamis. La función de esta caja, será la de proteger de la corrosión a los componentes del sistema para evitar el deterioro prematuro de los mismos, ya que como se comentó con el sistema del Marmotor, una de las posibles causas del fracaso del proyecto habría sido la corrosión, cuando la intención de esta central es que esté funcionando la mayor parte de su vida útil con el menor mantenimiento posible.

### 4.4.3 Dispositivos

Como se ha hecho en las centrales Pelamis y Marmotor, a continuación procederemos a nombrar cada uno de los componentes por los que está formada la nueva central, nombrando las características principales de cada uno de ellos:

-Armazón: Con un diseño basado en el Marmotor, tiene la misma función pero con una forma simplificada, es el que soporta el resto de componentes; el sistema generador/turbina y se encuentra sujeto al soporte intermedio de los pistones, haciendo de nexo entre el flotador, la barra guía i los pistones con el generador/turbina. Además, encontraremos el pistón neumático, para poder levantar el sistema de pistones y flotador en el caso de fuerte temporal. El material elegido, como se ha juzgado en el apartado 4.3.1.3 *Cambio del material de la estructura del dispositivo*, será madera de teca.

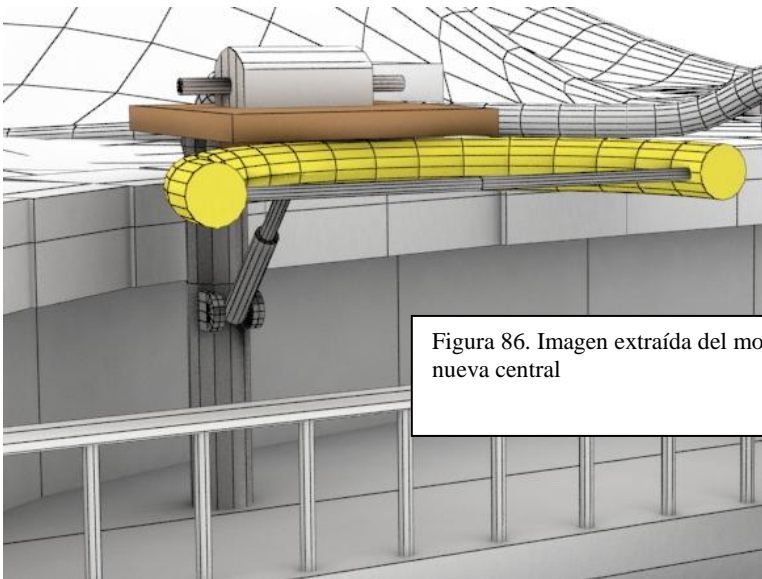
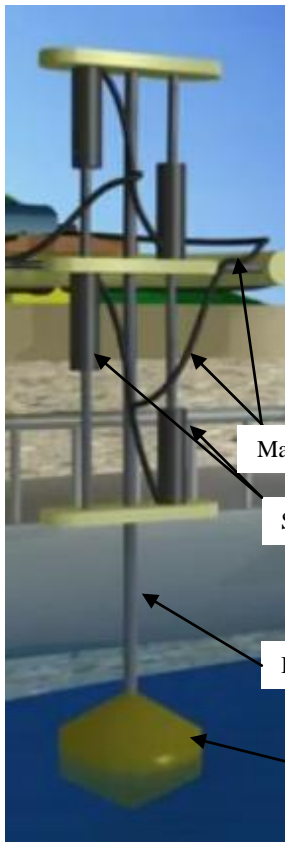


Figura 86. Imagen extraída del modelado del armazón de la nueva central

-Flotador: Su forma, así como su función, no ha variado respecto al del Marmotor; es el encargado de traducir el movimiento de vaivén de las olas en un movimiento de subida y bajada, aunque no pasa lo mismo con el material usado, que como se muestra en el apartado 4.3.1.1 *Substitución de material del flotador*, va a ser usado el hierro dulce.

-Sistema de pistones: Son los encargados de accionar el movimiento de los fluidos que contienen mediante el movimiento que les transmite el flotador.



-Barra guía: Se encuentra solidaria al flotador y a los soportes superior e inferior de los pistones, por lo que sirve de unión entre estos, además hace la función de mantener el movimiento rectilíneo de los pistones.

-Manguitos: son los encargados de llevar los fluidos desde los pistones hasta la turbina. Según el proveedor elegido, el material del que están compuestos es una capa de fibra de vidrio con un recubrimiento de neopreno y un alambre de metal de refuerzo.

Manguitos

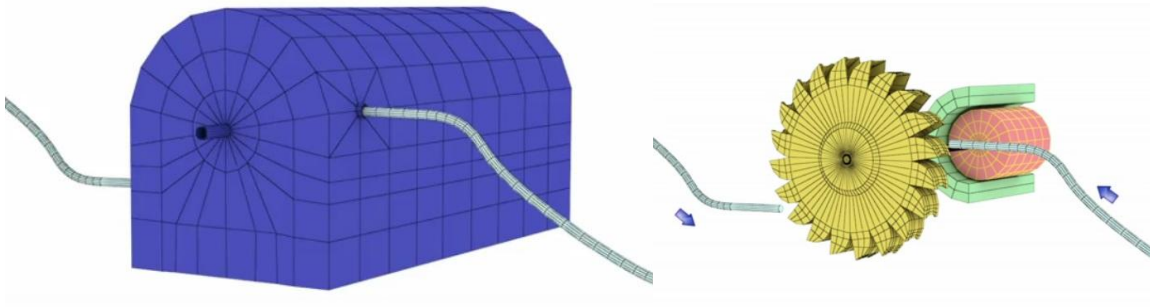
Sistema de pistones

Barra guía

Flotador

Figura 87. Imagen extraída del modelado de la nueva central del flotador, pistones i manguitos

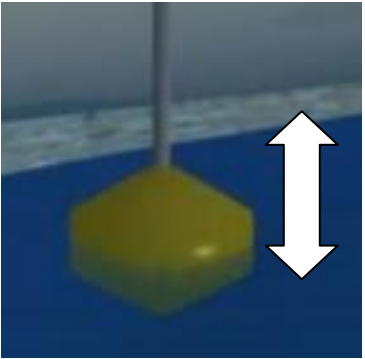
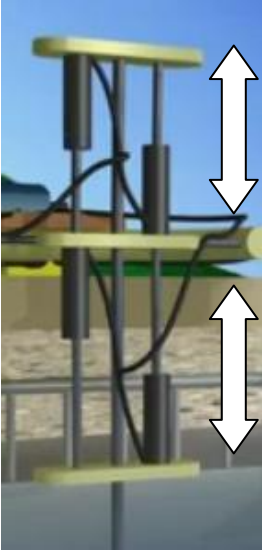
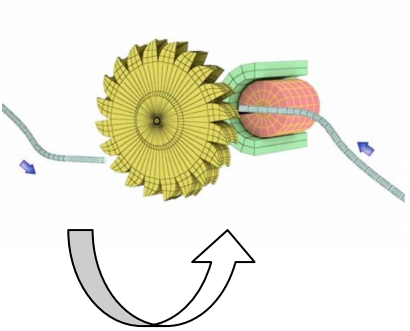
-Sistema generador/turbina: Esta formado por una turbina de tipo Pelton (la elección de este tipo de turbina esta especificado más adelante, en el apartado 4.4.6.1 *Elección del tipo de turbina*) que se encuentra solidaria a un rotor que al girar en el interior del estator, juntos forman el generador, son los encargados de generar energía eléctrica.



Figuras 88 y 89. Imagen extraída del modelado, de la carcasa y la turbina/generador.

#### 4.4.4 Proceso de conversión de energía

Este apartado, que se ha hecho anteriormente, tanto para la central Pelamis como para el Marmotor, podremos comprobar que, el concepto que se pretendía de coger los principales conceptos del diseños de las centrales anteriormente nombradas, se cumple, ya que, como podremos observar, cada una de las etapas aparecen también en el Pelamis y Marmotor:

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
		
<p>Inicialmente, del mismo modo que en el Marmotor, el movimiento de vaivén de las olas se convierte en un movimiento rectilíneo gracias a la acción del flotador.</p>	<p>En la segunda etapa, como el flotador se encuentra fijado a dos de los soportes de los pistones, el tercero se encuentra fijo al armazón, hace que dos de los pistones se compriman, y los otros dos se expanden, provocando así el movimiento de los fluidos que contienen estos en el interior.</p>	<p>En la última etapa, esta vez de forma similar que en la central Pelamis, los fluidos que se mueven por la acción de los pistones, hacen girar a una turbina que se encuentra solidaria a un generador que crea energía eléctrica. En este sistema no hacen falta acumuladores porque la presión de los fluidos será la misma.</p>

Figuras 90. Tabla de conversiones de energía de la nueva central.

#### 4.4.5 Cálculos y comprobaciones

##### 4.4.5.1 Comprobación del movimiento de bajada del flotador

Una de las incógnitas que se plantean a la hora de utilizar el movimiento de las olas para mover el flotador, es si el flotador será capaz de completar el movimiento de bajada, una vez la ola lo ha elevado, antes de que comience a formarse la siguiente ola.

En primer lugar, tenemos que tener en cuenta que el flotador sube con una cierta velocidad, y una vez que pierde el contacto con la ola, este seguirá subiendo durante un periodo de tiempo antes de que empiece a bajar, por ello, en primer lugar calcularemos hasta que altura subirá el flotador, para después determinar cuanto tiempo tardará en completar la bajada.

Para empezar este análisis, hemos de plantear una hipótesis sobre la forma de las olas, para así poder obtener toda la información necesaria, estas hipótesis las sacaremos del estudio que hizo José Barrufet:

-Esta hipótesis es para conocer el avance de una ola. Según Barrufet, la longitud de una ola es (observar figura 91); desde el punto inicial hasta la cresta, es un tercio de la longitud de la cresta de la ola hasta el punto final de la misma. Conociendo la velocidad media a la que se desplaza la ola, conoceremos la longitud total ocupada por una ola, imaginando todo esto desde un punto de vista estático. A continuación, procedemos a construir el esquema de una ola según lo planteado.

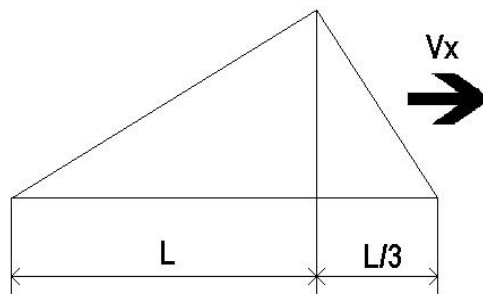


Figura 91. Esquema de una ola

Para elegir el tipo de ola que tomaremos, recurriremos al gráfico en el que se muestran las alturas significativas de las olas, facilitado por el ministerio de fomento. En la figura que encontraremos a continuación, figura 92, que es el extracto de la zona de Cataluña, veremos que la altura significativa de las olas es de alrededor de 3 metros:

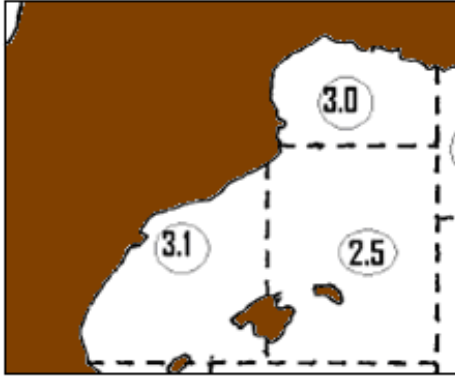


Figura 92. Mapa extraído del ministerio de fomento de la altura significativa de las olas

Si tomamos el estudio de las olas de Barrufet (apartado 2.1.2.3), cogemos las olas coexistentes de propagación, es decir, olas que se desplazan a 0.56 m/s, y sabiendo que entre una ola y otra hay 7 segundos de diferencia, podremos encontrar el valor del L en la figura 91. En primer lugar encontraremos el valor total de la longitud de la ola mediante la fórmula del movimiento rectilíneo uniforme:

$$v = s / t$$

Donde: v es la velocidad constante

s es el espacio recorrido

t es el tiempo empleado en completar el espacio recorrido

Como queremos conocer el valor de s y conocemos v, aislaremos s en la ecuación.

$$s = v \times t = 0.56 \times 7 = 3.92 \text{ m}$$

Sabiendo el valor de s, procederemos a encontrar L.

$$L + L/3 = s$$

$$L + L/3 = 3.92$$

$$(3L + L) / 3 = 3.92$$

$$4L/3 = 3.92$$

$$L = 3.92 \times 3 / 4 = 2.94$$

Una vez conocemos la L, y conociendo la altura de la cresta de la ola, construiremos un triángulo, que utilizaremos para conocer los ángulos con respecto a la hipotenusa. Estos ángulos los usaremos para hacer un símil con el triángulo formado por las velocidades, así que sabiendo la velocidad de avance de la ola ( $v_x$ ) conoceremos la velocidad en el eje vertical ( $v_y$ ), o lo que es lo mismo, la velocidad a la que subirá el flotador.

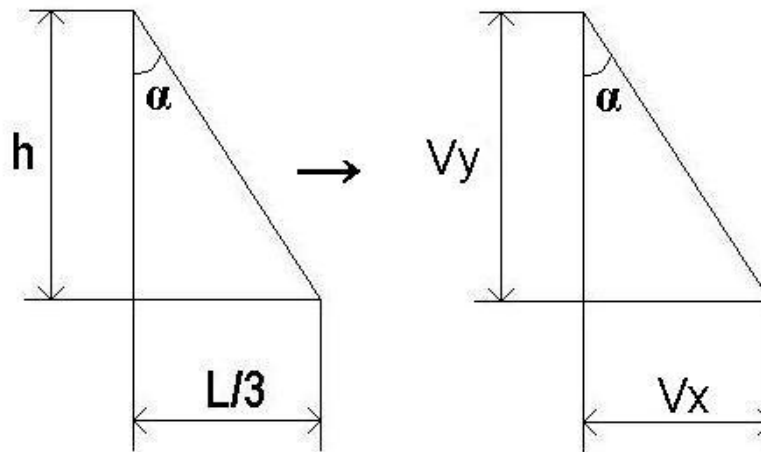


Figura 93. Esquemas de medida de ola y descomposición de velocidad

Conociendo que los dos triángulos son iguales, buscaremos las tangentes de  $\alpha$  de la figura 93, como los triángulos son iguales, podremos igualar las dos tangentes del ángulo  $\alpha$ .

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= L/3 / h & \leftrightarrow & \operatorname{tg} \alpha = v_x / v_y \\ L/(3 \times h) &= v_x / v_y \end{aligned}$$

Teniendo esta fórmula, aislaremos  $v_y$ , que es la velocidad a la que irá el flotador.

$$v_y = v_x / (L / (3 \times h)) = 0.56 / (2.94 / (3 \times 3))$$

$$v_y = 1.71 \text{ m/s}$$

Una vez conocemos la velocidad a la que irá el flotador ( $v_y$ ) una vez haya perdido el contacto con la ola, procederemos a conocer hasta que altura subirá el mismo mediante la fórmula del movimiento rectilíneo uniformemente desacelerado.

$$x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

Donde:  $x$  es la altura total a la que subirá el flotador

$a$  es la aceleración del cuerpo, en este caso será negativa (la gravedad)

$t$  es el tiempo que tardará en llegar a  $x$

$v_0$  es la velocidad con la que iniciará el movimiento

$x_0$  la velocidad donde el flotador empieza el movimiento, es decir la cresta de la ola

Esta fórmula plantea un inconveniente, y es que tendríamos dos incógnitas, la altura máxima a la que llegaría el cuerpo ( $x$ ), y el tiempo que tardaría en llegar ( $t$ ), por lo tanto,  $t$  la buscaremos



mediante la fórmula de la velocidad en un instante, ya que conocemos la velocidad final y la inicial, y queremos saber que intervalo de tiempo hay entre ellas.

$$v(t) = at + v_0$$

Aislamos t y nos quedará:

$$t = (v - v_0) / a = -v_0 / -g = 1.71 / 9.81 = 0.174s$$

Una vez conocemos el tiempo que tardará en subir, ya podemos saber la altura.

$$x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

$$x = 1/2 \times (-9.81) \times (0.174)^2 + 1.71 \times 0.174 + 3 = -0.148 + 0.297 + 3$$

$$x = 3.15m$$

Una vez conocemos la altura a la que llegará, podremos saber cuánto tiempo tardará en llegar al punto mínimo de la siguiente ola mediante la fórmula del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, la misma usada anteriormente:

$$x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

En este caso, aislaremos el tiempo que tardará en bajar (t), sabiendo que la velocidad inicial ( $v_0$ ) será 0 y la posición final (x) también:

$$0 = 1/2 \times g \times t^2 + x_0$$

$$t = \sqrt{(x_0 \times 2 / g)} = \sqrt{(3.15 \times 2 / 9.81)} = \sqrt{0.642}$$

$$t = 0.801 s$$

Si a este tiempo le sumamos el tiempo que tarda en subir el flotador, nos quedará que el tiempo total ( $t_t$ ) es:

$$t_t = 0.801 + 0.174 = 0.975 s$$

-La segunda hipótesis que hemos de plantear, es que la misma división en cuanto a longitudes hechas en la figura 91, se puede tomar también en cuanto al tiempo, ya que se supone una velocidad constante de ola, por lo tanto, sabiendo que el tiempo total entre ola y ola es de 7 segundos y la división del tiempo de ola, podremos conocer el tiempo que hay entre la cresta de la ola y el inicio de la siguiente ( $t_p$ ).

$$t_p / 3 + t_p = 7$$

$$4 \times t_p / 3 = 7$$

$$t_p = 7 \times 3 / 4$$

$$t_p = 5.25s$$

### **Conclusión**


El tiempo que tarda el flotador desde que pierde contacto con la cresta de la ola, hasta que llega la altura donde ha iniciado el movimiento tarda 0.975 segundos. Por otro lado, el tiempo que hay desde que pasa la cresta de la ola hasta que se inicia la siguiente ola es de 4.5 segundos, por lo tanto, el flotador podrá completar sin ningún tipo de problemas el movimiento de bajada, no se dará el caso de que llegue abajo después de que empiece la siguiente ola, con la consiguiente pérdida de carrera.


#### *4.4.5.2 Funcionamiento del circuito hidráulico de la nueva central*

En la explicación del funcionamiento del generador hidroeléctrico, se ha expuesto la existencia de un circuito hidráulico previo, por el que circula un fluido hidráulico proveniente de los pistones. La función de este circuito es, tanto para cuando los pistones se muevan en una dirección como en otra, la dirección del flujo del fluido al llegar al generador siempre sea la misma. Para ello se ha diseñado un recorrido de tubos con una serie de válvulas, con el objetivo de que el fluido siga una dirección determinada. Las válvulas usadas en el circuito son válvulas anti retorno y válvulas de compuerta, el funcionamiento de las cuales explicaremos brevemente a continuación:

- Las válvulas anti retorno, tienen por objetivo cerrar por completo el paso del fluido en circulación en un sentido y dejarlo libre en el contrario. Tiene la ventaja de un recorrido mínimo del disco u obturador a la posición de apertura total.
- La válvula de compuerta es una válvula que abre mediante el levantamiento de una compuerta o cuchilla (la cuál puede ser redonda o rectangular) permitiendo así el paso del fluido.

A continuación, procederemos a explicar el funcionamiento del circuito, tanto para el movimiento de subida, como para el de bajada del flotador. Como veremos seguidamente en las figuras 94 y 96, a lo largo del circuito hay colocadas una serie de válvulas que están numeradas, de las cuales mostramos la leyenda:

 Válvulas anti retorno (1, 2, 3 y 6)

 Válvulas de compuerta (4 y 5)

*Funcionamiento del circuito hidráulico en el movimiento de subida de la ola*

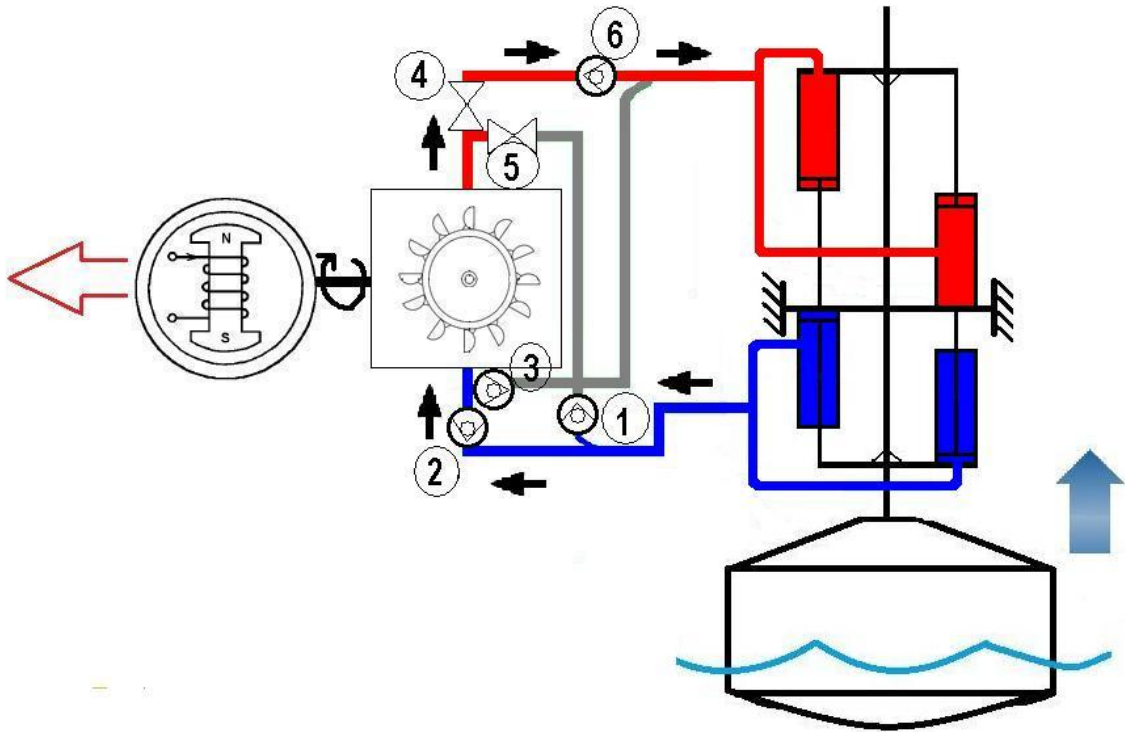


Figura 94. Funcionamiento del circuito hidráulico en el movimiento de subida de la ola

Como observamos en el esquema de la figura 94, el fluido sale de uno de los pistones, en su recorrido, se encuentra con la válvula anti retorno 1, que se activa para evitar el paso por esa canalización. Siguiendo el circuito la siguiente válvula que se encuentra, es la válvula anti retorno 2, que no actúa, ya que es favorable a esa dirección de fluido, a continuación encuentra la válvula anti retorno 3, que como en el caso de la primera, evita el paso del fluido. Una vez pasada la turbina, encontramos las válvulas de compuerta 4 y 5, estas válvulas deberían estar asociadas a un software informático, el cual hiciera actuar a una o a la otra según el movimiento del flotante. Para este caso, la válvula 5 se encontraría cerrada y la 4 abierta, por lo que el fluido seguiría su marcha a través de esta última. Por último, se encontraría con la válvula anti retorno número 6, la cual se encontraría abierta, ya que para esa dirección de flujo, esta no tiene ningún efecto. Si adelantamos un poco en el circuito encontraríamos un nuevo tubo, para evitar poner más válvulas, lo que supondría un mayor coste, lo que se hace es un diseño por el cual el fluido sigue su dirección natural, sin verse afectado por este tubo, como ocurriría en la imagen 95.

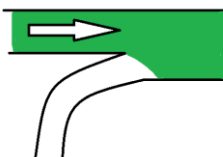


Figura 95. Diseño de anclaje de tubos del circuito hidráulico

*Funcionamiento del circuito hidráulico en el movimiento de bajada de la ola*

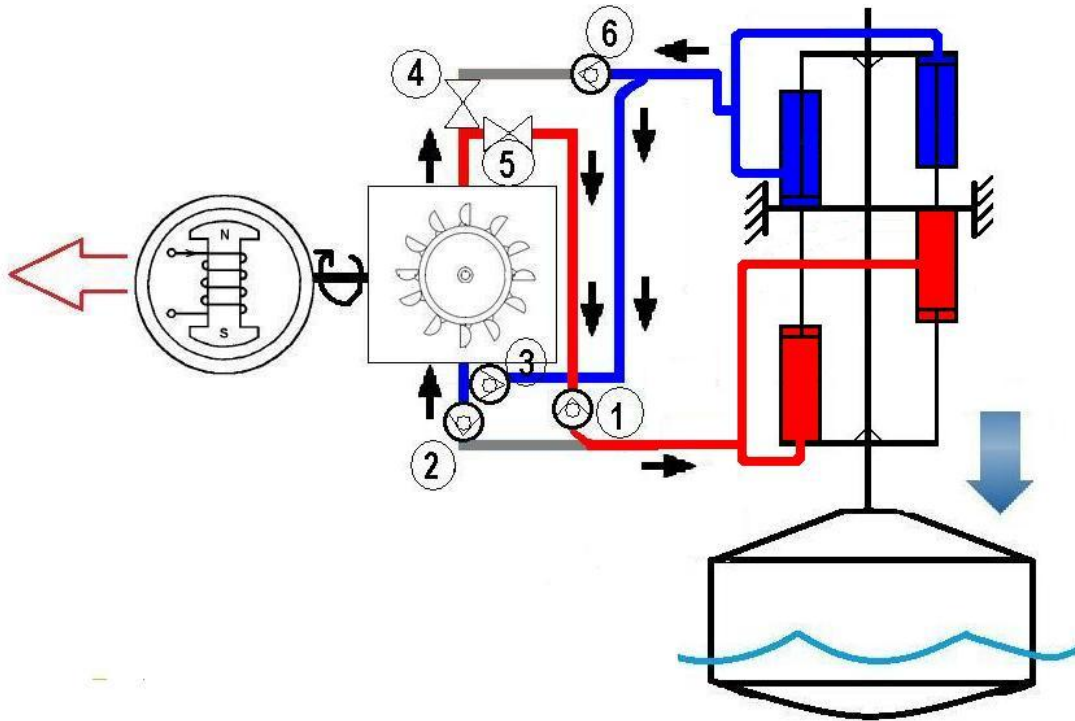


Figura 96. Funcionamiento del circuito hidráulico en el movimiento de bajada de la ola

En este caso, observando la figura 96, veremos que la dirección del fluido es opuesta, por lo que el funcionamiento de las válvulas será diferente. Para esta dirección de fluido, la primera válvula que encontrará el fluido es la válvula anti retorno 6, que en este caso evitará el paso del fluido, que seguirá la dirección de la tubería transversal gracias a la acción conjunta de la válvula y el diseño de tubo mostrado en la figura 95. La siguiente válvula que se encontraría es la válvula anti retorno 3 que dejaría paso al fluido, seguidamente, para que el fluido no siga la dirección opuesta a la turbina, se encuentra la válvula anti retorno número 2 para evitar el paso. Una vez pasada la turbina, nos encontraríamos nuevamente con las válvulas de compuerta 4 y 5 conectadas al software informático, que esta vez, al ser el movimiento de bajada del flotador haría que la válvula número 4 estuviera cerrada y la 5 abierta. Por último, llegaría a la válvula número 1 que no impediría el paso del fluido.

#### 4.4.6 Dimensionado de componentes

##### 4.4.6.1 Elección del tipo de turbina

En primer lugar, procederemos a la elección del tipo de turbina que elegiremos para nuestro sistema de turbina/generador. Para ello, haremos un vistazo global de los tipos de turbina que nos podemos encontrar en la actualidad, siguiendo la siguiente clasificación, en la que se distinguen las turbinas de acuerdo al tipo de trabajo que han de ejercer:

-Turbinas de acción: Son aquellas en las que el fluido de trabajo no sufre un cambio de presión importante en su paso a través del rodete, en la que destaca la turbina **Pelton**, que consisten en una rueda (rodete o rotor) dotada de cucharas en su periferia, las cuales están especialmente realizadas para convertir la energía de un chorro de agua que incide sobre las cucharas. Se usa cuando hay poco caudal de fluido.



Figura 97. Imagen de una turbina Pelton

-Turbinas de reacción: Son aquellas en las que el fluido de trabajo si sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete, en las que destacan las turbinas **Kaplan**; de flujo axial, con un rodete que funciona de manera semejante a la hélice de un barco. Las amplias palas o álabes de la turbina, que suelen ser de inclinación regulable, son impulsadas por agua a alta presión. Por otro lado, encontramos las turbinas **Francis** de flujo mixto, en las que destaca la capacidad de trabajar con un alto grado de variedad de caudales, generalmente usada para la gran mayoría de saltos de agua.

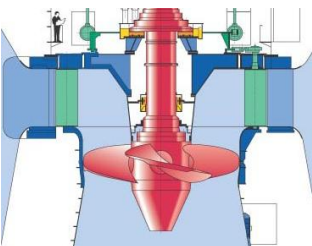


Figura 98. Imagen de una turbina Kaplan



Figura 99. Imagen de una turbina Francis

Conociendo las condiciones de trabajo de nuestra turbina, en la que se encontrara en un circuito cerrado por el que circularan los fluidos de los pistones, por el que el caudal de agua no será de gran magnitud, esto hará que la presión de trabajo no sea muy elevada, por esto, nos decantaremos por el uso de una turbina de acción como es la turbina Pelton. El rendimiento de este tipo de turbinas se mantiene casi constante en todo su rango de funcionamiento en un 90%.

#### 4.4.6.2 Elección del generador hidráulico

Para proceder en este apartado, se han elegido tres tipos de generadores que trabajan en condiciones totalmente diferentes. En primer lugar, evaluaremos cuales son estas condiciones de trabajo, valoraremos cual es el más adecuado para nuestra central de energía y procederemos al dimensionamiento de los pistones y al cálculo de obtención de energía que nos proporcionará todo el conjunto.

En la siguiente tabla, encontraremos los tres tipos de generadores diferentes, conjuntamente con sus diferentes especificaciones:

Generador	#1 MD-H30K	#2 ST-24	#3 SFW990
			
<b>Fabricante</b>	Changzhou Modo Lighting & Plastic Factory	Fuzhou Landtop Co., Ltd.	Shaoyang Electrical Machinery Factory Co., Ltd.
<b>Rango de rpm de trabajo</b>	200	1500-1800	300~1200
<b>Potencia obtenida (KW)</b>	30	24	75~670
<b>Rendimiento</b>	0.9	0.9	0.8

Figura 100. Tabla comparativa de diferentes generadores.

El sistema de funcionamiento de estos tres generadores es el mismo, a través de un eje giratorio hacen girar un rotor solidario, y gracias a un estator que se encuentra dentro de la carcasa del generador, generan energía eléctrica. Lo que diferencia a estos generadores, es la manera de transformar la energía de rotación del eje giratorio, en esto va a ser en lo que nos vamos a centrar para valorar cual se adapta mejor a nuestras condiciones de trabajo:

Como podremos observar, las bombas #1 y #2, aprovechan la energía cinética de rotación de manera similar, mediante una rotación más o menos constante (con poca variabilidad), son capaces de conseguir potencia. Lo que las diferencia a ambas, es el rango de rpm de trabajo, la primera trabaja con un rango inferior y la segunda con un rango bastante superior, aunque una da algo más de potencia que la otra, las dos necesitan una velocidad de rotación muy constante para poder funcionar.

A diferencia de las dos primeras, la tercera trabaja con un rango de velocidades de rotación mucho más extenso, cosa que hace que nos declinemos por elegir este tipo de generador, ya que si extrapolamos estos datos a nuestras condiciones de trabajo, veremos que las olas del mar nunca tienen una altura constante, sino que cambian a causa de gran cantidad de factores, y estas olas del mar son las que nos darán la velocidad de giro del eje. Por lo tanto, podremos conseguir potencia en gran cantidad de condiciones de oleaje, a diferencia de los dos primeros generadores, que obtendríamos potencia con un rango de oleaje mucho más limitado. Uno de los inconvenientes de la elección de esta bomba es que su rendimiento es algo peor, de un 80% a diferencia del 90% de las otras, aunque no se considera significativo este parámetro a la hora de la elección del generador.

#### *4.4.6.3 Dimensionamiento de los pistones*

Seguidamente, procederemos a dimensionar los pistones que se encuentran solidarios al flotador, para asegurar que se usan los pistones idóneos para nuestras condiciones de trabajo. Para ello, utilizaremos el catalogo del fabricante de pistones, Rexroth Bosch.

El parámetro básico para dimensionar los pistones, es la presión que han de soportar con tal de evitar un deterioro prematura de estos, por ello, dimensionaremos los pistones según este parámetro y el resto de componentes se dimensionaran según estos.

Para conocer la presión que tendrán que soportar estos pistones, recordamos que, para tener un reparto de esfuerzos igualitario, se colocaron cuatro pistones, daremos que la condición de que la presión soportada por el flotador, que es el que recibe la fuerza procedente del agua, será igual a la fuerza soportada por los cuatro pistones, por lo que, si conocemos la formula de la presión:

$$P = F / S$$

Donde: P es la presión

F es la fuerza

S es la superficie

Diremos que la presión de los 4 pistones va a ser igual a la del flotador

$$P_f = P_p / 4$$

Donde:  $P_f$  es la presión del flotador

$P_p$  es la presión de los pistones

Si igualamos las dos formulas nos quedará:

$$F / (4 \times \Pi \times D_f^2) = F / (4 \times \Pi \times D_p^2) / 4$$

Donde: F es la fuerza.

$D_f$  es el diámetro de la superficie del flotador

$D_p$  es el diámetro de la superficie de los pistones

Como la F serán iguales se pueden simplificar juntamente con los  $\Pi$ , y aislando el  $D_p$  nos quedará lo siguiente:

$$D_p^2 = D_f^2 / 4$$

$$D_p = \sqrt{D_f^2 / 4} = D_f / 2 = 0.6 / 2 = 0.3$$

$$D_p = 0.3\text{m}$$

Sabiendo que el diámetro mínimo de cada uno de los pistones has de ser de 0.3 metros, procederemos a coger la tabla del fabricante para elegir el pistón que más se adecue a nuestras condiciones:



Piston AL Ø mm	Vástago MM Ø mm	Relación de superf. $\varphi$ $A_1/A_3$	Superficies			Fuerza para 250 bar <sup>1)</sup>			Caudal para 0,1 m/s <sup>2)</sup>		
			Piston $A_1$ cm <sup>2</sup>	Vástago $A_2$ cm <sup>2</sup>	Anular $A_3$ cm <sup>2</sup>	Compaezi $F_1$ kN	Diferenc. $F_2$ kN	Traccion $F_3$ kN	Avance $q_{v1}$ L/min	Diferenc. $q_{v2}$ L/min	Retrceso $q_{v3}$ L/min
40	22 28	1,43 1,96	12,06	3,80 6,16	8,76 6,40	31,40	9,50 15,40	21,90 16,00	7,5	2,3 3,7	5,3 3,8
50	28 36	1,46 2,08	19,63	6,16 10,16	13,47 9,45	49,10	15,40 25,45	33,70 23,65	11,8	3,7 6,1	8,1 5,7
63	36 45	1,48 2,04	31,17	10,18 15,90	20,99 15,27	77,90	25,45 39,75	52,45 36,15	18,7	6,1 9,5	12,6 9,2
80	45 56	1,46 1,96	50,26	15,90 24,63	34,36 25,63	125,65	39,75 61,55	85,90 64,10	30,2	9,5 14,8	20,7 15,4
100	56 70	1,46 1,96	76,54	24,63 38,48	53,91 40,06	196,35	61,55 96,20	134,80 100,15	47,1	14,8 23,1	32,3 24,0
125	70 90	1,46 2,08	122,72	38,48 63,62	64,24 59,10	306,75	96,20 159,05	210,55 147,70	73,6	23,1 38,2	50,5 35,4
140	90 100	1,70 2,04	153,94	63,62 78,54	90,32 75,40	384,75	159,05 196,35	225,70 168,40	92,4	38,2 47,1	54,2 45,3
160	100 110	1,64 1,90	201,06	78,54 95,06	122,50 106,00	502,50	196,35 237,65	306,15 264,65	120,6	47,1 57,0	73,5 63,6
180	110 125	1,60 1,93	254,47	95,06 122,72	159,43 131,75	636,17	237,65 306,80	398,52 329,37	152,7	57,0 73,6	95,7 79,1
200	125 140	1,64 1,96	314,16	122,72 153,96	191,44 160,20	785,25	306,80 384,90	476,45 400,35	188,5	73,6 92,4	114,9 96,1
220	140 160	1,68 2,12	380,1	153,9 201,0	226,2 179,1	950,3	384,8 502,6	565,5 447,7	226,1	92,4 120,7	135,7 107,4
250	160 180	1,69 2,08	490,8	201,0 254,4	289,8 236,4	1227,2	502,7 636,2	724,5 591,0	294,5	120,7 152,7	173,6 141,8
280	180 200	1,70 2,04	615,7	254,4 314,1	361,3 301,6	1539,4	636,2 785,4	903,2 753,9	369,4	152,7 188,5	216,7 180,9
320	200 220	1,64 1,90	804,2	314,1 380,1	490,1 424,2	2010,6	785,4 950,3	1225,2 1060,3	482,5	188,5 226,1	294,0 254,4

<sup>1)</sup> Fuerza teórica  
(sin considerar el rendimiento)

<sup>2)</sup> Velocidad de carrera

Figura 101. Tabla de dimensiones de pistones del fabricante Rexroth Bosch.

Como vemos señalado en la figura 101, el pistón elegido es el de diámetro de pistón de 320 mm, ya que es el único igual a superior a los 300 mm requeridos por nuestro sistema, con el valor añadido que tiene un coeficiente de seguridad de un 6.67%.

#### 4.4.6.4 Dimensionamiento de la turbina

Tenemos que tener en cuenta las condiciones en las que trabaja nuestra central, para así dimensionar la turbina de tal manera que el aprovechamiento de la energía de las olas sea óptimo, por ello, tendremos que pasar por todos los pasos de conversión de la energía desde la ola hasta llegar a la turbina.

El primer paso, es el de transformar el movimiento de la ola en el movimiento de subida del flotante, para ello, basándonos en la figura 91, diremos que la forma de la ola está compuesta por dos

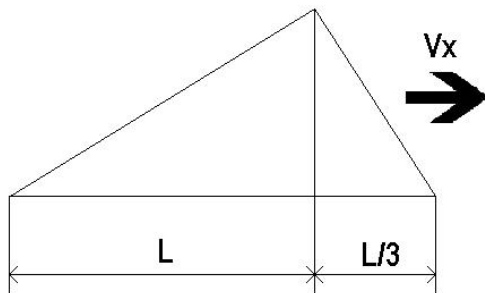
triángulos, uno para el movimiento de subida y otro para el movimiento de bajada, por lo que si conocemos la velocidad de avance de ola y sabiendo la forma del triángulo, mediante la descomposición de la hipotenusa en velocidad en la horizontal y velocidad en la vertical, podremos encontrar la velocidad de subida del flotador.

En primer lugar, como se ha comentado en el apartado anterior 4.4.5.1, usaremos el mismo tipo de ola para construir nuestros triángulos de subida y bajada, con tal de poder encontrar la velocidad de subida.

Datos de la ola:

- Altura de la ola ( $H$ ) = 3 m
- Velocidad de avance ( $v_a$ ) = 0.56 m/s
- Espacio entre olas ( $t$ ) = 7 s

Si volvemos a mostrar la figura 91, usaremos esta misma estructura de ola para encontrar tres parámetros distintos:



Para las longitudes, usaremos la figura 102, que encontraremos a continuación:

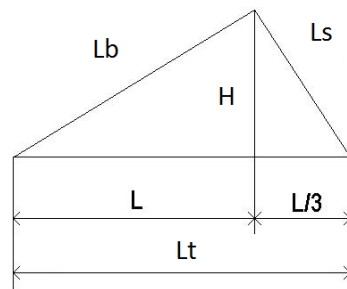


Figura 102. Esquema de longitudes de una ola

Donde:  $L_s$  es la longitud de subida

$L_b$  es la longitud de bajada

$L_t$  es la longitud total

$L$  son las longitudes parciales

Para el tiempo usaremos la figura 103, en este caso es mucho más simple porque el tiempo no se puede descomponer, una vez se conoce el tiempo que se tarda en la horizontal, se puede extrapolar a cualquiera de las diferentes inclinaciones:

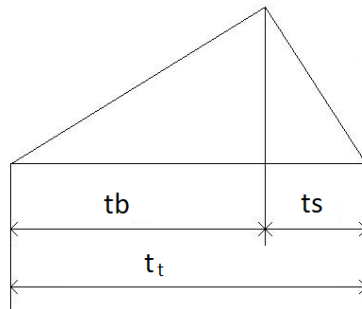


Figura 103. Esquema de tiempos de una ola

Donde:  $t_s$  es el tiempo de subida

$t_b$  es el tiempo de bajada

$t_t$  es el tiempo total

Por lo tanto, si tomamos que movimiento de la ola no tiene aceleración, la velocidad será constante, si sabemos la longitud de subida y bajada, y sabemos el tiempo que tarda en subir y en bajar, podremos encontrar la velocidad media que tendrá el flotador mediante la siguiente expresión:

$$v = L / t$$

Primeramente, nos centraremos en encontrar las longitudes de subida y de bajada, para ello, primero tenemos que encontrar la longitud que recorre horizontalmente la ola, como tenemos la altura de esta misma, podemos encontrar las longitudes que buscamos. Para encontrar la longitud horizontal usaremos:

$$L_t = v_a \times t_t$$

$$L_t = 0.56 \times 7 = 3.92$$

$$L_t = 3.92 \text{ m}$$

Una vez conocemos la longitud total, procederemos a buscar las longitudes parciales ( $L$ ) sabiendo que:

$$L + L/3 = L_t$$

Haciendo mínimo común múltiplo:

$$(3 \times L + L) / 3 = L_t$$

$$4 \times L / 3 = L_t$$

$$L = 3 \times L_t / 4 = 3 \times 3.92 / 4 = 2.94$$

$$L = 2.94 \text{ m}$$

Una vez conocemos las longitudes parciales, podremos construir dos triángulos, y mediante el teorema de Pitágoras, encontraremos las velocidades de subida y de bajada.

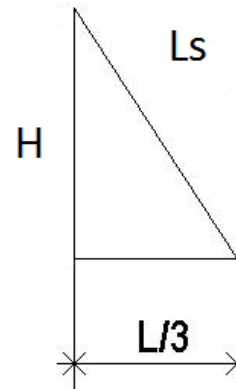
-Longitud de subida ( $L_s$ )

Como conocemos que la altura de la ola es de 3 metros, y que la longitud que avanza la ola en la subida es la tercera parte de la longitud parcial, mediante el teorema de Pitágoras, que dice que la suma del cuadrado de los catetos es igual al cuadrado de la hipotenusa, encontraremos la longitud parcial:

$$H^2 + (L/3)^2 = L_s^2$$

$$L_s^2 = \sqrt{H^2 + (L/3)^2} = \sqrt{3^2 + (2.94/3)^2} = \sqrt{9 + 0.96} = \sqrt{9.96} = 3.156 \text{ m}$$

$$L_s = 3.156 \text{ m}$$



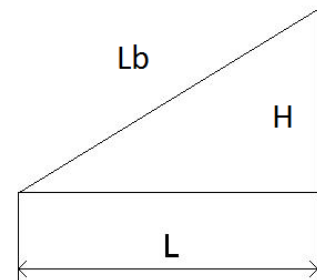
-Longitud de bajada ( $L_b$ )

Para encontrar esta longitud, usaremos la misma base que en el apartado anterior, con la diferencia de que la longitud parcial no se tiene que dividir entre tres:

$$H^2 + L^2 = L_b^2$$

$$L_b^2 = \sqrt{H^2 + L^2} = \sqrt{3^2 + 2.94^2} = \sqrt{9 + 8.64} = \sqrt{17.64} = 4.2 \text{ m}$$

$$L_b = 4.2 \text{ m}$$



-Velocidad media

Una vez conocemos el recorrido de subida y de bajada y el tiempo que tarda en recorrerlo, podemos encontrar, la velocidad media a la que se moverá el flotador verticalmente:

$$v = (L_s + L_b) / t_t = (3.156 + 4.2) / 7 = 1.051 \text{ m/s}$$

$$v = 1.051 \text{ m/s}$$

Una vez conocemos la velocidad media a la que se moverá el flotador, procederemos a calcular como se transmitirá este movimiento a la turbina. Para ello, tenemos que tener en cuenta que de la sección del pistón, el fluido pasará por un manguito de sección menor a este, antes de llegar a la turbina. Este cambio de sección provocará lo que se conoce como efecto Venturi, que consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido contenido en este segundo conducto.

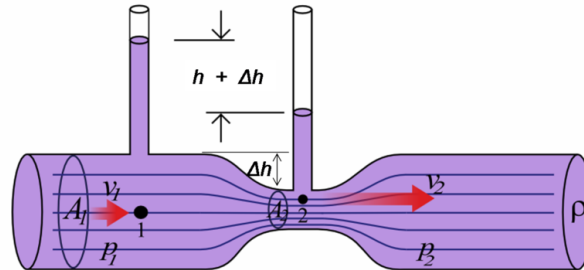


Figura 104. Ilustración del denominado efecto Venturi

Para la elección de los manguitos, usaremos el catalogo del proveedor Ventair, del que elegiremos uno de diámetro interior de 3 centímetros. En el caso de que el tamaño del manguito no se adecue a un resultado válido, se elegirá otro tamaño de manguito de este mismo proveedor con tal de valorar si esta puede ser una de las posibles causas.

Por lo tanto, al disminuir la sección por la que pasa el fluido, aumentará la velocidad del mismo siguiendo la siguiente expresión:

$$Q = s \times v$$

Donde: Q es el caudal

s es la sección del tubo

v es la velocidad a la que circula el fluido

Partiendo de la base de que la cantidad de fluido (caudal) que pasará por el tubo será la misma tanto en los pistones como en los manguitos, y conociendo las secciones de los mismos, podremos encontrar la variación de velocidad:

Expresión del caudal en los pistones

$$Q_p = s_p \times v_p^*$$

Expresión de caudal en los manguitos

$$Q_m = s_m \times v_m^*$$

\*Las variaciones en los términos de las formulas “p” y “m” se refieren a pistones y manguitos respectivamente

Partiendo de la teoría que los caudales son iguales expuesta anteriormente nos quedará la siguiente expresión:

$$Q_p = Q_m$$

$$s_p \times v_p = s_m \times v_m$$

La sección del pistón ya nos viene dada por el catalogo del proveedor, pero para la sección del manguito, tomaremos la sección de un círculo:

$$s_m = r_m^2 \times \pi$$

Donde:  $r_m$  es el radio del manguito

Por lo que si introducimos estos valores y aislamos la velocidad del fluido en el manguito nos quedara la siguiente expresión:

$$v_m = (s_p \times v_p) / s_m = (s_p \times v_p) / r_m^2 \times \pi$$

$$v_m = (804.2 \times 1.051) / 32 \times \pi = 29.89 \text{ m/s}$$

$$v_m = 29.89 \text{ m/s}$$

Una vez conocemos la velocidad a la que circula el fluido por el manguito, por lo tanto la velocidad a la que llegará el fluido a la turbina, por lo tanto la velocidad a la que girará la turbina, sin tener en cuenta rendimiento, los cuales se contemplarán más adelante, procederemos a dimensionar nuestra turbina para que esta se adecue a la velocidad de giro de nuestro generador. Para ello,

consideraremos que la curva de potencia del generador es lineal (no facilitada por el proveedor), con lo que plantearemos la hipótesis que en el rango medio de rotación del generador obtendremos la potencia intermedia, por lo tanto, con una velocidad de rotación 750 rpm, tendremos una potencia de 372.5KW.

Como tenemos la velocidad de giro, y la velocidad de fluido será tangencial, tal como se muestra en el siguiente grafico, podremos dimensionar la turbina mediante la siguiente formula:

$$r_t = v_m / \omega_t$$

Donde:  $r_t$  es el radio de la turbina

$v_m$  es la velocidad del fluido procedente del manguito

$\omega_t$  es la velocidad de giro de la turbina

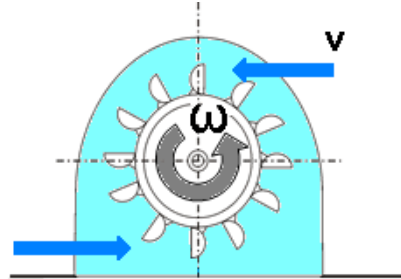


Figura 105. Ilustración del denominado efecto Venturi

Como las revoluciones de trabajo nos las encontramos en rpm y a nosotros nos interesan en rad/s, el primer paso será hacer la conversión:

$$750 \text{ rpm} \times ((2\pi) / 1 \text{ vuelta}) \times (1 \text{ min} / 60 \text{ s}) = 78.53 \text{ rad/s}$$

Una vez convertido, procedemos a dimensionar la turbina:

$$r_t = 29.89 / 78.53 = 0.3806 \text{ m}$$

$$r_t = 0.3806 \text{ m}$$

#### 4.4.6.5 Potencia útil del conjunto

En este apartado, procederemos comprobar de manera aproximada la potencia que obtendríamos en nuestro generador, teniendo en cuenta todas las fases de conversión de energía que pasa una ola, desde que esta empuja el flotador, el flotador hace mover los pistones, que a su vez hacen circular el fluido hidráulico que contienen y este, una vez pasa por el sistema de tubos que le lleva a la turbina, la acciona y genera un movimiento de rotación que hace mover el rotor y se genera energía eléctrica mediante el movimiento relativo del estator i el rotor.

En primer lugar, consideraremos que la altura media de las olas (altura significativa) es de 3 metros, como ya se ha mencionado en el apartado 4.4.5.1. , por lo tanto, basándonos en los cálculos del apartado anterior, en el que se trabajaba con la velocidad de giro intermedia del generador, por lo que supondremos que la potencia consumida también será el valor intermedio de los valores dados por el proveedor, es decir, una potencia consumida de 372.5 Kw.

A esta potencia consumida, le aplicaremos los rendimientos de los diferentes componentes, para así encontrar la potencia útil de la central. Uno de los rendimientos a aplicar es el de la turbina, que es del 90%, además se le tendrá que aplicar el rendimiento del propio generador que es del 80 %.

Una vez aplicados los diferentes rendimientos, nos quedará que la potencia útil de la central de 268.2 Kw.

En este apartado no tendremos en cuenta las pérdidas de carga producida por el circuito hidráulico por el que circula el fluido movido por los pistones, ya que el objetivo principal de este proyecto es el de modelar la central y estos cálculos harían muy extenso este apartado de cálculos.

#### 4.4.6.6 *Comprobación del oleaje soportado por el generador*

Como observaremos en la figura 100, el generador elegido, trabaja en un rango de revoluciones determinado, con la turbina que hemos dimensionado anteriormente, a continuación, comprobaremos que tipo de oleaje esta en los limites de trabajo del generador.

-En primer lugar comprobaremos el oleaje más pequeño con el que trabaja el generador, es decir, cuando este trabaja a 75 rpm, para ello, seguiremos el proceso inverso al usado en el apartado 4.4.6.4.

Primero pasaremos las rpm a rad/s para usar esta velocidad angular en la formula:

$$300 \text{ rpm} \times ((2\pi) / 1 \text{ vuelta}) \times (1 \text{ min} / 60 \text{ s}) = 31.4 \text{ rad/s}$$

$$v_m = \omega_t \times r_t$$

$$v_m = 31.4 \times 0.3806 = 11.95 \text{ m/s}$$



$$v_m = 11.95 \text{ m/s}$$

Una vez conocemos la velocidad a la que incidirán los fluidos en la turbina, mediante el efecto Venturi, calcularemos la velocidad a la que se moverán los pistones y por tanto, el flotador:

$$S_p \times v_p = S_m \times v_m$$

$$v_p = (S_m \times v_m) / S_p$$

$$v_p = (r_m^2 \times \pi \times v_m) / S_p = (3^2 \times \pi \times 11.95) / 804.2 = 0.42 \text{ m/s}$$

$$v_p = 0.42 \text{ m/s}$$

Para analizar que tipo de ola coincide con la que nos daría esta velocidad de flotador, cogeremos la ola más pequeña del estudio de José Barrufet (Figura 8), y si vemos que no coincide, iremos aumentando la medida de las olas:

Datos de la ola:

$$\text{-Altura de la ola (H) = 0.2 m}$$

$$\text{-Velocidad de avance (v}_a\text{) = 0.23 m/s}$$

$$\text{-Espacio entre olas (t) = 2 s}$$

Para encontrar la longitud horizontal usaremos:

$$L_t = v_a \times t_t$$

$$L_t = 0.23 \times 2 = 0.46$$

$$L_t = 0.46 \text{ m}$$

Una vez conocemos la longitud total, procederemos a buscar las longitudes parciales (L) sabiendo que:

$$L + L/3 = L_t$$

Haciendo mínimo común múltiplo:

$$(3 \times L + L) / 3 = L_t$$

$$4 \times L / 3 = L_t$$

$$L = 3 \times L_t / 4 = 3 \times 0.46 / 4 = 0.345$$

$$L = 0.345 \text{ m}$$

Conocidas las longitudes parciales, podremos construir dos triángulos, y mediante el teorema de Pitágoras, encontraremos las velocidades de subida y de bajada.

-Longitud de subida ( $L_s$ )

$$H^2 + (L/3)^2 = L_s^2$$

$$L_s^2 = \sqrt{H^2 + (L/3)^2} = \sqrt{0.2^2 + (0.46/3)^2} = \sqrt{0.04 + 0.39} = \sqrt{0.43} = 0.65 \text{ m}$$

$$L_s = 0.65 \text{ m}$$

-Longitud de bajada ( $L_b$ )

$$H^2 + L^2 = L_b^2$$

$$L_b^2 = \sqrt{H^2 + L^2} = \sqrt{0.2^2 + 0.46^2} = \sqrt{0.04 + 0.21} = \sqrt{0.25} = 0.5 \text{ m}$$

$$L_b = 0.5 \text{ m}$$

Una vez conocemos el recorrido de subida y de bajada y el tiempo que tarda en recorrerlo, podemos encontrar, la velocidad media a la que se moverá el flotador verticalmente:

$$v = (L_s + L_b) / t_t = (0.65 + 0.5) / 2 = 0.575 \text{ m/s}$$

$$v = 0.575 \text{ m/s}$$

Como observamos, la velocidad que tendría la turbina con la ola más pequeña, sería mayor a la mínima necesaria a la que necesita el generador para funcionar, así que el generador, con el mínimo oleaje, producirá energía.

$$0.42 \text{ (velocidad mínima del pistón)} < 0.575 \text{ (velocidad de ola más pequeña)}$$

-En segundo lugar, haremos el mismo procedimiento, pero para el valor máximo de rotación al que trabajará el generador, en este caso, a 1200 rpm.

$$1200 \text{ rpm} \times ((2\pi) / 1 \text{ vuelta}) \times (1 \text{ min} / 60 \text{ s}) = 125.67 \text{ rad/s}$$

$$v_m = \omega_t \times r_t$$

$$v_m = 125.67 \times 0.3806 = 47.83 \text{ m/s}$$

$$v_m = 47.83 \text{ m/s}$$

Una vez conocemos la velocidad a la que incidirán los fluidos en la turbina, mediante el efecto Venturi, calcularemos la velocidad a la que se moverán los pistones y por tanto, el flotador:

$$s_p \times v_p = s_m \times v_m$$

$$v_p = (s_m \times v_m) / s_p$$

$$v_p = (r_m^2 \times \pi \times v_m) / s_p = (3^2 \times \pi \times 47.83) / 804.2 = 1.68 \text{ m/s}$$

$$v_p = 1.68 \text{ m/s}$$

Para analizar que tipo de ola coincide con la que nos daría esta velocidad de flotador, cogeremos la ola más grande del estudio de Jose Barrufet (Figura 8), y si vemos que no coincide, iremos disminuyendo la medida de las olas:

Datos de la ola:

-Altura de la ola (H) = 5 m

-Velocidad de avance ( $v_a$ ) = 0.89 m/s

-Espacio entre olas (t) = 9 s

Para encontrar la longitud horizontal usaremos:

$$L_t = v_a \times t_t$$

$$L_t = 0.89 \times 9 = 8.01\text{m}$$

$$L_t = 8.01 \text{ m}$$

Una vez conocemos la longitud total, procederemos a buscar las longitudes parciales (L) sabiendo que:

$$L + L/3 = L_t$$

Haciendo mínimo común múltiplo:

$$(3 \times L + L) / 3 = L_t$$

$$4 \times L / 3 = L_t$$

$$L = 3 \times L_t / 4 = 3 \times 8.01 / 4 = 6.01 \text{ m}$$

$$L = 6.01 \text{ m}$$

Una vez conocemos las longitudes parciales, podremos construir dos triángulos, y mediante el teorema de Pitágoras, encontraremos las velocidades de subida y de bajada.

-Longitud de subida ( $L_s$ )

$$H^2 + (L/3)^2 = L_s^2$$

$$L_s^2 = \sqrt{H^2 + (L/3)^2} = \sqrt{5^2 + (6.01/3)^2} = \sqrt{25 + 4.01} = \sqrt{29.01} = 5.39 \text{ m}$$

$$L_s = 5.39 \text{ m}$$

-Longitud de bajada ( $L_b$ )

$$H^2 + L^2 = L_b^2$$

$$L_b^2 = \sqrt{H^2 + L^2} = \sqrt{5^2 + 6.01^2} = \sqrt{25 + 36.12} = \sqrt{61.12} = 7.82 \text{ m}$$

$$L_b = 7.82 \text{ m}$$

Una vez conocemos el recorrido de subida y de bajada y el tiempo que tarda en recorrerlo, podemos encontrar, la velocidad media a la que se moverá el flotador verticalmente:

$$v = (L_s + L_b) / t_t = (5.39 + 7.82) / 9 = 1.46 \text{ m/s}$$

$$v = 1.46 \text{ m/s}$$

$$1.68 \text{ (velocidad máxima del pistón)} < 0.1.46 \text{ (velocidad de ola más grande)}$$

Si observamos los valores obtenidos, la velocidad de subida del flotador con la ola más grande, sería más pequeña, que la máxima que se necesitaría para obtener el valor más grande de potencia por el generador, por lo tanto, nuestro generador siempre funcionaria, aunque no del todo cierto, y es que hay una limitación en cuanto a la carrera del pistón. A continuación encontraremos la hoja en la que aparece, las especificaciones de longitud de nuestro pistón:

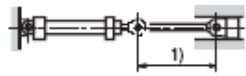
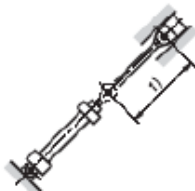












AL Ø	MM Ø	Carrera admisible para									Carrera máxima entregable	Posición de montaje
		100 bar			160 bar			250 bar				
		0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°		
40	22	195	200	215	130	135	140	40	45	55	2000	0° 
	28	385	400	445	295	300	320	215	220	225		
	36	535	555	625	425	430	460	320	325	335		
50	28	285	295	310	205	210	215	120	130	135	3000	45° 
	36	535	555	625	425	430	460	320	325	335		
63	36	390	400	440	290	295	305	200	205	210	6000	90° 
	45	655	685	790	530	545	585	410	415	430		
80	45	500	515	560	375	385	400	240	260	280	6000	90° 
	56	815	850	900	665	680	735	520	525	545		
100	56	610	630	705	470	480	505	280	295	355	6000	90° 
	70	985	1030	1240	820	845	930	650	660	695		
125	70	770	800	900	600	615	650	360	380	465	6000	90° 
	90	1295	1360	1670	1095	1130	1265	885	900	955		
140	90	1145	1200	1430	945	970	1070	740	755	790	6000	90° 
	100	1400	1475	1840	1190	1230	1390	965	985	1050		
160	100	1230	1285	1530	1010	1040	1140	790	800	840	6000	90° 
	110	1490	1555	1930	1250	1290	1455	1005	1030	1090		
180	110	1305	1365	1630	1085	1095	1200	825	840	880	6000	90° 
	125	1675	1765	2210	1420	1470	1870	1150	1175	1260		
200	125	1500	1580	1930	1240	1290	1430	985	1005	1060	6000	90° 
	140	1885	1965	2520	1590	1660	1910	1305	1340	1440		
220	140	1620	1710	2180	1360	1415	1630	1090	1120	1200	6000	90° 
	160	2075	2200	3000	1810	1890	2280	1510	1560	1730		
250	160	1885	1990	2570	1600	1670	1930	1300	1330	1440	6000	90° 
	180	2330	2475	3370	2040	2135	2570	1710	1770	1960		
280	180	2075	2200	2900	1775	1880	2170	1450	1490	1620	6000	90° 
	200	2510	2670	3700	2200	2310	2820	1850	1920	2140		
320	200	2170	2300	3070	1850	1940	2290	1500	1550	1700	6000	90° 
	220	2590	2760	3850	2260	2360	2920	1890	1960	2200		

Figura 106. Tabla de dimensiones de pistones del fabricante Rexroth Bosch (2)

Como vemos, la carrera máxima entregable por este tipo de pistones es de 6 metros, con lo que, si nos encontramos con una ola con una altura mayor a estos 6 metros, el vástago llegaría hasta el fondo del pistón, si esto pasara con cierto violencia, como sería nuestro caso en el que el flotador va con cierta velocidad de avance, provocaría daños en este componente, seguramente irreparables. Para evitar esta situación, se coloca una articulación en la estructura de la central y un brazo neumático capaz de elevar los componentes en el caso de que el oleaje superara la carrera de los pistones, como se muestra en la siguiente ilustración:



Figura 107. Imagen donde se muestra el pistón neumático

#### **4.4.7 Estudio de impacto ambiental del sistema propuesto**

La energía de las olas es considerada como una de las formas más respetuosas con el medio ambiente para la generación de electricidad. Sin embargo, dependiendo del régimen de regulación, puede ser que los proyectos sean objeto de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) como parte de la actividad de desarrollo de proyectos con el fin de minimizar y mitigar los impactos potenciales de un proyecto, para este caso nos centraremos en la legislación europea: Informe de la Comisión Europea sobre la aplicación y eficacia de la Directiva de EIA. Las áreas de enfoque para una evaluación del impacto ambiental se definen ámbitos los cuales se vean afectados por las actividades tanto de funcionamiento, como a la hora del montaje y desmantelamiento de los sistemas. En este apartado se describen algunas de las áreas que pueden requerir la evaluación dentro de un EIA.

##### *Impacto Visual*

El sistema propuesto tiene un impacto visual considerable, ya que toda su estructura se encuentra por encima del nivel del mar, aunque tiene la ventaja de que al situarse en un acantilado, el impacto es menor que si se situara en una zona costera. Además, para mejorar su visibilidad, se le pueden montar unas luces intermitentes amarillas, como las del sistema Pelamis. Estas luces son visibles a 2 millas náuticas por la noche.

##### *Impacto en los hábitats costeros*

Este nuevo sistema tendría un impacto muy reducido en los hábitats costeros, ya que la estructura se monta en tierra y el espacio utilizados por las mismas es muy pequeño, solo ocupan el espacio en que se ancla la viga del armazón en el suelo. Si tenemos en cuenta el hábitat marino, no se vería afectado, ya que, el flotador, que es la única parte que puede estar bajo el nivel del mar, se ve sumergido parcialmente sin efectos para estos hábitats. Por otro lado, teniendo en cuenta que más del 80% de la energía de las olas disponibles en alta mar se puede perder, naturalmente, por efectos de la fricción con el fondo del mar antes de llegar a la costa, y teniendo en cuenta factores tales como las variaciones en la dirección de las olas, las máquinas flotantes no afectarán a la

periodicidad de las olas incidentes, se prevé y se ha modelado el proyecto para que tenga un efecto insignificante en el medio costero.

#### *Impacto en los hábitats del fondo marino*

Como se ha mencionado con anterioridad, no hay ninguna parte que se instale en el fondo marino, por lo tanto, este no se vería modificado al instalar uno de estos sistemas.

#### *Impacto en la Pesca*

Se sabe que los peces se congregan alrededor de los objetos de los fondos marinos, ya sean los arrecifes de roca o estructuras artificiales, aunque en este caso la estructura que se encuentra debajo del agua es muy pequeña, lo más probable es que atraigan a bancos de peces y, además, proporciona un refugio de las actividades pesqueras, las poblaciones de especies de peces indígenas podrían aumentar. Se prevé que esta no tendrá ningún efecto adverso sobre los propios peces.

#### *Impacto sobre las aves y pájaros de la costa*

En la zona en torno a un proyecto propuesto es probable que experimente un aumento en el número de peces, que a su vez puede proporcionar una mejor alimentación para las aves locales. Además de esto, la estructura puede actuar como zonas de descanso para los grupos de aves locales y transitorias. Las máquinas no plantean grandes obstáculos a volar a las aves debido a su bajo perfil. Tampoco plantea un gran riesgo para las aves que estén flotando cerca de la estructura o estén posadas sobre ellas ya que el movimiento de los flotadores no es muy agresivo. Por lo tanto la presencia de las máquinas es poco probable que cause un impacto negativo en el comportamiento de la población de aves locales.

#### *Impacto sobre los Mamíferos Marinos*

Los flotadores del sistema propuesto, son similares en dimensiones a otros edificios marinos con la ventaja añadida de que son estacionarias, por lo que es poco probable que presente problemas importantes de la navegación de los mamíferos marinos, es sumamente improbable.

Al estar situado en la costa, no influiría en los grandes mamíferos.

### *Impacto en los otros usuarios del mar*

Es probable que un estudio del tráfico marítimo y evaluación de riesgos de navegación se requieran para identificar, cuantificar y ayudar a mitigar este riesgo. Por lo tanto, es importante que a través de la evaluación de impacto ambiental a las partes interesadas (por ejemplo el envío comercial, la pesca y las industrias involucradas, los militares y los usuarios recreativos) estén comprometidas e involucradas en este proceso desde el principio. En relación con esto hay muchas opciones disponibles para la mitigación del riesgo de colisión, como marcar con boyas cardinales, pintado de las máquinas, esquemas de iluminación, previo aviso a los navegantes, la información del puerto local y los sistemas de radar.

### *Emisiones de Ruido*

Con especial atención a los mamíferos marinos, ha habido un interés cada vez mayor en los efectos del ruido bajo el agua y el alcance de las actividades que producen el sonido se ha ampliado y entró en nuevas áreas. Los buques utilizados para el montaje de los proyectos será la fuente de los niveles de mayor energía. El movimiento del proyecto es relativamente lento con secuencias cortas, donde cualquier sonido emitido será relativamente bajo.

#### **4.4.8 Valoraciones**

El objetivo de este proyecto, además de modelar dos centrales undimotrices ya existentes, era el de crear una nueva central undimotriz partiendo de las mejores ideas extraídas de cada una de las centrales elegidas, por lo tanto el resultado obtenido debería de ser más eficiente que las anteriores, esto es lo que procedemos a valorar a continuación:

Conociendo la potencia de los sistemas Pelamis, en la que cada sistema genera 700Kw, energía suficiente para satisfacer la demanda anual de electricidad de unos 500 hogares, y conociendo la potencia generada por el Marmotor, que según la documento de José Barrufet, un flotador era capaz de producir 2 caballos marmométricos, procederemos a valorar el nuevo sistema propuesto.

En primer lugar, pasaremos a unidades de medida del sistema internacional la potencia dada por el Marmotor, ya que el término caballo marmométrico no aparece como unidad de medida, aunque



José Barrufet si que explica que un caballo marmométrico equivale a 0.5 caballos de vapor. El caballo de vapor (CV) es una unidad de medida de potencia que se define como la potencia necesaria para elevar verticalmente un peso de 75 kgf a 1 m de altura en 1 s, aunque actualmente se encuentre en desuso y no pertenezca al sistema de medida internacional, si que tiene una equivalencia con las mismas, la equivalencia es la siguiente:

$$1CV = 735W$$

Por lo tanto, si la potencia obtenida por cada flotador es de 4 caballos marmométricos, esto equivale a 2 caballo de vapor, por lo que la potencia obtenida por cada flotador en una unidad de medida del sistema internacional será de 1470 W o lo que es lo mismo 1.47 Kw. Si comparamos este valor obtenido con la potencia de la nueva central propuesta, que es de 268.2 Kw, obtendremos que la potencia es mucho mayor en la nueva central, partiendo de la base de que el Marmotor es una central en 1885, ya que la tecnología ha avanzado más de un siglo, podemos concluir que las diferencias entre ambas sean totalmente normales.

Comparando el valor de potencia obtenido por el nuevo sistema, que es de 268.2 Kw, con los 700Kw que genera un sistema Pelamis, es decir, del orden de 2.5 veces mas producción de energía, se podría valorar como negativo, pero lo cierto es que hay que valorar ciertos aspectos:

-La superficie que ocupa un Pelamis (sin contar la altura) es de 720m<sup>2</sup>, 180 metros de largo por los 4 metros de diámetro que mide cada uno de los módulos, en cambio el nuevo sistema propuesto, tan solo ocupa 6.75 m<sup>2</sup>, ocupa alrededor de 100 veces menos que un Pelamis, así que si ocupáramos una extensión equivalente a la ocupada por un solo Pelamis, dejando un metro de seguridad entre central y central, podríamos colocar un total de 64 unidades de la central propuesta, que multiplicándolo por los 268.2Kw que generaría cada una, obtendríamos una potencial total generada de uno 17000Kw, lo que equivale a un 95% de energía producida más en la misma superficie.

-Una de las desventajas con las que parte este nuevo diseño, es que hemos partido de la base de usar un generador hidráulico que estuviera en el mercado, para poder tener resultados realistas con los que poder valorar las diferentes ideas. Uno de los motivos de la diferencia entre potencias entre ambos sistemas es tan acusada, en el caso de que este tipo de central consiguiera un presupuesto para ser construida, se podría pedir a un proveedor que creara un generador especializado para unas condiciones de trabajo concretas. Por lo tanto, el resultado de poder elegir un abanico más amplio de las condiciones de trabajo, se podría producir mayores cantidades de energía.



También hay que destacar el trabajo hecho con los programas de modelado virtual, en los que se ha partido de un nivel muy básico, y que mediante la utilización de estos y ayuda exterior, se ha podido llegar a un nivel de presentación que consideramos más que aceptable, mas si tenemos en cuenta desde el punto que se partía.

Por otra parte, se han superado las expectativas que se tenían a la hora de diseñar la nueva central propuesta, de la que en un principio se intentó que fuese un diseño basado en una de las centrales estudiadas inicialmente, pero que finalmente, a la hora de realizarla, se ha partido de un diseño casi de cero, más tarde se han integrado componentes de las centrales anteriormente mencionadas y otros elementos con tal de solventar problemas que ocurrían sobre la marcha y de los que no se tenía ninguna referencia para solventarlos.

En contraposición, hay algunos temas que han quedado pendientes en cuanto a la realización del proyecto, y que no se han llegado a hacer o por falta de conocimiento, o por falta de tiempo. Uno de estos puntos, ha sido el de intentar diseñar de forma eficiente el sistema de tubos por los que circulan los fluidos hidráulicos que conectan la parte del flotador con la turbina e incluso integrar estos tubos a la estructura que sujeta los pistones, el motivo básico ha sido la falta de conocimiento de este punto y la falta de tiempo para poder adquirir el conocimiento necesario. Otro de los puntos que hubiera sido interesante estudiar es el sistema de obtención de energía del sistema Pelamis, ya que se conoce como funciona a grandes rasgos, no se ha podido encontrar la información de todos los componentes usados y la función de cada uno de ellos, aunque sabemos de su existencia porque en algunos artículos de páginas webs aparecen mencionados, la empresa que construye estos sistemas no provee esta información.

Finalmente, cabe apuntar, que en el caso que hubiera habido un periodo de tiempo más largo para la elaboración del proyecto, hubiera contactado con un proveedor de generadores, con tal de conseguir un tipo de generador capaz de adaptarse a las condiciones de trabajo en las que se encontraría la central propuesta, con tal de optimizar la energía obtenida, minimizar la perdidas en el menor grado posible y poder obtener un resultado que teóricamente se acercara más a la realidad y poder tener unas valoraciones más exactas.

## 7 Presupuesto

La elaboración de este proyecto, se ha centrado en la búsqueda de información de las centrales estudiadas y en la ejecución del modelado en 3D de las mismas, por lo tanto, el presupuesto de este, se centrará en las horas utilizadas en llevar a cabo las tareas anteriormente mencionadas. Los programas usados en el modelado han necesitado un tiempo previo de uso de estos mismos, este tiempo usado no se ve reflejado en las horas, pero si en el precio por hora.

A continuación, encontraremos un desglose de lo expuesto con anterioridad:

Operación	Detalle	Horas	Precio (€)	
			Hora*	Total
Interpretación y conocimiento del funcionamiento de las centrales	Marmotor	50	30	1500
	Pelamis	10	30	300
Diseño de la nueva central	Propuestas de mejora, cálculos, etc.	75	30	2250
Modelado	Marmotor	20	50	1000
	Pelamis	10	50	500
	Nueva central	15	50	750
Texturizado	Marmotor	4	50	200
	Pelamis	1	50	50
	Nueva central	5	50	250
Animación, renderizado y postproducción	Marmotor	30	50	1500
	Pelamis	10	50	500
	Nueva central	50	50	2500
<b>Total bruto</b>				11300

\*en el precio de la hora estan incluidas las horas-hombre y las horas-maquina

	Iva	16%	1808
<b>Total Presupuesto</b>			13108

Figura 109. Tabla de presupuesto por sistema

## 10 Bibliografía

### Libros

Polo Encinas, M. *Turbomáquinas hidráulicas*. Méjico: Editorial Limusa, 1975.

Viejo Zubicaray, M y Álvarez Fumadas, J. *Bombas: Teoría, diseño y aplicaciones*. Méjico: Editorial Limusa, 1975.

Barrufet y Veciana, J. *Aprovechamiento del movimiento de las olas del mar como fuerza motriz por el Marmotor Barrufet*. Barcelona: Establecimiento tipográfico de los sucesores de Ramírez y C<sup>a</sup>, 1885.

Barrufet y Veciana, J. *Las olas del mar. Apuntes que se relacionan con el movimiento de las mismas*. Barcelona: Establecimiento tipográfico de los sucesores de Ramírez y C<sup>a</sup>, 1885.

### Páginas Web

Wave dragon → <http://www.youtube.com/watch?v=mcTNkoyvLFs&feature=related>

Turbina axial → <http://www.youtube.com/watch?v=F9thXnEzRJE&feature=fvw>

Undimotriz → <http://www.youtube.com/watch?v=CysmMBzKrMQ&feature=related>

<http://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>

<http://www.youtube.com/watch?v=1IIJ6qLGDAs>

<http://www.youtube.com/watch?v=wFxYLxcTfcQ&feature=related>

[http://www.youtube.com/watch?v=IYe\\_eYu-ykY&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=IYe_eYu-ykY&feature=related)

[http://www.youtube.com/watch?v=0IQ\\_B7xdeGw&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=0IQ_B7xdeGw&feature=related)

[http://www.youtube.com/watch?v=tt\\_lqFyc6Co&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=tt_lqFyc6Co&feature=related)

Trabajo general →

<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/8326/3/02.pdf>

<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>

Pato → <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia17/HTML/articulo03.htm>

Molino de cerroja → <http://miojomorado.blogspot.com/2009/01/un-molino-entre-la-marisma-molino-de.html>

<http://www.babeloo.es/espana/cantabria/cantabria/escalante/molino-de-cerroja>

Noja → <http://www.cantabrijoven.com/noja/arte/arte5.html>

Isla cristina→

[http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques\\_Tematicos/Estado\\_Y\\_Calidad\\_De\\_Los\\_Recursos\\_Naturales/Fauna/guia\\_ornitologica\\_suratlantico/Area\\_4\\_Es.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estado_Y_Calidad_De_Los_Recursos_Naturales/Fauna/guia_ornitologica_suratlantico/Area_4_Es.pdf)

Cadiz→ <http://www.rutasdelsur.es/node/210>

Principios→ <http://www.arrakis.es/~errota/molinom.htm>

Cantabria→ <http://sobrecantabria.com/2009/11/13/el-molino-del-jado-en-argonos/>

Portu errota→ <http://www.arrakis.es/~errota/>

Molinos england→ <http://victorian.fortunecity.com/holbein/871/>

Marmotor→ <http://www.fotovoltaiica.com/pioneros.pdf>

Plataforma de aprovechamiento→<http://www.scribd.com/doc/22814482/Plataforma-para-capturar-energia-de-las-olas>

Catalogo de tubos (Marmotor)→ <http://www.vemacero.com/Tablas/A53MP.pdf>

Momentos de inercia→ <http://www.slideshare.net/kurtmilach/clculo-de-momento-de-inercia>

Estudio impacto ambiental→ <http://www.ingenieroambiental.com/newinformes/EIA.htm>

EPAM→ <http://www.sri.com/news/releases/120808.html>

<http://www.youtube.com/watch?v=UHS-BpgvQaM>

Pelamis→ <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=170>

<http://www.pelamiswave.com/>

<http://www.morissarroes.es/2011/10/pelamis-la-serpiente-energetica/>

Impacto ambiental→ <http://www.pelamiswave.com/wp-content/uploads/2010/08/Environmental-Impact-Assessment.pdf>

<http://www.pelamiswave.com/project-development/environmental-impact>

Caballo de vapor→ [http://es.wikipedia.org/wiki/Caballo\\_de\\_vapor](http://es.wikipedia.org/wiki/Caballo_de_vapor)

Estudio impacto ambiental→ <http://www.eia.es/nueva/publicaciones.html#>

Densidades→ [http://www.construaprende.com/Tablas/Modulos\\_elasticidad.html](http://www.construaprende.com/Tablas/Modulos_elasticidad.html)

Generador

eléctrico→<http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/magnet/generador.html>

<http://spanish.alibaba.com/product-gs/micro-hydro-generator-472833135.html>

<http://spanish.alibaba.com/product-gs/low-speed-horizontal-axis-hydro-generator-301151101.html>

<http://spanish.alibaba.com/product-gs/sfw990-series-hydro-generator-247515863.html>

Madera teca→ <http://www.una.ac.cr/inis/docs/teca/temas/ARTICULO%20LPF%201.pdf>

Madera laminada → <http://www.bricomarkt.com/madera/vigas-de-madera/vigas-de-madera-laminada.html>

Las olas → [http://www.todosurf.com/surfologia/anatomia\\_olas.php](http://www.todosurf.com/surfologia/anatomia_olas.php)

Altura significativa de las olas→ <http://www.fomento.gob.es/>

Manguitos→ [http://www.tuningvenair.com/manguitos\\_silicona/ceramica/638](http://www.tuningvenair.com/manguitos_silicona/ceramica/638)

Turbina pelton→ <http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/fisica-y-tecnologia-energetica/recursos/05-Hidraulica.pdf>