3.-Sistema generador

3.1. Estado de la técnica-Principio general de operación

La literatura existente relativa a los sistemas convertidores de energía de las olas (WEC - Wave Energy Converter) suelen clasificar dichos dispositivos según su localización y sus principios de operación.

La localización está muy unida al desarrollo histórico de los WEC's. Los dispositivos estáticos instalados en la línea de costa fueron los primeros dispositivos fabricados y comercializados para extraer la energía de las olas, y se consideran los WEC's de *primera generación*.

En la búsqueda de mayor densidad de energía en las olas ha sido necesario instalar dispositivos en mar abierto, aunque esto suponga un aumento en los costos. Este grupo de sistemas se han reunido dentro de lo que se ha llamado la *segunda generación*.

Y por último esta la *tercera generación*, cuya ubicación se realiza offshore. Estos dispositivos son anclados en el fondo del mar y los sistemas de extracción se basan en los principios de extracción que se han usado en la primera y segunda generación.

Históricamente estos dispositivos no han sido viables comercialmente. Sin embargo debido a los adelantos en tecnologías *offshore* y la cada vez mas necesaria búsqueda de fuente de energías inagotables está haciendo que actualmente estos dispositivos sean muchos más atractivos.

Los métodos de extracción de energía o lo que se ha venido llamando principios de operación se pueden clasificar en tres grupos principales:

1. Columna de agua oscilante(Oscillating Water Colunm OWC)
2. Almacenadores(Overtopping devices OTD)
3. Flotadores (Wave Activated Bodies WAB)

Los sistemas situados en la línea de costa son normalmente construcciones de hormigón armado y emplea los métodos de columna de agua o el de almacenamieto.

Cerca de la costa se pueden desarrollar dispositivos que pueden operar de cualquiera de los tres principios antes mencionados.

El grupo de flotadores se puede dividir en subgrupos según el principio de movimiento del flotador. Movimiento vertical absoluto o relativo, y giro absoluto o relativo. Una característica inherente a estos dispositivos es que necesitan una fuerza restauradora que lleve el flotador a la posición inicial en cada caso.

Los convertidores son dispositivos que transforman la energía del oleaje en energía útil, tienen que ser capaces de resistir los embates del mar y de funcionar eficientemente para las amplias gamas de frecuencias y amplitud de las olas.

A continuación se resumen en la *figura 3.1.1*, los distintos sistemas antes descritos.

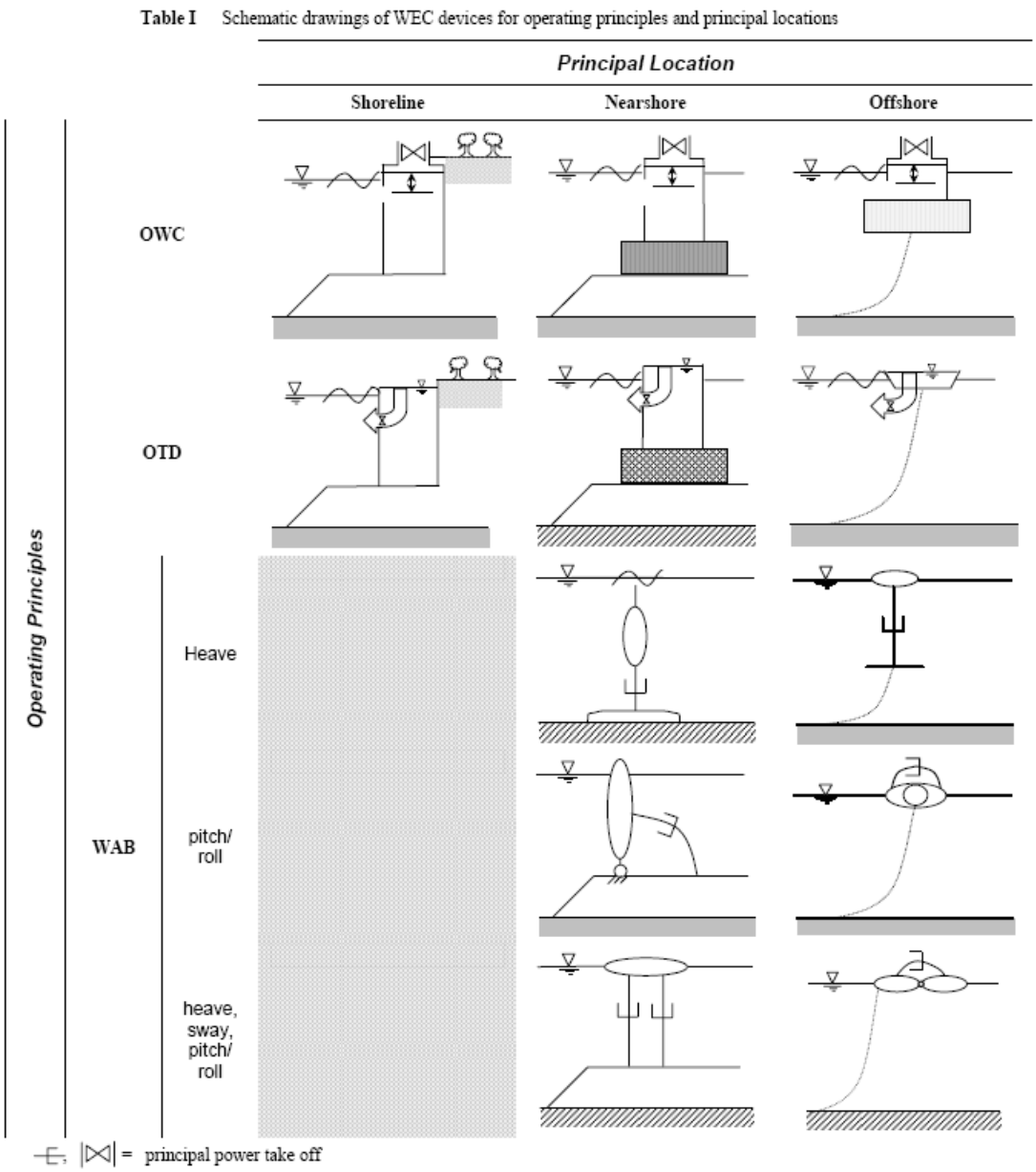

figura 3.1.1

Actualmente dos de los sistemas que han pasado la fase de prototipos y están comenzando a crearse los primeros parques en explotación son el dispositivo llamado Pelamis de fabricación inglesa, y el desarrollado por la empresa americana OPT.

El dispositivo Pelamis, *figura 10*, se fundamenta en el sistema de extracción offshore con generación por el giro relativo entre dos cuerpos, y es capaz de producir hasta 200kW.

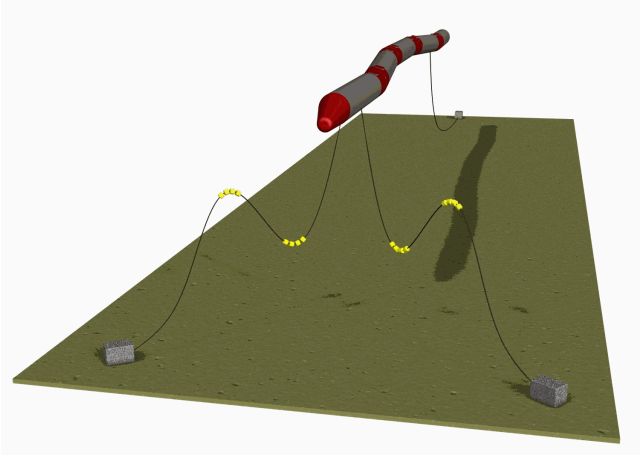

figura 3.1.2

El dispositivo desarrollado por OPT, *figura 3.1.2*, se basa en el sistema de extracción offshore con generación por el desplazamiento vertical relativo entre dos partes. El principio de funcionamiento es el mismo que se va a desarrollar en este proyecto, la diferencia fundamental está en que el sistema de generación de este es mediante una turbina hidráulica, mientras que el que aquí se desarrolla se basa en un motor oleohidráulico, que presenta una mejora en el rendimiento y en la capacidad de regulación lo que conlleva a conseguir mayor eficacia del mismo.

figura 3.1.3

En la dirección de internet www.wave-energy-centre.org aparece un listado de links, conectando con todas las páginas de las empresas y escuelas que están desarrollando su propio generador.

Para concluir, no se puede afirmar actualmente que un diseño determinado sea indiscutiblemente el mejor para su fabricación en serie. Pero, sin lugar a duda, se está en el camino de alcanzar aparatos que sean competitivos.

Una opción muy ventajosa, sin lugar a duda, es la que se desarrolla en este proyecto, por su eficiencia, sencillez y economía.

3.2. Descripción del prototipo

El prototipo de generador que se va a desarrollar en el proyecto se basa en el principio de operación llamado flotador de localización offshore con movimiento vertical absoluto.

La variación de la altura de la superficie marina con respecto el fondo se va a traducir en un movimiento relativo entre las dos partes de un cilindro oleohidráulico, que va a generar un caudal. Este caudal se lleva a un motor hidráulico que acciona un generador eléctrico.

El generador se puede dividir en dos partes, la fija y la móvil, unidas a través del cilindro.

La parte fija, es decir, la que no se mueve con respecto el fondo marino, se compone del lastre, el cable, el vástago y los pistones.

El lastre es un bloque de hormigón, su peso debe ser mayor que todas las fuerzas que actúan sobre el generador para así impedir su desplazamiento.

El cable de acero hace de link entre el lastre y el vástago. Al ser una instalación offshore se dan profundidades que varían entre los 50 y 200 metros. El cable debe estar siempre tenso para garantizar que se genera caudal tanto en el movimiento ascendente como en el descendente del ciclo. Y debe soportar todos lo ciclos de carga a los que se va a someter en la vida del generador.

A la altura del flotador está el vástago con sus dos pistones, pues el cilindro es de los denominados tandem.

El cilindro tandem tiene dos cámaras totalmente independientes una de la otra. Esto es necesario para conseguir las dos propiedades intrínsecas a un sistema dinámico, la constante elástica (cilindro superior) y el coeficiente de amortiguamiento (cilindro inferior). Una cámara está ligada al sistema de suspensión y la otra al sistema de amortiguación o generación.

Como se pretende que la boya siga el movimiento de la ola incidente, el muelle debe estar comprimido cuando el mar esté en calma, de tal forma que si desciende el nivel del agua por debajo de la línea de aguas la suspensión es

capaz de hacer descender la boya, pero manteniendo el cable tenso. De esta forma se garantiza la generación tanto en el descenso como en el ascenso.

La camisa del cilindro y la boya son los dos elementos que unidos rígidamente forman el flotador, que es la parte móvil del generador.

La camisa del cilindro está unida rígidamente a la boya mediante una brida con junta en el fondo de la boya y simplemente apoyada en la planta y cubierta.

La boya es el elemento que recibe el empuje de Arquímedes, generador de la energía. Cuando el nivel del mar esté por encima o por debajo de la línea de aguas, la boya va a recibir un empuje diferente al empuje de equilibrio, que va a provocar un movimiento ascendente o descendente respectivamente del flotador. En su interior se van a instalar los diferentes sistemas que componen el generador.

En la siguiente *figura 3.2.1*, se representan los cuatro estados en los que se puede encontrar el generador. En el primer estado (E1), el generador no se encuentra sujeto al fondo marino, la línea de aguas es la correspondiente al peso del generador. Para el segundo (E2), se representa el mar en calma y el generador instalado. Se puede contemplar como la línea de aguas ha subido en la boya, puesto que el peso de volumen de agua que tiene que ser desalojado es igual al peso del generador más el empuje de la suspensión cuando el cilindro se encuentra a mitad de recorrido. Consiguiendo la precompresión de la suspensión antes mencionada.

El tercer y cuarto estado (E3 y E4), corresponden al funcionamiento del generador. El E3 cuando el nivel del agua está por encima de la línea de aguas, lo que provoca un movimiento ascendente del flotador y la consecuente generación de caudal que proporciona potencia. Y cuando el nivel del agua está por debajo de la línea de aguas, lo que induce a un movimiento descendente del flotador y la equivalente generación de caudal. La parte superior del cilindro del circuito de suspensión (el de arriba) se comunica con una cámara de Nitrógeno gas que permita mantener la presión cuasiconstante a 1 bar. Así se evita que entre aire marino, que favorecería la corrosión del cilindro.

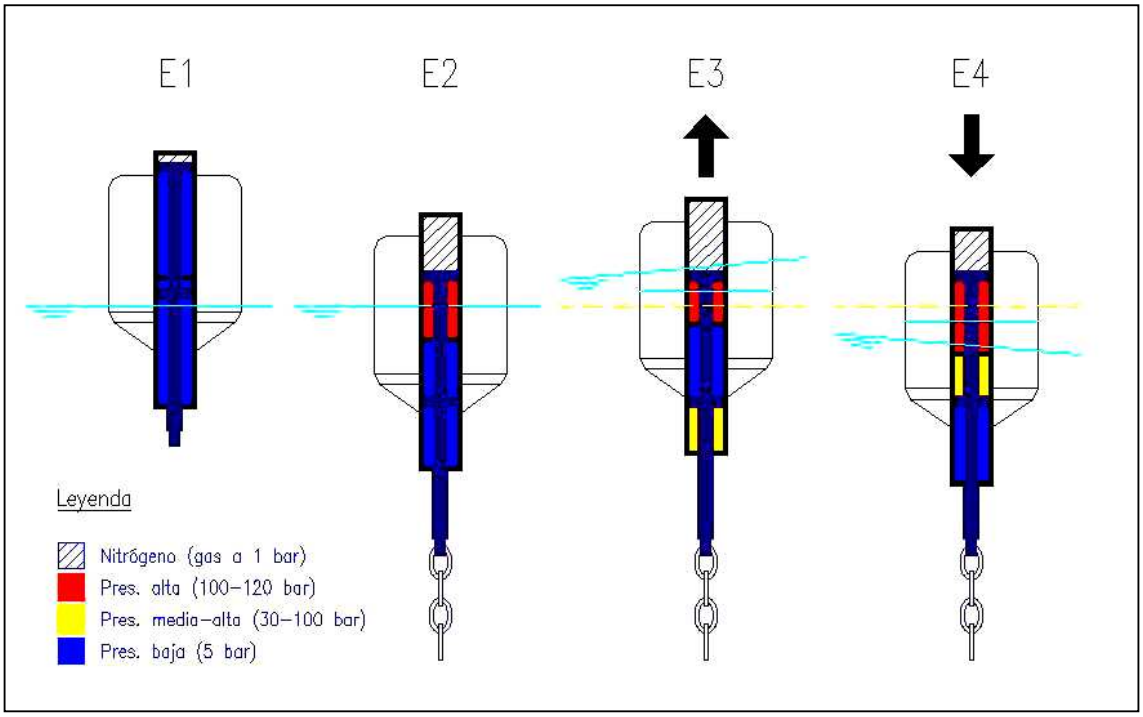

figura 3.2.1

A continuación se detallan las diferencias del generador que aquí se va a desarrollar con otros ya creados con el mismo principio de funcionamiento:

- El movimiento relativo se traduce en un caudal pequeño de aceite oleohidráulico a alta presión, en lugar de un caudal de agua grande con un salto de presión bajo. El rendimiento de un motor oleohidráulico volumétrico es bastante mayor que el de una turbina.
- La precomprensión de la suspensión permite generar caudal tanto en el movimiento ascendente como en el descendente.
- La gran capacidad de regulación que se va a dotar al generador para optimizar la generación de energía en función del estado de la mar.
- Aprovechar elementos comerciales muy utilizados en la industria en general y off-shore en particular, como son todos los componentes oleohidráulicos, juntas, etc.

Una vez definidas las partes del generador se va a describir los sistemas de los que se compone:

- Árbol
- Sistema hidráulico de generación.
- Sistema hidráulico de suspensión.
- Sistema eléctrico.
- Sistema de llenado/vaciado de los compartimentos.
- Sistemas de medidas y control.

Árbol de potencia

En el árbol de potencia se hace la conversión de la energía que transporta el aceite a alta presión en energía eléctrica.

El árbol de potencia lo compone el motor hidráulico, los volantes de inercia, las poleas, el generador eléctrico, los apoyos y los acoplamientos. La velocidad de giro del generador y motor es de 1500 rpm siempre que esté generando potencia y las poleas de relación ponen el volante de inercia a 6000 rpm.

El motor hidráulico de pistones axiales de caudal variable permite adaptarse al estado de la mar, variando la cilindrada en función del periodo y altura de las olas. La cilindrada del motor es aquella que girando a 1500 rpm el volumen de aceite hidráulico que pasa por él en un periodo es igual al volumen generado por el cilindro en el periodo anterior.

El par entregado por el motor hidráulico es una función periódica de periodo la mitad del de la ola, y la intensidad generada por el generador debe tener unas variaciones muy controladas. Es necesario, por tanto, un volante de inercia que absorba las variaciones del par. El volante de inercia se encarga de disminuir las variaciones en la velocidad angular del árbol, y de hacer cuasi-constante la intensidad (potencia) generada por el generador eléctrico.

Circuito hidráulico de generación

Este circuito va unido a las conexiones de la camisa inferior del cilindro tandem. Es el encargado del amortiguamiento del sistema dinámico, es decir, de la producción de energía. Se compone de la cámara inferior del cilindro tandem, de un conjunto de antiretornos, acumuladores, electroválvulas y del motor hidráulico de caudal variable. El conjunto de antiretornos son los encargados de que el flujo en el motor sea siempre en el mismo sentido y que la generación sea válida tanto en el movimiento ascendente como descendente.

Se pretende conseguir que la fuerza (de amortiguamiento) ejercida por el sistema de generación en el sistema dinámico sea los más parecida a la fuerza ideal de un sistema amortiguado, es decir, que sea proporcional a la velocidad. En el circuito hidráulico diseñado la fuerza del sistema de generación va siempre en sentido contrario al del movimiento de la boya y la fuerza es proporcional a la presión del circuito de alta. Es por esto por lo que se han situado diferentes acumuladores de distinto volumen y presión de llenado que hacen que el aumento de la presión sea casi parecida al aumento de la velocidad, pues al aumentar la velocidad aumenta el volumen acumulado lo que se traduce en un aumento de presión.

Circuito hidráulico de suspensión

La suspensión tiene dos finalidades, por un lado darle la propiedad elástica al generador y por otro lado hacer que el cable esté siempre tenso y así garantizar la generación en el descenso.

Esta formado por la parte superior del cilindro tandem, y dos acumuladores con una electroválvula que permite conectar o desconectar uno de los acumuladores en función de la determinación del sistema de regulación.

El sistema de suspensión nos va a proporcionar dos constantes elásticas, según esté uno o dos acumuladores al circuito. Las dos constantes que se requieren se calcularán en el capítulo de cálculos, y serán aquellas que permitan variar la frecuencia natural del sistema dentro del rango de variación del periodo de las olas para las que se diseñe el generador.

La segunda función encomendada al sistema de suspensión es la de generar caudal en el descenso. Para conseguir dicho objetivo la presión en el circuito de suspensión debe ser siempre superior a la presión del circuito de generación. Es decir, la presión de carga de los acumuladores de la suspensión debe ser mayor a cualquiera de las presiones de carga de los acumuladores del sistema generador.

Circuito eléctrico

El generador eléctrico es excitado a 1500 r.p.m. por el motor hidráulico, y está gobernado por un variador de frecuencia regenerativo, el cual se encarga de regular el par resistente del generador, al par que da en cada instante el motor hidráulico y por otro lado el volcar a la red eléctrica la intensidad generada.

El cable que conecta el generador eléctrico con el transformador, situado en la costa, debe ser un cable blindado de la sección requerida.

Para la generación eléctrica se debe contar con el know-how de las empresas dedicadas a generación y transporte de energía eléctrica.

Sistema de llenado/vaciado de los compartimentos

Con una turbobomba autocebante se va a vaciar o llenar el compartimiento inundable de la boya. Con esto se consigue modificar la masa total del flotador, modificando así la frecuencia natural del sistema, aproximándola a la frecuencia de la ola en cada instante.

Sistemas de medida y control

El generador debe contar con computador que gobierne los distintos parámetros variables de este de una forma autónoma, a la vez que permita la comunicación con una sala de control situada en tierra desde donde se supervise el funcionamiento de cada uno de los generadores, e incluso desde donde se puedan actuar sobre el gobierno del generador.

Se pretender hacer para que sirvan como inputs del sistema de control las siguientes medidas:

- Posición del pistón (velocidad y aceleración)
- Estado de la mar (periodo y altura de las olas)
- Nivel de llenado de los compartimentos
- Potencia elécrica generada
- Estado de las electroválvulas
- Velocidad de giro del árbol de potencia.

Con los valores obtenidos de las medidas, un software de control las procesará y tomará las decisiones que hagan aumentar la potencia generada. Las decisiones tomadas por el software serán los outputs.

3.3. Análisis - Ecuaciones de movimiento

En este apartado vamos a realizar el análisis dinámico del sistema anteriormente descrito. Los resultados del análisis se van a emplear para el diseño del generador, y para conocer la potencia generado en función del estado de la mar.

En este análisis se va a considerar el flotador como una masa puntual que se mueve en la dirección vertical y sobre la que actúan las diferentes fuerzas implicadas.

El comportamiento del generador se obtiene resolviendo la ecuación diferencial que gobierna el movimiento. Esta ecuación de movimiento resulta de la ecuación de equilibrio de las fuerzas que actúan sobre el generador en cada instante.

A continuación se muestra un esquema de las fuerzas involucradas en el flotador. En la *figura 3.3.1* se detallan las fuerzas que aparecen cuando la boya se mueve en sentido positivo. Las fuerzas de color verde a la derecha de la imagen son las fuerzas que se ejercen sobre la boya, y a la izquierda de color negro las que se ejercen sobre el vástago.

Igualmente en la *figura 3.3.2* se representan las fuerzas sobre la boya y vástago cuando el movimiento de la boya es descendente.

Se puede apreciar como el empuje de Arquímedes que recibe la boya es siempre positivo, y si diferente en valor, lo que permite una fuerza de generación de distinto signo en cada movimiento pero de similar valor, lo que garantiza generar potencia tanto en movimiento ascendente como en el descendente.

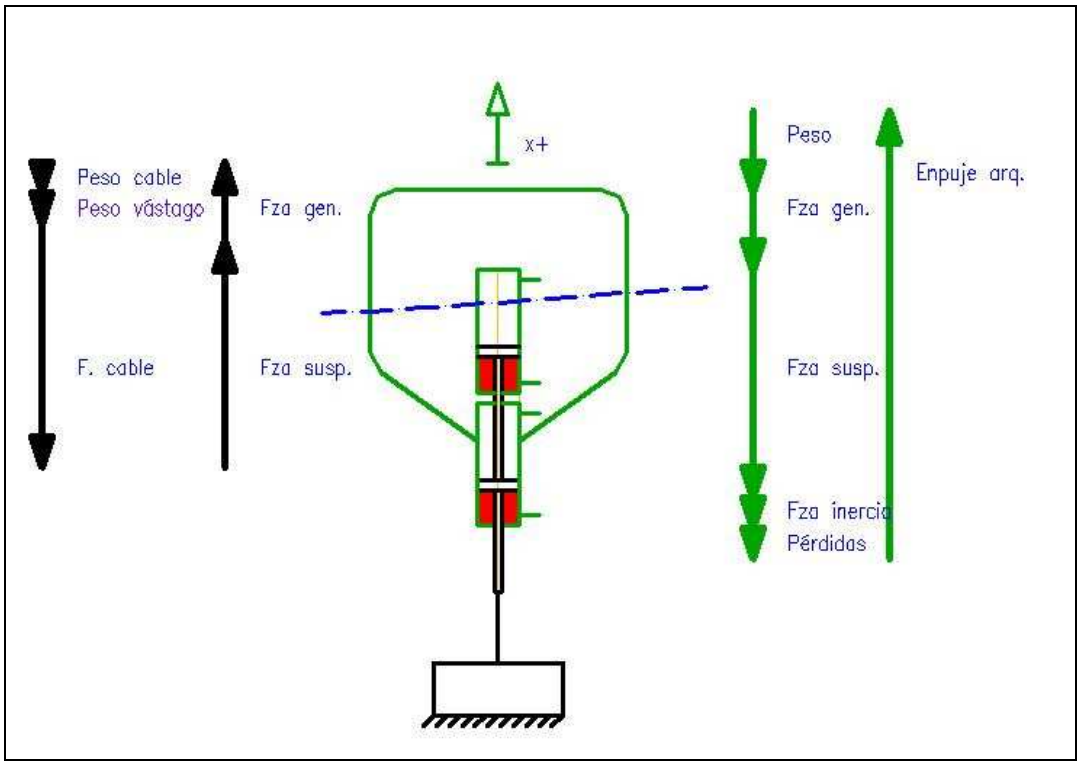

figura 3.3.1

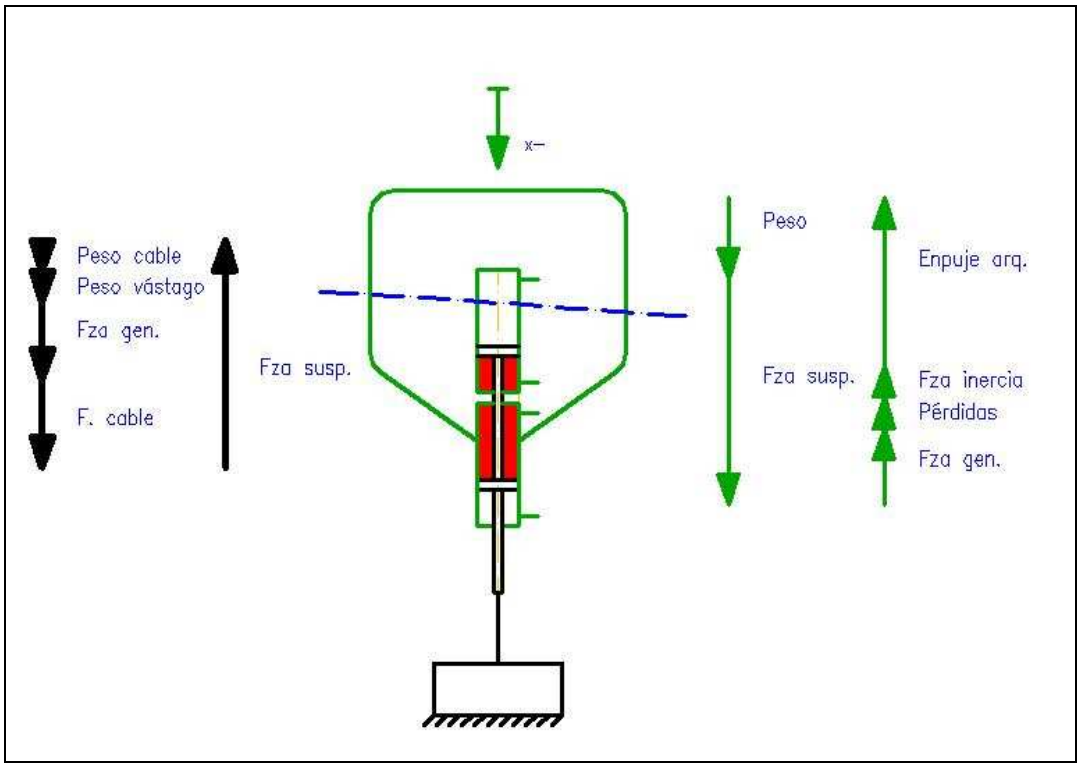

figura 3.3.2

La ecuación de equilibrio de fuerzas que gobierna el movimiento vertical del flotador es la siguiente:

$$E_{arq,\,flotador} = P + F_{c1} + F_{c2} + I + per$$

A continuación se describe cada uno de los términos de la ecuación.

$E_{arq,\,flotador}$ es el empuje de Arquímedes, igual al peso del volumen de agua desplazado. El volumen de agua desalojado es función de la diferencia entre la posición de la línea de aguas instantánea y la línea de aguas que tendría la boya con un mar en calma.

$$E_{arq,\,flotador} = \rho \cdot A_{flotador} \cdot (h(t) - x(t))$$

siendo ρ la densidad del agua de mar, $A_{flotador}$ el área en planta del flotador, $h(t)$ la altura de la ola que a su vez es función del tiempo t y $x(t)$ la posición del flotador en el instante t (tomando como referencia el estado de reposo). Ambos referidos a un sistema de coordenadas fijo con el fondo del mar.

El peso del cuerpo flotante, P. Del diseño se tiene un valor bastante aproximado. Además este peso es variable, pues el flotador se va a equipar con un compartimento inundable para poder modificar la masa, y conseguir una mejor adaptación al cada estado de la mar.

$$P = m \cdot g$$

F_{c1}, F_{c2} son las fuerzas que ejerce la presión del aceite en la cámara 1 y en la cámara 2 del cilindro tandem.

$$F_{cil} = p_{cil} \cdot a_{cil}$$

siendo P_{cil} la presión hidráulica dentro de la cámara (presión manométrica) y a_{cil} el área libre del pistón.

I es la fuerza correspondiente a la aceleración de la masa flotante:

$$I = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}(t)$$

El conjunto de pérdidas se van a englobar dentro de la fuerza, per, y se va a estimar proporcional a la velocidad del flotador.

$$per = c \cdot \frac{d}{dt} x(t)$$

Si introducimos las ecuaciones particulares de cada fuerza en la ecuación del movimiento tenemos:

$$\rho \cdot A_{flotador} \cdot (h(t) - x(t)) = m \cdot g + p_{c1} \cdot a_{cil} + p_{c2} \cdot a_{cil} + m \cdot \frac{d^2}{dt^2}(t) + c \cdot \frac{d}{dt} x(t)$$

La ecuación de movimiento obtenida nos muestra una ecuación diferencial de segundo orden característica de los sistemas dinámicos amortiguados.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN:

Del conjunto de parámetros se van a diferenciar entre los que son valores constantes, no variables con el tiempo y que son fijados en el diseño, y los valores que tienen la posibilidad de ser modificados en función de las características de las olas en cada instante.

Un valor constante y que queda determinado en el diseño es el $A_{flotador}$, este viene determinado por el diámetro de la boya. Para determinar el diámetro que va a tener el flotador hay que tener en cuenta, la potencia que se pretende obtener, el material con el que se va a construir, los medios de transporte disponibles, etc.

Nota: Existen estudios que demuestran que el diámetro del cuerpo flotante no influye en la energía que es capaz de absorber, en cambio otros ponen un límite máximo al diámetro, a partir del cual el aumentar este no implica un aumento en la capacidad de extraer energía a la ola. No obstante, presumiblemente la potencia nominal del GMP(Generador marino puntual) si tenga relación con el diámetro del flotador por no ser ideal el comportamiento que se consiga. Sobre todo hay que tener en cuenta la longitud de onda de las olas para las que se diseña, pues su valor debe ser muy inferior.

La densidad del mar tiene unas variaciones mínimas que no van incurrir en modificaciones sensibles al comportamiento del generador.

El área del cilindro a_{cil} es otro parámetro que hay que fijar en el diseño, para el cual hay que tener en cuenta el rango de presiones en el que va a trabajar el circuito hidráulico, el rendimiento del motor hidráulico, el caudal de aceite que se va a mover, las fuerzas que se van a producir que dependen del diámetro del flotador. Otro factor a tener en cuenta es la rigidez del cilindro, pues este va a estar sometido a otras cargas perpendiculares al eje debidas a temporales.

El coeficiente de amortiguamiento debido a las pérdidas se desconoce por completo, por lo que no se va a considerar ya que su influencia es muy pequeña. Si se considerará en el cálculo de la energía producida un rendimiento global.

Quedan por analizar los parámetros que permiten regulación. El oleaje presenta estados muy diferentes, por lo que el sistema debe de adaptarse a cada estado para obtener la máxima potencia posible.

La masa del flotador, m, este parámetro se va a descomponer en dos parámetros, por un lado la masa fija del conjunto de elementos que integran el flotador y por otro la masa de agua acumulada en los compartimentos inundables.

$$m = m_f + m_v$$

Otro parámetro de regulación que permite este sistema es la presión dentro de las dos cámara del cilindro tandem. Cada una de los cilindros del cilindro tandem se conectan a circuitos diferentes por lo que la presión dentro de cada uno de los cilindros será diferentes y estarán gobernadas por leyes de comportamiento diferentes.

El cilindro superior se va a conectar al circuito hidráulico que se encarga de darle al sistema capacidad de suspensión, es decir, hacer que el sistema sea elástico.

El circuito de suspensión consiste en conectar directamente la cámara inferior a un acumulador , que va a hacer la vez de muelle elástico, de tal forma que empuje siempre al flotador hacia abajo y al vástago hacia arriba.

El acumulador, puede ser un acumulador de gas o de resorte. Para el diseño del GMP se va a emplear un acumulador de gas, por ser mas habitual en la industria. Se puede evaluar desarrollar uno de muelle para esta aplicación.

La presión del circuito de suspensión es la que debe garantizar que el cable del lastre este siempre a tracción, es decir, garantizar en todo el ciclo de la ola que el cable esté en tensión. Y a la vez darnos la rigidez elástica más apropiada al estado de la mar.

La presión del circuito de generación es otra variable gobernable, además es deseable que esta evolucione de una forma progresiva con la velocidad del flotador, y conseguir una amortiguación viscosa.

En la figura 3.3.3 se representa un esquema básico de los circuitos descritos.

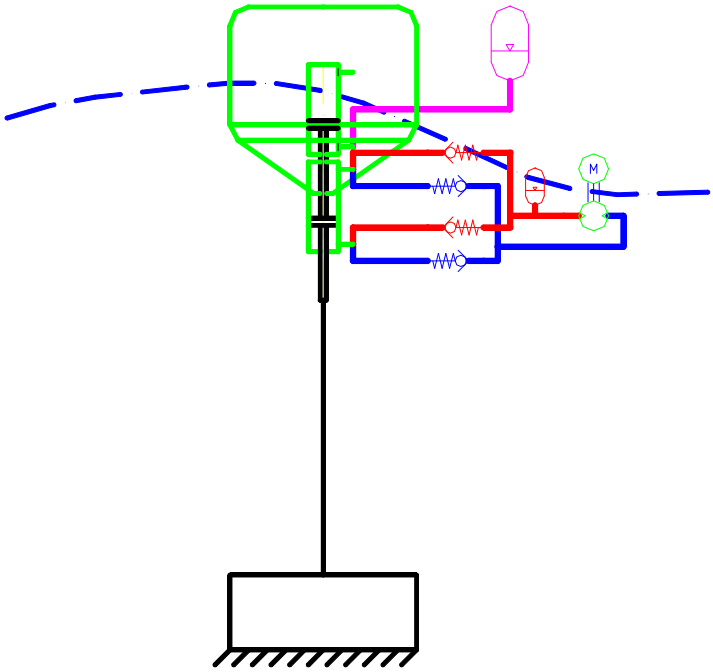

figura 3.3.3

Se puede apreciar los distintos antiretornos, el/los acumuladores, la válvula de seguridad y el motor hidráulico, que se conecta directamente al generador.

El vástago es, al contrario de lo habitual de un cilindro, el sólido fijo cuya ecuación estática es:

$$E_{arq,vástago} + F_{c1} + F_{c2} = P_{vástago} + F_{cable}$$

De esta ecuación se puede conocer la tensión del cable en cada instante.

RESOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL FLOTADOR:

La resolución de la ecuación se va a hacer para una ola de forma senoidal con una sola frecuencia, que se corresponde con la mar tendida. Cuando el mar este bravo, presentado la superficie una ondulación caótica (ruido blanco), el generador discriminará de forma natural aquellas olas para las que no se ha diseñado, es decir, no se ve afectado su comportamiento por olas de pequeña longitud de onda (poca altura). Actúa de filtro, caracterizado por el tamaño e inercia, captando solamente las olas que transportan mayor energía.

Para una ola de onda regular con una altura y un periodo determinado, partiendo del estado de reposo como condiciones iniciales de resolución de las ecuaciones diferenciales. El permanente se alcanza pasado un tiempo del instante inicial.

Para simular el comportamiento del generador son necesarios datos concretos del generador que se resumen a continuación (*Tabla 3.3.1*) y que han salido del diseño realizado.

Variable	Valor	Unidad
Masa fija	22.000	Kg
Masa variable	55.000	Kg
K suspensión	34.540	N/m
Fza max cilindro generación (150 bar)	323.812	N
Area boya	19,625	M2

Tabla 3.3.1

En la *figura 3.3.4* se refleja un pantallazo de la simulación realizada en el programa *SIMULINK* de *MATLAB.*

Partiendo del equilibrio de fuerzas se obtiene la aceleración, y de la sucesiva integración se obtiene la velocidad y posición de la boya. En la parte inferior se hacen las operaciones necesarias para obtener la distintas fuerzas que son función tanto de la velocidad como de la posición y que intervienen en el equilibrio.

Por último se hacen dos procesos, el cálculo de la potencia y energía generada y la representación gráfica de distintos valores, como son la altura de la ola y la posición de la boya.

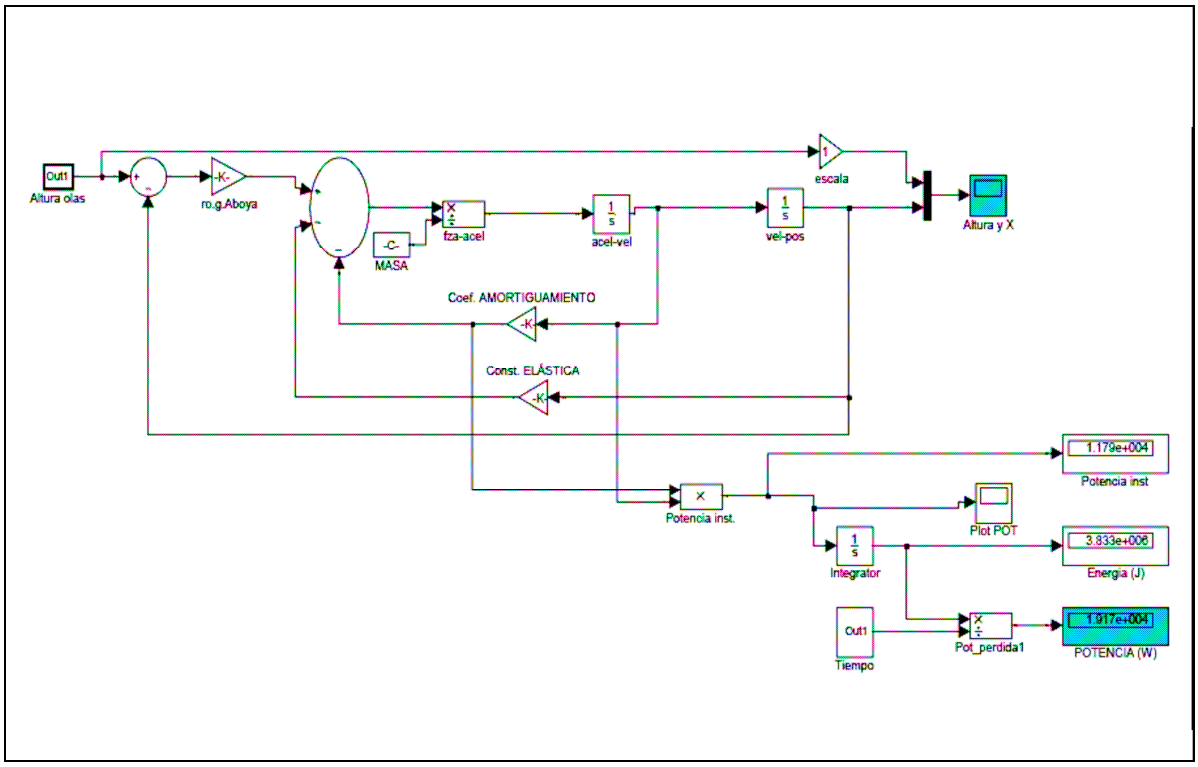

figura 3.3.4

En la siguiente gráfica (*figura 3.3.5*) se representa la evolución en el tiempo de la altura de la ola (curva amarilla) y la posición de la boya (curva rosa). Se puede apreciar como la boya no alcanza la amplitud de la ola, siendo la diferencia de cotas en cada instante la fuerza generadora.

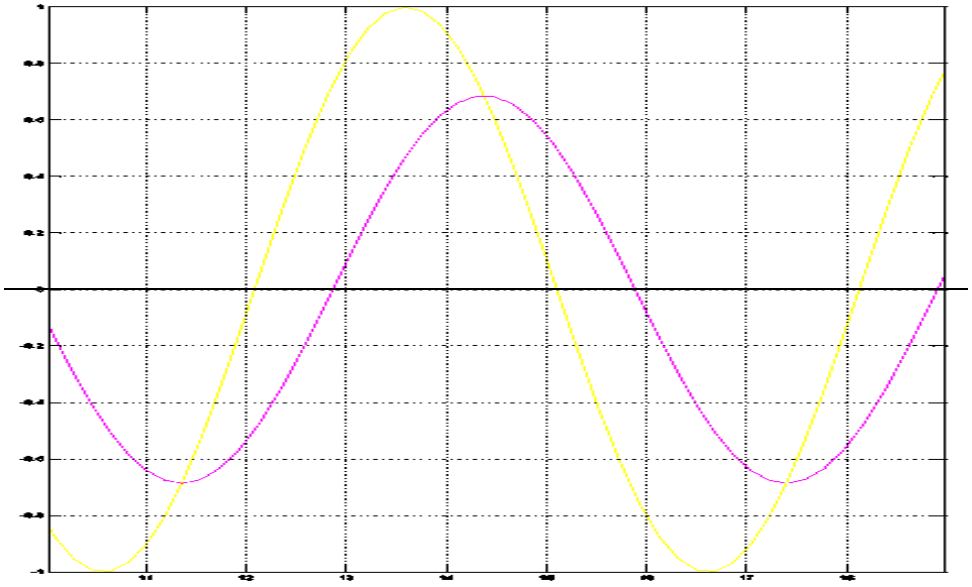

figura 3.3.5

En la siguiente figura se pueden ver las curvas de la evolución en el tiempo de la posición (curva amarilla), velocidad (curva rosa) y aceleración (curva azul) de la boya.

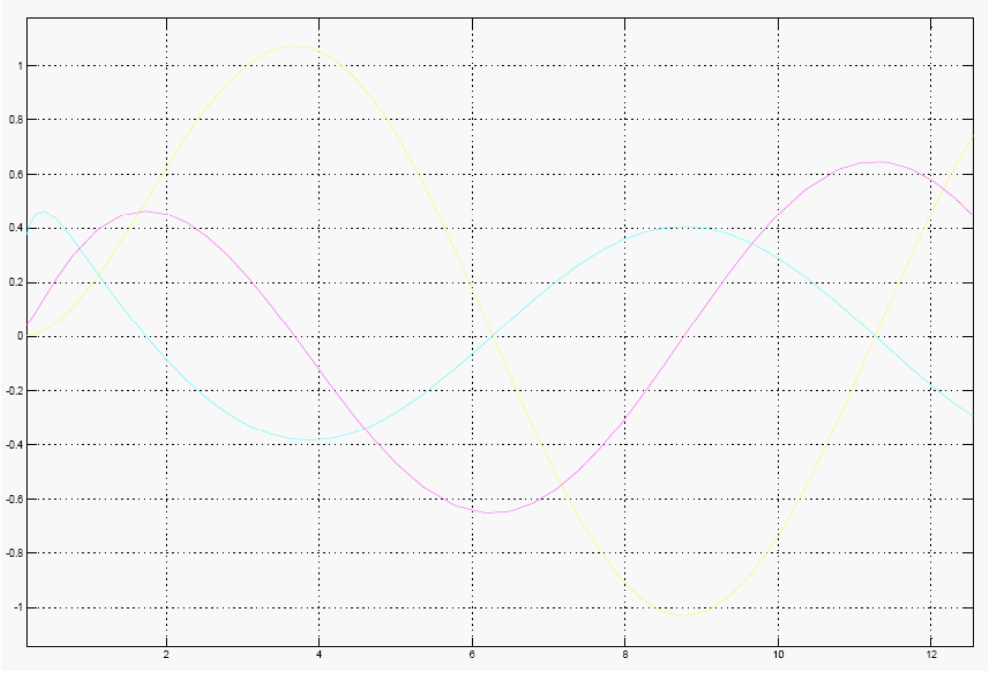

figura 3.3.6

3.4. Potencia – Energía anual

Conocer la energía producida por un generador a lo largo de un año es un dato muy interesante para conocer la rentabilidad de una inversión, o lo que es lo mismo saber a priori cuanto debe costar el generador para que sea competitivo con otras energías.

No obstante, para este proyecto, el costo final del generador diseñado no es un factor determinante, pues se trata de un prototipo cuyo objetivo primordial es verificar que el sistema proyectado da unos resultados positivos. Una vez probado el prototipo, una labor importantísima es la de reducir costos así como optimizar la producción de energía.

Primeramente se debe de determinar la zona donde se va a instalar el generador y así poder conocer los estado de la mar que se dan en dicho lugar. En este caso se ha seleccionado el Golfo de Cádiz, que en comparación con otras costas del mundo se podría decir que es una zona con un nivel de olas medio.

El Instituto Nacional de Meteorología, a partir de ahora INM, facilita tablas y gráficos con datos del oleaje en distintas costas de España. La tabla que aquí se va a emplear es la que recoge el estado de la mar, altura y periodo de las ola, y le asigna el porcentaje de tiempo que el mar presenta ese estado a lo largo de un año. Estos datos están en la *tabla 3.4.1*.

Lugar:	Boya de Cádiz
Año:	2005
Eficacia:	77.877

...		Tp (s)											Total
		<=1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	>10.0	
Hs (m)	<=0.5	---	---	0.220	0.837	0.881	0.220	0.352	0.308	0.264	0.308	1.937	5.328
	1.0	---	---	0.396	4.183	9.643	7.001	1.057	1.541	2.422	4.447	8.587	39.278
	1.5	---	---	---	0.837	6.253	9.643	2.818	1.145	1.321	2.730	5.328	30.075
	2.0	---	---	---	---	0.440	3.919	3.435	0.749	0.396	0.572	4.491	14.003
	2.5	---	---	---	---	---	0.528	2.818	1.101	0.132	0.264	1.497	6.341
	3.0	---	---	---	---	---	0.088	0.661	1.145	0.132	0.264	0.749	3.038
	3.5	---	---	---	---	---	---	0.132	0.440	0.088	0.088	0.440	1.189
	4.0	---	---	---	---	---	---	---	0.352	---	---	0.044	0.396
	4.5	---	---	---	---	---	---	---	0.088	0.088	---	0.176	0.352
	5.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.000
	> 5.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.000
Total		---	---	0.616	5.856	17.217	21.400	11.273	6.869	4.844	8.675	23.250	%

Tabla 3.4.1

Para cada uno de los estados de la mar que se reflejan en la *tabla 3.4.1*, le corresponde una potencia ideal máxima que es posible extraer, como se puede ver en la tabla 3.4.2. Las olas con altura inferior a 1 m y superiores a 3,5 m no se incluyen en el cálculo, por no considerarse aprovechables por el generador. En esta tabla los valores de potencia son los ideales, ya que no se ha considerado el rendimiento global de la máquina.

CADIZ

Potencia según estado de la mar

H(m)/T(s)	4	5	6	7	8	9	10	12
1	13,00	12,20	11,00	9,00	8,60	8,10	7,22	5,60
1,5	29,00	27,00	24,50	22,70	20,10	18,70	16,25	12,81
2		29,20	44,00	39,40	35,90	33,30	28,89	22,76
2,5			69,50	61,10	56,20	52,04	45,15	35,57
3			101,00	88,30	80,90	74,94	65,01	51,22
3,5				120,10	110,10	102,20	88,49	69,72

Tabla 3.4.2

Estos datos se han sacado del modelado numérico realizado en MATLAB, modificando los parámetros dentro de los rangos admisibles por diseño.

La gráfica de la figura 3.4.1 representa gráficamente la potencia para los estados de la mar considerados. Se observa como la potencia es creciente con la altura y decreciente con el periodo.

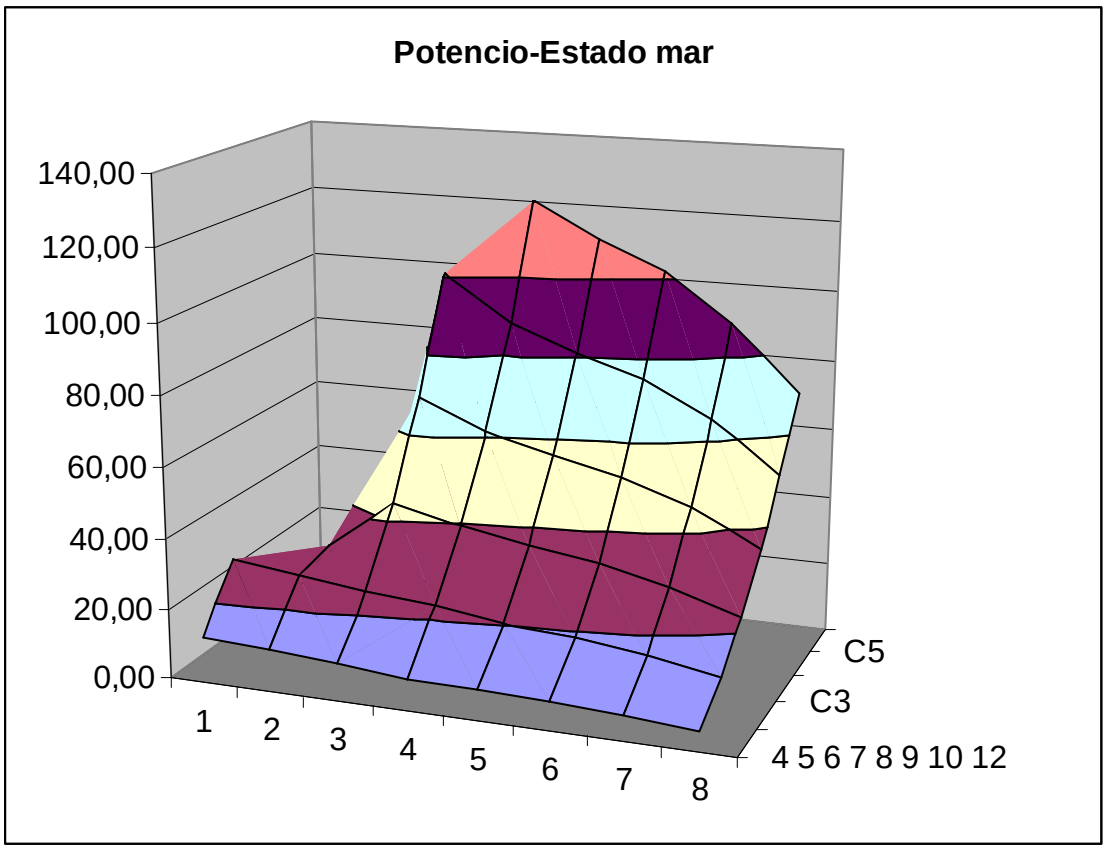

figura 3.4.1

Considerando un año completo, con 8760 horas, la energía generada en kwxhora, y en cada estado es la presentada en la *tabla 3.4.3*.

Energía anual producidad según estado de la mar

H(m)/T(s)	4	5	6	7	8	9	10	12
1	953,18	10.305,67	6.746,16	833,34	1.187,93	1.718,55	2.812,60	2.740,76
1,5	10.626,49	14.789,60	20.695,81	5.603,65	2.016,07	2.163,96	3.886,16	5.978,85
2	0,00	1.125,48	15.105,39	11.855,70	2.356,49	1.155,16	1.447,60	8.954,05
2,5	0,00	0,00	3.214,57	15.082,95	5.420,36	601,75	1.044,16	4.864,55
3	0,00	0,00	778,59	5.112,89	8.114,43	866,55	1.492,06	3.360,67
3,5	0,00	0,00	0,00	1.388,74	4.243,69	787,84	682,15	2.687,29

Kwxhoras/año	194.600,85	Rendimiento	0,8	Kwxhoras/año	155.680,68

Tabla 3.4.3

El total de energía ideal que se produciría en una año es de 194.600 kwxhora, sin embargo es evidente que existirá un rendimiento global del generador que se va a fijar en un 80%. Por lo que se espera producir en un año un total de 155.680 kwxhora.

Considerando un consumo eléctrico anual medio por casa de 4355 kwxhora/año, cada generador cubriría el consumo de 35 viviendas.

EFECTO DIMENSIONAL DE LA BOYA:

El estudio de fuerzas y potencia realizado se han basado en la hipótesis de que la boya era un punto al que se le asociaba el área de la boya real. La boya, como es evidente, debe tener unas dimensiones que proporcione el área considerada en los cálculos. Y por lo tanto, a cada punto de la superficie de la boya le va a corresponder una altura diferente.

En este apartado se pretende calcular la desviación entre la descripción de la onda por un punto y la que ve una superficie circular.

Para una ola de 3 m, de periodo 8 s, le corresponde una longitud de onda de 100 m. Para un circulo de 5 m de diámetro la altura media que ve el conjunto de puntos que forma el circulo si avanza sobre ella un frente de olas paralelo, la desviación máxima no supera el 1%. En la figura 3.4.2 se ve a escala el caso antes mencionado.

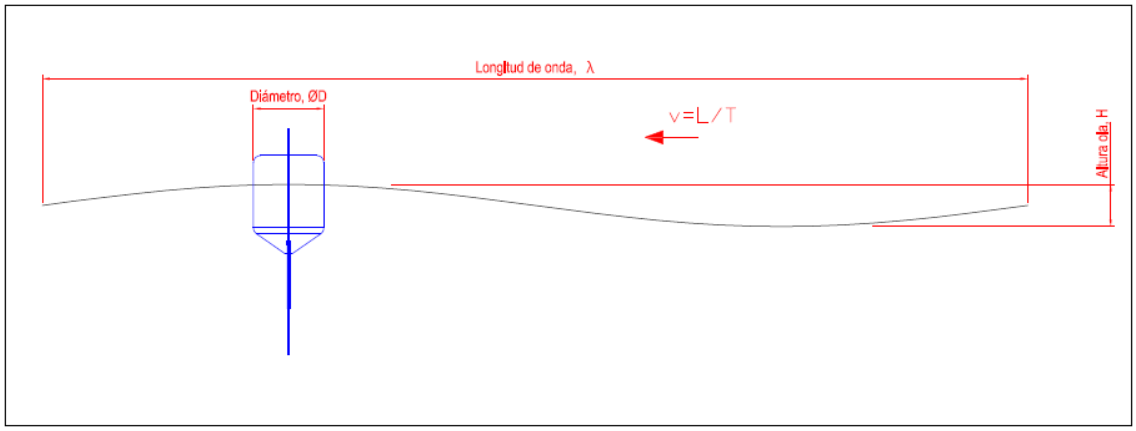

figura 3.4.2

Las figuras 3.4.3 y 3.4.4 representa en línea azul la altura de la ola, y en amarillo la altura media de la ola que ve la sección circular de la boya. La variación es inapreciable.

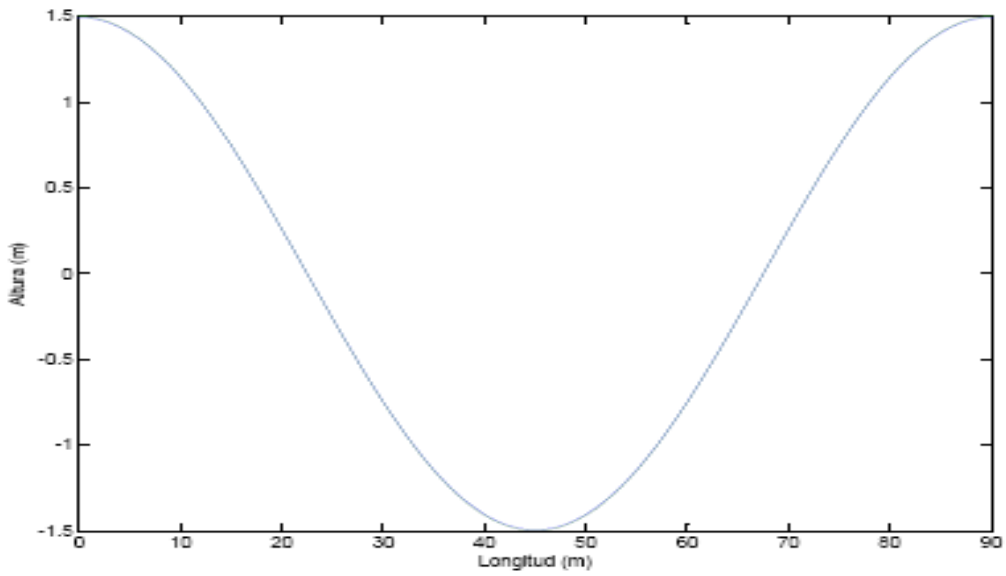

figura 3.4.3

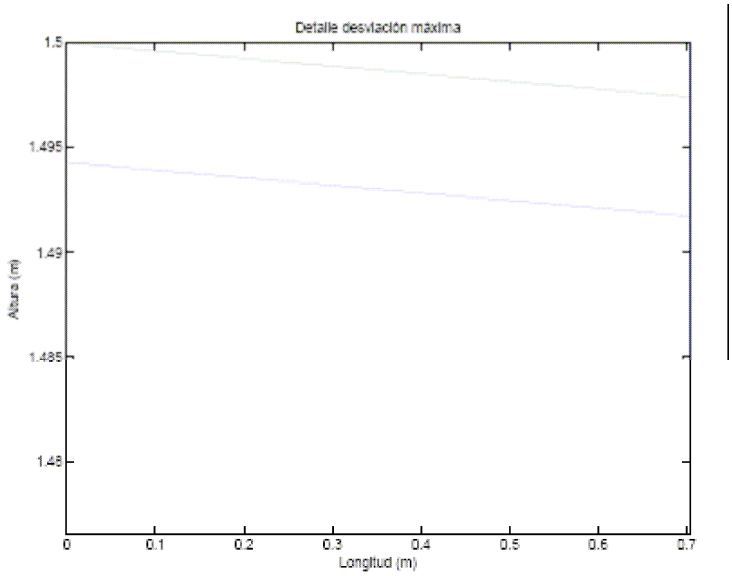

figura 3.4.4

Por tanto se acaba de demostrar el acierto de emplear el modelo puntual del generador para su análisis.

La elección de una boya de 5 m de diámetro está basada en varios argumento:

La desviación de la altura media con respecto la de la ola no es significativa, inferior al 1%.

La presiones nominales máximas de trabajo se han fijado en 120 bar, y por las fuerzas que aparecen del propio funcionamiento obligan para la boya de 5 m a poner un cilindro de 300 mm de diámetro de camisa y 250 mm de diámetro de vástago. Si la boya fuese más grande obligaría a aumentar la presión nominal o a aumentar el cilindro. En un principio se ha descartado.