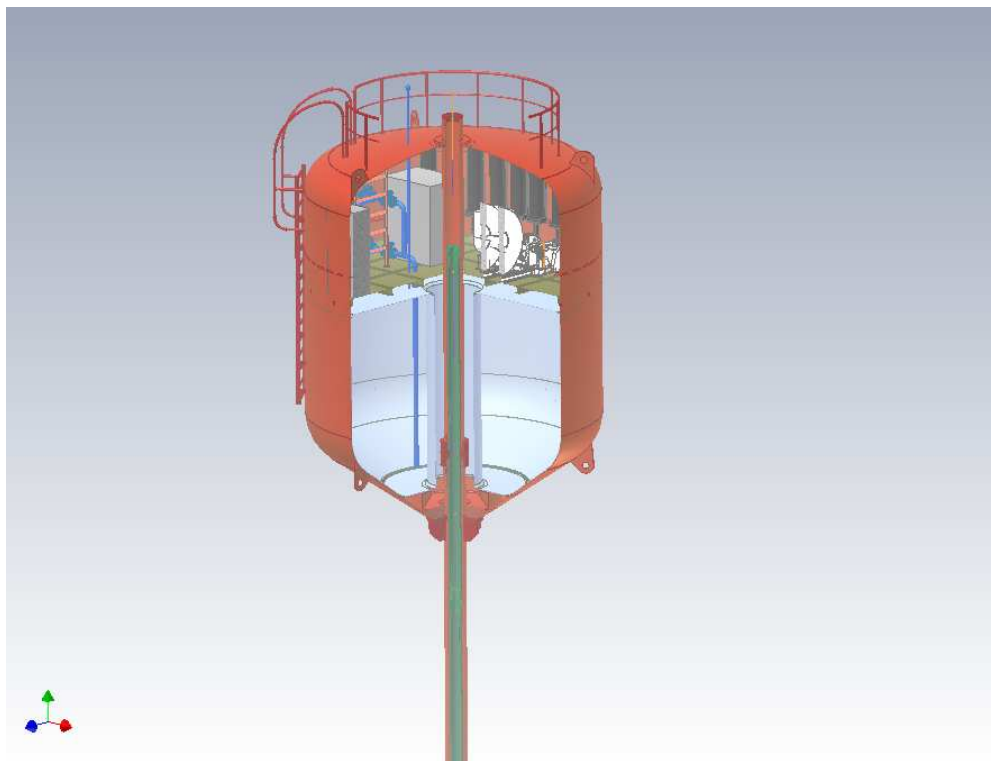


## 4.- Diseño

La energía generada anualmente depende mucho del espectro de estados que presente el mar en el lugar donde se ubique el generador, y evidentemente también influirá en su diseño.

Por ejemplo la amplitud máxima de la ola de diseño y las mareas usuales del lugar influyen directamente en la carrera del cilindro. El tamaño máximo de las olas en caso de temporal influirán en la rigidez de la boya.

La potencia máxima generada marcará el tamaño del árbol de potencia, así como el tamaño de las instalaciones.



**figura 4.1**



Y el circuito conectado al cilindro inferior del cilindro tandem a los dos lados del pistón es el sistema de generación.

A continuación se van a describir los dos circuitos, y justificar numéricamente el dimensionado los elementos principales que los componen.

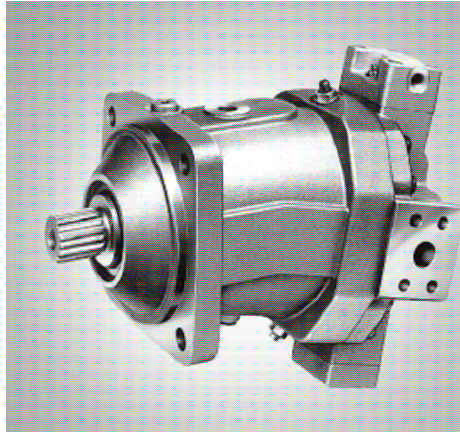
#### 4.1.1 Circuito de generación

Por la búsqueda de producir caudal tanto en el ascenso como en el descenso de la boya, y para conseguir que el motor hidráulico siempre gire en el mismo sentido se han colocado los cuatro antiretornos.

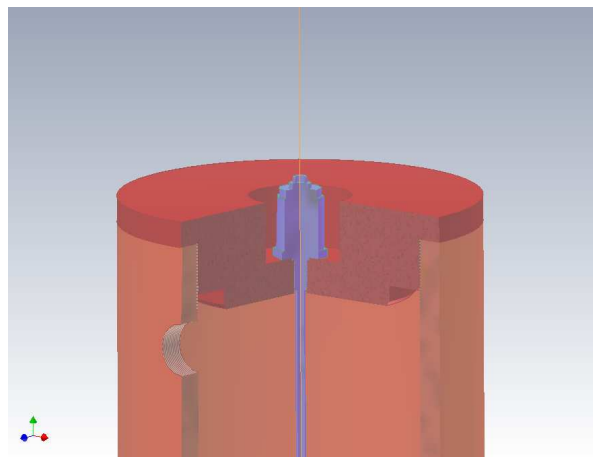
El grupo de acumuladores de vejiga de diferente tamaño se colocan para conseguir una evolución en la presión lo más parecida a la del amortiguamiento viscoso (proporcional a la velocidad). En el prototipo se aconseja emplear un mayor número de acumuladores conectados mediante electroválvulas para poder modificar el número y/o tamaños de los que entran en juego y encontrar así el óptimo. Sería conveniente incluso tener la posibilidad de modificar la presión de carga de cada uno de ellos.

Otros elementos son los filtros, el depósito, las válvulas de seguridad, los purgadores, etc. Todos, elementos comerciales, muy habituales en la industria, lo que garantiza un bajo coste.

El motor seleccionado es el A6VM de BOSH REXROTH, por su alto rendimiento y posibilidad de regulación del caudal. El motor es de pistones, de caudal variable con variador eléctrico con solenoide proporcional, y admite presiones de hasta 400 bar. En la *figura 4.1.1.1* se puede ver una fotografía del motor.

**figura 4.1.1.1**

Ahora se va a realizar el cálculo de la cilindrada máxima necesaria para el motor. La cilindrada se fijará en cada instante para evacuar a 1500 rpm el caudal medio generado en un intervalo de tiempo  $t$  anterior y no para evacuar el caudal instantáneo producido. Para conocer ese caudal medio se ha incorporado en el cilindro un lector de posición, de tal forma que conociendo el área del cilindro y la distancia recorrida por el cilindro en el intervalo de tiempo fijado el autómatas podrá calcular el caudal medio generado.

**figura 4.1.1.2**

De esta forma, en el instante en el que la velocidad sea mayor a la media se almacenará aceite en los acumuladores lo que producirá un aumento en la presión. Esto es lo que se está buscando, una fuerza de amortiguamiento proporcional a la velocidad.

De la simulación en Matlab, del estado planteado, se obtienen unos

desplazamientos de la boya de 1,5 m de amplitud, por lo que el caudal generado es:

$$Q_{ge} = \frac{A_{cil} \cdot 2 \cdot Amplitud}{periodo} = \frac{215,8cm^2 \cdot 600cm}{10s} = 12948cm^3/s \approx 13 l/s$$

Como el régimen de vueltas es de 1500 r.p.m., la cilindrada es:

$$Cil_{motor} = \frac{q_{max}}{\omega} = \frac{13 l/s}{1500rpm} = 82,8cm^3$$

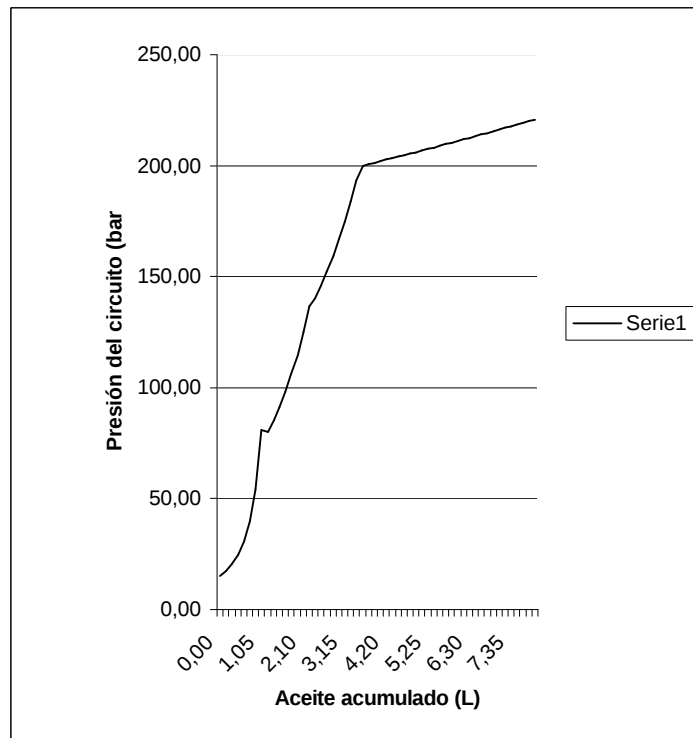
Por tanto, el tamaño seleccionado es el TN107, de 107 cm<sup>3</sup> de cilindrada por revolución. La cilindrada es variable mediante control eléctrico por solenoide proporcional.

Como ya se ha comentado antes, se conjugarán un número determinado de acumuladores de diferentes tamaños y tarados a distintas presiones. Para conseguir que la presión evolucione de la forma más óptima.

En la siguiente tabla se detallan las características de una combinación posible de acumuladores.

|              | Po (bar) | Vo (L) |
|--------------|----------|--------|
| Acumulador 1 | 15       | 1,5    |
| Acumulador 2 | 80       | 3      |
| Acumulador 3 | 140      | 3      |
| Acumulador 4 | 200      | 60     |

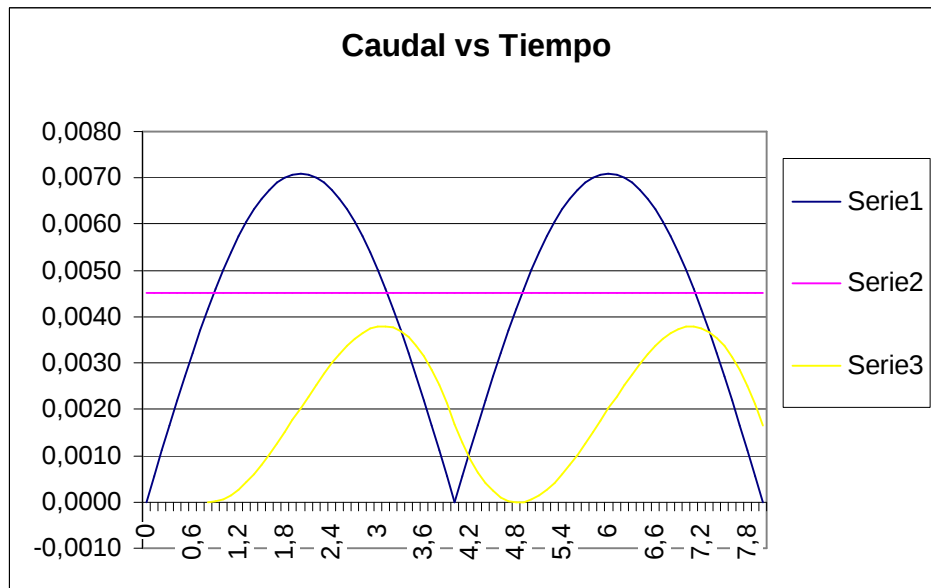
Estos acumuladores colocados en serie provocan una evolución de la presión con la el volumen del aceite acumulado cuasi-lineal como se puede apreciar en el siguiente gráfico, *figura 4.1.1.3*. Esta ley se ha obtenido teniendo en cuenta la ley de los gases ideales y considerando que el proceso es adiabático.

**figura 4.1.1.3**

El acumulador 4 se justifica por pequeños desajustes entre el caudal medio generado y el evacuado por el motor.

La evolución de la presión representada se puede expresar matemáticamente mediante una ecuación lineal.

Con esta combinación tomada, si se toma un movimiento de la boya senoidal de amplitud 2 metros y periodo 8 segundos. La siguiente gráfica, *figura 4.1.1.4*, nos representa en el eje de x el tiempo y en el y el volumen de aceite almacenado en m<sup>3</sup> que se corresponde a la curva amarilla. La curva negra representa el caudal generado por el cilindro y la violeta la curva del caudal evacuado por el motor hidráulico para la onda definida.

**figura 4.1.1.4**

Conforme se ha ido reflexionando y desarrollando el generador, han ido apareciendo nuevas ideas que presumiblemente puedan mejorar el generador. Una de estas ideas es la de conseguir un mejor control de la fuerza de amortiguamiento (generadora) e incluso un menor costo. En vez de tener un control discreto de la presión de alta del circuito mediante un grupo de acumuladores, se puede tener un solo acumulador cuya cámara de gas esté conectada a un cilindro de gas que tenga el vástago conectado a un cilindro hidráulico, de tal forma que sea posible gobernar la presión del gas mediante el cilindro hidráulico (en función de la velocidad instantánea del flotador) variando el volumen de la cámara de gas. En definitiva lo que se estaría controlando es la presión del cilindro hidráulico. Esto es posible por el pequeño volumen que se necesita acumular en cada ciclo. El gasto energético es pequeño ya que solo se está modificando la presión sin generar caudal.

Dimensionado de conductos:

Para determinar el tamaño de las mangueras hidráulicas se debe llegar al compromiso entre el tamaño de estas y la que minimice las pérdidas de carga.

Tras probar distintos diámetros, se van a emplear mangueras de 3". En este caso la velocidad, para el movimiento definido, entra dentro de lo admisible. En ciertos puntos concretos es posible emplear pasos de menor área.

$$v = \frac{q_{no\ min\ al}}{A_{conducto}} = \frac{12948\ cm^3/s}{45,58\ cm^2} = 2,84\ m/s$$

Un valor que entra dentro de las recomendaciones de los manuales de oleohidráulica.

#### 4.1.2 Circuito de suspensión

Como ya se ha comentado antes, para que el generador tenga un movimiento armónico es necesario un sistema de suspensión que aporte una constante elástica al sistema. Este sistema estará precomprimido para garantizar la generación tanto en ascenso como en descenso, siendo la fuerza de la suspensión la fuerza generadora en el descenso.

La finalidad que se persigue es que el sistema mecánico del generador tenga una frecuencia natural igual a la frecuencia de la ola, para maximizar así la potencia generada por el generador.

Para modificar la frecuencia natural del sistema se ha incorporado al generador un compartimento inundable, para modificar la masa suspendida y, un conjunto de acumuladores oleohidráulicos, para modificar la constante elástica.

Basándonos en la tabla facilitada por el INM, se va a hacer un estudio de las necesidades de regulación tanto de la masa como de la constante elástica.

De la teoría de vibraciones, se sabe que la frecuencia natural de un sistema es:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Siendo:

- La constante elástica del sistema K.
- La masa suspendida M.

Y debe ser igual a la frecuencia de las olas:

$$\omega_f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

A partir de la ley de Hooke, se tiene:

$$\Delta F = K \cdot \Delta x = \Delta P \cdot A \Rightarrow K = \frac{\Delta P \cdot A}{\Delta x}$$

Siendo:

- El incremento de presión en la cámara de suspensión,  $\Delta P = P_2 - P_1$ .
- El área del cilindro,  $A$ .
- La amplitud de la onda descrita por la boya,  $\Delta x$ .

Y con la ley de los gases en compresión adiabática:

$$P \cdot V^\gamma = \text{CTE} \Rightarrow P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma \Rightarrow \frac{\Delta P}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_1 - \Delta V} \right)^\gamma - 1$$

Siendo:

- El coeficiente de compresión adiabática de un gas biatómico,  $\gamma = 1,4$ .
- El volumen del acumulador,  $V_1$ .
- El incremento de aceite acumulado, que es igual al volumen comprimido de gas,  $\Delta V = V_1 - V_2 = A \cdot \Delta x$ .
- $P_1$ , es la presión a la que se targa el acumulador (sin aceite almacenado).

Agrupando el conjunto de leyes anteriormente expuestas, igualando la frecuencia natural de la ola al sistema mecánico, se tiene una ley que relaciona el volumen  $V_1$  y la masa suspendida  $M$ , con la presión  $P_1$ , el periodo de la ola  $T$ , y la amplitud de la onda de la boya  $\Delta x$ .

$$P_1 \cdot \left[ \left( \frac{V_1}{V_1 - \Delta x \cdot A} \right)^\gamma - 1 \right] = \left( \frac{2 \cdot \pi}{T} \right)^2 \cdot \frac{\Delta x \cdot M}{A}$$

Ahora se van a calcular los volúmenes necesarios de los acumuladores para los periodos extremos, considerando un desplazamiento habitual de ese periodo.

Del diseño, el incremento máximo de masa suspendida que se puede obtener es de 55.000kg ( $\Delta M$ ). Y la masa estimada de la boya sin agua acumulada es de 22.000 kg (M).

Antes de pasar al dimensionado de los acumuladores, ahí que analizar las condiciones que se deben dar para mantener el cable tenso incluido en el descenso, lo que me garantizaría la generación de caudal oleohidráulico en ambos sentidos.

La condición para generar caudal es que la presión de la cámara del sistema de suspensión en cualquier instante sea superior a la presión de la cámara del sistema de generación.

Para ello, como la presión del sistema de generación se va a limitar a 150 bar, se va a imponer que la presión mínima del circuito de suspensión sea igual a 160 bar (P1-presión de tarado del acumulador).

Entre la variedad de estados que presentan las olas, hay dos que son extremos. El de menor periodo (4 s), que le corresponde una frecuencia máxima; y el de mayor periodo (12 s), que le corresponde una frecuencia mínima.

Para la frecuencia máxima, el sistema de control seleccionará la masa suspendida mínima, es decir, el compartimento vacío. Y para la frecuencia mínima el sistema de control llenará por completo el compartimento inundable.

En cuanto a la rigidez, como por diseño está determinada la presión de tarado de los acumuladores, solamente es posible variar el volumen del acumulador (V1), con lo que se consigue variar la rigidez.

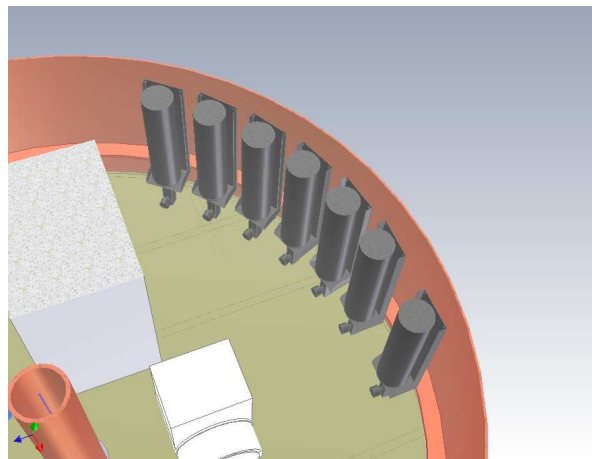
Para la frecuencia mínima, periodo máximo, se determina la rigidez mínima que se traduce en el volumen máximo de acumulador que se necesita.

#### Estados extremos-volumen acumulador

|                       |       |        |
|-----------------------|-------|--------|
| H(m)                  | 1     | 3,5    |
| T(s)                  | 4     | 12     |
| $\Delta M(\text{kg})$ | 0     | 55.000 |
| $\Delta x(\text{m})$  | 0,5   | 1,75   |
| V1(m3)                | 0,189 | 0,605  |

El resto de estados de las olas requerirán, un valor intermedio a los descritos para la masa almacenada y para el volumen del acumulador.

La masa se variará con el sistema de inundación descrito en el apartado 4.5 Y para modificar el volumen del acumulador se van a emplear 3 acumuladores de 200 L cada uno. El primer acumulador siempre estará conectado, y los otros dos entrarán en juego mediante una electroválvula normalmente cerrada. La figura 4.1.2.1 se ve el espacio que ocupan los acumuladores, se han representado más de tres porque los otros pertenecen al circuito de generación, aunque estos son de menor tamaño.

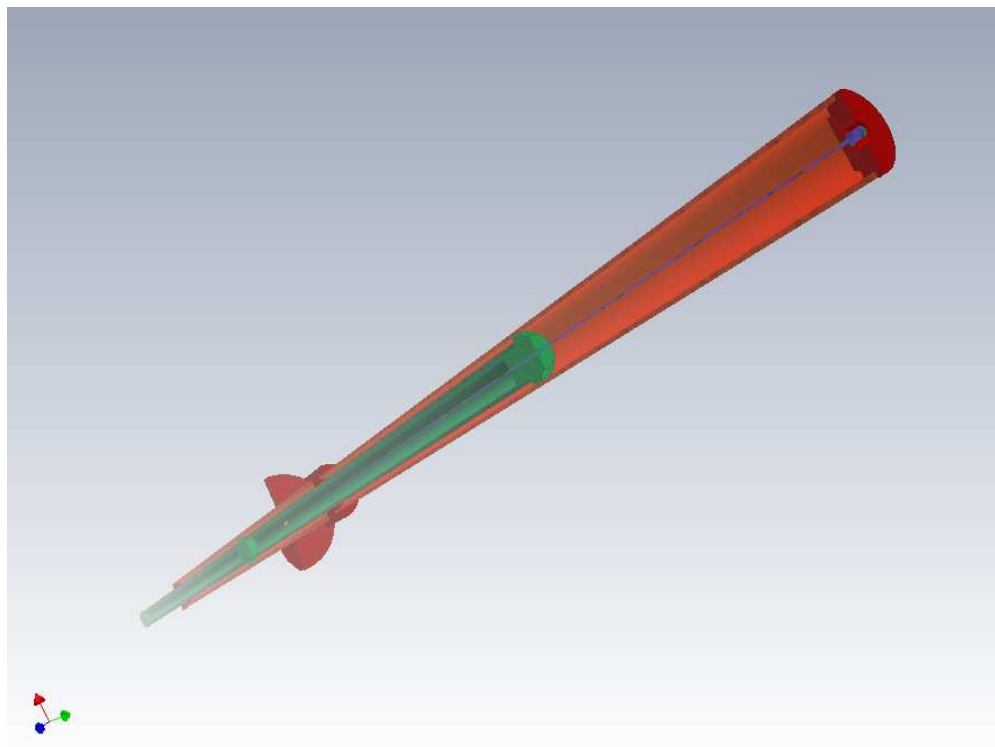


**figura 4.1.2.1**

## 4.2. Cilindro

Según datos facilitados por el INM, en el Golfo de Cádiz las mareas no suelen superar los dos metros de altura. Con esto y con el análisis dinámico en Matlab, en ninguno de los estados introducidos se han superado los 3 metros de desplazamiento del pistón. Siendo para olas de 3,5 metros de altura una amplitud máxima de la onda descrita por la boya de 2,8 metros. Por tanto, la carrera máxima del cilindro se ha fijado en 5 m.

Se podría instalar un cabrestante que recogiese o soltase cable según estuviese la marea en pleamar o bajamar, pero por evitar en todo lo posible los mecanismos, es aconsejable darle más carrera al cilindro en vez de introducir el mecanismo, aunque este sea mayor. Es seguro que se ahorra, pues al ser muy grandes las fuerzas que se transmiten por el cable implicaría instalar un mecanismo muy robusto.



**figura 4.3.1**

Como ya se comentó antes, el cilindro es un cilindro de los denominados tandem. El cilindro superior se conecta al circuito hidráulico de suspensión, y el inferior al circuito de generación. En la camisa del cilindro inferior se le suelda la brida de conexión con la boya. En la tapa superior se le instala el lector de posición del pistón. Y en el extremo del vástago se le coloca el trinquete de cogida del cable.

Las juntas del cilindro serán las recomendadas para sus uso en agua de mar. Las habituales en construcciones off-shore. Es prioritario minimizar las fugas de aceite hidráulico para tener la aprobación medioambiental correspondiente para su instalación.

El cilindro de área de pistón de  $215,8 \text{ cm}^2$ , se ha diseñado de forma que sea lo suficientemente robusto. Para ello se ha diseñado un vástago hueco de diámetro exterior 250mm e interior 120 mm de tubo calibrado de acero inoxidable cromado. La camisa es de diámetro interior 300mm y diámetro exterior 380mm de tubo lapeado de acero St-52.

La presión máxima de diseño del cilindro se va a fijar en 250 bar.

#### Comprobación de resistencia:

Todas las cargas que se están tratando son cíclicas con periodos la mitad del ciclo de las olas que inciden sobre el generador. Por tanto es obligatorio el cálculo a fatiga de los componentes. En este caso se va a reducir a comprobar que la tensión máxima es inferior a la mitad del límite elástico.

El esfuerzo principal al que se somete tanto el vástago como la camisa es a un axil de tracción.

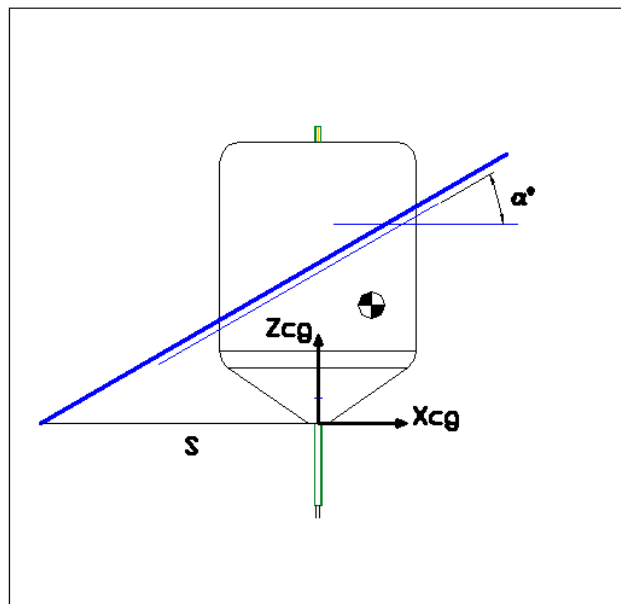
$$\text{Axil: } N = 215,8 \text{ cm}^2 \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 2 = 107,9 \text{ Tn}$$

Además de este esfuerzo axil existe un momento flector que aparece cuando la línea de flotación (línea ficticia que dibuja la superficie de agua en la boya) forma un ángulo respecto el plano horizontal de la boya. En esta situación el centro de las fuerzas de flotación no está en el eje de revolución del

generador por lo se produce el momento flector que desalinea el eje de revolución con el cable. Esto sucede por que lo que se alinean son los vectores fuerza, lo que provoca desalineación del cable con el eje de revolución.

Para estimar el orden de magnitud del momento flector se van a suponer distintas situaciones de la línea de aguas respecto de la boya, se va a hallar el centro de empuje de flotación y el momento que se genera en el vástago y en la camisa en la situación pésima, es decir, cuando el vástago está fuera completamente.

En la figura 4.3.2 se representa gráficamente el problema planteado.



**figura 4.3.2**

En la siguiente tabla se resume los casos contemplados y el volumen desalojado en cada caso.

| S (mm) | $\alpha$ | Xcg (mm) | Zcg (mm) | Volumen desalojado (m3) |
|--------|----------|----------|----------|-------------------------|
| 3500   | 45°      | 580      | 2425     | 52,4                    |
| 3500   | 50°      | 551      | 2796     | 65,3                    |
| 4000   | 45°      | 493      | 2636     | 62,1                    |
| 4000   | 50°      | 453      | 3012     | 76,2                    |

**Tabla 4.3.1**

Los momentos máximos de las hipótesis contempladas son:

- $M_{mas, camisa} = 27.770 \text{ kg} \cdot \text{m}$
- $M_{max, vástago} = 16.076 \text{ kg} \cdot \text{m}$

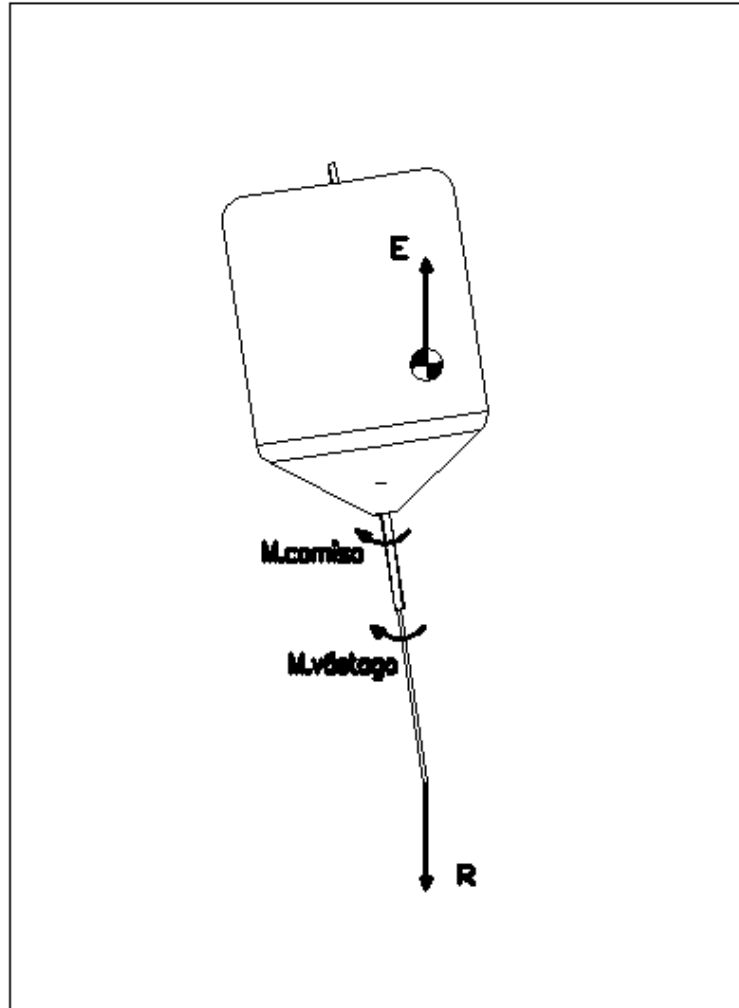


figura 4.3.3

Características mecánicas:

- $A_{camisa} = 370 \text{ cm}^2$ ,  $I_{camisa} = 62.593 \text{ cm}^4$ ,  $W_{camisa} = 3.294 \text{ cm}^3$
- $A_{vástago} = 290 \text{ cm}^2$ ,  $I_{vástago} = 25.765 \text{ cm}^4$ ,  $W_{vástago} = 1.908 \text{ cm}^3$

La tensión en el vástago es:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_{\text{vástago}}}{W_{\text{vástago}}} = \frac{107,9 \times 10^3 \text{ kg}}{290 \text{ cm}^2} + \frac{16.076 \text{ kg} \cdot \text{m}}{1.908 \text{ cm}^3} = 1.214 \text{ kg/cm}^2$$

Inferior a la mitad de 3.600 kg/cm<sup>2</sup>.

La tensión en la camisa es:

$$\sigma_{\text{eje}} = \frac{N}{A} + \frac{M_{\text{camisa}}}{W_{\text{camisa}}} = \frac{107,9 \times 10^3 \text{ kg}}{370 \text{ cm}^2} + \frac{27.770 \text{ kg} \cdot \text{m}}{3.294 \text{ cm}^3} = 1.134 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{membrana}} = \frac{P \cdot A_{\text{neta}}}{A_{\text{espesor}}} = \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 30 \text{ cm}}{8 \text{ cm}} = 937,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{\text{von mises}} = \sqrt{\sigma_{\text{eje}}^2 + \sigma_{\text{membrana}}^2} = 1472 \text{ kg/cm}^2 \leq \frac{3600 \text{ kg/cm}^2}{2}$$

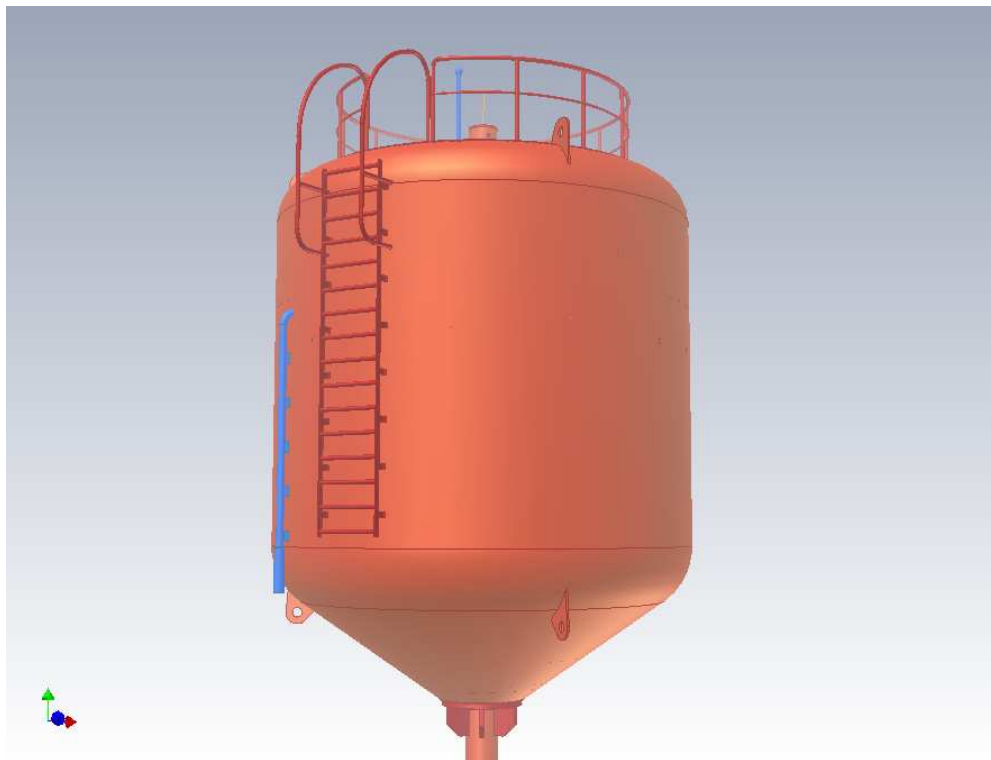
Por lo que se ha comprobado a resistencia el cilindro diseñado.

### 4.3. Boya

La boya es la encargada de recibir el empuje de Arquímedes y transmitirlo a la camisa del cilindro. Además de servir como habitáculo para las instalaciones del generador.

El casco es el elemento principal de la boya. Este se ha dividido en dos partes, que se unirán mediante tornillos colocados en el interior, que permite su desmontaje. Con esto se permite realizar las instalaciones dentro de la boya en la fabricación. Y una vez en operación, permitirá realizar reparaciones importantes en las que sea necesario el traslado a fábrica y la retirada del casco superior.

Para el diseño del casco se han buscado superficies de revolución que tengan un buen comportamiento estructural ante cargas uniformemente distribuidas, que es el tipo de carga principal al que se ve sometido la boya. Es decir, se pretende que el casco trabaje como una membrana.



**figura 4.2.1**

La boya, es un cilindro en su parte intermedia, que se ha cerrado por arriba con un casquete esférico, y por abajo, con un tronco de cono. El cono en la parte inferior es para mejorar la hidrodinámica de la boya, ya que en un periodo de ola existe un movimiento relativo del agua con la boya en sentido vertical, por la necesidad de variar el empuje de Arquímedes para producir potencia. El cilindro se une a la boya mediante una unión atornillada, con junta, en la parte más estrecha del cono de la boya.

Una vez la boya este instalada, para acceder al interior del generador, el casco cuenta en el casquete esférico con una escotilla. En el exterior cuenta con una escalera, en la pared cilíndrica de la boya, para acceder desde una embarcación a lo alto de la boya. También se ha colocado una barandilla y un suelo antideslizante para evitar posibles caídas al mar. Para bajar desde la cubierta (el casquete) hasta el interior cuenta con una escalera de gato en su interior.

En el interior, la parte baja se ha reservado para el compartimento inundable, que mejora la estabilidad, y encima de este está la planta, con una altura libre de dos metros, donde se van a instalar los distintos componentes de los distintos sistemas del generador. Esta planta le da rigidez a la boya, impidiendo los fenómenos de pandeo.

A parte, la boya debe contar con las balizas que marca el código pertinente de navegación marítima.

#### Estudio de la estabilidad:

| Relación de masas        |                    |
|--------------------------|--------------------|
| Concepto                 | Masa prevista (kg) |
| Boya                     | 8000               |
| Cilindro                 | 2000               |
| Sist. Inundación         | 1250               |
| Sist. Generador          | 1860               |
| Cuadro eléctrico         | 730                |
| Rango masa compartimento | [1000,53000]       |

Otro empuje en la dirección y sentido igual al debido a la gravedad es el producido por el sistema de amortiguación. Aunque tiene un rango de variación, este es pequeño y se va a tomar el valor medio. La presión media es de 180 kg/cm<sup>2</sup>.

$$E_{amor} = \bar{p} \cdot A_{cil} = 180 \frac{kg}{cm^2} \cdot 215 cm^2 = 38.700 kg$$

El rango del Empuje es de 53.550 kg a 105.540 kg.

Y la z de la línea de agua variará por tanto de 3500 mm a 6000 mm desde la parte inferior de la boya.

El metacentro para cada uno de los estados es 2130 mm y 3400 mm.

Hay una situación distinta, que es cuando se procede al traslado. Si la boya está vacía, y no existe el empuje debido al sistema de amortiguación, el metacentro está muy por debajo del centro de gravedad por lo que inevitablemente se volcará. Para evitar esto, antes de botarlo, se le añadirán tres grandes flotadores en los enganches previsto para esto. Con esto se evitará el volteo de la boya hasta que se fije al lastre.

A partir del diseño se pasa al análisis estructural, por elementos finitos que nos va a determinar el ancho de la pared del casco, que en este proyecto se va a realizar en acero naval.

El cálculo realizado para dimensionar el casco de la boya se resume en el ANEXO I.

### Construcción

Para la construcción se debe usar el sistema de radios, que permite hacer curvas en la boya, como si se tratara de un barco de plástico.

Para el forro, se debe dar la forma a cada plancha que formará el casco, esto normalmente se realiza con una máquina de rodillos, la cual le aplica la curvatura necesaria.

Referente a la soldadura, se utilizan soldadores TIG, para una soldadura perfecta y con la suficiente penetración entre las planchas. Antes de realizar el cordón final de soldadura, se une toda la boya mediante un punteado de todas las planchas, para luego al haber comprobado la correcta colocación de todas las planchas, se realiza la soldadura final tanto en el interior como en el exterior, teniendo en cuenta, realizar pequeños cordones de soldadura en varias zonas de la misma plancha, ya que esta se podría deformar.

Una vez soldado herméticamente, se realiza la molienda de los cordones, cuya finalidad es dejar el casco completamente liso y perfecto, en el cual una vez pintado será imposible saber donde se encuentran las soldaduras.

Antes de dar por finalizada la construcción de la boya, se realizan rayos X, en todas las soldaduras realizadas, para comprobar su perfecta estanqueidad y correcta soldadura.

Ya construida la boya se protege debidamente mediante una capa de imprimación adecuada para la mar y dos capas de esmalte color rojo.

#### 4.4. Sistema de anclaje

Todos los elementos que pertenecen al sistema de anclaje deben ser analizados con detenimiento. Son elementos de gran responsabilidad que deben garantizar que la boya no se suelte del punto de instalación, su fallo llevaría a la boya a la deriva.

El lastre, un bloque de hormigón armado, debe ser tal que impida que el generador se mueva. Para ello su peso debe ser igual a la mayor fuerza ejercida sobre el cable multiplicado por un coeficiente de seguridad que se va a fijar en 1,5.

$$V_{\text{hormigón}} = \frac{Fz \cdot 1,5}{\rho_{\text{hormigon}}} = \frac{108.000 \text{ kg} \cdot 1,5}{2.500 \text{ kg/m}^3} = 64,8 \text{ m}^3$$

Un cubo de lado 4 metros de hormigón armado sería suficiente. El armado se debe realizar teniendo en cuenta el medio marino donde se va situar.

Sería conveniente realizar una investigación sobre los sistemas de anclaje utilizados en instalaciones *off-shore*. Se destaca aquí el sistema basado en una campana, que una vez anclada en el fondo marino se le retira todo el agua de su interior, de tal forma que la fuerza que ejerce la presión del agua sobre la campana es igual a la presión multiplicada por el área de la abertura de la campana. Este sistema es probable que sea más barato.

El cable tipo 6x36 EIPS seleccionado es un cable muy empleado en la pesca profesional, con las siguientes características:

- Elevada sección metálica.
- Mínimo alargamiento.
- Galvanizado especial lo cual le torga una gran resistencia a la corrosión.
- Alma mixta.

La sección del cable se determina escogiendo la que tenga una carga de rotura inmediatamente superior a la carga máxima a la que se puede someter el cable multiplicado por un coeficiente de seguridad.

Según la normativa DNV el coeficiente de seguridad para el sistema de anclaje debe ser 2,5.

Si la presión máxima de trabajo en ambas cámaras del cilindro se limita a 250 bar, la carga máxima que el cilindro es capaz de transmitir es:

$$F_{\max} = p_{\max} \cdot \text{área} \cdot n = 250 \cdot 216 \cdot 2 = 108.000 \text{ kg}$$

Luego la carga de rotura del cable debe ser superior a 270 toneladas.

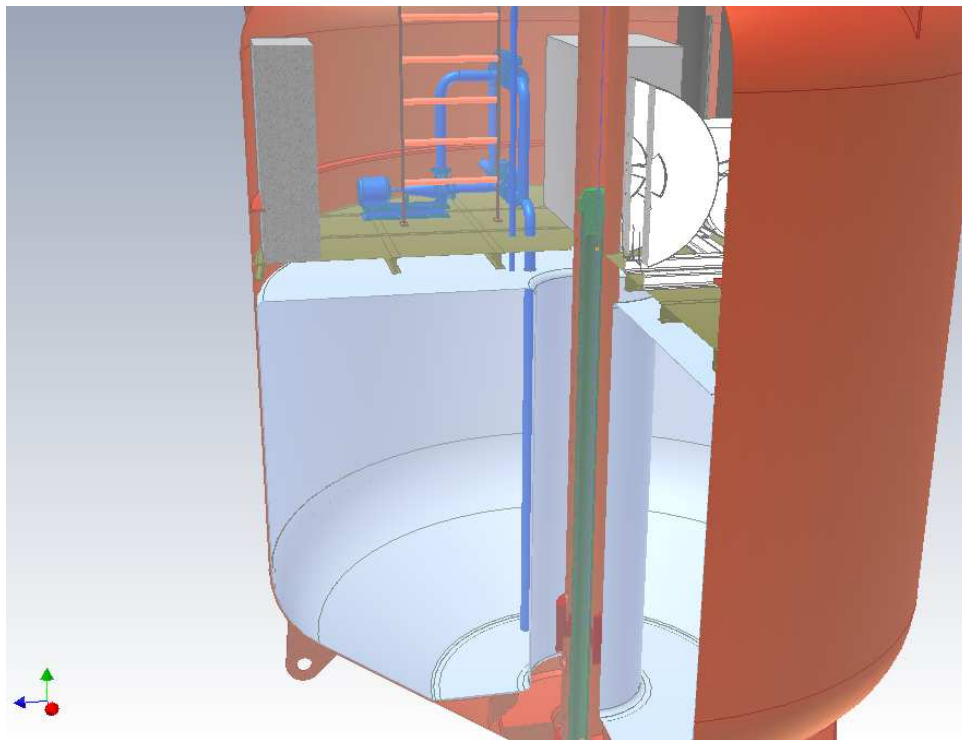
La sección del cable seleccionado debe ser igual o superior a 2" ½ de diámetro (64 mm), con una carga de rotura de 274 toneladas y un peso de 17,3 kg por metro.

Sería conveniente no transmitirle la carga del cable al vástago, para que este peso no entre en juego en las presiones del cilindro, pues significa un aumento constante en la presión de trabajo que nunca va a aportar potencia. Para conseguir esto se ha pensado en colocarle unos flotadores cuyo empuje vertical sea igual al peso de todo el cable.

## 4.5. Sistema de inundación

La necesidad de modificar la masa de la boya (masa suspendida), como ya se ha comentado anteriormente, ha llevado a incorporar en la boya un compartimento inundable que se llenará y vaciará mediante bombas de forma que la masa interior de agua sea la determinada por el sistema de control que pretende maximizar la energía obtenida de las olas.

El llenado y vaciado del compartimento se hace a través de una bomba autocebante.



**figura 4.4.1**

Para la elección de la bomba es necesario conocer el caudal y el salto que debe aportarnos. Para ello vamos a simular el sistema como dos depósitos uno es el mar y el otro el compartimento situados a una longitud de 4 m, con una diferencia de cota de 2,5 m con un filtro y con dos codos a 90°.

Entre ambos se coloca la bomba.

Se debe determinar la curva del esquema hidráulico planteado que junto con la curva de comportamiento de la bomba se podrá conocer el punto de funcionamiento.

La bomba hidráulica se va a seleccionar teniendo en cuenta que es una bomba principalmente de trasiego, es decir, la altura que debe proporcionar la bomba es pequeña, y que el caudal debe satisfacer las necesidades del generador.

Para dimensionar la bomba del sistema de inundación se va a definir el tiempo máximo que se pretende emplear en llenar o vaciar el compartimento en su totalidad.

Cada 60 minutos se va a modificar la frecuencia natural del generador, de tal forma que se aproxime a la frecuencia media de las olas en el último intervalo de medida. Se pretende que la bomba sea capaz de modificar la masa variable total en al menos una tercera parte del tiempo que hay entre una modificación y otra. Es por esto por lo que el tiempo que se va a tomar para vaciar o llenar por completo el compartimento es de 20 min.

El caudal de la bomba es por tanto:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} = \frac{40000 \text{ litros}}{20 \cdot 60 \text{ s}} = 33 \text{ litros/s}$$

El sistema de inundación lo va a componer una bomba, que se utilizará tanto para el llenado como para el vaciado, que con un juego de cuatro válvulas accionadas eléctricamente se podrá vaciar o llenar el compartimento según su configuración, véase *figura 4.4.2*. A efectos de cálculo es como si se tuviera tan solo un circuito.

Se va a emplear para el llenado y vaciado una bomba autocebante de eje libre. La cual es un equipo de bombeo compacto y funcional, que garantiza un servicio eficiente y libre de mantenimineto. La referencia es la bomba de la marca HIDROSTAL DO4CA que gira a 3540 rpm, con un diámetro en la impulsión de 145 mm.

La bomba seleccionada es capaz de proporcionar una altura máxima de 20 m, con un rendimiento cercano al 70%.

Como se ha fijado un caudal mínimo el cual se debe cumplir en cualquier condición, la bomba debe proporcionar una altura superior a la altura necesaria para el caudal determinado.

Los datos de la instalación son:

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| Altura geométrica máxima (H)         | 2,5 m      |
| Longitud real de la instalación (Lr) | 4 m        |
| Diámetro tubería 4" (D)              | 0,097 m    |
| Caudal (Q)                           | 12 l/s     |
| Viscosidad (n)                       | 0,001 Pa.s |

La curva característica de una red es:

$$H = H_g + \frac{P_{imp} - P_{asp}}{\rho \cdot g} + \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_{eq} \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5}$$

donde:

$$L_{eq} = L_r + \sum L_i = 2,5 + 2 \cdot 2,91 + 0,78 + 6 \cdot 0,19 = 10,24m$$

Li equivale a la longitud equivalente de tubería recta que produce la misma pérdida de carga que el elemento que representa.

$$L_{eq, codo 90^\circ} = 30 \cdot D = 30 \cdot 0,097 = 2,91m$$

$$L_{eq, válvulas} = 8 \cdot D = 8 \cdot 0,097 = 0,78m$$

$$L_{eq, uniones} = 2 \cdot D = 2 \cdot 0,097 = 0,19m$$

$f$  es el factor de fricción que determinamos mediante el Ábaco de Moody a partir del número de Reynolds y la rugosidad relativa.

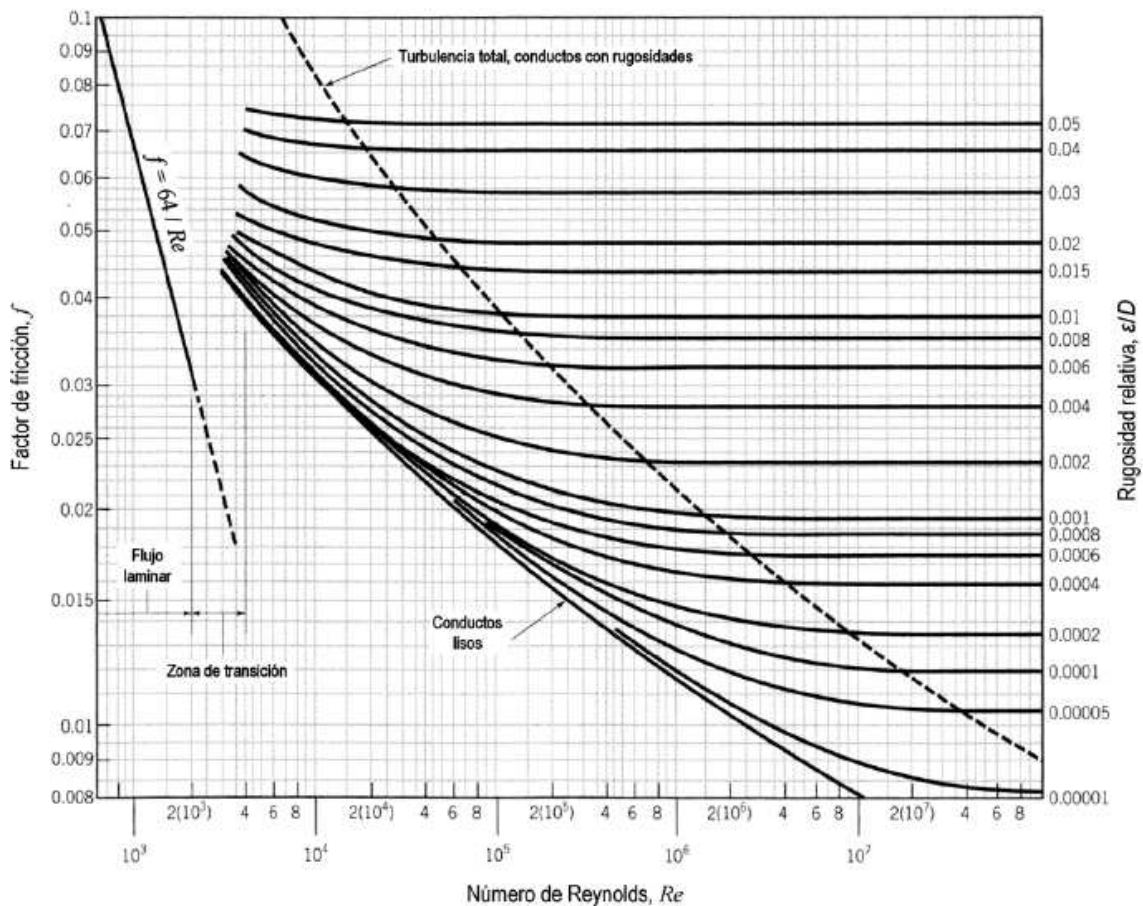
$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\nu} = \frac{1 \frac{m}{s} \cdot 0,13m \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}}{0,001 \frac{kg}{m \cdot s}} = 130000 \geq 2300 \Rightarrow F.Turbulento$$

Rugosidad relativa  $e/D$

Para el acero comercial la rugosidad es  $4.2 \times 10^{-5}$

Luego:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4.6 \cdot 10^{-5}}{0,097} = 4,74 \cdot 10^{-4}$$



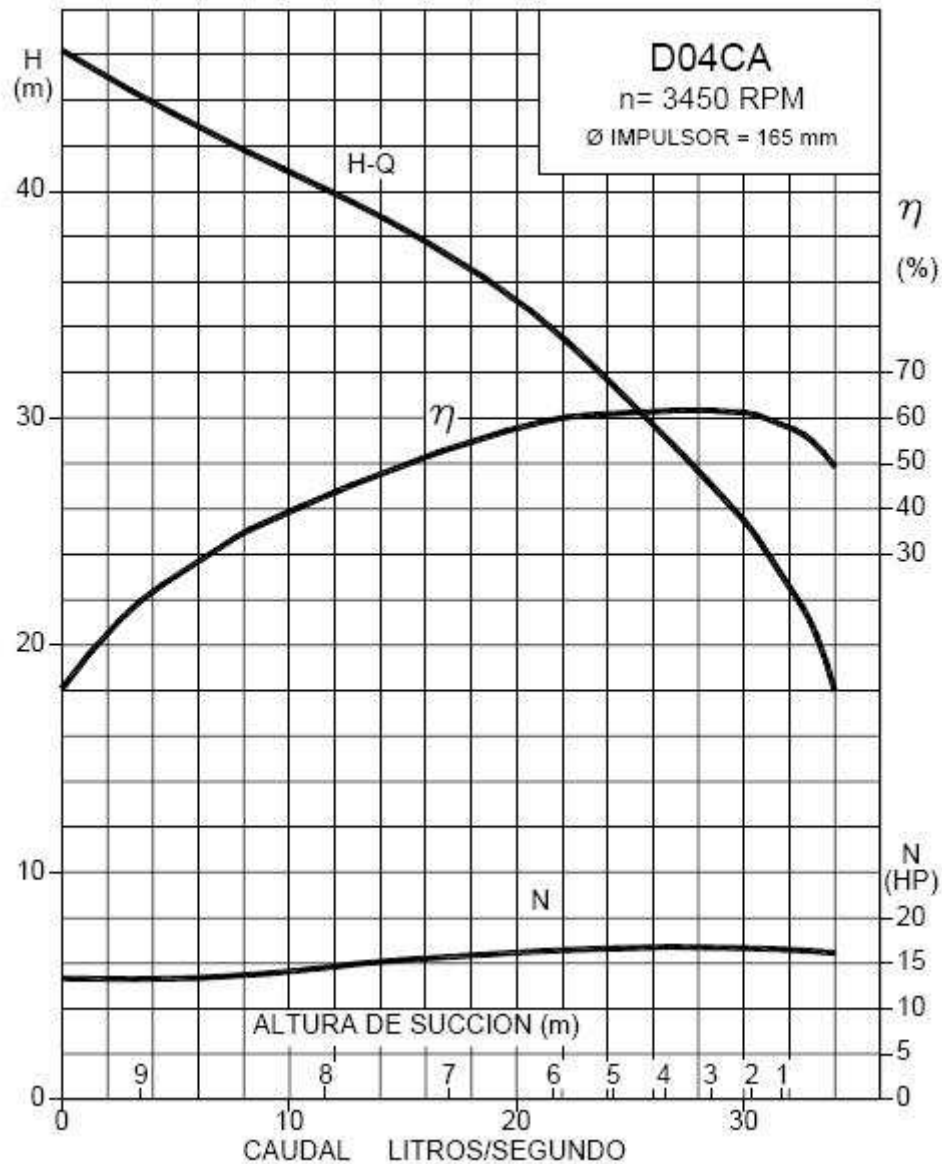
Del ábaco de Moody se obtiene el factor de fricción de 0,019.

Luego la altura que debe proporcionar la bomba es:

$$H = 2,5 + 0 + \frac{8 \cdot 0,019 \cdot 10,24 \cdot 0,012^2}{\pi^2 \cdot 9,8 \cdot 0,097^5} = 2,77m$$

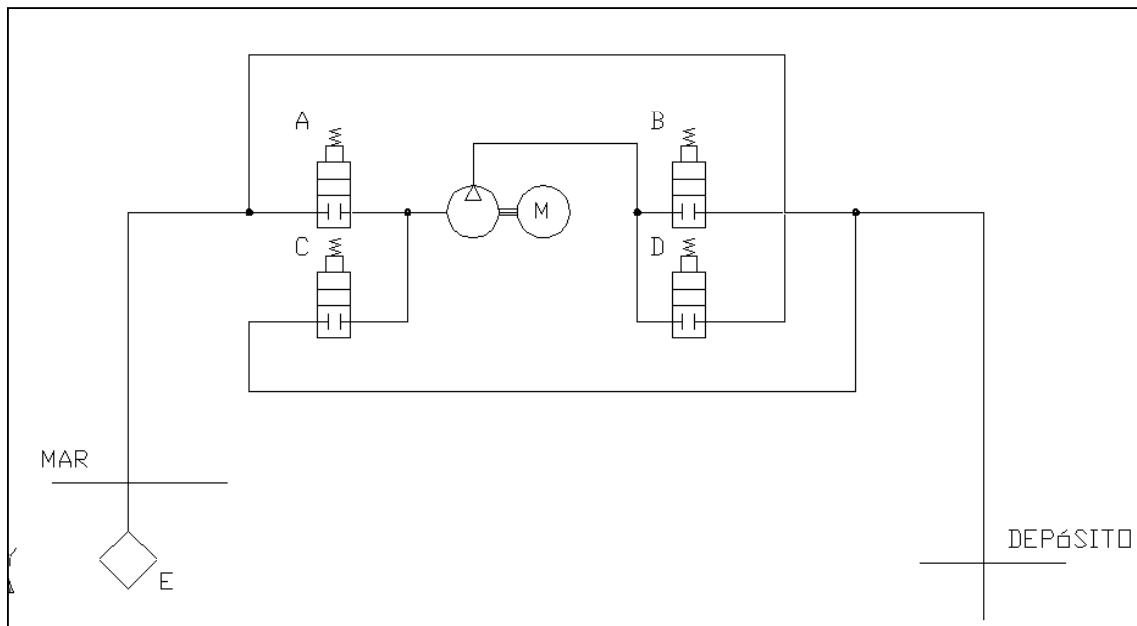
Para garantizar una larga vida a la bomba es necesario comprobar la condición de no cavitacion. Es decir, se debe cumplir:

$$NPSH_d > NPSH_r$$



El esquema hidráulico de la figura 4.4.2 representa el sistema de inundación, con este diseño la bomba se utiliza tanto para el llenado como para el vaciado del depósito de agua del generador. Las cuatro válvulas accionadas eléctricamente permiten tal objetivo, la A y B abiertas y la C y D cerradas permiten el llenado del depósito, y las A y B cerradas y C y D abiertas se vacía el depósito. En el lado mar cuenta con un filtro.

Las válvulas se accionan cada 60 minutos, por lo que la válvula tipo esfera accionada eléctricamente es factible.



**figura 4.4.2**

La figura 4.4.3 muestra una imagen de la bomba empleada.



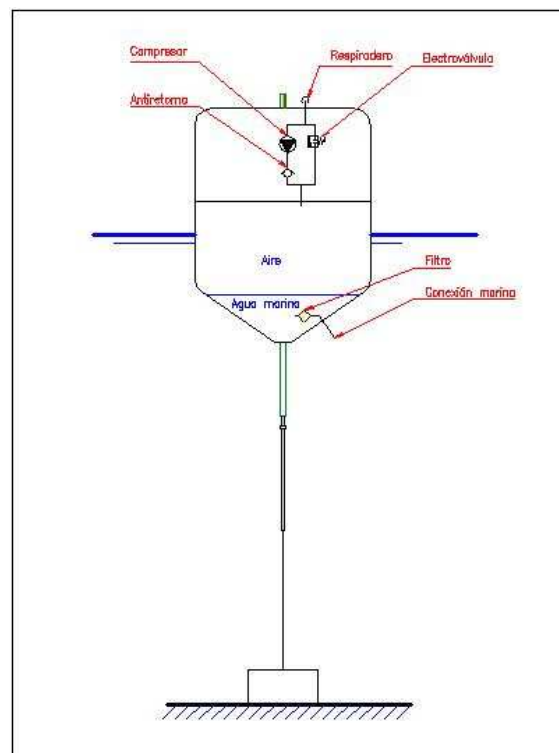
**D04CA / D04CAL**

**figura 4.4.3**

En el proyecto se ha desarrollado la solución explicada, pero a continuación se va a describir otro sistema de inundación que puede ser utilizado. Es evidente que el sistema más barato será el que se deba instalar.

El sistema que a continuación se describe es el empleado en los submarinos para sumergirse o emerger del fondo marino.

En la figura 4.4.4 se representa esquemáticamente el sistema. El compartimento inundable está unido hidráulicamente al mar por su parte más profunda. Y en su parte superior está unido a la atmósfera mediante un respiradero. La forma de vaciar de agua el compartimento inundable será comprimiendo aire cogido de la atmósfera e inyectándolo en el compartimento de tal forma que la presión del aire obligue al agua a evacuarlo. Y para llenar el compartimento simplemente hay que dejar salir el aire por el respiradero mediante la electroválvula neumática.

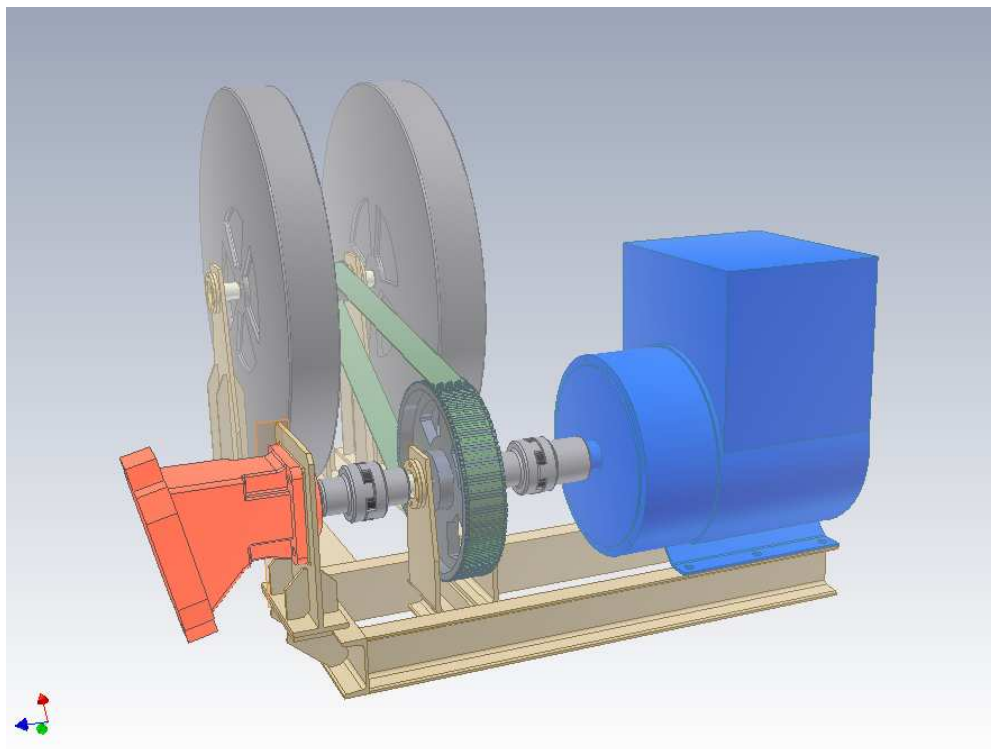


**figura 4.4.4**

## 4.6. Árbol de potencia

La entrega de potencia de la ola al generador no es continua pero si periódica. En cambio, la potencia generada/evacuada si es aproximadamente constante en el tiempo característico del periodo de la ola.

La potencia de la ola se convierte directamente en energía oleohidráulica, de tal forma que el sistema de generación comunica directamente las fluctuaciones de entrega de potencia al motor hidráulico. Se precisa por tanto de un volante de inercia que almacene la energía e impida que la velocidad angular sufra fluctuaciones.



**figura 4.5.1**

En global, en todo el proceso de transformación de la energía de la ola en energía eléctrica, el generador, cuenta con dos formas de almacenamiento, para que la entrega de energía a la red sea constante. Las dos formas empleadas son los acumuladores y el volante de inercia. Entre los acumuladores está el acumulador del sistema de suspensión, para entregar potencia en el descenso de la ola y el acumulador del sistema de generación que junto con el volante de inercia se encargan de absorber las fluctuaciones que existen dentro de cada medio periodo. En la *figura 4.5.1* se puede ver el árbol diseñado. Al tener partes móviles, por seguridad, es necesario cubrirlo con una carena ventilada que no se representa.

Para el cálculo de los volantes de inercia se suelen utilizar dos parámetros auxiliares, la velocidad angular media,  $\omega_m$ , y el coeficiente de fluctuación,  $C_f$ , que se definen:

$$\omega_m = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2}$$

$$C_f = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m}$$

En la siguiente tabla, figura 4.5.2, se recogen unos valores típicos de coeficientes de fluctuación para diferentes tipos de máquinas.

| <b>COEFICIENTE DE FLUCTUACIÓN *</b>       |                      |
|-------------------------------------------|----------------------|
| <i>Tipo de máquina</i>                    | <i>C<sub>f</sub></i> |
| Maquinaria de machaqueo                   | 0,200                |
| Maquinaria eléctrica                      | 0,003                |
| Maquinaria eléctrica, transmisión directa | 0,002                |
| Motores con transmisión por correas       | 0,030                |
| Maquinaria para molinos harineros         | 0,020                |
| Transmisión rueda dentada                 | 0,020                |
| Martillos                                 | 0,200                |
| Máquinas herramientas                     | 0,030                |
| Maquinaria para fabricación de papel      | 0,025                |
| Bombas                                    | 0,030-0,050          |
| Maquinaria de corte                       | 0,030-0,050          |
| Maquinaria de hilanderías                 | 0,010-0,020          |
| Maquinaria textil                         | 0,025                |

\* *Mechanical Engineers Handbook, de Kent, 12.ª edición, «Design and Production», pág. 7-40.*

figura 4.5.2

Para el generador vamos a tomar un coeficiente de fluctuación de 0,03.

La inercia de giro del árbol debe ser aquella que minimice las variaciones en la velocidad angular del eje.

La energía mecánica almacenada en el árbol que gira a 1500 rpm es:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Delta \omega^2$$

El par motor no es constante por la variación de la presión dentro del ciclo, pero si el par resistente que es igual al par medio, que es el que produce electricidad.

La presión media en el circuito de generación es:

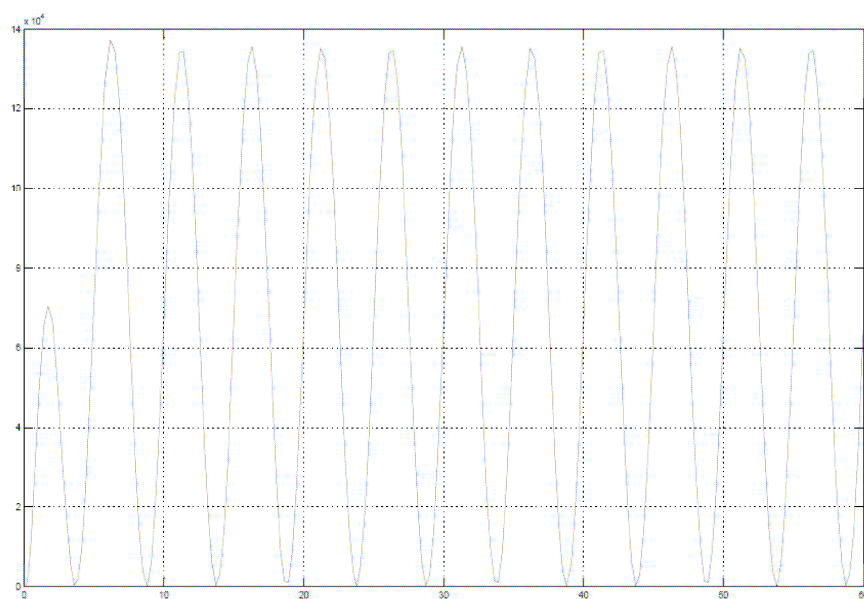
$$\bar{p} = \frac{\int p(t) \cdot dt}{\Delta t}$$

El tramo en el que la presión es superior a la media genera un incremento de par en el árbol que se traduce en un aumento de velocidad.

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Delta \omega^2 = \bar{q} \cdot \int_{t_1}^{t_2} [p(t) - \bar{p}] \cdot dt$$

La inercia del árbol debe ser superior o igual a la inercia que me produzca una fluctuación igual a la tomada.

$$J_{\min} = \frac{\bar{q} \cdot \int_{t_1}^{t_2} [p(t) - \bar{p}] \cdot dt}{\frac{1}{2} \cdot c_f^2 \cdot \omega_m^2}$$



**figura 4.5.3**

El ejemplo representado en la figura 4.5.3 corresponde a la potencia proporcionada por el flotador al circuito de generación, para olas de 3 metros de altura y periodo 10 segundos. La curva de potencia que se obtiene es una onda senoidal positiva de periodo 5s y amplitud 60kw.

Si la potencia media producida es de 60kw, medio periodo se está entregando una potencia superior y el otro una potencia menor.

La energía extra aportada al arbol en el intervalo de tiempo en el que la presión del circuito es superior a la presión media, es de 95kJ.

La inercia mínima que cumple con el criterio de fluctuación, considerando tan solo el eje rápido de 7500 rpm es:

$$J_{\min} = \frac{95 \times 10^3 J}{\frac{1}{2} \cdot 0,03^2 \cdot \left(\frac{6000 \cdot 2 \cdot \pi}{60}\right)^2 s^{-2}} = 535 kgm^2$$

Diseño mecánico del arbol:

Ya que el eje principal gira a 1500 rpm, se ha incorporado una polea dentada de radio 4 veces del de la polea del eje secundario para que este gire a 6000 rpm, consiguiendo así un tamaño de polea mucho menor.

Se van a usar dos poleas de diámetro 1200 mm, con una inercia de 250kgm<sup>2</sup> cada una.

## 4.7. Medida y control

El control se basa en la toma de decisiones a partir de los datos facilitados por los distintos dispositivos de medida, de tal forma que se actúe sobre los mecanismos de regulación existentes en el generador que permiten modificar las variables dinámicas de este. Cuyo objetivo primordial será maximizar la potencia generada.

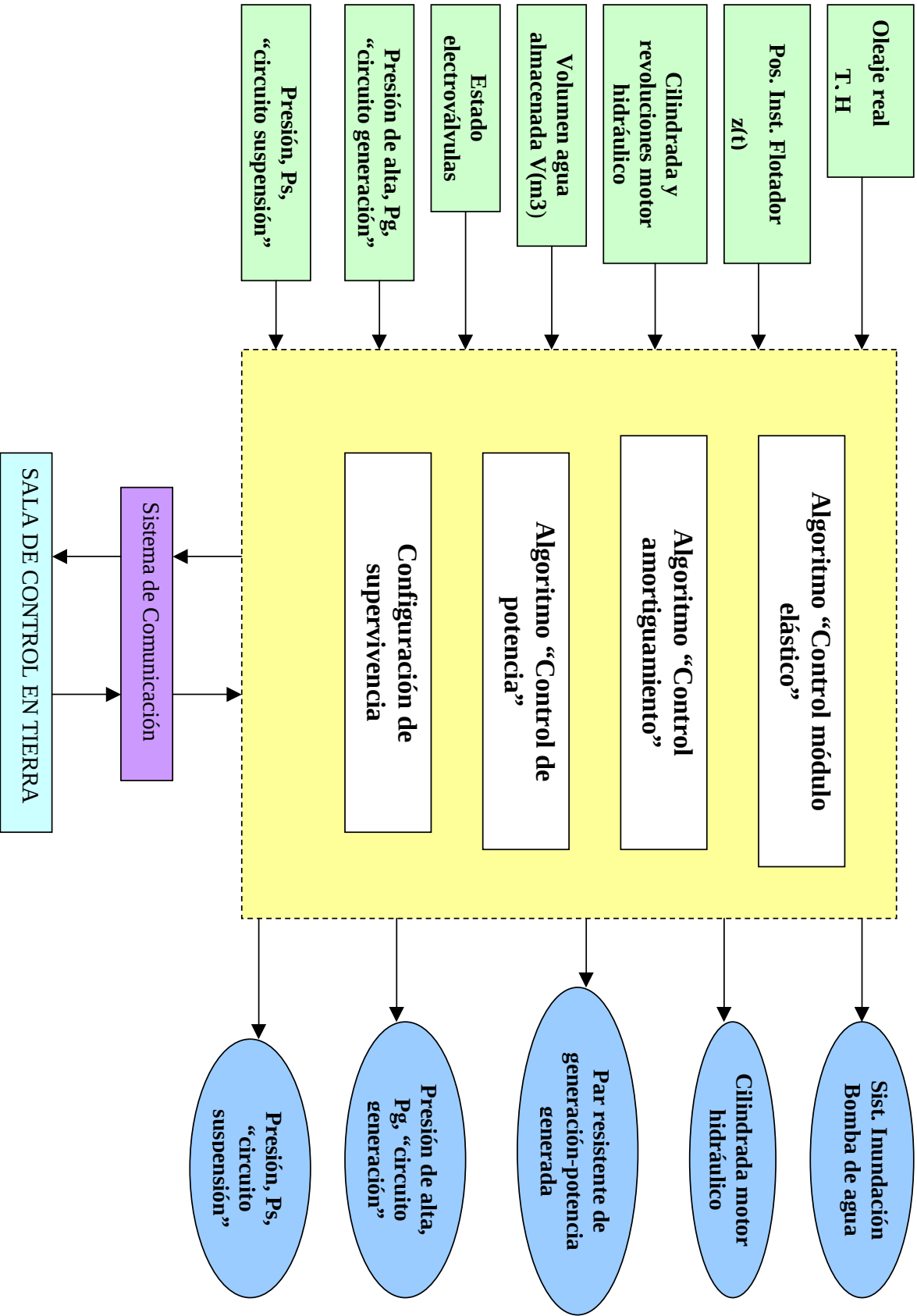
Los dispositivos que componen el sistema de control son:

- Autómata programable, SIMATYC
- Encoder lineal de pulsos
- Nivel de agua, mediante boya.
- Nivel de aceite
- Temperatura
- Encoder de revoluciones
- Intensidad generada
- Commutador de la motobomba
- Variador cilindrada
- Comunicador alarma
- Electroválvulas del sistema de generación y suspensión

El esquema básico del sistema de control de la figura siguiente resume los datos que se van tener, y sobre que se va a actuar en función de los resultados de los algoritmos de control. No obstante, el funcionamiento del generador estará supervisado por la centralita ubicada en costa, desde donde se podrá gobernar en caso de avería, operación de mantenimiento, etc.

A parte de maximizar la potencia generada, una tarea del sistema de control será la de poner el generador en la posición más favorable en caso de temporal para garantizar la supervivencia de la instalación.

ESQUEMA BÁSICO DE GOBIERNO DEL GENERADOR



#### 4.8. Protección catódica

Se entiende por corrosión la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. Las características fundamental de este fenómeno, es que sólo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas anódicas y catódicas: una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal. Por esta razón, es necesario la oportuna utilización de la técnica de protección catódica.

La protección catódica es un método electroquímico cada vez más utilizado hoy en día, el cual aprovecha el mismo principio electroquímico de la corrosión, transportando un gran cátodo a una estructura metálica, ya sea que se encuentre enterrada o sumergida. Para este fin será necesario la utilización de fuentes de energía externa mediante el empleo de ánodos galvánicos, que difunden la corriente suministrada por un transformador-rectificador de corriente.

El mecanismo, consecuentemente implicará una migración de electrones hacia el metal a proteger, los mismos que viajarán desde ánodos externos que estarán ubicados en sitios plenamente identificados, cumpliendo así su función.

A está protección se debe agregar la ofrecida por los revestimientos, como por ejemplo las pinturas, casi la totalidad de los revestimientos utilizados en instalaciones enterradas, aéreas o sumergidas, son pinturas industriales de origen orgánico, pues el diseño mediante ánodo galvánico requiere del cálculo de algunos parámetros, que son importantes para proteger estos materiales, como son: la corriente eléctrica de protección necesaria, la resistividad eléctrica del medio electrolito, la densidad de corriente, el número de ánodos y la resistencia eléctrica que finalmente ejercen influencia en los resultados.

En la práctica se puede aplicar protección catódica en metales como acero, cobre, plomo, latón, y aluminio, contra la corrosión en todos los suelos y, en casi todos los medios acuosos. De igual manera, se puede eliminar el agrietamiento por corrosión bajo tensiones por corrosión, corrosión intergranular, picaduras o tanques generalizados.

Como condición fundamental las estructuras componentes del objeto a proteger y del elemento de sacrificio o ayuda, deben mantenerse en contacto eléctrico e inmerso en un electrolito.

La protección catódica realiza exactamente lo expuesto forzando la corriente de una fuente externa, sobre toda la superficie de la estructura.

Mientras que la cantidad de corriente que fluye, sea ajustada apropiadamente venciendo la corriente de corrosión y, descargándose desde todas las áreas anódicas, existirá un flujo neto de corriente sobre la superficie, llegando a ser toda la superficie un cátodo.

Para que la corriente sea forzada sobre la estructura, es necesario que la diferencia de potencial del sistema aplicado sea mayor que la diferencia de potencial de las microceldas de corrosión originales.

La protección catódica funciona gracias a la descarga de corriente desde una cama de ánodos hacia tierra y dichos materiales están sujetos a corrosión, por lo que es deseable que dichos materiales se desgasten (se corroan) a menores velocidades que los materiales que protegemos.

Teóricamente, se establece que el mecanismo consiste en polarizar el cátodo, llevándolo mediante el empleo de una corriente externa, más allá del potencial de corrosión, hasta alcanzar por lo menos el potencial del ánodo en circuito abierto, adquiriendo ambos el mismo potencial eliminándose la corrosión del sitio, por lo que se considera que la protección catódica es una técnica de POLARIZACION CATODICA.

La protección catódica no elimina la corrosión, éste elimina la corrosión de la estructura a ser protegida y la concentra en un punto donde se descarga la corriente.

Para su funcionamiento práctico requiere de un electrodo auxiliar (ánodo), una fuente de corriente continua cuyo terminal positivo se conecta al electrodo auxiliar y el terminal negativo a la estructura a proteger, fluyendo la corriente desde el electrodo a través del electrolito llegando a la estructura.

Influyen en los detalles de diseño y construcción parámetro de geometría y tamaño de la estructura y de los ánodos, la resistividad del medio electrolito, la fuente de corriente, etc.

Dentro del sistema general de protección catódica el que se va a emplear es el del ANODO DE SACRIFICIO, en el que se coloca en la superficie un metal más activo (anódico) con respecto al empleado, corroyéndose el metal anódico.

En la protección catódica con ánodo galvánicos, se utilizan metales fuertemente anódicos conectados a la estructura, dando origen al sacrificio de dichos metales por corrosión, descargando suficiente corriente, para la protección.

La diferencia de potencial existente entre el metal anódico y la estructura a proteger, es de bajo valor porque este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente, pequeñas estructuras y en medios de baja resistividad.

Considerando que el flujo de corriente se origina en la diferencia de potencial existente entre el metal a proteger y el ánodo, éste último deberá ocupar una posición más elevada en la tabla de potencias (serie electroquímica o serie galvánica).

Los ánodos galvánicos que con mayor frecuencia se utilizan en la protección catódica del acero son: Magnesio, Zinc, Aluminio.

#### Ventaja de la protección por ánodo de sacrificio:

- No requieren potencia externa.
- Voltaje de aplicación fijo.
- Amperaje limitado.
- Aplicable en casos de requerimiento de corriente pequeña, económico hasta 5 amperios.
- Útil en medios de baja resistividad.
- La interferencia con estructuras enterradas es prácticamente nula.
- Sólo se los utiliza hasta un valor límite de resistividad eléctrica hasta 5000 ohm-cm.
- Mantenimiento simple.

El otro sistema utilizado es el de corriente impresa que para el caso de una estructura pequeña en agua de mar no es tan ventajoso como el propuesto.

## 4.9. Instalación

La fabricación de la boya y el ensamblaje final del generador se realizará en unos astilleros, que poseen todos los medios técnicos necesarios para este tipo de construcción.

Una vez ensamblados todos los componentes e instalaciones, se realizarán las pruebas que se determinen para comprobar los distintos sistemas que componen el generador. Y cuando todas las pruebas sean favorables se procederá a la botadura de la boya.

Si el punto de instalación del generador es próximo a los astilleros es posible botar la boya en el mismo astillero y remolcarlo hasta el punto elegido. O, en otro caso, cargarlo en un buque para transportarlo lejos y que cuente con la capacidad y equipamiento suficiente para su posterior botadura.

Además de la boya, hay que llevar al punto de instalación el lastre, el cable de conexión entre ambos y el cable eléctrico que una el generador con la orilla.

Para que la instalación sea lo más sencilla posible se debe elegir un día en que la mar se encuentre totalmente tendida.

Además es necesario conocer justo en el instante de ajuste final en que momento se encuentra la marea.

A continuación se va a detallar un guión de los pasos a seguir en la instalación.

- Conocer coordenadas exactas de la ubicación deseada, y profundidad del fondo marino.
- Conocer estado de la mar, para el día y horas de posible instalación.
- Botar la boya, en caso de ser transportada en barco. Mantenerla sujeta al buque.
- Botar pequeña boya con un extremo del cable fijado a ella, capaz de soportar el peso total del cable sin que se hunda.

- Soltar el lastre con el extremo correspondiente de cable unido al gancho.
- Con una pareja de submarinistas se hace pasar el extremo del cable de la pequeña boya por el extremo del vástago del cilindro que está sumergido.
- Una vez hilvanado el cable, mediante un traste se recoge la cantidad de cable necesaria para colocar el pistón del cilindro en el centro de su carrera. Hay que tener en cuenta el instante de la marea para determinar exactamente el punto del pistón que fijará la posición del cable.
- Instalar el cable eléctrico.

Toda esta operación se realizará con el compartimento inundable medio lleno.