



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Naval

PROPUESTA DE GENERACIÓN DE ENERGIA MEDIANTE OLAS

Tesis para optar al título de
Ingeniero Naval
Mención: Arquitectura Naval.

Profesor Patrocinante:
Sr. Richard Luco Salman.
Ingeniero Naval
Licenciado En Ingeniería Naval.
Doctor en Ingeniería Naval

DANIEL BRAVO SILVA

VALDIVIA - CHILE

2008

Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

La Tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de **Ingeniero Naval**, mención **Arquitectura Naval**.

EXAMEN DE TITULO:

Nota de Presentación	(Ponderada) (1)	:	
Nota de Examen	(Ponderada) (2)	:	
Nota Final de Titulación	(1 + 2)	:	

COMISION EXAMINADORA:

----- DECANO	----- FIRMA
----- EXAMINADOR	----- FIRMA
----- EXAMINADOR	----- FIRMA
----- EXAMINADOR	----- FIRMA
----- SECRETARIO ACADEMICO	----- FIRMA

Valdivia,.....

Nota de Presentación	= NC/NA * 0,6 + Nota de Tesis * 0,2
Nota Final	= Nota de Presentación + Nota Examen * 0,2
NC	= Sumatoria Notas de Currículo, sin Tesis
NA	= Número de asignaturas cursadas y aprobadas, incluida Práctica Profesional.

Al Flaco, a Cirilo, a Francisco Abel,

Y a Arturo Silva, cuando lo empezó todo...

Índice:

I. Introducción	1
II. Estado del arte	3
II.1.Pelamis	3
II.2.Wave Dragon	6
II.3.AquaBuoy	7
II.4.SwellFuel	9
III. Desarrollo del modelo de ingeniería,	11
III.1.Fabricación de una maqueta	15
III.2.Materialización y proyecto de ingeniería	16
III.3Fase de diseño	18
III.4.Cálculos estructurales y propiedades mecánicas	22
IV. Datos hidrodinámicos, movimiento de olas y resultados preliminares,	28
IV.1.Estimación de caudal bombeado	30
V. Conclusión	35
VI. Bibliografía	37
VII. Anexos	39

Resumen:

El presente trabajo mostrará un proceso ingenieril que termina con una propuesta concreta respecto a un sistema generador de energía eléctrica accionado por las olas del mar.

La propuesta es extremadamente simple y la filosofía general ha consistido en mantener todo en un nivel tecnológico bajo, que garantice un funcionamiento económicamente sustentable.

El proceso de generación se basa en tres conversiones energéticas; desde el movimiento vertical de las olas, a la generación de movimiento mecánico rotatorio y luego, a través de un generador, obtención de energía eléctrica.

Abstract:

The present document will show an engineering process, ending with a proposal about a system able to get electric energy from the ocean waves.

The proposal is extremely simply and the philosophy of the project is to keep everything on a very low level of technology, making it cheaper and offering an economic practicable solution.

The process is based on three energetic transformations; from the vertical movement of the waves to the mechanical rotation of an axis and, from this axis, to a generator on the last transformation, to electric energy.

I. Introducción

El problema energético mundial representa un desafío cuya solución es apremiante, tanto en términos económicos e industriales como ecológicos y medioambientales.

El cenit del petróleo mundial se predijo según las empresas Shell y Total para los años 2015 y 2020 respectivamente, previamente la empresa Shell había sido capaz de predecir con casi total exactitud el cenit de la extracción de crudo estadounidense (1970).

El problema energético ha sido el motivo histórico de grandes conflictos bélicos, incluyendo la fallida invasión a Iraq por parte de Estados Unidos, que desde el cenit del petróleo de Noruega (2002), ya ha ocasionado la muerte de más de 100.000 personas, y ha frustrado toda la planificación del invasor, para quien ésta debía ser una intervención rápida y certera.

De esta manera, es imposible dejar de atender uno de los pocos temas que le dan a la ingeniería la posibilidad de comprometerse con ideales más altos que la simple explotación industrial.

La intención de extraer energía del océano no es una idea nueva, y nace de forma casi espontánea al observar la fuerza de las masas enormes de agua.

Al igual que el viento, la luz del sol o el calor de las profundidades de la tierra, la existencia de la fuente de energía es tan evidente como lo es la dificultad de extraerla y de asegurar un suministro continuo y regular. En efecto parece que los elementos se burlaran de los esfuerzos humanos, mostrándoles su fuerza pero negándoles su captura.

La necesidad de extraer energía mediante medios amigables y alternativos es tan crítica que en muchos países europeos se subvenciona la inversión inicial de todo proyecto de energía limpia y renovable, de manera que el inversor privado no debe esperar largos años (30 en el caso de una central eólica de tamaño medio) para empezar a ver los resultados de su inversión. Nuestro país tampoco está ajeno a esta tendencia y entre otras regalías, permite el uso libre de la red de transmisión para todos los productores pequeños de energías renovables, siendo esto lo que permite pensar en la sustentabilidad económica de un proyecto de este tipo.

No obstante lo anterior, es necesario señalar que una central termoeléctrica (según estudios del Centro de Estudios Públicos; CEP) sigue siendo mejor negocio que una central eólica, incluso considerando en las toneladas de carbono que, según la nueva legislación chilena, esta última puede “vender” a una empresa que sí genere carbono liberado al ambiente.

Frente a la necesidad energética y en un escenario económico donde el precio de la energía es capaz de sustentar inversiones fuertes en desarrollo, se inició un proceso de ingeniería en busca de una forma de extracción energética oceánica.

Se analizaron distintas formas de extracción energética, considerando corrientes marinas por variación de mareas, movimiento vertical de la marea, impulso tangencial del impacto frontal de una ola, absorción de la energía de las olas que revientan y movimiento vertical de la ola. Siendo este último el elegido dada su relativa predictibilidad, regularidad general y posibilidad de utilización del desplazamiento de un volumen flotante.

La altura de marea del lugar más amplio de Chile, Chiloé, son 6 metros. Esta variación ocurre cada 6 horas, mientras que una ola de un metro de alto tiene un periodo aproximado de 6 segundos, lo cual equivale a un ascenso de 2160 metros en 6 horas. La variación de altura en un volumen dado es, en consecuencia óptima en la ola, y no en la marea. Por otro lado en el año 2005, y bajo la misma búsqueda, Felipe Cubillos, quien ha estado detrás del financiamiento de este proyecto desde sus inicios, y yo, visitamos durante el periodo de mayores mareas el canal de Chacao en un yate, con el fin de determinar la posibilidad de sumergir turbinas generadoras en el canal (véase: [energia_pdf_centrales_mareomotrices.pdf](#) entre los documentos adjuntos) por aquel entonces nosotros descartamos la posibilidad de aprovechar esta energía ya que, aunque parece enorme, la velocidad de la corriente tiene un pic máximo muy breve, y de las 6 horas del ciclo de marea, 4 horas son de semi calma, años después el proyecto del puente del canal de Chacao propondría una solución parecida, descartándola por sus costos en términos de obra civil.

Nuestro sistema de movimiento vertical accionado por olas, sufrió una serie de variaciones y evoluciones, desde sistemas que incluían tanto conversiones mecánicas o hidráulicas, como un generador en cada boya, reguladores y sistema eléctrico en general. Finalmente se propuso una solución que simplificaba al máximo los elementos flotantes expuestos al océano. Esta solución está conformada por una serie de bombas gigantes de agua marina, accionadas por el movimiento vertical de las olas, cuyo flujo se conduce a través de tuberías flexibles, a una turbina y generador, únicos para toda la central.

Sobre un falucho, la sumatoria de los flujos de la serie de bombas, será conducida a una central hidroeléctrica “estándar”, cuya turbina Francis o Pelton, generador y solución eléctrica en general están resueltas, con costos y rendimientos conocidos.

El sistema se ha calculado bajo una serie de situaciones difíciles de estimar, ya que el ambiente marino, durante los 365 días del año, varía desde largas calmas hasta tormentas de condiciones impredecibles.

Las condiciones económicas se han calculado bajo una evaluación a 5 años de la inversión, por lo tanto nuestras bombas deben ser capaces de resistir este periodo sin sufrir daños mayores; esto constituye una condición más que complicada, y difícil de asegurar, para un cuerpo flotante fondeado y aislado en el ambiente marino.

A lo largo de esta tesis intentaremos mostrar el desarrollo del proyecto, incluido su cálculo teórico, maqueta funcional y fase de producción del prototipo. Es muy relevante estar concientes de que este es un proyecto privado, con fines económicos y no una investigación académica pura, por lo tanto en repetidas ocasiones a lo largo del desarrollo, se descartaron ideas por ser tecnológicamente demasiado sofisticadas o de desarrollo lento y complejo. No se ha buscado una solución “perfecta” sino una solución “eficiente”, y esto llevó a descartar muchas opciones basándose en cálculos simples y observaciones muy preliminares inspiradas casi en la intuición, este es un procedimiento de desarrollo industrial, el cual, a un académico riguroso, podrá parecerle incluso descuidado.

II. Estado del arte

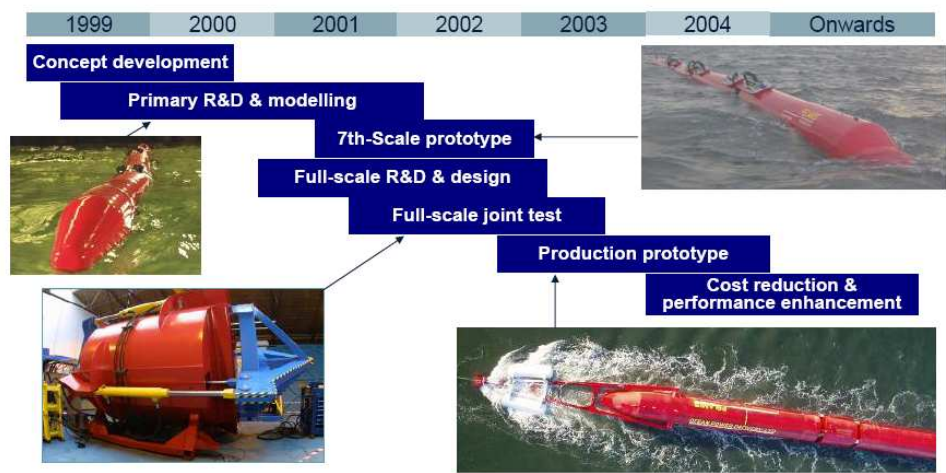
Por supuesto, y según ya hemos mencionado, nosotros no somos los únicos en el mundo que enfrentan este desafío, ni tenemos el mayor presupuesto, ni estamos más avanzados que el resto, nosotros solo tenemos el “descaro” de creer que nuestra solución si va a funcionar, que va a ser económica y funcionalmente la más robusta, y que va a producir energía a un costo sustentable.

Los distintos equipos de trabajo alrededor de todo el mundo han ido buscando entre las partes energéticas de la ola y se han diferenciado en sus apuestas respecto a que forma de extracción es la más conveniente. La ola puede entregarnos energía porque es un cuerpo que se mueve muy rápido, porque se levanta cíclicamente o porque desplaza una masa enorme. Estas tres opciones exigen configuraciones muy particulares para los aparatos involucrados, y aunque el poder proviene de la misma fuente, casi se constituyen inicialmente en formas distintas de energía.

Como sea, nuestros competidores no son principiantes, y conviene darles una mirada:

Pelamis:

Partiremos nuestra revisión con uno de los sistemas más avanzados, costosos y que llevan una fase de estudio más larga; estamos hablando del proyecto portugués Pelamis, cuya carta Gantt de desarrollo vemos aquí;

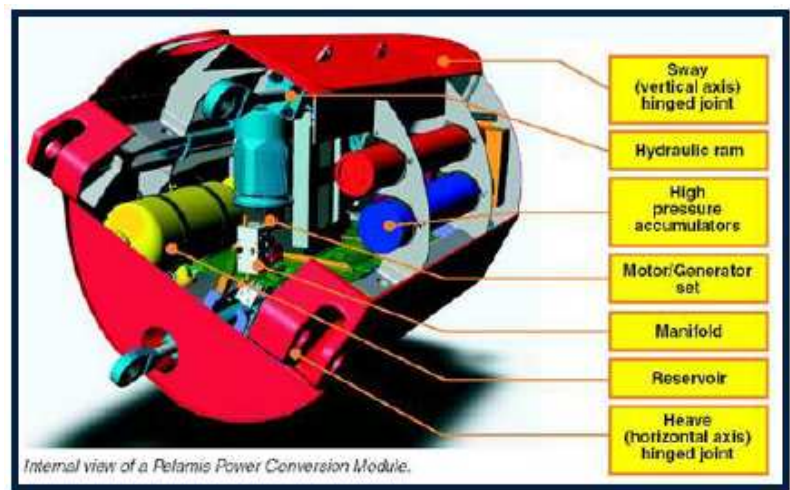


Pelamis es un proyecto que lleva casi 10 años de desarrollo y se basa en el aprovechamiento de la oscilación vertical de la ola, en forma de ondulación sobre la superficie del mar.

El aparato consiste en una serpiente de 140 metros de largo y 3.5 metros de diámetro, cuyas uniones articuladas están conectadas a grandes pistones hidráulicos, que absorben la energía de las flexiones recurrentes transformándolas en presión hidráulica, la cual es transformada en energía eléctrica.

Todo el conjunto de acumuladores motores y generadores se encuentra en las secciones cortas que unen los cuerpos flotantes principales, cada “serpiente” se fondea libremente con 2 muertos y envía la corriente a través de un cable submarino hacia tierra. La serie de cuerpos articulados se orienta de forma espontánea hacia las olas incidentes.

El sistema interno se ve básicamente así:



El sistema hidráulico es, en principio, relativamente simple, sin embargo su total hermeticidad es prerequisite fundamental para asegurar la duración de la maquinaria en el tiempo.

El esquema funciona así:

Los cilindros hidráulicos bombean líquido hidráulico desde un depósito, por acción de la flexión del cuerpo del Pelamis, el líquido es conducido a un acumulador de hidrógeno (“Reservoir”, en el dibujo), los acumuladores son botellas de acero, con dos fluidos dentro; Hidrógeno y fluido hidráulico, separados ambos por una membrana de goma flexible, en un primer momento el volumen interno del acumulador se encuentra ocupado solamente por hidrógeno, el cual tiene un comportamiento de compresión elástica, reduciendo progresivamente su volumen a medida que la botella se va llenando de fluido hidráulico. Manteniendo este último a una presión regular.

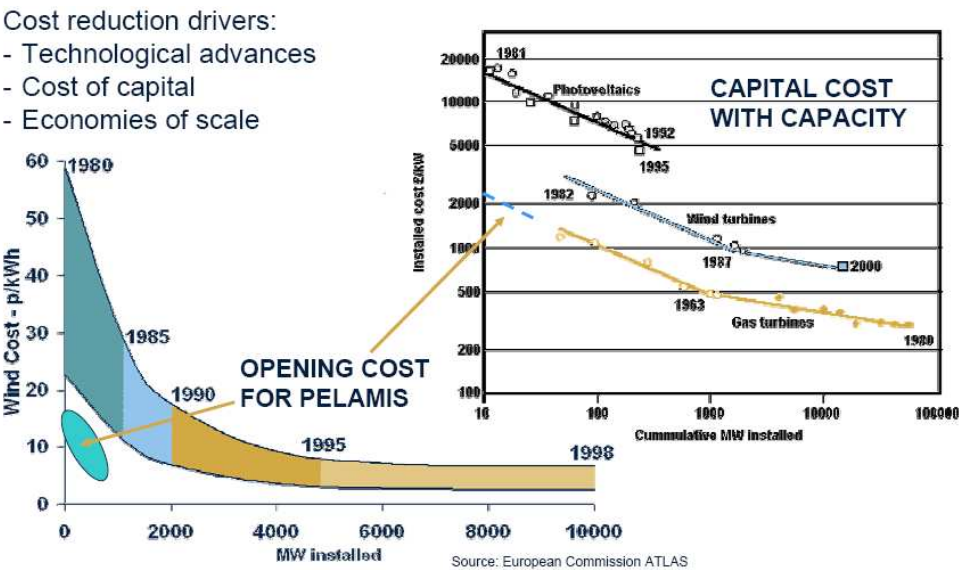
Un flujo deseablemente constante escapa del acumulador y llega a un motor hidráulico, el cual genera movimiento rotatorio y mueve un generador.

Las desventajas menos graves del sistema corresponden a la naturaleza de los sistemas hidráulicos: los motores de este tipo giran con rangos de presiones y caudales determinados, si la presión aumenta más de lo deseado, esa energía simplemente deberá perderse, en forma de un chorro de descarga hacia el depósito de líquido hidráulico.

La desventaja más grave de este sistema es su elevado grado de sofisticación y tecnología en sus componentes, los cuales estarán expuestos al ambiente más inhóspito de la tierra, sin posibilidad de mantención suficientemente periódica.

No obstante la aparente sofisticación del sistema, sus fabricantes declaran ser capaces de producir energía en un rango de 3200 dólares por Kilowatt, lo cual esta bastante lejos de una instalación de turbina hidroeléctrica estándar, (1000 dólares por kilowatt en turbinas y generadores, sin contar la obra civil de una eventual represa).

Aquí vemos una tabla de costos productivos del sistema (provista por sus fabricantes):



Wave Dragon:

Nuestro siguiente “competidor”, es el proyecto danés “Wave Dragon” cuya apuesta no es a las oscilaciones verticales de la ola sino al impulso frontal de cada ola. El “Wave Dragon” pretende ocupar la energía cinética escondida en la rotación de cada partícula por la cual “pasa” una ola, mediante una rampa que emula el efecto de la orilla de una playa, transformando energía cinética en energía potencial mediante el ascenso.

La estructura del aparato en análisis consiste en un cuerpo flotante, de acero y concreto, fondeado mediante una línea única al fondo del océano, paralelo a la cual viaja un cable submarino. El cuerpo se orienta por efecto de las mismas olas apuntando siempre con su rampa de acceso hacia la dirección de incidencia de los trenes de olas.

El ingreso y concentración de olas en la rampa se ve estimulado por dos brazos orientadores, a modo de paredes semi-sumergidas, que nacen del cuerpo principal del aparato y son soportadas en su posición por algunos cabos que nacen de la línea de fondeo.

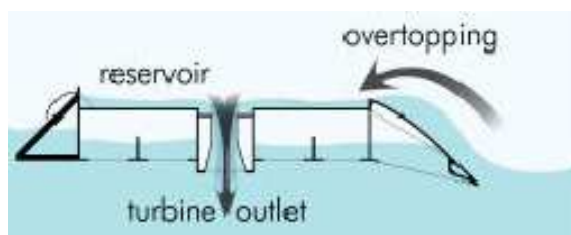
Una vez que el agua sube a la rampa del Wave Dragon, se encuentra con una piscina de escasa profundidad que retiene el agua unos pocos segundos, antes de que ésta vuelva a caer, esta vez a través de unas tuberías ubicadas en el medio de la piscina equipadas con turbinas y generadores.

Esta piscina acumuladora se encuentra a 1.5 metros de altura respecto a la superficie del mar en el prototipo y se encontrará a una altura de entre 3 y 7 metros en los modelos definitivos.

A continuación vemos una imagen del artefacto y un esquema simple de funcionamiento:



Esquema de funcionamiento:



El prototipo escala 1:4.5 que se encuentra funcionando tiene un desplazamiento de 237 toneladas y sus medidas son 58x33 metros, aunque se espera llegar a construir unidades de 33.000 toneladas de desplazamiento y 300x170 metros. La estructura definitiva se piensa realizar en materiales compuestos

Una de las formas en que se plantea reducir el enorme impacto económico de la inversión inicial consiste en la instalación adicional de molinos eólicos sobre el cuerpo flotante, actuando este como cimiento y ocupando la misma instalación de transmisión eléctrica. De cualquier forma se espera que nueve de estas unidades (sin especificar su tamaño) sean capaces de generar 100MW.

Según las declaraciones de sus creadores, ellos esperan ser, dentro de los próximos años, competidores serios para las plantas eólicas offshore, lo que nos indica, que no han alcanzado una forma de producción que les permita un grado suficiente de competitividad económica. Por lo pronto, ellos dicen ser capaces de vender la electricidad a €0.052/kWh, lo cual está cerca de ser 3.8 veces más caro de lo que se transa la energía actualmente en Chile (0,021 dólares).

No obstante todas las dudas que puedan surgir, los creadores del sistema declaran que este ha probado desde el 2003 su factibilidad, generando energía conectado a la red y resistiendo los embates climáticos.

La fase de pruebas ha demostrado que el sistema es capaz de generar energía en intensidad variable durante el 80% del tiempo, y esperan ser capaces de reducir los costos de mantención e instalación en un 5% respectivamente mediante la optimización en el tiempo.

AquaBuoy

Nuestro tercer sistema en exposición, es el más parecido a nuestro propio intento y también están bastante avanzados respecto a nuestra evolución; ya han lanzado un prototipo al agua y se encuentran en las fases de "Sea Trials".

Es relevante mencionar que la información disponible para la mayoría de estos proyectos es escasa y más bien general, pudiendo observarse, en general, múltiples esquemas, videos y animaciones sofisticadas, pero de escaso valor técnico o ingenieril, en un intento claro y comprensible por mantener los secretos del sistema bajo un manto de hermetismo.

El sistema propuesto por la empresa canadiense Finavera apela al aprovechamiento de los movimientos verticales del océano, y así como nuestro sistema, el cuerpo principal es una boya que absorbe la energía en un área reducida sobre la superficie de la ola.

No obstante, este sistema ocupa la energía cinética del movimiento vertical de la ola, mientras que el nuestro, ocupa la potencia del desplazamiento y empuje de una boya.

El sistema AquaBuoy, de Finavera, oscila verticalmente, mientras debajo de la boya oscilante, un disco inserto en un cilindro de diámetro aproximadamente igual al de la boya, se mantiene en una posición relativamente estática, debido a la relativa calma en que se encuentran las aguas a mayor profundidad.

Este disco está conectado a una bomba simple, de pistón, la cual bombea agua salada a presión hacia la boya, dentro de la boya existe una pequeña turbina Pelton, conectada a un generador. Cada boya tiene su propio generador y éste envía la energía generada a través de un cable hacia tierra. El sistema es modular y cada boya es independiente, pudiendo instalarse desde una pequeña central para un poblado o alguna industria marítima, hasta series de cientos de boyas para alimentar ciudades completas.

Los creadores del AquaBuoy son particularmente herméticos en lo que a datos sobre costos de fabricación y de generación respecta y en efecto no hay ningún motivo para decir que este sistema sea más barato o más caro que otros.

Aquí vemos el dispositivo flotando, generando energía:

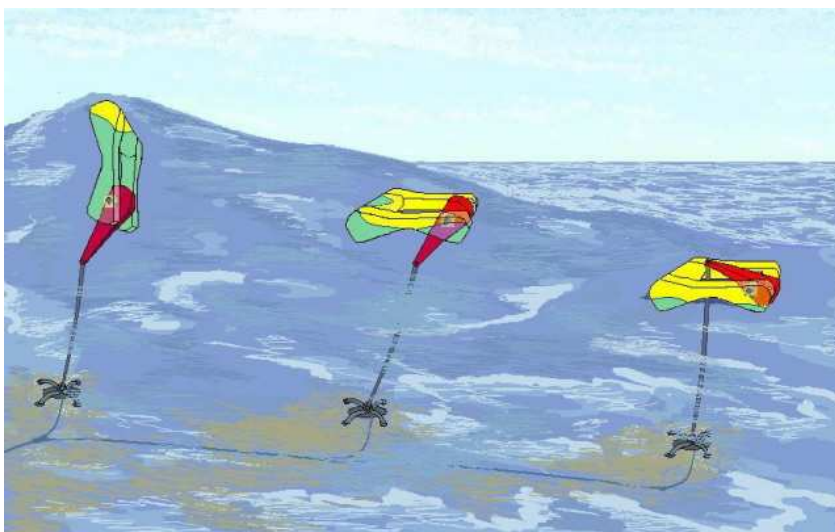


Aquí observamos el cilindro inferior, donde se ubica el disco que, manteniéndose estático respecto al movimiento del cuerpo de la boya, acciona una bomba de agua salada:



SwellFuel:

Nuestro último proyecto a analizar pertenece a Christopher Olson de Houston y ha recibido el nombre de “SwellFuel”, el sistema esta en una fase más temprana de desarrollo que los otros y es, según veremos, bastante más doméstico:

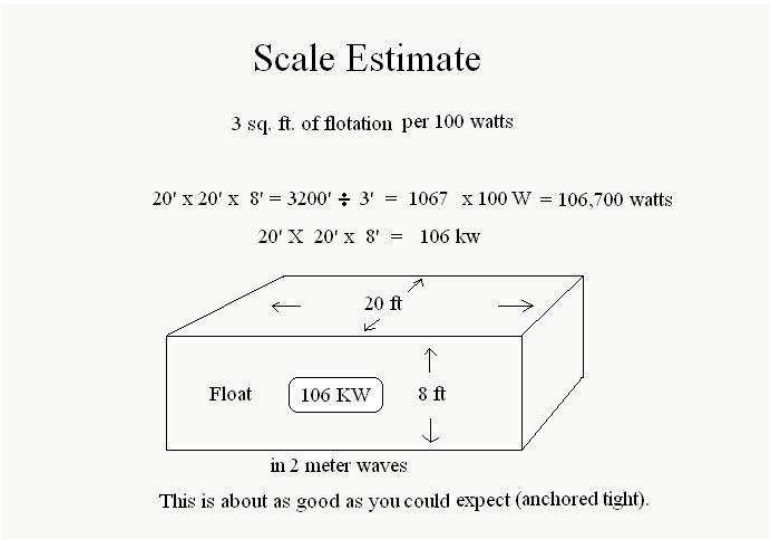


La creación en cuestión no pretende solucionar el problema energético en términos macroeconómicos o mundiales, sino que se plantea como una solución para pequeñas instalaciones que se encuentren en muelles, plataformas flotantes o cerca de la costa u orillas de playas, el dispositivo es relevante en nuestra exposición ya que es el único que incluye al fondeo como parte esencial de la relación mecánica que genera la energía, teniendo esto en común con nuestro sistema.

El dispositivo es simple y pequeño, su tamaño le permite incluir soluciones que en otras proporciones serian muy caras o técnicamente muy desafiantes.

El prototipo inicial ya fue fabricado y efectivamente es capaz de generar energía en cantidades y voltajes pequeños, aunque su versión industrial no se ha desarrollado ya que hasta ahora la puesta en práctica no pasa de ser una estructura casera fabricada con materiales comunes de ferretería, produciendo entre 40 y 130Wh. Según podemos apreciar la aplicación tiene una escala doméstica.

En general no se dispone de ningún tipo de información cuantitativa respecto a este sistema, salvo una tabla donde se puede realizar una observación rápida de cómo podría escalarse el sistema en tamaños mayores:



Por supuesto la rigurosidad numérica de esta aproximación y las posibilidades técnicas reales de exportar el sistema a escalas mayores, limitará concretamente su aplicabilidad, pero el ejercicio sirve para hacerse una idea de su funcionamiento (básicamente de que su rendimiento se supone proporcional al plano de flotación lo que es, en principio, verdadero).

Aquí vemos el prototipo construido, del cual ésta es la versión 51:



El sistema del Swell Fuel consiste en una palanca fija al fondeo y a un eje soportado sobre un flotador, a este eje, dentro del flotador, va acoplado un generador y al producirse el movimiento ascensional del conjunto, la palanca se ve obligada a pivotar hacia abajo, haciendo girar el generador.

El ciclo se completa cuando la ola pasa, y la palanca retorna a su posición inicial accionada por un peso tipo balancín.

Cabe mencionar que el sistema se sumerge completo cuando la ola excede la altura máxima soportada por la palanca completamente pivotada, además, el rango de movimiento del sistema debe ser tal que absorba las diferencias de mareas, ya que sino, la palanca quedaría totalmente extendida en la marea más alta y totalmente retraída en la más baja.

Todas estas características complicarían seriamente la aplicación del sistema a mayores escalas, dado que el generador debería estar dentro de una cámara sellada y resistente a la presión de las inmersiones.

III. Desarrollo del modelo de ingeniería

Es fundamental recalcar en este punto que nuestro modelo ingenieril estuvo más bien relacionado con la viabilidad económica del proyecto, comprendiendo que nuestra solución no está respaldada por el mayor proceso académico o científico posible, sino que se han limitado las horas de ingeniería con la intención de quedar a la par de los proyectos ya desarrollados en un lapso de 4 meses.

Por lo demás, el carácter general del proceso ingenieril aplicado fue más bien poco pretensioso y para nada impresionante, todos los cálculos estuvieron basados en los principios más básicos de la física y la ingeniería y no se utilizó ningún software complejo de análisis o simulación.

La única intervención informática se llevo a cabo a través de planillas Excell y AutoCad para realizar planos. La mayoría de los cálculos se realizaron durante conversaciones con calculadora

en mano o sobre buses en croqueras de apuntes, por lo tanto tampoco existe una memoria de cálculo donde pueda seguirse el proceso de forma ordenada.

El trabajo intensivo de desarrollo duró 4 meses, de los cuales se dedicó el primero a determinar que forma de la energía de la ola era capaz de producir más simple y homogéneamente energía eléctrica.

El segundo mes se dedicó primordialmente a identificar cual iba a ser el mecanismo mecánico o hidráulico que extraería la energía. Durante este mes se trabajó en conjunto con un ingeniero eléctrico, quien debía estudiar la factibilidad de instalar un generador eléctrico en cada boya, así como la evaluación económica de la instalación de cableado y equipos eléctricos en general

El tercer mes de desarrollo se enfocó a la optimización del sistema que se propuso como definitivo, Obteniéndose los primeros planos de lo que sería nuestro actual “Bombín Marino” o “Sistema Perpetuo de Generación Oceánica” y sobre todo calculándose la cantidad teórica de energía que seríamos capaces de producir.

Durante este mes se fabricó y probó en el mar una maqueta escala 1:7 del proyecto.

Durante el cuarto mes se entregaron los planos de la Bomba (Versión VI) a la empresa Reifox, para iniciar su fase de producción, paralelamente se cotizan y averiguan sistemas de fondeo, muerto, mangueras flexibles, bancos de medición de caudal y todos los demás implementos necesarios para instalar el prototipo.

Hacia el quinto mes se adquiere un estudio estadístico de parte del SHOA, que nos permite decidir en que zona de la costa chilena instalaremos nuestro Bombín marino, y podemos además, contrastar por primera vez nuestros pronósticos energéticos teóricos con información empírica, la cual resulta ser mucho mejor (en alturas y periodos) de lo que habíamos calculado durante la fase de desarrollo.

Mediante esta secuencia estricta y vertiginosa pretendemos tener nuestro sistema fondeado entre el 5to y 6to mes de desarrollo. Momento a partir del cual se requiere una medición de un mes que confirmará (idealmente) los cálculos teóricos y verificará la viabilidad técnica y económica del proyecto.

Durante la fase inicial del proyecto se tenía escasa idea de la línea que se deseaba seguir, no obstante, el encargo era claro; hay que inventar la forma de generar energía del océano.

Al respecto existe en Internet un sinnúmero de propuestas y creaciones más o menos serias, algunas domésticas y otras enormes y millonarias, financiadas, principalmente, por la comunidad europea, según ya hemos revisado en el “Estado del Arte”.

La primera labor que podría titularse de “ingenieril” fue la determinación del movimiento de la ola capaz de levantar una mayor columna de agua con la mayor frecuencia posible.

Nuestros casos de estudio fueron tres:

Potencia del avance “horizontal” de la ola.

Potencia del desplazamiento vertical de un cuerpo flotando sobre la ola

Potencia de impacto de una ola contra la orilla

Estos tres casos de estudio se analizaron de forma breve y más bien pragmática, prescindiéndose en general de evaluaciones detallistas.

El tercer caso, de la potencia de impacto de una ola contra la orilla se descartó ya que se consideró un caso poco “genérico”, el cual debería estudiarse de forma individual en cada playa o en cada roquerío que pueda presentar condiciones favorables, se sabe del siguiente caso, perteneciente a la empresa Israelita S.D.E. Wave Power:



El sistema de paletas flotantes está asociado a una serie de pistones hidráulicos los que, a su vez, entregan energía hidráulica a motores y estos impulsan generadores.

Sin embargo ante este caso de estudio o modelo de extracción energética, se presentó el problema de que, según sabemos, los fenómenos de olas que revientan y, en general situaciones de fluidos caóticos no permiten hacer predicciones precisas. Por otro lado el nivel de impacto visual y social asociado a un proyecto instalado en el medio del océano, respecto a uno que ocupe una gran extensión de costa son incomparables, haciendo que nos decantemos sin dudar por un proyecto

que pueda ser aislado, en lo posible, de todo contacto visual y natural. Más aun las costas son un espacio necesariamente lineal, dado lo cual, el espacio útil está destinado a sacrificar una extensión enorme de playa o roquerío, en el medio del océano el espacio puede ocuparse en largo y ancho, lo que permite realizar intervenciones que, en términos de espacio frontal visual, sean más discretas.

Como último inconveniente, se presenta el hecho de que la exposición al impacto de las olas en una costa puede, en determinados momentos, ser potencialmente destructivo para cualquier estructura.

Para evaluar las otras dos condiciones energéticas se consideró una ola estándar, correspondiente a 16 nudos de viento real. En su momento se realizaron cálculos y documentos que justificaban las decisiones que se tomaron en esa línea, y a modo de testimonio, se expondrán aquí los documentos originales con los cuales se estudiaron los casos de:

- Potencia del avance “horizontal” de la ola (revisar anexo “Olas.pdf”)
- Potencia del desplazamiento vertical de un cuerpo flotando sobre la ola (Revisar anexo “La Energía en el Mar.pdf”)

En los anexos propuestos se evalúa la energía en términos de la presión de columna de agua que son capaces de levantar, o de su capacidad de tiro.

Como conclusión de los textos antes mencionados podríamos decir que, aprovechando el impulso horizontal de “rotación” de la ola podemos, con un artefacto de 5mt de ancho y un metro de profundidad, bombear 1250 Lt/seg, con una presión de 8250 Pa, equivalentes a 1031 Watts. Mientras que con un flotador cilíndrico de 5mt de diámetro, somos capaces de generar 9850 Watts de energía, mediante un sistema de winches y cables anclados al fondo marino.

Por lo tanto, en adelante se asumirá que la “mejor” forma de energía extraíble de la ola corresponde al empuje de un elemento flotante, según se proponía en el anexo “La Energía en el Mar.pdf”.

Sin embargo, se llegó a la conclusión de que “embarcar” un rolete, un generador y los cables eléctricos necesarios en una boya que descansa en el medio del océano, y replicar esto en la cantidad de boyas necesarias, supondría un gasto económico y un riesgo de averías enorme, tecnológicamente difícil o imposible de abarcar, sobretudo por el problema que implica el desarrollo del generador, el cual funcionaría a velocidad variable y se necesitarían además, artefactos como la caja_1 para lograr que el eje girara siempre en la misma dirección (ver anexo

pdf caja_1) cuyo funcionamiento mecánico, en el medio del océano, se vería seriamente afectado por la humedad, exigiría una cabina hermética, etc.; Más complicaciones de las que un proyecto “de bajo presupuesto” quiere asumir.

Luego de divagar sobre las distintas posibilidades que se nos presentaban, llegamos a la idea definitiva de la bomba marina, es decir, un artefacto que simplemente levantaría una cantidad de agua a una altura determinada, para ser usada como medio de producción energética en un sistema hidroeléctrico normal.

El principio inicial pretendía bombear el agua hasta tierra, por medio de tuberías flexibles, podemos ver una descripción de este concepto en el anexo: “Breve Explicación.pdf”. Se evaluó la cantidad de agua y la energía susceptible de producirse en base a una tabla estándar de turbinas hidroeléctricas (véase grafturb.jpg), lo que permitió hacerse una primera idea de cuánto podía “pagar” nuestro proyecto, y de a cuánto ascendía el monto que podíamos gastarnos en nuestro prototipo, de acuerdo al precio de la energía.

III.1. Fabricación de una maqueta:

En esta etapa de desarrollo se fabricó una maqueta con unas medidas preliminares, cercanas al prototipo final. La intención de desarrollar esta maqueta no fue obtener valores cuantitativos ni determinar si éramos capaces de bombear una cantidad de litros determinada, aunque debo reconocer que yo subí al bote con una bolsa plástica donde llevaba mi calculadora y las croqueras de apuntes; por supuesto, no fui capaz de registrar nada concreto.

La prueba se desarrolló en la poza del Club de Yates de Algarrobo, donde existe una ola mínima, pero que para nuestra maqueta escala 1:7, era más que suficiente, de hecho relativamente sobredimensionada.

Nuestra experiencia con la maqueta fue breve, pero intensa y emocionante, la fondeamos en el océano con un saco de arena y luego de algunos ajustes al cabo de fondeo, pudimos observar con euforia como emergía agua salada de la manguera que habíamos conducido hasta el bote; ¡La bomba funcionaba correctamente!. (Véase video anexo “whales chile.wmv”)

El principio básico quedo así probado, no sabíamos si bombeábamos la presión teórica ni el caudal teórico, pero era claro que nuestro “Bombin marino” no se escoraba, no se trababa ni se desplazaba demasiado lateralmente; un éxito enorme, capaz de motivarnos lo suficiente para seguir adelante.

Con este hito terminó la primera etapa de desarrollo, la cual nos llevo a los principios básicos que se seguirían durante la materialización del prototipo.

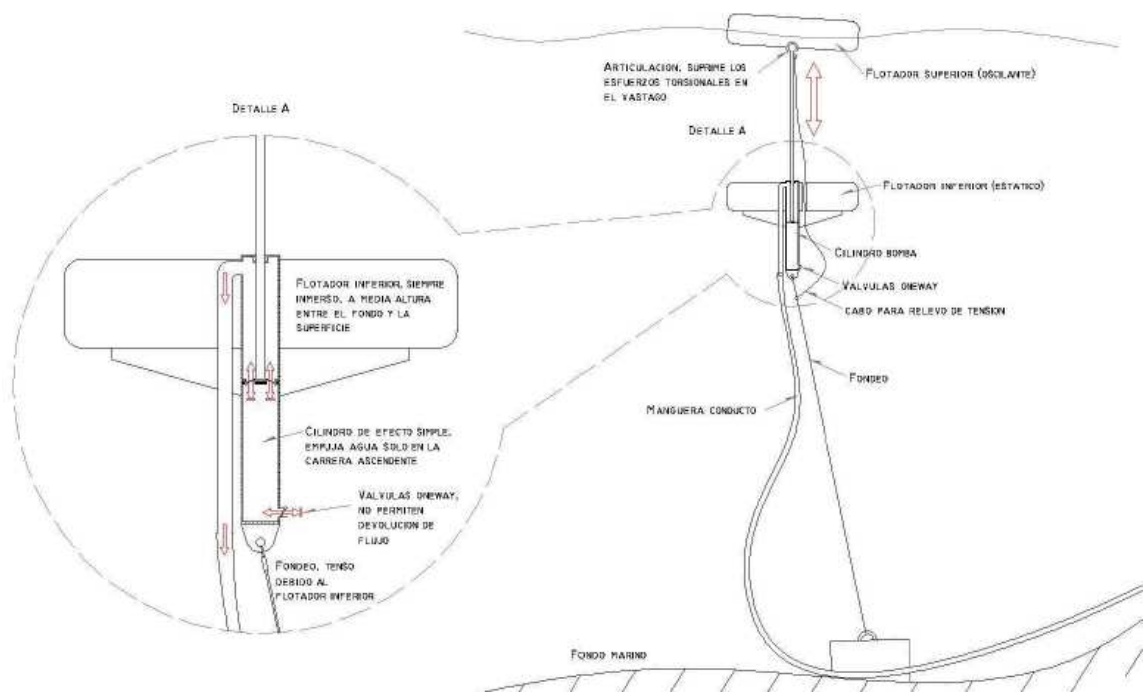
III.2. Materialización y proyecto:

En esta etapa de desarrollo se terminó de implementar la planilla “Hoja para Estimaciones.xls” (ver anexo) la cual nos permitió evaluar una nueva variable, consistente en la pérdida de carga por efecto de la longitud de tubería, esta consideración empezó a oscurecer la perspectiva de bombear agua hasta tierra. Por otro lado se recibieron cotizaciones de una tubería flexible y se constató que el costo de ésta podía no ser trivial (ver anexo “WHALES CHILE 15812.pdf”), considerando que el costo total debía mantenerse alrededor de los 7 millones de pesos. El efecto de la pérdida de carga en la tubería se evaluó con la formula de Darcy - Weisbach ocupando el diagrama de Moody para tuberías con régimen turbulento (véase “Fricción en tuberías.pdf”, el documento no acusa autoría y fue encontrado en internet), y se terminó de constatar con el programa Parga (ver anexo: “Parga.exe”). El procedimiento ocupado procede de fórmulas empíricas.

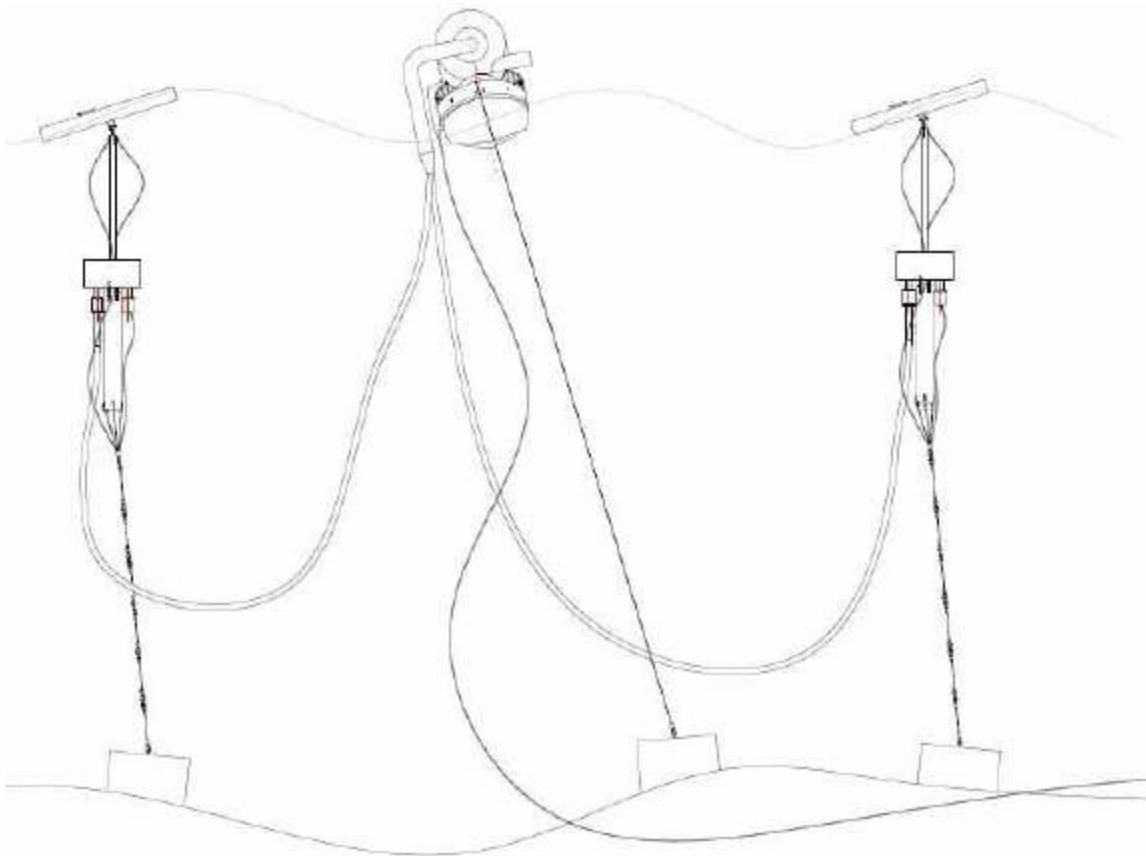
Ante estas nuevas evidencias, se reconsideró la pregunta de dónde generar la energía, determinándose que en realidad, lo más adecuado sería generar la energía lo más cerca posible de las boyas, minimizando el largo de las tuberías.

La nueva orientación se describe pormenorizadamente en el siguiente documento anexo: “Breve explicación II.pdf”, pero podemos ver aquí un esquema rápido de la forma final de las bombas y de la turbina:

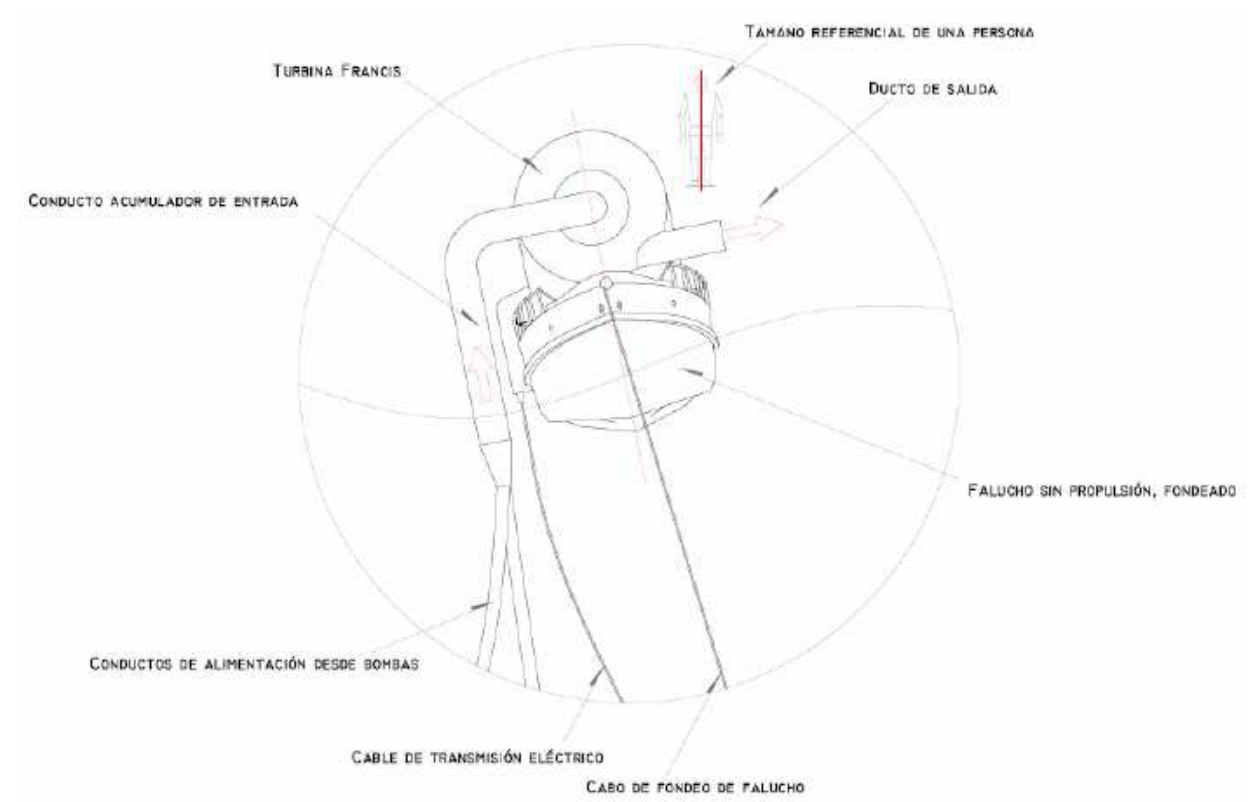
Formas de las Bombas:



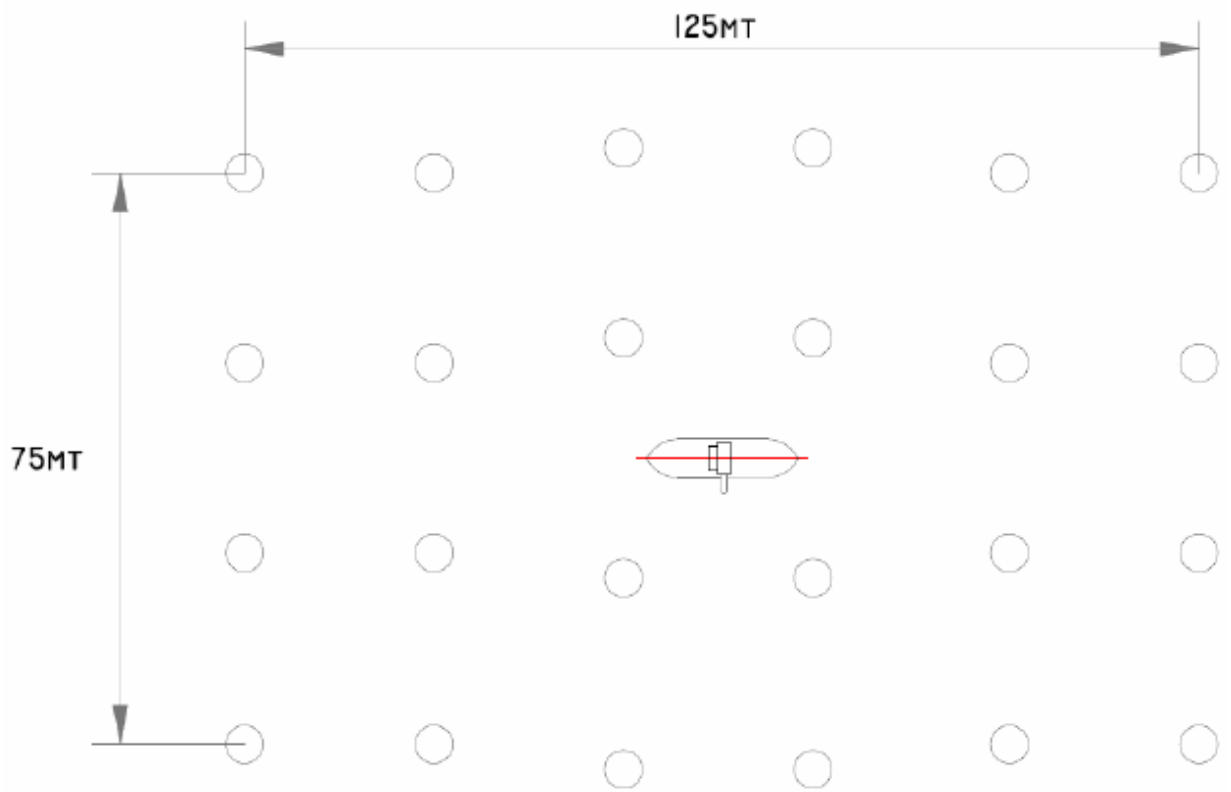
Disposición de las bombas y la turbina:



Esquema de la turbina y sus tuberías:



Disposición general de bombas y turbinas, en vista superior:



III.3. Fase de Diseño:

No obstante y aunque a esta altura se han acotado enormemente los problemas de diseño, aun no hemos diseñado concretamente la pieza fundamental de nuestro sistema, esto es, la bomba flotante de agua salada:

En esta fase fueron fundamentales los siguientes preceptos:

- La condición de funcionamiento “normal” del sistema son 16 nudos de viento
- Las condiciones del mar para los 16 nudos se extraerá, en principio, de la tabla Beaufort
- La variación de marea “normal” se considerará de 1mt, lo cual corresponde a la altura de marea de la zona central del país.

Teniendo estos datos, se inició la acotación de las dimensiones de nuestro artefacto, para lo cual fue fundamental el uso de la planilla “Hoja para Estimaciones.xls” ya mencionada, la cual es ridículamente simple, pero nos permitió evaluar distintas combinaciones de medidas rápidamente. Sabíamos que lo más deseable es siempre elevar una gran presión, más que un enorme volumen a baja presión, eso debido a que, luego de conversar con el fabricante nacional de turbinas hidroeléctricas (visítese el tópico “Turbinas Mancini” en Internet), éste nos informó que las turbinas son más baratas, simples y eficientes mientras mayor sea la caída de agua que las

alimenta, prefiriéndose una cantidad pequeña de agua desde una altura considerable a una cantidad grande de agua a baja presión de entrada. Sabemos además que el costo asociado a compra e instalación del sistema hidroeléctrico, es alrededor de US\$1000 por cada KW generado.

El proceso de desarrollo fue rápido, sin embargo, generó una serie de planos intermedios, y aún durante la fase de producción del prototipo, los planos “oficiales” no correspondieron exactamente a la materialización concreta del artefacto, modificándose o añadiéndose en repetidas ocasiones nuevos elementos o información.

Existen algunos hitos dignos de ser mencionados durante la fase de producción, los cuales se irán mencionando de acuerdo al set de planos que representan las distintas características:

Set de planos I:

Es evidente que en este nivel de desarrollo nuestra bomba era poco más que una idea, sus medidas no estaban bien definidas y los detalles estructurales estaban lejos de acercarse a la realidad, sin embargo, es relevante mencionar que en ese momento se consideraba posible y apropiado implementar un pistón de doble efecto, de manera que el agua se bombee tanto en su camino de ascenso como de descenso.

Esta idea se descartó posteriormente debido a que, para lograr la misma presión de bombeo en la carrera de descenso que en la de ascenso, el flotador superior debería desplazar una masa de agua igual a su propio peso, de manera que al subir su empuje fuese igual a su peso al bajar, esto es imposible ya que, para que el flotador en efecto flote, no puede pesar lo mismo que desplaza, esto obligaría a perder potencia en la carrera de ascenso en función de implementar un flotador algo más pesado, que posibilitara el uso de la carrera de descenso. La solución tiene poco sentido y se descartaría luego. El material del cual se deseaba fabricar el aparato (Polietileno) se encontró definido desde el comienzo, debido a su resistencia al ambiente marino y su comportamiento químicamente inerte.

Set de planos II:

El gran paso de este nuevo modelo fue la supresión del cilindro de doble efecto, utilizándose un cilindro de efecto simple.

Además se esbozó el primer plano “técnico” empezándose a aventurar valores para las dimensiones generales del cilindro. Los detalles estructurales de todo lo demás son aun muy primitivos. Se define en esta fase el uso de válvulas check. En este modelo se incluye un set de estas válvulas ubicadas sobre el mismo pistón, cosa que luego se modificaría por considerarse muy compleja en su construcción.

Set de planos III:

Las medidas generales del cilindro están casi acotadas, no obstante aun se mantiene un sistema de válvulas check sobre el pistón, los flotadores muestran ahora unas fijaciones de soporte en base a orejas, cuyas medidas fueron calculadas según su resistencia estimada.

Uno de los principales elementos que aparece en esta fase corresponde a los cables de seguridad, que limitan la ascensión del flotador superior. Estos cables protegerán la integridad del cilindro en caso de que una ola cubra por completo el flotador superior, llevando al vástago a su límite de recorrido. La maqueta, que se ha mencionado anteriormente, se realizó según este nivel de avance.

Set de planos IV:

En este modelo ya se ha adoptado la configuración final de válvulas check externas, visibles e intercambiables, transformándose el pistón en un artefacto considerablemente más simple. Las válvulas check son válvulas con esferas que obstruyen el paso de fluido en una dirección y lo admiten en la otra. El sistema de arraigo al fondeo ya toma su forma general y la unión del vástago con el flotador superior se resuelve mediante un grillete y destorcedor simples.

Los flotadores reciben por primera vez medidas y desplazamientos precisos, que corresponden a las presiones y fuerzas de trabajo reales estimadas, incluso el flotador inferior aparece ya descrito con un esquema claro de fabricación, mediante tubos soldados.

Set de planos V:

En las constantes conversaciones con la empresa Reifox que se desarrollaron durante la fase de producción, se determinó que la presión de la inmersión del flotador inferior podía significar un problema, dado que la boyas normales, bajo esa presión, colapsarían, como propuesta de solución se esbozó la idea de utilizar bolsas flexibles de PVC, las cuales igualarían su presión interna a la externa, manteniendo su forma y volumen con relativa independencia de la inmersión. Esta idea se planteó, dimensionó y cotizó, sin embargo no llegó a concretarse debido a que finalmente nos decantamos nuevamente por los flotadores rígidos, cuyos 4m^3 de volumen total serían inyectados con espuma de poliuretano para conservar su forma e integridad bajo el agua.

Set de planos VI:

Finalmente llegamos a lo que debía ser el final del proceso de desarrollo, el cual sin embargo y como podía esperarse, sufrió cambios menores hasta el último minuto.

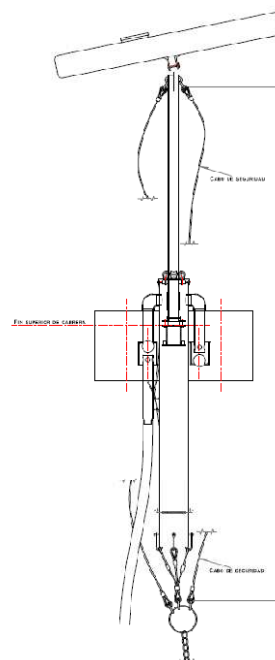
Nuestro modelo final incluye un amortiguador hidráulico para recibir el descenso del vástago, en caso de que una ola baje hasta el cilindro, incluye además amortiguadores flexibles en los cables de seguridad y se le han incorporado unos roletes en la salida del vástago para facilitar el viaje de éste.

Como complemento a este set de planos, y a modo de simplificación del proceso de producción se desarrolló un modelo tridimensional, el cual se imprimió en una serie de renders que permitieron a los operarios de la empresa constructora (Reifox) entender globalmente el sistema y sus partes. Cuando se realizó el modelo tridimensional inicial, éste mostraba la posición de los flotadores inferiores como dos cilindros horizontales, esto fue modificado a petición expresa del Señor Miguel Hidalgo, jefe de producción de la empresa Reifox, quien fuera una enorme ayuda durante toda la producción, aportando incontables ideas apoyadas en su enorme experiencia práctica. Hidalgo consideró que la unión estructural entre el cilindro principal y los flotadores sería considerablemente más robusta si estos se ubicasen en posición vertical, atendiendo esta oportuna observación, se desarrollo el segundo modelo 3d (véase carpeta anexa “Imágenes_3d_I e Imágenes_3d_II”).

Existen también en este set algunas piezas que se idearon pero que no llegaron a materializarse, como los roletes en el pistón; solo se fabricaron finalmente los roletes en la salida superior del vástago, por considerarse los primeros un despliegue innecesario de energía y recursos, las piezas generales se definieron en este set de planos de acuerdo a las disponibilidades de diámetros nominales de tubos y secciones en general.

Este set está constituido por 19 planos y cada uno fue necesario para apoyar y posibilitar el proceso de producción, es relevante mencionar que al comienzo del proceso de producción, este set constaba solamente con 5 planos.

La forma general final del aparato, puede verse el plano anexo: “Bomba_VI_Cabos de seguridad.pdf” o en el siguiente esquema:



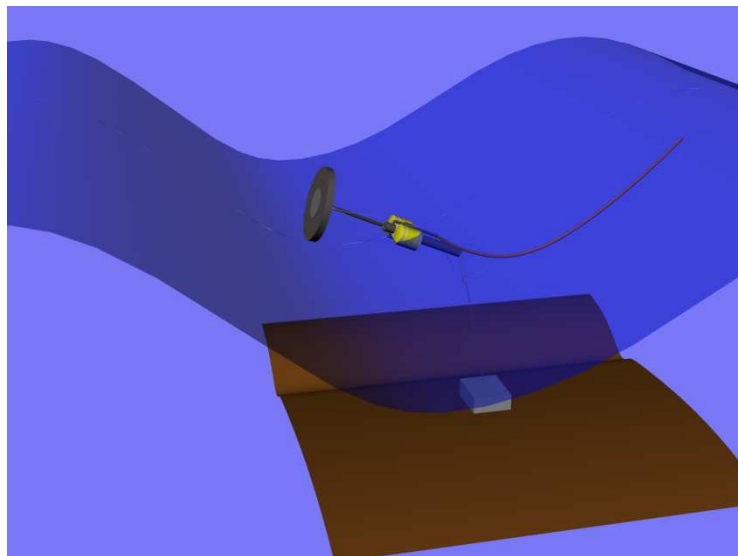
III.4. Cálculos estructurales y propiedades mecánicas:

Se recomienda revisar antes el breve anexo “Explicación.pdf”, que dará luces sobre la configuración de algunas piezas estructurales o funcionales del prototipo y se recomienda leer también la planilla Excel “Pesos.xls”, que se encuentra entre los anexos. La información de esta planilla se obtuvo cubicando teóricamente las partes o pesándolas directamente en la empresa a través de un dinamómetro digital y una grúa. La información de los pesos nos dará una idea de las fuerzas de las que estamos hablando dentro del sistema.

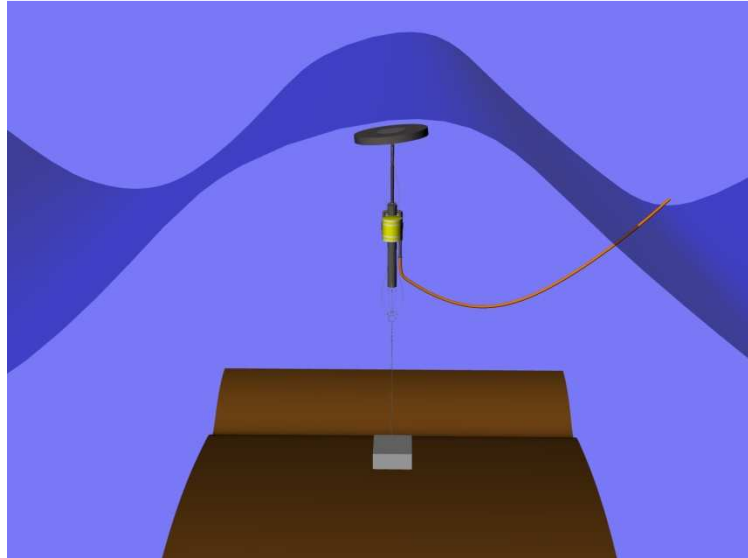
Los cálculos estructurales se desarrollaron, durante la fase de proyecto en croqueras de apuntes, basándose en el cálculo de momentos flectores y de resistencia de vigas simples, no obstante, y siendo necesario exponer ese proceso en esta tesis, se hará una reconstrucción del proceso antes mencionado y las consideraciones que se tuvieron a lo largo de este:

Las dos situaciones críticas que se propusieron, fueron las siguientes:

1. Una ola demasiado baja, que expusiera el cuerpo inmerso de la bomba, escorándola:



2. Una ola demasiado alta, que cubriera la bomba completa, llevándola al final de su recorrido:



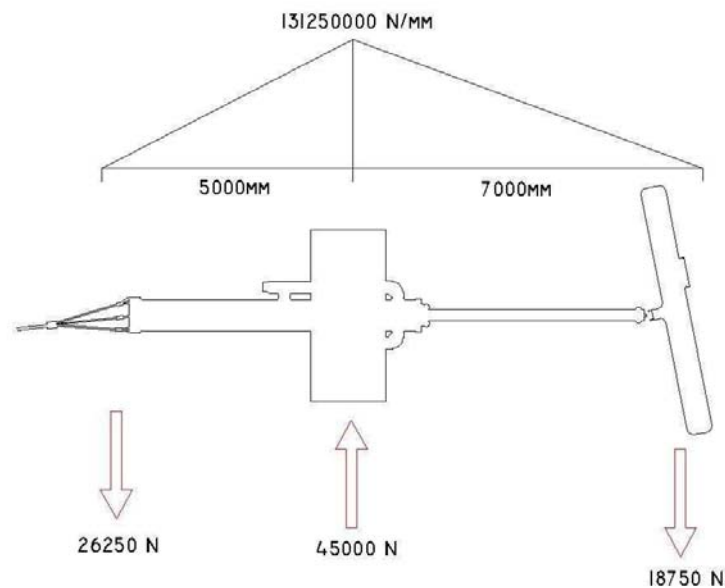
Ante estas dos situaciones, se tuvieron una serie de precauciones en términos de dimensionamiento, las cuales serán descritas separadamente:

Caso 1; Ola baja, que expone el cuerpo inmerso de la bomba:

Este caso no debería ser tan complicado en una situación normal, donde el vástago se inserte, a medida que la altura de la ola disminuye, en el cilindro inferior. En este caso, el vástago no sufriría ninguna flexión demasiado grande y solo existiría el riesgo de que el flotador superior se apoyara, inclinado, en los flotadores inferiores, abollándolos o dañando su fijación al cilindro principal. Esto no parece ser un gran riesgo ya que las piezas, en general, se soportan bien a si mismas.

Sin embargo, existe un temor mucho mayor, más difícil de controlar y muy inquietante; si la ola baja muy rápidamente o el pistón se traba por cualquier motivo, el vástago quedará con sus 5 metros de largo fuera del agua, con un flotador cilíndrico enorme suspendido en el extremo, si la ola sigue bajando, todo el cuerpo se inclinará, transformando al vástago en una viga en voladizo, que estará soportando el peso del flotador enorme en una posición horizontal; ¿Quebrará este esfuerzo al vástago? ¿Quebrará este esfuerzo al cuerpo del cilindro?... Preguntas que determinaron los espesores de los distintos cuerpos, y cuyas respuestas revisaremos aquí:

La situación mecánica es la siguiente:



En esta situación se ha considerado, algo sobredimensionada, la fuerza de empuje generada por el flotador inferior, la cual es contrarrestada por el fondeo, y se ha considerado como si el flotador superior simplemente estuviese “fijo” trabado en su posición, sin poder “izarse” por el momento adrizante generado entre las fuerzas de fondeo y flotador inferior, esto es, por supuesto, mucho más severo que la situación que podríamos encontrar en la realidad, donde el flotador superior será, de hecho, izado antes de ser capaz de oponer una fuerza de 18750N al vástago (sabemos que el flotador pesa, de hecho, solo 750Kg y el vástago; 390Kg)

Según el cálculo de caudal, el vástago debe tener máximo 20 cm de diámetro y de acuerdo a esto se elige una tubería comercializada por SACK; la tubería de 8`` (220mm) de diámetro externo, corresponde a una cañería ASTM 106 Grado B, Sch 80 sin costuras. Su resistencia a bajas temperaturas es 487MPa a tracción. (Véanse anexos “Tuberías SACK.pdf” y “Propiedades_ASTM 106.pdf”)

Según estas medidas calculamos el esfuerzo asociado a la situación descrita:

$$\frac{18750 \bullet 7000 \bullet 110}{44595238} = 323MPa$$

Y encontramos que la tubería seleccionada aguantará, no demasiado sobredimensionada, el esfuerzo propuesto.

Se requirió además calcular el diámetro de la pared del cilindro de Polietileno, el cilindro principal, así, en un proceso similar y sometido al mismo momento flector, calculamos el esfuerzo para una inercia desconocida, sabiendo que la resistencia del Polietileno a tracción es de 22N/mm² y que el diámetro necesario del tubo es de alrededor de 500mm, planteamos nuestra ecuación con un coeficiente de seguridad aproximado de 2:

$$\frac{45000 \bullet 5000 \bullet 250}{X} = 22MPa$$

De esto, obtenemos una inercia mínima necesaria de:

2556818181mm⁴

Para una tubería PECC 500 PN100, de 45.5mm de espesor de pared, encontramos una inercia de:

2880134096mm⁴

Por lo tanto estamos muy bien; en el lado seguro.

Posteriormente, durante la fase de producción, se optó por una tubería PECC 630 PN 10, cuya resistencia esperada es aún mayor.

Con esto se ha terminado de calcular los factores críticos para el caso de análisis 1, ahora revisaremos la solución al caso de análisis 2, en el cual nuestra boya era sumergida en su totalidad por una ola:

Caso 2:

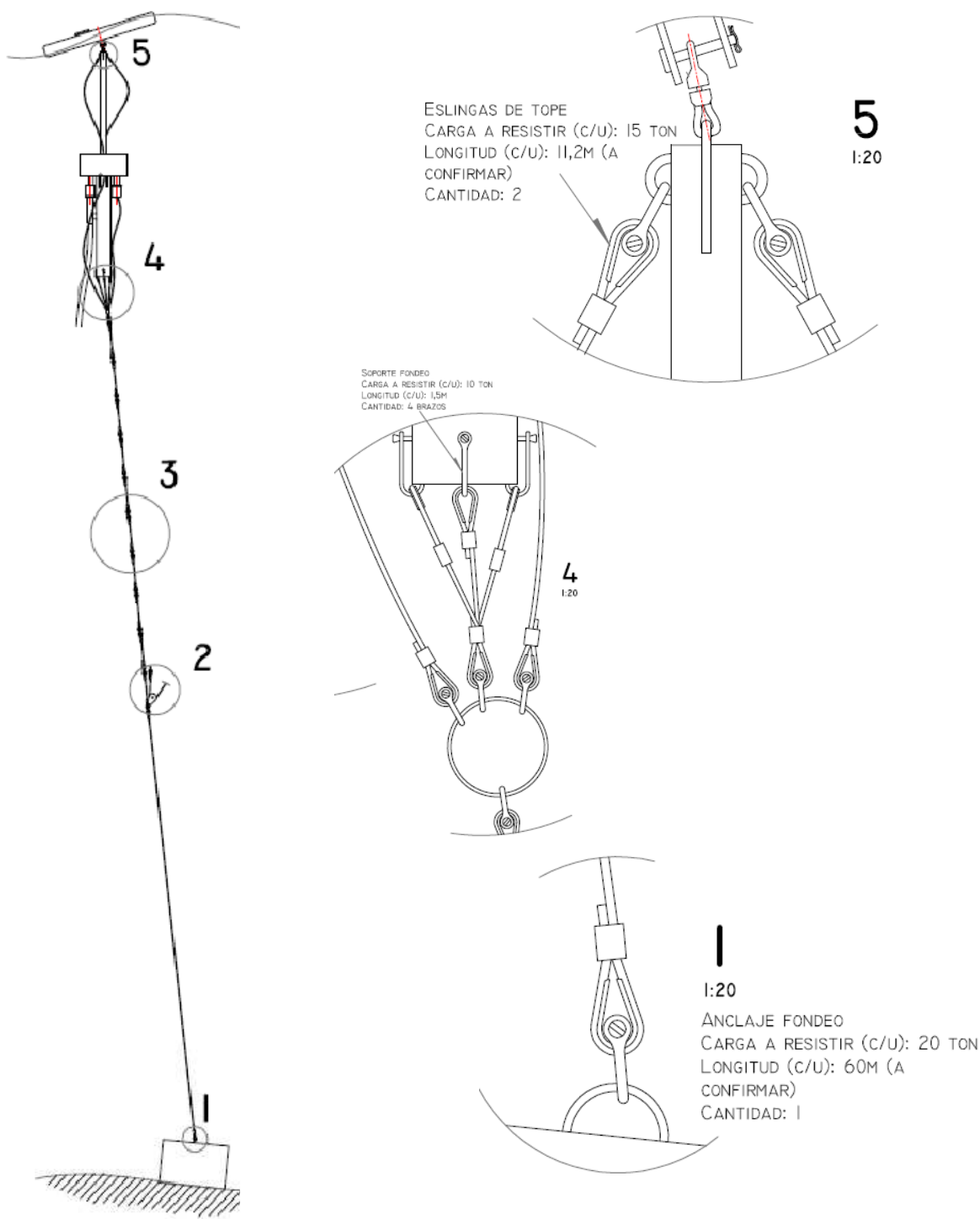
El único punto realmente crítico de este caso de estudio es el golpe que dará el flotador superior cuando su carrera encuentre abruptamente el final del recorrido del cilindro, en este momento la tapa superior eventualmente volaría por efecto de las casi 10 toneladas de desplazamiento que impactarán contra un tope fijo y rígido.

Para solucionar este problema se dispusieron dos cables de seguridad que conectan directamente el cable de fondeo con el vástago, los cuales limitarán la carrera de ascenso, liberando al cilindro y a los sellos de la carga y el golpe asociado.

Se puede observar en el documento anexo “Bomba_VI_Cabos de seguridad.pdf” los dos cabos de seguridad que van desde el cable de fondeo al vástago del flotador superior, además se ha

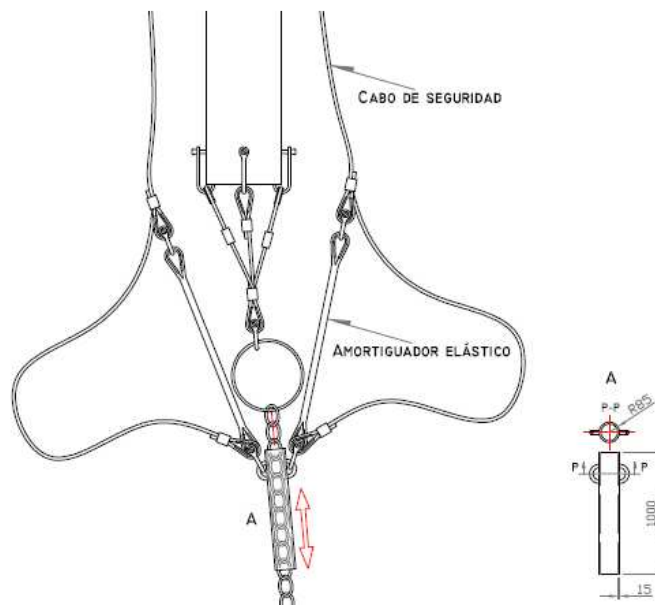
adjuntado el plano “Bomba_VI_Esquema de fondeo.pdf”, donde se pueden ver las cargas que se estimaron para cada pieza del conjunto de fondeo y de seguridad, según se podrá percibir, estas cargas se encuentran algo sobredimensionadas y dado que la cotización definitiva se solicitó a la empresa Küpfer, quienes trabajan con un coeficiente de seguridad 3, podemos estar seguros de que no habrán sorpresas en esta  rea. (Véase anexo “Kupfer Hermanos Cotización N 0020214407.pdf”). Las cargas se estimaron de acuerdo a los volúmenes de los flotadores; 10mt³ el superior y 4mt³ el inferior y de acuerdo al peso del aparato completo; 2500Kg aprox. El impacto sobre el sistema al momento de entrar estos cables en tensión, destruiría cualquier elemento asociado, por lo tanto se dispone de unos disipadores de impacto de caucho ubicados en estos cables.

El arreglo antes dispuesto se observa en el siguiente plano de cables de fondeo y seguridad:



Según podemos ver la capacidad del cable de fondeo es de 20 toneladas y el total del volumen desplazado de los flotadores es de 14 toneladas, menos las 2,5 toneladas de peso del sistema nos darían un empuje vertical total de 11,5 toneladas en una condición de inmersión total. Más aún, este cable, según se ha descrito, fue encargado a la empresa Kupfer, la cual trabaja con un coeficiente de seguridad 3, por lo tanto el cable soporta en realidad 60 toneladas.

En el siguiente diagrama podemos ver el sistema de amortiguadores de caucho para disipar el impacto de la carrera ascendente del flotador superior, al momento de alcanzar el límite de recorrido de los cables de seguridad:



Cálculos estructurales adicionales:

Dado que este proyecto se desarrolló desde cero, es evidente que se han realizado una cantidad enorme de cálculos pequeños, rápidos que han dado lugar a especificaciones o modificaciones puntuales, a modo de ejemplo nombraré solo algunos de estos:

Se calculó la tensión a la que estarán sometidas las paredes del flotador superior para asegurarse de que, al momento de quedar 100% sumergido, sujetado desde el punto central, este cuerpo no se parta en dos, se incorporó estructura al interior del flotador considerando esta eventualidad (puede verse en la carpeta anexa de imágenes: “Producción”).

Se calculó también la resistencia del extremo inferior del cilindro principal donde van adosados los cabos de fondeo, lugar que recibe la tracción constante de los flotadores inferiores y que recibirá 4 cables que repartirán el esfuerzo, además, se reforzó esta zona con una argolla de acero que, bañada en polietileno, se unirá con soldadura plástica en la zona.

Se calcularon, además, las dimensiones de las piezas de unión de los flotadores inferiores, para las cuales se determinaron unas medidas mínimas de largos de cordón de soldadura plástica, las cuales fueron, sin embargo, enormemente sobredimensionadas por la gente de producción.

Se consideró, de esta misma manera, el inconveniente que presenta el final de la carrera del pistón hacia arriba en el cilindro principal, y la carga lateral sobre el flotador superior en el momento de máxima elongación, si el pistón y el borde superior del cilindro estuviesen demasiado juntos, la fuerza lateral provocada por el pistón podría ser capaz de cortar el cilindro desde sus paredes internas, a modo de cizalle. Se limitó la carrera ascensional del pistón 1100mm antes de que llegue a topar el sello superior del cilindro.

Se consideró el hecho de que, dado que el flotador superior es hueco, al sumergirse en una ola demasiado alta, este podría colapsar, en función de esto se estructuró con mamparos el interior de este, separándolo además en 4 secciones independientes, con tapas herméticas cada una.

De esta forma se podría resumir el proceso de desarrollo estructural de nuestro aparato, el cual es simple y realizado con conocimientos y procedimientos sencillos y fáciles de abarcar.

IV. Datos hidrodinámicos, movimiento de olas y resultados generales:

Existe una cantidad de información respecto a la cual se determinaron las medidas del conjunto y, sobre todo, la longitud necesaria o ideal del recorrido del cilindro.

Inicialmente, y según ya se ha dicho, se definió la altura de la ola en base a una condición de mar “normal” originada por una intensidad de viento de 16 nudos, la altura de ola en cuestión debería fluctuar entre 1 mt y 1.2 mts.

Se consideró una altura de marea de aproximadamente un metro, lo cual implica tener un recorrido de aproximadamente 1.5 metros hacia arriba y 1.5 metros hacia abajo, a partir de los puntos de plea y bajamar; Frente a esta evidencia, se pensó que era oportuno tener, al menos, 4 metros de recorrido libre para el pistón.

Una vez que se tenía una idea bastante definida del sistema y sus medidas, se procedió a tomar la decisión de dónde instalar el sistema completo para su fase de pruebas. En este momento fue fundamental la adquisición de un estudio comprado al SHOA, que nos permitió determinar que la zona central del país presentaba las condiciones ideales para instalar nuestro sistema, sin

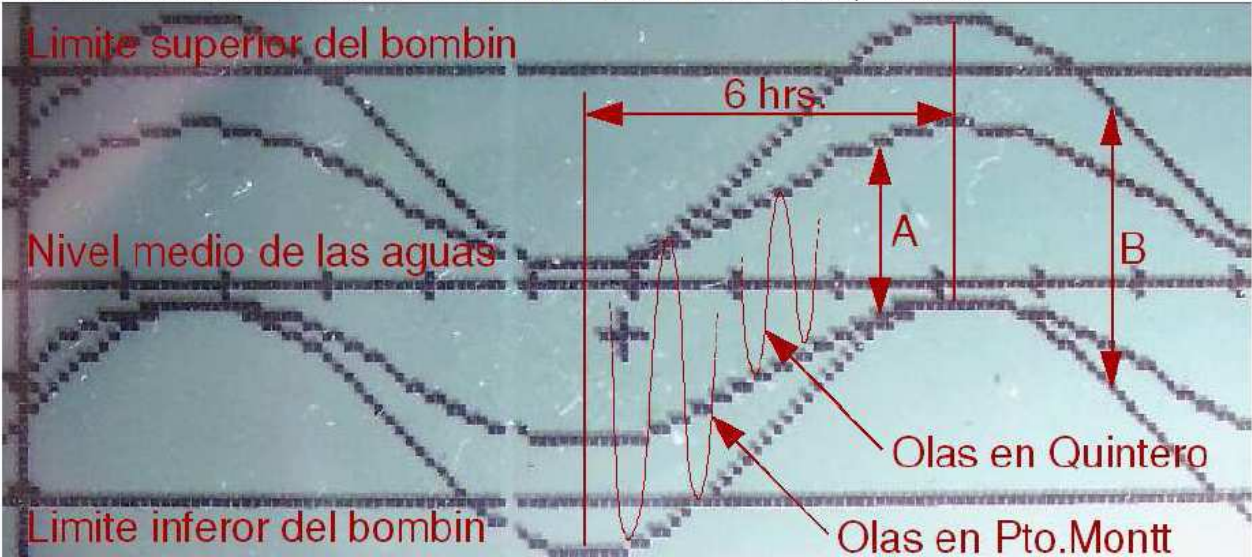
embargo, el costo de fondear en esta zona resultaba prohibitivo, por lo cual nos decantamos por la zona sur del país, específicamente en el Golfo de Coronados, en la salida del canal de Chacao, donde, aunque la cantidad de energía es indiscutiblemente mayor, también lo son las alturas pic de las olas, representando esto un riesgo enorme para la integridad estructural de nuestro sistema.

Al momento de optar definitivamente por la zona sur del país, se realizó un calculo que pretendía determinar si efectivamente seríamos capaces de obtener un plus interesante de energía en la zona sur, esto porque, a pesar de que la ola es notablemente más alta, también lo es la oscilación de mareas, la cual podría dejar continuamente a nuestro sistema en un rango de eficiencia parcial, por encontrarse hacia arriba o hacia abajo de los 4mt de recorrido útil.

En el anexo “Comparación energética entre Quintero y Golfo Coronados.pdf” existe una descripción pormenorizada de la forma en la que se determino la diferencia de energía susceptible de ser extraída. En las siguientes líneas se describirá brevemente el procedimiento involucrado;

El siguiente grafico muestra las franjas de oscilación de las olas en Carelmapu (B) y en Quintero (A). El esquema será explicado más abajo:

Gráfico realizado en base a un modelo matemático de los procesos:



En efecto en Puerto Montt (en realidad, en Carelmapu) disponemos de una ola un metro mayor en promedio a la ola de la zona central del país, pero también tenemos una oscilación de marea que supera en un metro a la variación que se observa en Quintero, como resultado de esto, las crestas de las olas más altas en el momento de la plea mar en la zona sur, quedan fuera del rango de operación de nuestro pistón, así también, los puntos más bajos, de las olas que se producen durante la bajamar quedan fuera del rango de operación, por lo tanto hay una porción de la energía “extra” de la zona sur del país, que no se puede extraer. La cantidad exacta de energía extraíble se determinó mediante la integración numérica de una franja senoidal que representa la

franja de oscilación del bombín, es decir, los puntos más altos y más bajos de las olas en el momento en que estas son afectadas por la marea. El resultado de este estudio fue, como se mencionó anteriormente, que la energía extra es solo de un 44%, y no de alguna cifra mayor como podría esperarse observando solamente las alturas de ola (2,6 contra 1,6 metros; 63% de diferencia). Es necesario mencionar también que el periodo de una ola mayor es también mayor, por lo tanto, la cantidad de oscilaciones del pistón por minuto serán algo menores, con lo cual la eficiencia esperada en el sur disminuye en alguna proporción cercana al 7%. Recuérdese que el periodo en la zona de Quintero es de 9,4 segundos contra 10,3 segundos en la zona del Golfo de Coronados.

El siguiente parámetro a ser determinado fue la profundidad a la que convenía fondear el sistema, ésta se determinó en base a una serie de factores prácticos, por ejemplo se determinó que una profundidad “accesible” para buzos deportivos, mariscadores y especialistas es de 25 mts, por lo tanto no conviene sumergirse demasiado más que eso. Además de esto, el costo del metro lineal de cadena de fondeo representa uno de los costos no despreciables, deseables de ser minimizados. Por último, y como factor de mayor preponderancia, se consideró el hecho de que los desplazamientos laterales del cuerpo de la bomba no son deseables por múltiples motivos; las posibles elongaciones de las tuberías flexibles, las pérdidas energéticas por desplazamientos inútiles, los posibles golpes entre boyas adyacentes, etc. Siendo así, se observa que con una profundidad de fondeo menor, el recorrido lateral posible de la boya será, naturalmente, menor. Sabemos además que la profundidad de fondeo no puede ser muy menor a 15 mts, ya que esto empieza a parecerse al largo total de la Bomba 100% extendida (12.5mt).

IV.1. Estimación de caudal bombeado:

Ya hemos mencionado la planilla “Hoja para Estimaciones.xls” La cual nos permitió determinar el flujo susceptible de ser bombeado, pero nos extenderemos ahora brevemente en lo que definió las características hidráulicas del sistema: para levantar presión se desea obviamente un flotador superior lo más grande posible, con un plano de flotación, dentro de lo posible, enorme.

Estas medidas están, sin embargo, limitadas por la longitud de onda de una ola; es esencial que nuestro flotador no llegue, de ninguna manera, a unir dos crestas de ola, ya que en ese caso su oscilación vertical sería, obviamente, mínima. De estas reflexiones se consideró que 5mt de diámetro son una medida razonable, para aprovechar incluso las olas más pequeñas, de unos 10 o 15mt de longitud de onda.

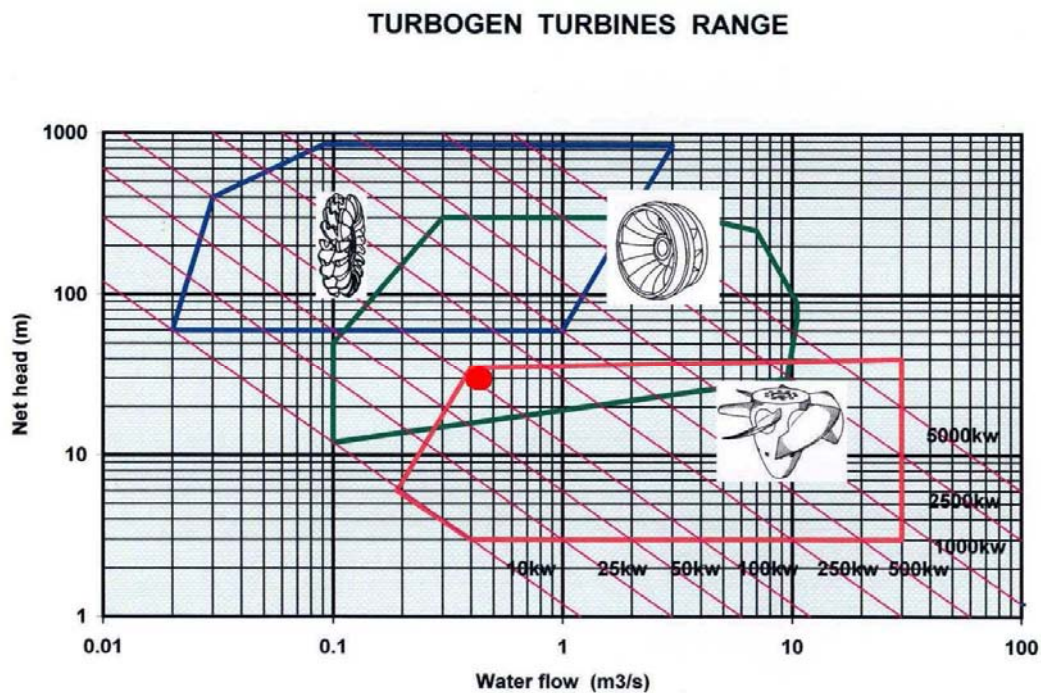
Un flotador circular de 5mt de diámetro tiene una fuerza de empuje determinada por cada cm de inmersión, por lo tanto la presión que es capaz de inducir dentro de nuestro cilindro inferior se

encuentra limitada y será función, primordialmente, del diámetro interno del cilindro. Ya se había determinado con anterioridad (en función de conversaciones con comerciantes de turbinas hidroeléctricas) que 30 mts de caída de agua son una presión “cómoda” en términos de generación hidroeléctrica, por lo tanto nuestro ánimo se orientó espontáneamente a generar un caudal de agua que garantizara, al menos, 3 bar de presión.

Dado que las medidas del flotador superior se encuentran limitadas y que la presión deseada en el caudal de salida es fija, en realidad ya no quedan muchas variables, y el caudal será simplemente aquel que el volumen interno del cilindro (cuyo diámetro esta determinado por la presión) sea capaz de mover.

Así fue como se acotó el volumen interno y caudal de nuestras bombas y dado que el modelo “tipo” de central debería generar 100kW, se requieren 25 bombines, cada uno de los cuales levantará una presión de 3.65 bar, (de los cuales se perderán aproximadamente 0.4 bar en caída de presión por tuberías) y 22Lt/seg.

Con 25 bombines generamos un caudal esperado de 550Lt/seg lo que nos dejará, aproximadamente, en una producción indicada por el punto rojo:



Esto nos permite afirmar que, en teoría, nuestro sistema generaría 100kW, aunque esto es particularmente sensible a la altura de ola y se obtienen distintas prognosis con las olas de distintos lugares de Chile.

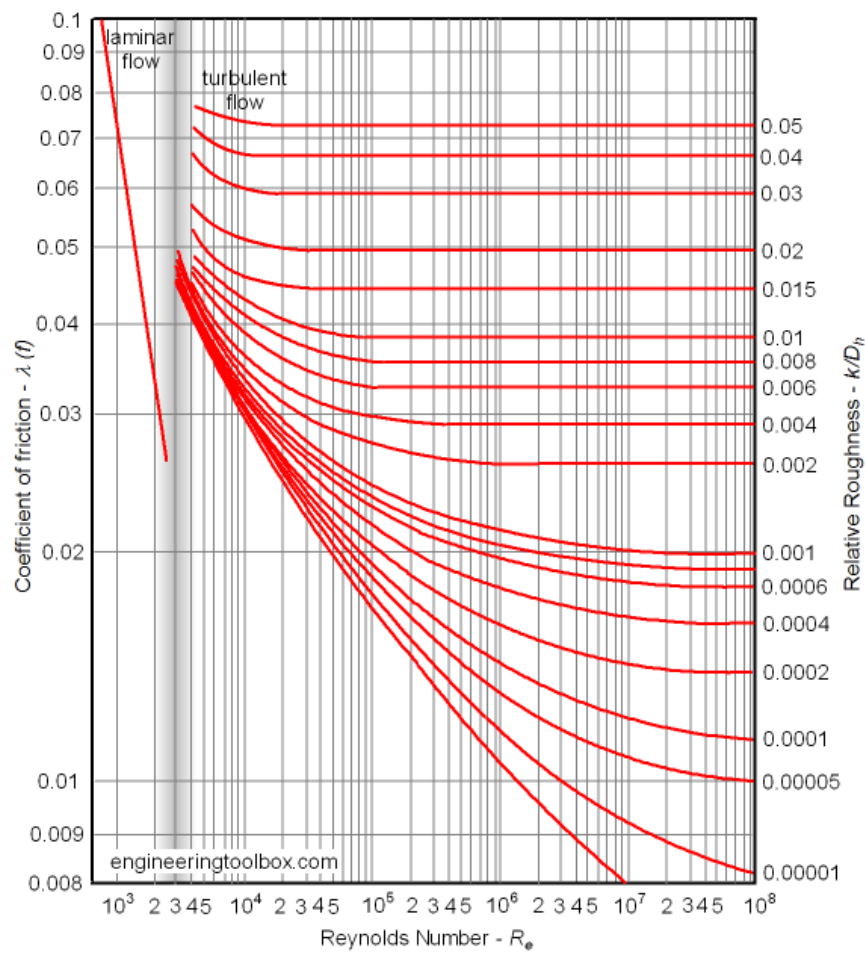
Todos estos cálculos, incluida la estimación de fricción dentro de la tubería y la pérdida de carga asociada a esta se evaluaron según la planilla “copia de hoja para estimaciones.xls”.

En esta planilla se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach para estimar la perdida de carga en tuberías, esto es fundamental en nuestro caso ya que la principal perdida de presión se produce a través de la cañería flexible que conecta las bombas con la turbina sobre el falucho.

$$h_f = \phi \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Para estimar el factor Φ o coeficiente de fricción se ha utilizado el grafico de Moody, el cual nos entrega este valor en función de la rugosidad relativa y el número de Reynolds. Se ha optado por la rugosidad relativa más alta que ofrece el grafico ya que las tuberías flexibles tienden a inducir una resistencia mayor en los flujos.

Vemos aquí el diagrama de Moody:



Tenemos también aquí una vista de la planilla con la cual se ha estimado buena parte de los cálculos que sustentan esta tesis y sus resultados esperados:

Bombín marino.				
Flotadores:				
Diámetro del flotador superior:	5	m		
Calado de operación:	0,35	m		
Vástago:				
Diámetro:	0,22	m		
Pistón:				
Diámetro interno:	0,538	m		
Largo total de la carrera:	4	m		
Volumen para la ola dada:	0,42	m ³		
Ola:				
Altura:	2,37	m		
Periodo:	9,19	seg		
Central:				
Numero de bombas:	25	#		
Caudal medio al estanque:	1,04	m ³ /s	1039,78	Lt/seg
Canalización:				
Velocidad media del embolo:	0,44	m/s		
caudal medio durante la carrera:	0,0916	m ³ /s	338064,51	Kg/sec
Diámetro del conducto a tierra:	0,22	m		
Velocidad del flujo en conducto:	2,411339	m/s	8,68	Km/h
Largo del tubo:	100	m		
Reynolds Nr:	4,08E+05			
Friction coefficient:	0,05			
Roughness:	0,00500	PVC flexible		
Roughness ratio:	0,02273			
Perdida de presión:	67726,34	Pa	67,73	kPa
Perdida de altura:	6,74	m		
Tubo Matriz HDP:				
Numero de boyas asociadas:	25,00	#		
Diámetro del tubo Matriz:	1,10	m		
Datos de salida:				
Fuerza en ascenso:	68996,59	N		
Fuerza en descenso:	0	N		
Metros cúbicos/minuto:	2,50	m ³ /min	0,0416	m ³ /s
Presión generada	364637,8	Pa	3,65	bar
			(incluye perdida por tubería)	
Altura alcanzable:	29,57	m		
Volumen min del flotador inferior:	6,87	m ³		
Peso min del flotador superior:	68996,59	N		

En la planilla se deben alterar las celdas en amarillo para poder evaluar rápidamente configuraciones de diámetro interno del cilindro, diámetro del flotador superior, largo de las tuberías, diámetro de estas, cantidad de bombas por turbina, caudal bombeado, etc.

Es relevante mencionar también, como último punto, que para levantar la presión deseada, el flotador superior debe hundirse 35cm en cada ola, por lo cual el sistema opera solo con olas superiores a esta medida, aunque se mencionará también que, luego de adquirirse otro estudio al respecto, se determino que las olas inferiores a 35 cm son, de hecho, una minoría no relevante y por lo tanto no deberían distorsionar los datos estadísticos del anterior estudio mencionado (comprado al SHOA). Estos 35 cm permiten que el flotador genere, por desplazamiento, una fuerza que transmitida al pistón, comprima el fluido interior a 3 bar.

Una vez fondeado el sistema, las mediciones se realizarán con un banco de pruebas mostrado en el anexo “Sistema de medición.pdf”, el cual estará ubicado sobre el flotador superior, conectado al tubo de descarga por una tubería flexible y sus partes y piezas son: una válvula T que permita desviar el flujo en caso de que se produzcan accidentes y las válvulas siguientes fallen o se traben, además esta válvula T permitirá instalar el resto del equipo, eliminando la incomodidad de tener un caudal en el sistema. Luego de la válvula T se instalará un medidor de caudal acumulativo estándar, mecánico, para tuberías de 200mm y acople din200, este dispositivo nos permitirá evaluar en un mes cuánta agua ha sido bombeada efectivamente por el sistema. Luego de este medidor de caudal se instalará una válvula de presión, la cual liberará el flujo a partir de una presión de 3 bar, equivalente a 30mt de altura de columna de agua y a su vez, equivalente a la presión con la cual trabajaría eventualmente una turbina hidroeléctrica. Esta válvula funciona con un resorte y una tapa móvil.

Podemos ver el caudalímetro acumulativo y la válvula de presión en los anexos: “EA_WDE.pdf” y “DO_S500.pdf” respectivamente.

El único inconveniente que tendrá nuestro periodo de medición es la carencia de un sensor que mida la altura de la ola en el lugar de instalación, junto a nuestra bomba. Si contáramos con este sistema podríamos optar a una medición objetiva, en base a datos concretos de altura de ola. Sin esto, solo podremos confiar en que la ola en el lugar elegido se parezca a lo que se espera de ella (valores obtenidos de estudio comprado al SHOA en la zona) y en consecuencia, bombeemos una cantidad similar a la proyectada, aunque es claro que, de no ser así, siempre subyacerá la duda de si la intensidad de la ola no fue la esperada, o la eficiencia de nuestro sistema es baja. Sería grato contar con este recurso de medida, pero su proceso de instalación es caro y muy complejo, por lo

cual, y siguiendo la filosofía general del proyecto, se mantendrá todo lo más simple y económico posible.

V. Conclusión

Luego de esta extensa exposición las conclusiones son obvias y probablemente sobran. Sin embargo y en favor de la claridad general, mostraremos una pequeña predicción económica del proyecto, realizada sin ningún criterio de evaluación financiera y únicamente calculando ingresos contra predicción de la energía obtenida y costo actual de la energía.

Para revisar estos antecedentes los invitamos a observar la siguiente planilla:

Energía total:	150	Kw	
Número de bombines:	25	#	
Costo del kilowatt/hora:	20	cent US\$	102,2 \$ Chilenos
Eficiencia esperada:	85	%	
Costo total del bombin:	11300000	\$ Chilenos	
Utilidad:	N.O.	%	
Interés sobre la inversión:	N.O.	%	
Datos por cada bombin:			
Energía:	6	Kw	
Killowatts hora mensuales:	3672	Kwh	
Monto mensual generado:	375278,4	\$ Chilenos	

Podemos observar fácilmente que en la planilla se espera una producción de 150kW, lo cual contradice nuestra predicción inicial de 100kW por cada 25 bombas, sin embargo esa predicción inicial se basaba en una altura de olas de 1 metro, lo cual es bastante menos de lo que se podría esperar en el sur de Chile, en la zona del Golfo de Coronados, esta ola (1mt de altura) corresponde aproximadamente a la zona de Quintero y según se vió en el documento “Comparación energética entre Quintero y Golfo Coronados.pdf” la energía esperada en la zona sur es mayor.

Considerando que el valor del kilowatt se mantenga en 20 centavos de dólar (lo que de hecho, no será así, y se espera que este valor se dispare inusitadamente durante los próximos años) y que nuestros 25 bombines sean capaces de generar 150kW, esto recuperaría la inversión en aproximadamente 3 años, si le sumamos además 5 millones de pesos en gasto por Bombín para comprar la solución hidroeléctrica y de conectividad eso aumentará el tiempo de recuperación de inversión en un año y medio más, esperándose un retorno total de la inversión en unos 5 años aproximadamente.

Es claro que en este cálculo rápido no se han considerado pago de sueldos, retención de utilidades, mantención de los bombines, y una larga lista de gastos que sin duda harán de los primeros años de negocio una pequeña maldición, sin embargo la energía eólica al comienzo tampoco fue buen negocio. Las represas, inicialmente, eran obras de proporciones bíblicas, solo susceptibles de ser abordadas por inversiones enormes, propias de un gobierno o una comunidad de estados. Siendo así, y conociendo estos antecedentes históricos, nosotros tenemos dos certezas; 1. En los próximos años habrá que enfrentar grandes inversiones y desafíos técnicos no triviales y 2. Una vez que hayamos salido de la parte oscura del camino, habremos cambiado un poco el mundo.

VI. Bibliografía

Es importante mencionar que, salvo investigación incipiente (y la mayoría de las veces intencionalmente no publicada) respecto al tema que nos ocupa, no existe literatura específica y la información en la cual se ha basado el trabajo consiste básicamente en conversaciones con proveedores, fabricantes, búsquedas web generales y los conocimientos básicos de física, vistos en los primeros años de universidad.

Dentro del formato de tesis es necesario incluir este ítem, sin embargo, el proceso ha sido producto de casi un año de conversaciones con los productores de acero para discutir sus posibilidades, los productores y manufacturadores de polietileno, las empresas dedicadas a montar fondeos, empresas dedicadas a fabricar mangueras, cables, cadenas, sistemas de medición de flujo, turbinas, sistemas hidráulicos e incluso comercializadores de embarcaciones usadas, cuya información aportada, más que cualquier texto técnico, fue la base del desarrollo.

No obstante y para cumplir con el protocolo, enunciaremos alguna bibliografía:

-Estudio del SHOA para las zonas de Iquique, Quintero y Golfo de Coronados, respecto al comportamiento estadístico de las olas en la zona. El estudio solamente incluye los datos estadísticos sin ningún texto asociado y fue comprado a la institución, por lo cual tampoco se encuentra publicado en lugar alguno (aunque su relevancia lo transforma en una referencia obligatoria en la bibliografía).

- TM-020; Reglamento para concesiones marítimas de la Armada de Chile, segunda edición, año 2006.

-Documento; “Fricción en tuberías.pdf”, que fue encontrado en Internet, no acusa nombre del autor ni año de publicación, pero es un material muy recomendable para estudiar el tema del cual habla su título, el material se encuentra entre los anexos.

-Tabla de rendimientos de turbinas hidroeléctricas, es solo una tabla y fue encontrada en Internet, sin embargo fue fundamental para el desarrollo del trabajo, esta tabla se encuentra entre los anexos.

-“Energía Mareomotriz”, Pedro Fernández Díez, de la Universidad de Cantabria, es un texto de un tema asociado, no directamente relacionado, sin embargo existe mucha tecnología en común.

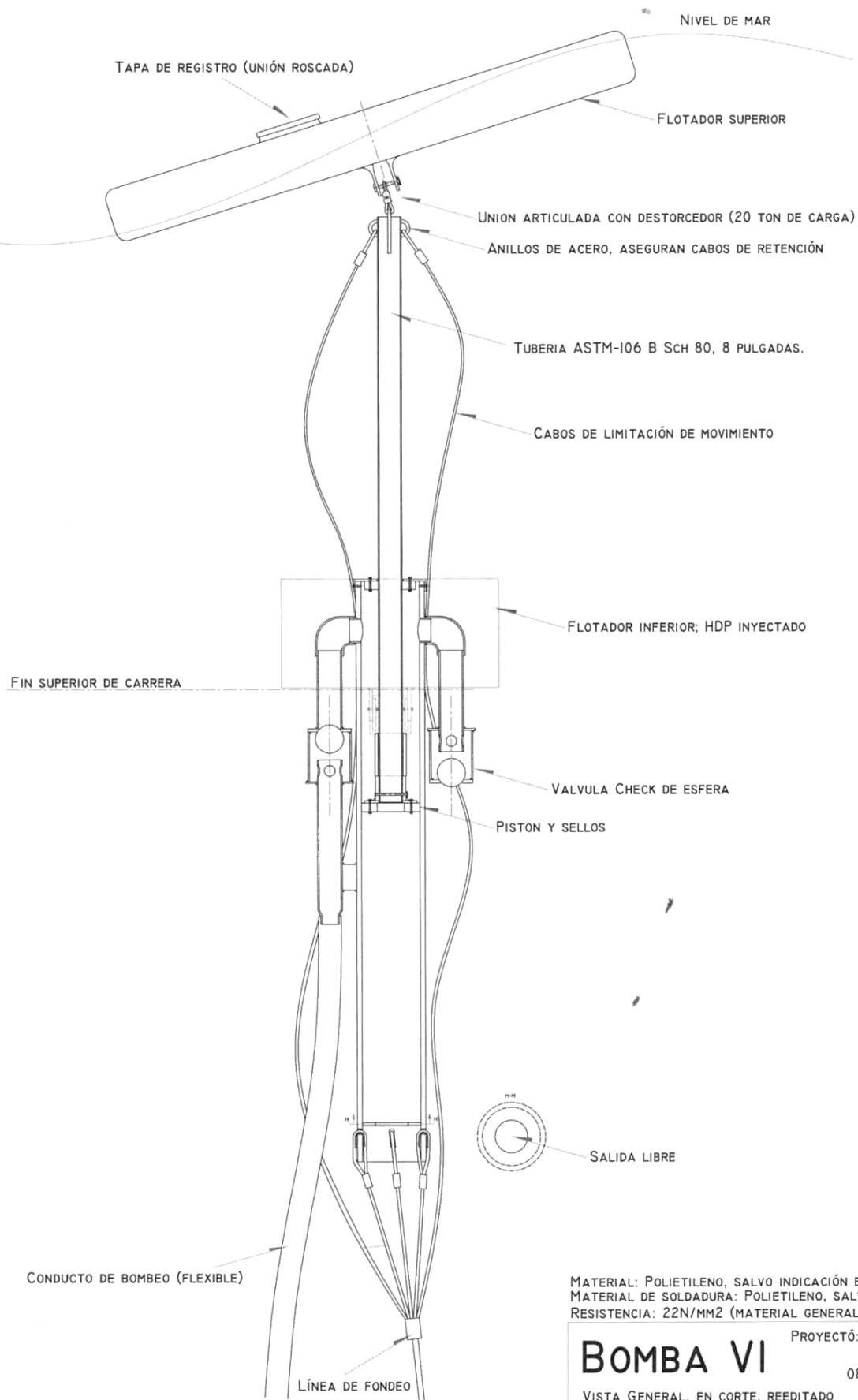
-“Tabla de mareas de la costa chilena”, texto publicado por la Armada de Chile, fundamental para conocer el rango de comportamiento vertical del océano.

Por último quisiera al menos mencionar y agradecer a las empresas que enviaron cotizaciones e invirtieron tiempo explicándome distintos temas y buscaron soluciones a las necesidades técnicas del proyecto, aunque muchas de estas no llegaron a concretarse:

Tarpulin, Küpfer Hermanos, Olaer (Sistemas hidráulicos), Vigniola (Motores hidráulicos), Resortes (.cl), Rexroth-Bosch, Induagua, Fanadego, Turbinas Mancini, Concretos Malatrassi, CINTAC, SACK, Reifox, Tehmco, MD::Maestranza Diesel, S.T.S; Obras submarinas, Marina OXXEAN, EECOL Electric, Martinez-Rigging.

VII. Anexos:

(Revísese también carpeta e información digital anexa)



MATERIAL: POLIETILENO, SALVO INDICACIÓN EXPRESA
 MATERIAL DE SOLDADURA: POLIETILENO, SALVO INDICACIÓN
 RESISTENCIA: 22N/MM2 (MATERIAL GENERAL Y SOLDADURAS)

PROYECTÓ: DANIEL BRAVO S.

BOMBA VI

08. MAYO. 2008

VISTA GENERAL, EN CORTE, REEDITADO

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN ©

1:50

7.Marzo.2008

Whales Chile

Concepto:

El mar es la síntesis energética de los distintos poderes de la naturaleza (viento, sol, corrientes), es el giroscopio que mantiene equilibrada la rotación de la tierra y es el depósito último de todo el sistema hidráulico terrestre, posibilitando todo tipo de procesos cíclicos sustentables.

El mar es por lo tanto el punto de donde se puede extraer la mayor cantidad de energía y de la forma más regular.

La propuesta:

La tecnología desarrollada en el mundo tendiente a extraer energía eléctrica directamente del movimiento marino, se encuentra en fases muy tempranas de desarrollo. Sin embargo la energía hidroeléctrica ha tenido años para desarrollarse en múltiples lugares y ha alcanzado un nivel de madurez elevado y bien respaldado.

Frente a esta situación, nuestra propuesta apunta a generar un "cauce" artificial, elevando agua marina a través de la energía vertical entregada por cada ola, desde múltiples bombas flotantes ancladas cerca de la costa, hasta un estanque en la costa y a mayor altura, que alimentara una central hidroeléctrica estándar.

La Bomba flotante:

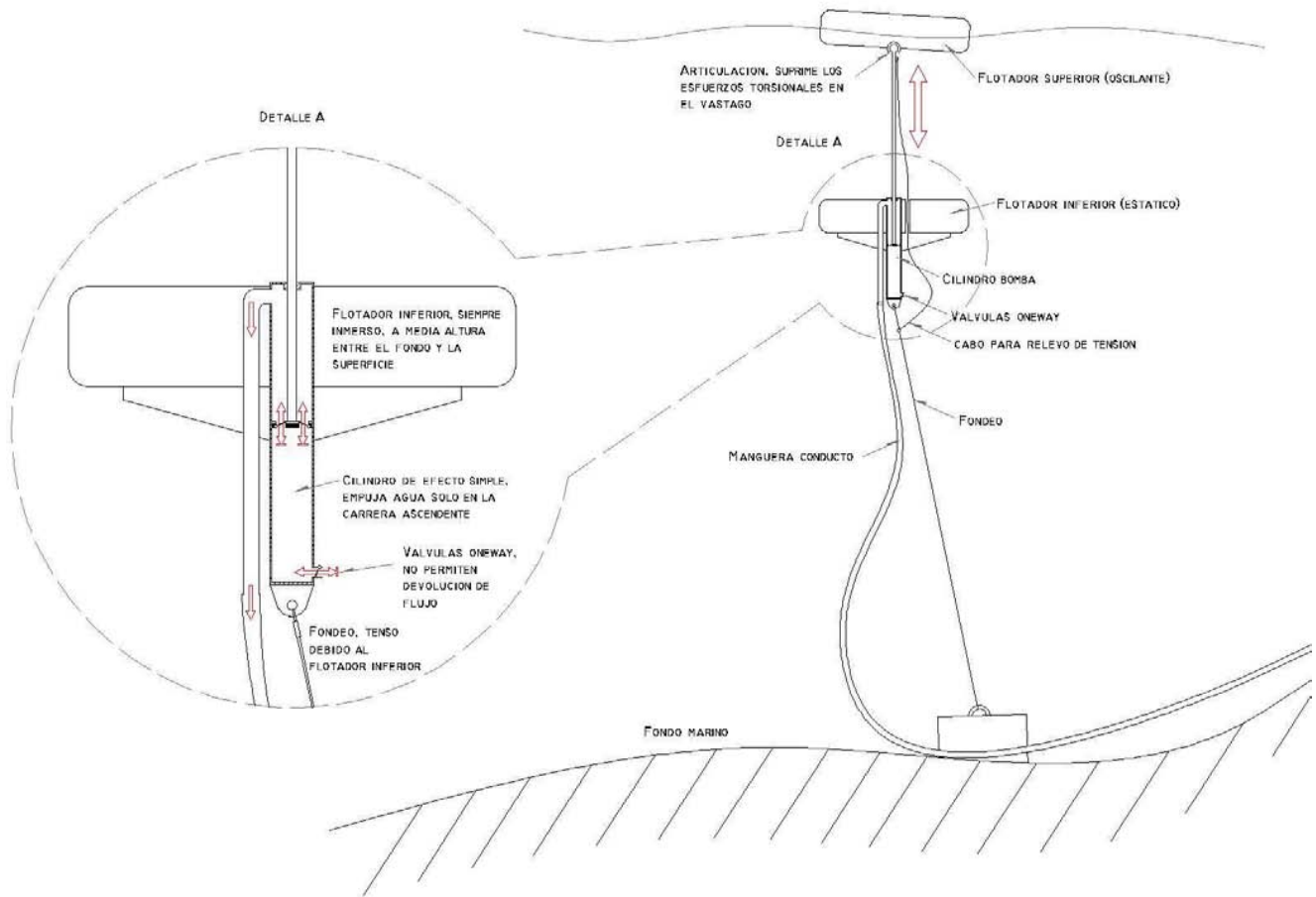
Nuestra bomba obedece a la disposición básica de una bomba de achique tradicional, muy utilizada entre los hombres de mar de la isla de Chiloe, al sur de Chile. Hablamos de un cilindro simple que extrae agua durante el movimiento ascendente y descendente de un embolo.

El cuerpo de la bomba flota a media profundidad; fijo mediante un fondeo que evita su ascenso y un flotador, que evita su descenso. Dentro de este cuerpo se encuentra un pistón que bombea el agua y cuyo vástago sube hasta anclarse a un flotador de mayor diámetro, en la superficie del mar. Este flotador superior sigue las oscilaciones propias de la superficie marina, subiendo por su desplazamiento y bajando por su propio peso.

Cada una de las bombas recién descritas es capaz de elevar cantidades variables de agua, en un máximo aproximado de 70lt/seg a 10 metros de altura o menores cantidades a mayores alturas. Con un set de 20 bombas puede alimentarse una turbina hidroeléctrica que genere aproximadamente 100kW.

Mas abajo vemos un croquis esquemático de la bomba en su condición de trabajo.

Esquema básico:



Nota del autor: Toda propiedad intelectual y derechos pertenecen a Felipe Cubillos o a la empresa Whales Chile

Prohibida su reproducción.

8.Julio.2008

Whales Chile

Índice.

Concepto_____	3
La propuesta_____	3
La bomba flotante_____	3
Esquema básico_____	4
Conexión esquemática de dos bombas a la turbina sobre una plataforma flotante_____	5
Detalle del falucho, la turbina y las conexiones necesarias_____	5
Esquema de una posible distribución para una planta de 100Kw____	6
La ubicación_____	6
Imagen de ubicación_____	8

Concepto:

El mar es la síntesis energética de los distintos poderes de la naturaleza (viento, sol, corrientes), es el giroscopio que mantiene equilibrada la rotación de la tierra y es el depósito último de todo el sistema hidráulico terrestre, posibilitando todo tipo de procesos cíclicos sustentables.

El mar es por lo tanto el punto de donde se puede extraer la mayor cantidad de energía y de la forma más regular.

La propuesta:

La tecnología desarrollada en el mundo tendiente a extraer energía eléctrica directamente del movimiento marino, se encuentra en fases muy tempranas de desarrollo. Sin embargo la energía hidroeléctrica ha tenido años para desarrollarse en múltiples lugares y ha alcanzado un nivel de madurez elevado y bien respaldado.

Frente a esta situación, nuestra propuesta apunta a generar un "cauce" artificial, bombeando agua marina a través de la energía vertical entregada por cada ola, desde múltiples bombas flotantes ancladas alrededor de una plataforma flotante, sobre la cual se encuentra una turbina Francis, impulsando de esta forma una central hidroeléctrica estándar.

La Bomba flotante:

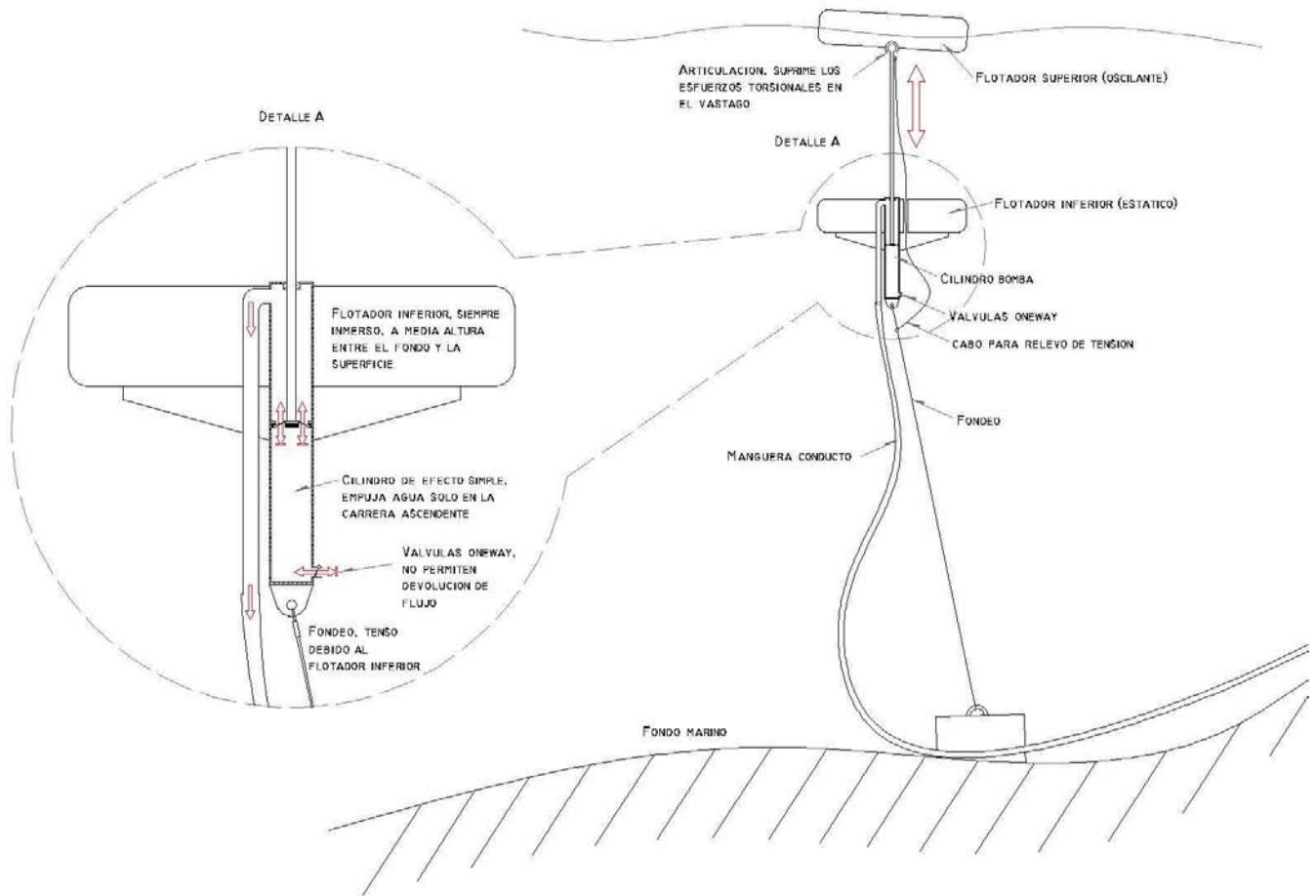
Nuestra bomba obedece a la disposición básica de una bomba de achique tradicional, muy utilizada entre los hombres de mar de la isla de Chiloe, al sur de Chile. Hablamos de un cilindro simple que extrae agua durante el movimiento ascendente y descendente de un embolo.

El cuerpo de la bomba flota a media profundidad; fijo mediante un fondeo que evita su ascenso y un flotador, que evita su descenso. Dentro de este cuerpo se encuentra un pistón que bombea el agua y cuyo vástago sube hasta anclarse a un flotador de mayor diámetro, en la superficie del mar. Este flotador superior sigue las oscilaciones propias de la superficie marina, subiendo por su desplazamiento y bajando por su propio peso.

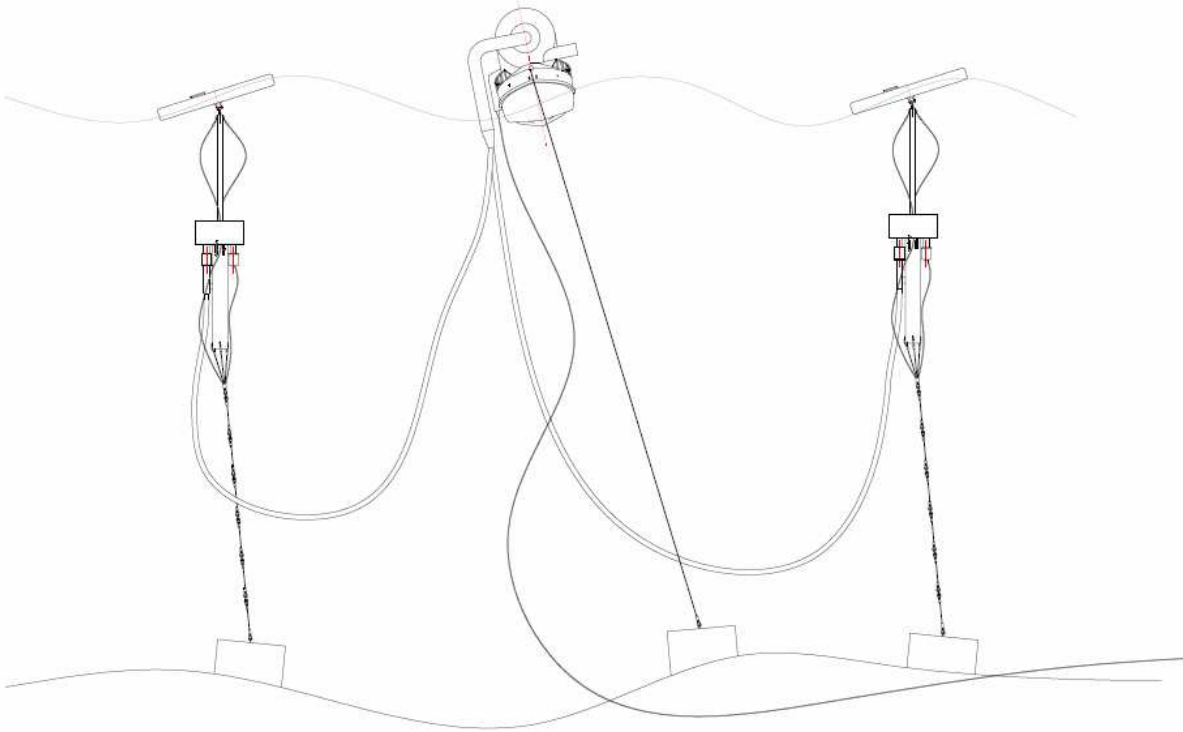
Cada una de las bombas recién descritas es capaz de bombear cantidades variables de agua, en un máximo aproximado de 650Lt/seg a 3bar de presión. Con un set de 25 bombas puede alimentarse una turbina hidroeléctrica que genere aproximadamente 100kW. El flujo será variable, pero tendrá una relativa regularidad considerando que las 25 bombas se encontraran simultáneamente en distintas fases del ciclo de una ola.

Mas abajo vemos un croquis esquemático de la bomba en su condición de trabajo.

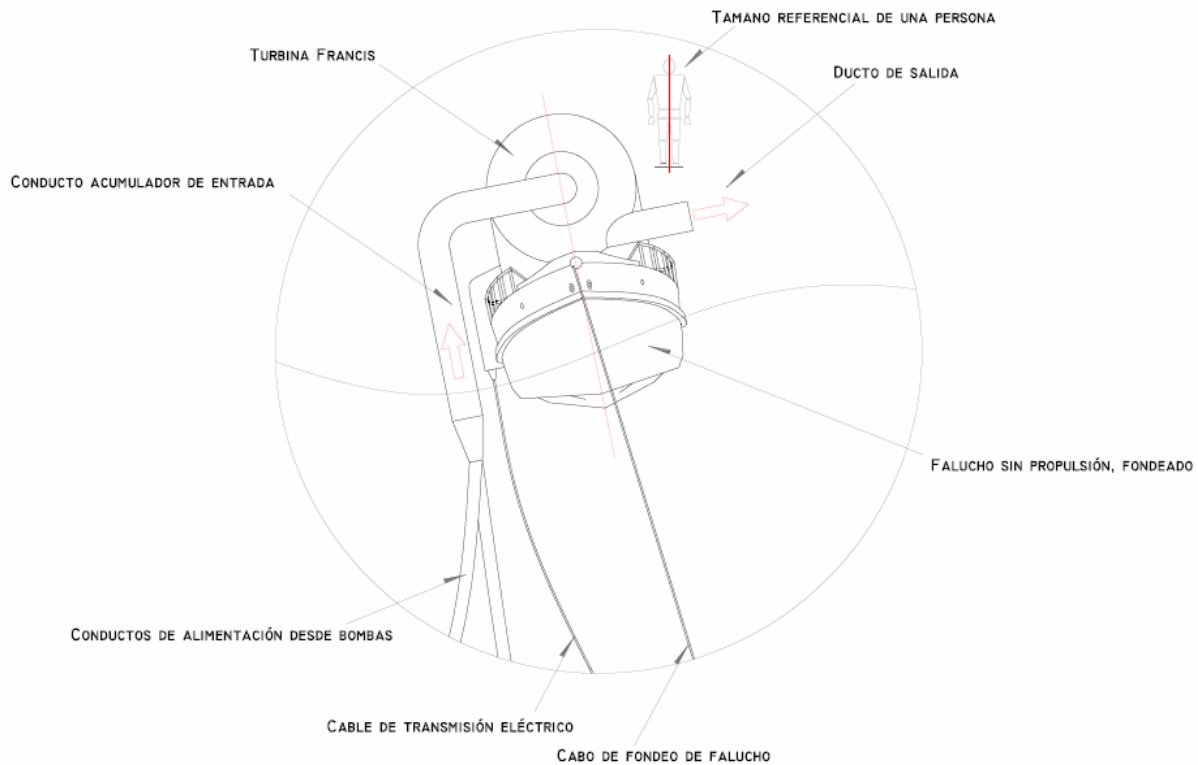
Esquema básico:



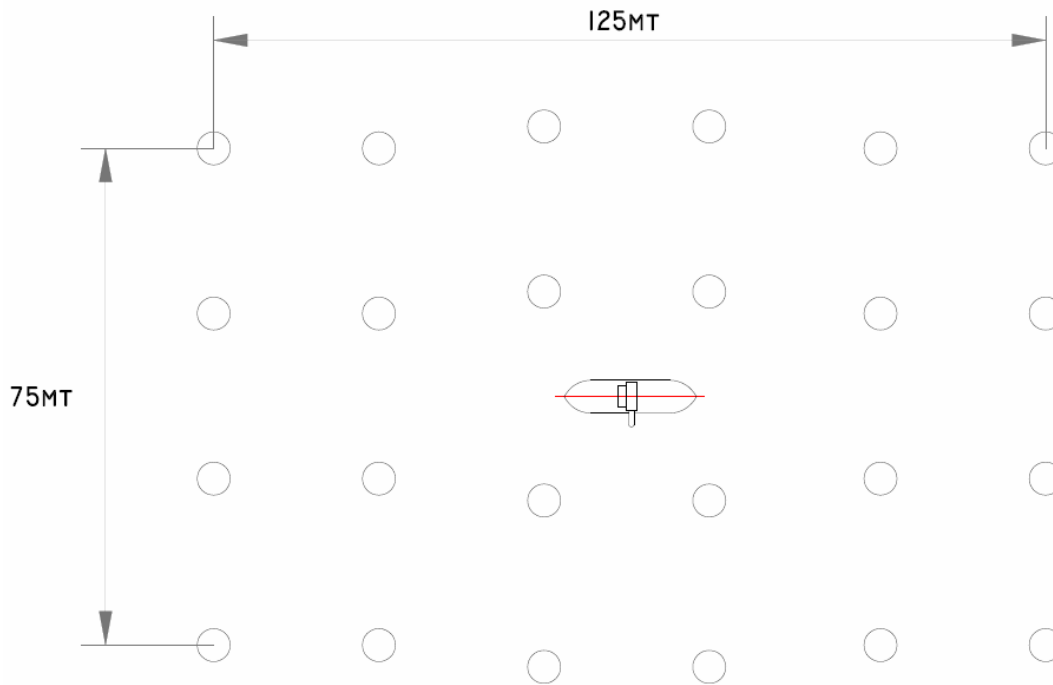
Conexión esquemática de dos bombas a la turbina sobre una plataforma flotante:



Detalle del falucho, la turbina y las conexiones necesarias:



Esquema de una posible distribución para una planta de 100Kw:



La ubicación:

En función de tomar la decisión general sobre la latitud en la que se deseaba ubicar el set de bombas, o al menos una primera aproximación experimental de este, se adquirió de parte del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, un estudio estadístico que mostraba las alturas y periodos promedio de un mes de verano y un mes de invierno de las localidades de Iquique, Quintero y Golfo de Coronados.

Es relevante mencionar que la evaluación económica del proyecto se realizó considerando una altura de ola de 1 metro y un periodo de 5 segundos. La presión necesaria (3 bar) se genera en el pistón a partir de un calado de 35cm, esto significa que el pistón empezara a bombear agua una vez que se haya hundido esta cantidad. Por otro lado nuestro sistema tiene un recorrido máximo de 4 metros, sobre los cuales la bomba detiene su carrera debido al fin del recorrido interno del pistón. Así, no se trata de buscar un lugar con demasiada ola, sino más bien un lugar con una ola regular y no violenta. De estos tres lugares, el más indicado, en base a la comparación de máximos estadísticos y a la relación Altura/Promedio resulto ser Quintero.

Al hacer un análisis fino de la zona de Quintero se determino que se desea instalar la bomba frente a una playa, esto debido a:

- Los fondos frente a una playa son arenosos, lo cual ofrece una excelente adherencia para el muerto de fondeo.
- Las profundidades frente a una playa suelen ser regulares y relativamente bajas, disminuyendo gradual y predeciblemente hacia la costa.
- Una playa es un "receptor" amigable en caso de que el sistema de fondeo falle y la bomba sea arrastrada hacia la costa.

Frente a estos requerimientos se busco una playa cercana a Quintero, grande, expuesta e idealmente deshabitada. La elección recayó en la playa de Ritoque, la cual mide alrededor de 6 kilómetros. La distancia a la playa se determinó en función de la profundidad, la cual debe ser idealmente de 30mt, 14 de los cuales estarán ocupados por la bomba, aproximadamente los 7 siguientes estarán ocupados por cabo con guardacabos cada 1.5 metros, que servirán para regular la profundidad de la bomba. Los últimos 9 metros corresponderán a cable simple de acero, hasta el muerto.

La latitud respecto a la playa se determinará en base a una distancia intermedia entre las Rocas Concon (posible interferencia de olas) y el limite norte de la playa (balneario de Ritoque).

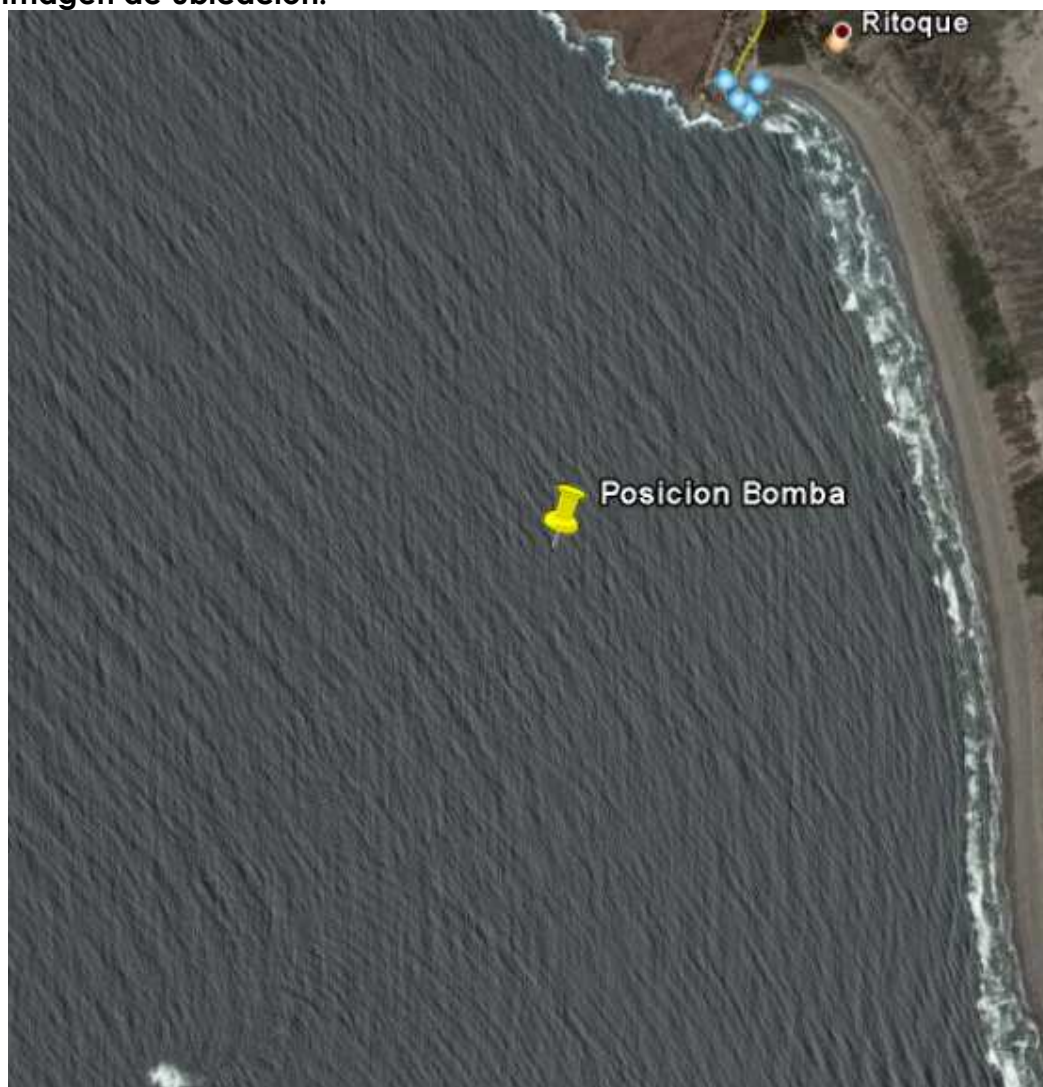
Siendo así, la posición aproximada de la boya será la siguiente:

Latitud: 32°50'55``
Longitud: 71°32'20``

Cabe mencionar que la boya prototipo se instalará sola, sin conexión alguna, y su capacidad de bombeo se medirá directamente sobre ella, sin embargo se hace necesario considerar un espacio de al menos 25mt de oscilación libre en cada dirección, así, la boya se encontrará en el centro de un cuadrado de concesión de 50x50mt.

Debe aclararse además que la posición dada en coordenadas es puramente referencial y se estimó de acuerdo a una carta náutica, cuya información batimétrica esta lejos de ser precisa y deberá ser confirmada en el lugar de instalación, siendo posible que en el punto exacto señalado, la profundidad del fondo escape demasiado a los 30mt ideales y nos obligue desplazarnos según la lectura de un ecosonda hasta un punto óptimo.

Imagen de ubicación:



Nota del autor: Toda propiedad intelectual y derechos pertenecen a Felipe Cubillos o a la empresa Whales Chile

Prohibida su reproducción.

Cálculo para la diferencia energética entre las bahías de Quintero y Golfo Coronados

Por: Daniel Bravo Silva

Introducción:

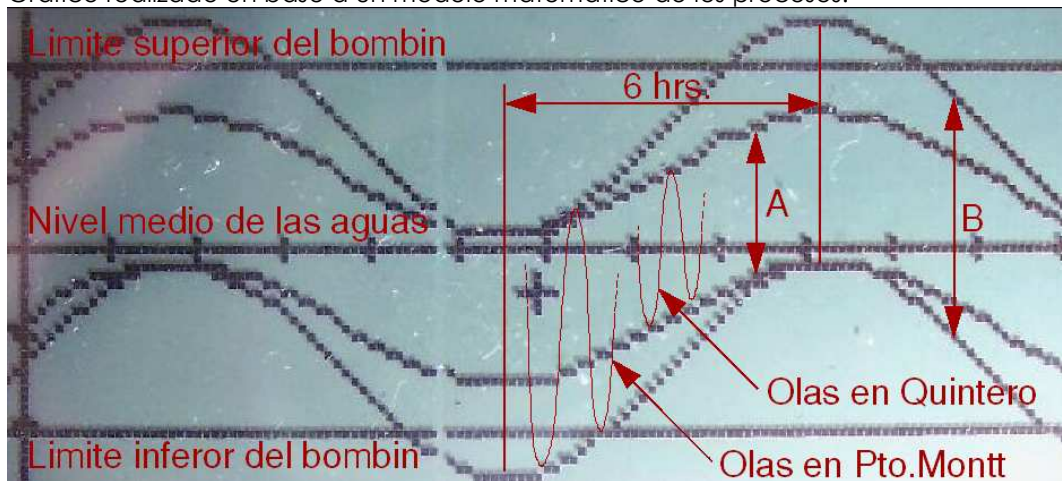
Dado que por motivos prácticos resulta conveniente instalar nuestro sistema en la zona cercana al faro corona y no en Quintero, se decidió hacer un estudio de la diferencia de potencial energético entre ambas zonas, así como una estimación del aumento de riesgo en una zona que no solo tiene mayor altura de olas sino, lo que es mas grave, mayor diferencia de mareas.

Estudio:

Los datos previos son los siguientes:

Altura de ola promedio en Quintero:	1,66mt
Diferencia de mareas en Quintero:	1,3mt
Periodo promedio de olas en Quintero:	9,4seg
Altura de ola promedio en Golfo Coronados:	2,6mt
Diferencia de mareas en Golfo Coronados:	2,3mt
Periodo promedio de olas en Golfo Coronados:	10,3seg

Gráfico realizado en base a un modelo matemático de los procesos:



En la imagen anterior se señala el ancho de la banda de oscilación de olas en Quintero con una letra A, podemos ver además la variación vertical de esta oscilación según la marea. Este dato se puede observar señalado por la diferencia de 6 horas entre una plea y una bajamar.

De la misma forma, con rangos de oscilación más amplios, y con una banda de altura de olas señalada con la letra B, podemos observar el comportamiento del océano en el golfo de Coronados.

Conclusión:

Dado que la ola del Golfo Coronados es razonablemente mas alta, podríamos esperar casi una duplicación del potencial energético, sin embargo, por efecto de una oscilación de mareas mayor, hay una porción importante de la oscilación de las olas que queda fuera del recorrido de 4 metros del Bombin, mientras las oscilaciones en la bahía de Quintero quedan (según la media estadística) 100% dentro del rango de acción del Bombin, aún considerando el efecto de las mareas.

Esta diferencia, sumada al hecho de que las olas en Coronados tienen un periodo promedio mayor, nos permitió determinar, con integración de funciones, que **la energía en el Golfo Coronados será un 44% mayor que en Quintero, y no de un 100%, como podría pensarse considerando solamente la diferencia de alturas de olas promedio.**

En términos de riesgo asociado, es también esencial observar que, según los promedios estadísticos, en Quintero nuestro Bombin nunca llegaría a sus límites de carrera, **mientras que en Golfo Coronados, pasará 4 de 6 horas alcanzando su límite superior o su límite inferior respectivamente.** Esto último supone un riesgo estructural no despreciable.

Energía

La Energía en el Mar

Antes de empezar a hacer cifras, es relevante hacer algunas aclaraciones que traigan luz sobre el comportamiento de nuestro querido medio;

La percepción general de que el océano es una súper fuente energética proviene, en buena medida, de su comportamiento caótico, impredecible y de constante irregularidad.

Así, nosotros sentimos que con, por ejemplo, 16 nudos, la altura de olas será por lo menos de unos 2 metros. Esa impresión la obtenemos del evento existente, pero improbable, de una ola de esa magnitud. Sucede algo similar con las rachas de viento, donde la tendencia natural será estimar que el viento imperante fue de algunos nudos más de lo que en realidad podía medirse.

Por otro lado, el caprichoso comportamiento del océano nos tendrá siempre deseando estar “en algún otro lado”, ya que en efecto los episodios de olas altas (pics) dentro de los llamados “espectros de mar”, se darán muy raramente en el mismo sitio, de esta manera, si ponemos una boya en un lugar donde frecuentemente se producen olas de por ejemplo, 3 metros, la realidad es que en el radio de 3 o 5 metros de la boya, muy probablemente se producirá solo una de las olas deseadas en un día completo, mientras 20 metros hacia atrás, hacia el lado, y hacia delante de la boya, estas olas especialmente altas parecerán abundar de forma burlona.

Hechas estas aclaraciones, podemos entrar en materia.

Los Factores en Juego

Para iniciar nuestro estudio invitaremos a algunos especímenes que nos entregaran valores referenciales, para condiciones predeterminadas, en base a las cuales desarrollaremos nuestras evaluaciones.

Nuestra ola de análisis proviene de la tabla del anexo 1, para una fuerza Beaufort de grado 4 a 5, y una intensidad de viento de 16 nudos. Estas condiciones han sido elegidas como un ejemplo de promedio razonable, que nos aleja de los peligrosos temporales y las improductivas calmas. La ola obtenida bajo estas condiciones tiene 0.89 metros de altura (distancia máxima desde el seno a la cresta), 21 metros de longitud y su periodo corresponde a 4.6 segundos. (Todos estos son valores medios, no ocuparemos valores “significativos”, a diferencia de las prácticas marítimas normales)

Luego definiremos una boya arbitraria; su forma será de planta circular y su área será lo mas grande posible mientras no se corra el riesgo de perder efectividad por acercarse mucho a la longitud de onda; Nuestra boya tendrá 2.5 metros de radio, 20 m² de área (en planta) y 1 metro de alto.

Cálculos

En primera instancia uno podría pensar que la boya ascenderá y descenderá 0.89 metros cada 4.6 segundos, lo cual sería cierto si nuestra boya oscilara libremente.

Para efectos de cálculo, y de forma arbitraria, consideraremos que la boya se “hunde” 30 cm en cada ola, por lo tanto la altura de ola ya no serán 0.89 metros sino 0.59 metros.

Hundiéndose 30 centímetros, la boya estará “jalando” 6.000 litros de agua hacia arriba, esto quiere decir que al ascender será capaz de tirar hacia arriba un cable con una fuerza de 58800 Newtons, una distancia de 0.59 metros y en un lapso de 2.3 segundos (la mitad del ciclo corresponde a ascenso, la otra, a descenso).

El descenso es distinto, en nuestro sistema, el cable del cual tira la boya está fijado a tierra y al ser tirado, desenrolla un cabo en un winche haciéndolo girar (una especie de yo-yo marino). Pero al descender, esta tensión desaparece, y el cable queda en reposo, por lo tanto para volver a enrollarlo, y además, aprovechar la energía del descenso, se propone montar, en la dirección opuesta de giro del winche, un cabo con un lastre, la potencia generada al descender, depende del peso de este lastre, el cual en este caso será, arbitrariamente, de 2 toneladas de masa, así, “jalara” hacia abajo con una fuerza de 19600 Newtons, esta fuerza se mantendrá aplicada durante 2.3 segundos.

Siendo así, el sistema nos entrega un ciclo que dura 4.6 segundos, de los cuales durante la primera mitad, se aplica una fuerza de 58800 Newtons y durante la segunda, de 19600 Newtons.

Para transformar esta fuerza en energía, debemos definir el winche que deseamos hacer girar: Arbitrariamente diremos que nuestro winche tiene un “carrete” de 1 metro de diámetro (la potencia no depende de esta medida, solo la necesitamos como herramienta de cálculo).

La potencia sobre un eje se define como

$$\text{Watts} = \text{Momento} * \text{Velocidad angular}$$

Donde el momento debe estar dado en $\text{N} * \text{m}$ y la veloc. Angular en Rad/seg

Con un radio del carrete de medio metro, nuestro momento en el ascenso, son $29400 \text{ N} * \text{m}$

Dado que el perímetro de nuestro círculo son 3.14 metros, con un desplazamiento de 0.59 m, daremos 0.18 vueltas en 2.3 segundos, esto es 0.08 rps (no existe un generador que funcione a revoluciones tan bajas, pero eso se soluciona instalando un sistema de amplificación mecánico).

Nuestra velocidad angular en Rad/seg , será:
 0.5 Rad/seg

Así, en el ciclo de ascenso, nuestra boya generará, sin pérdidas mecánicas ni funcionales del generador:

Potencia: 14800 watts

Para nuestro ciclo de descenso, mantenemos los mismos valores, excepto nuestra fuerza, que será algo menor:

Momento: $9800 \text{ N} * \text{m}$

Potencia: 4900 watts

Resultados

De esta manera, podemos decir que nuestro sistema estará generando, la mitad del día, 14800 watts (en ascensos) y la otra mitad 4900 watts (descensos).

Observaciones

En estos resultados se han obviado una serie de problemas funcionales, como por ejemplo el hecho de que la velocidad de giro del eje no es constante, la dirección de giro varia entre un ciclo de ascenso y uno de descenso y, por ultimo, que la eficiencia de un generador de corriente jamás será del 100%, sino bastante menos.

Los valores de energía entregados son una referencia de la cantidad de energía “neta” del mecanismo en términos físicamente ideales.

Anexo 1

Tabla Beaufort:

VIENTO							MAR									
DESCRIPCION	ESCALA BEAUFORT	LIMITES DE VIENTO (MUDOS)	PROMEDIO	SIGNIFICATIVA - M/s	ALTURA V/O OLAS MENORES	ALTURA DE LAS OLAS (METROS)	DESCRIPCION	ESCALA DMH (WMO)	PERIODO SIGNIFICATIVO T (SEGUNDOS)	PERIODO MAXIMO T (SEGUNDOS)	PERIODO MEDIO (SEGUNDOS)	LONGITUD MEDIA (MILLAS)	DISTANCIA MINIMA DE LA COSTA (MILLAS)	DURACION MINIMA DEL VIENTO (HORAS)		
CALMA	0	0-0.4	0	0	0	0	CALMA	0	—	—	—	—	—	—		
VENTOLINA	1	0.5-3.3	2	0.01	0.02	0.03	RIZADA	1	0.0-1.2	0.7	0.5	0.25	5	5 MIN.		
FLOJO (Brisa muy debil)	2	3.4-6.3	5	0.06	0.09	0.11			0.1-2.8	2.0	1.4	2.04	8	5 MIN.		
FLOJO (Brisa debil)	3	6.4-10	10	0.18	0.31	0.37	MAREJADILLA	2	0.8-5.0	3.4	2.4	6.10	9.8	17 HORAS		
			12	0.27	0.43	0.55			1.0-6.0	4	2.9	8.23	10	24		
			14	0.38	0.67	0.85			1.0-7.0	4.8	3.4	12.19	18	35		
BORRASCILLA MODERADA (Brisa moderada)	4	10.1-16	13.5	0.55	0.88	1.13	MAREJADA	3	1.4-7.6	5.4	3.9	15.65	24	43		
			16	0.61	1.01	1.23			1.5-7.8	5.6	4.0	17.98	28	52		
			18	0.83	1.40	1.77			2.0-8.8	6.5	4.6	21.64	40	66		
FRESQUITO (algo fuerte) (Brisa fresca)	5	16.1-21	19	1.18	1.86	2.32	FUERTE MAREJADA	4	2.5-10.0	7.2	5.1	27.43	55	83		
			20	1.31	2.10	2.65			2.8-10.6	7.7	5.4	30.17	65	92		
			22	1.57	2.44	3.09			3.0-11.1	8.1	5.7	32.83	75	10		
FRESCO (Brisa fuerte)	6	21.1-27	24.5	2.15	3.36	4.18	GRUESA	5	3.4-12.2	8.9	6.3	40.84	100	12		
			26	2.33	3.57	4.40			3.7-13.5	9.7	6.8	48.77	130	14		
			28	2.59	3.96	4.98	MUY GRUESA	6	3.8-13.6	9.9	7.0	49.99	140	15		
			30	2.83	4.29	5.31			4.0-14.5	10.5	7.4	57.30	180	17		
PRESAGACION (Viento fuerte)	7	28-33	30.5	3.35	5.19	6.49	ARBOLADA	7	4.5-15.5	11.3	7.9	64.62	230	20		
			32	3.70	5.61	6.91			4.7-16.7	12.1	8.6	76.20	280	23		
			34	4.06	6.12	7.52	MONTANOSA	8	4.9-17.0	12.4	8.7	78.82	290	24		
			36	4.45	6.72	8.26			5.0-17.5	12.9	9.1	85.87	340	27		
TEMPORAL	8	34-40	37	5.10	7.71	9.66			5.5-18.5	13.6	9.7	98.15	420	30		
			39	5.62	8.44	10.57			5.8-19.7	14.5	10.3	110.64	500	34		
			40	6.10	9.14	11.58			6-20.5	14.9	10.5	114.60	530	37		
			42	6.71	10.07	12.41			6.2-20.6	15.4	10.7	119.48	600	38		
			44	7.30	11.01	13.37			6.5-21.7	16.1	11.4	135.33	710	42		
TEMPORAL FUERTE	9	41-47	46	8.06	12.12	15.22			7-23	17.0	12.0	159.95	830	47		
			48	8.72	13.27	16.62			7-24.2	17.7	12.5	162.76	960	52		
			50	9.49	14.52	18.17			7-25	18.6	13.1	179.83	1100	57		
			52	10.29	15.87	19.81			7.5-26	19.4	13.8	198.12	1250	63		
TEMPORAL DURO	10	48-55	51.5	11.63	17.32	21.99			7.5-27	20.2	14.3	223.36	1470	69		
			54	12.55	18.88	23.69			8-28.2	20.8	14.7	242.33	1560	73		
			56	13.64	20.61	25.68			8-28.5	21.0	14.8	248.60	1610	75		
			58	14.82	22.52	27.98			8-29.5	21.8	15.2	268.39	1800	81		
TEMPORAL MUY DURO	11	56-63	59.5	16.20	24.69	30.82			8.5-31	22.6	16.3	297.33	2100	88		
			62	17.86	27.08	33.83			10-32	24	17.0	300.23	2500	101		
TEMPORAL HURACANADO	12	64-71	> 64	24.49	36.19	45.11			10-35	(26)	(18)	~	~	~		

a) La duracion y alcance para vientos huracanados y a menudo para verdaderos y tormentas, se alcanza y por consiguiente los mares no se desarrollan plenamente.

b) Para tales vientos, el estado de mar es confuso. Las crestas de olas se dispersan y el agua se mezcla con el aire.

FETE

Estimación de Energía para Olas que Avanzan

Finalidad del documento:

Analizar la posibilidad de aprovechar la energía simple de avance de la ola, en forma de presión de agua.

Desarrollo:

La cantidad de energía que puede obtenerse de una ola, depende del punto donde esta se extraiga (el centro, la cresta o alguna posición intermedia de la ola) su tamaño en altura, y esencialmente de la longitud de onda del tren de olas, esto es, de la distancia entre una ola 1 y la ola siguiente 2.

Para Obtener la máxima energía posible, debemos ubicarnos siempre en la franja mas alta de la ola, donde la masa de agua "avanza" a mayor velocidad, nos referimos a la franja que luego, al reventar la ola, formara la "cresta".

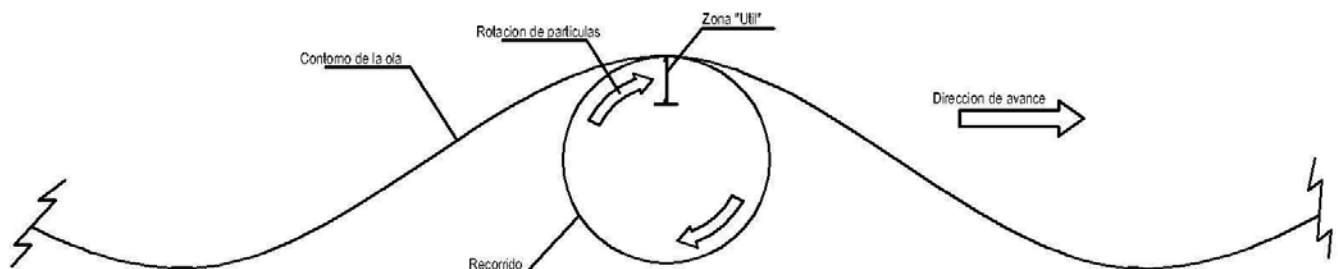
El problema radica en que nuestra "toma", o boca de acceso de la presión de agua debe cumplir con dos características;

1. Tener un área expuesta tan grande como sea posible y
2. Ser lo mas ancha posible a modo de concentrar esta área en la parte superior de la ola.

Las masas de agua no se desplazan, solo rotan, empujando en su rotación a la partícula siguiente y transmitiendo de esta forma la energía en una ola, que "parece" desplazarse. Cada partícula de agua en una ola describe un círculo; en este recorrido la partícula se eleva, avanza hacia delante, luego se sumerge y avanza hacia atrás, así las olas tienen un eje neutro en el cual prácticamente no hay movimiento y alrededor del cual giran las partículas.

Las olas revientan en la orilla porque en el momento en que las partículas están descendiendo, para iniciar el retroceso, se encuentran con la arena de una playa, y chocan con esta, proyectando su energía descendente hacia delante.

La energía "útil" de las olas se encuentra en el desplazamiento tangencial de las partículas superiores, el cual genera un empuje que puede accionar distintos mecanismos.



Estimación preliminar de la energía potencial extraíble:

Valores considerados (datos obtenidos simplemente de la tabla Beaufort):

Potencia de viento imperante: 16 Nudos

Fetch: sin límite; se desarrolla estado de mar.

Longitud de ola: 30 metros; valor arbitrario, dentro de los rangos normales.

Altura de ola: 1mt

Periodo medio: 5 segundos

Longitud de ola: 21mt

Velocidad de ola: 4m/s

Presión dinámica de la ola: 8200N/m

Presión capaz de levantar una columna de agua de: 0,82mt.

Observación final:

La posibilidad de extraer presión de agua directamente a través de un tubo cuya boca enfrente a las olas, es baja y por lo tanto, se considera inútil.