

2018

BOMBEO DE AGUA DE MAR CON ENERGÍA UNDIMOTRIZ

CABRERA FERNÁNDEZ, ELIECER BASTIÁN

<http://hdl.handle.net/11673/40828>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAISO-CHILE**



**“BOMBEO DE AGUA DE MAR CON ENERGÍA
UNDIMOTRIZ”**

ELIECER CABRERA FERNÁNDEZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN PRODUCCIÓN**

PROFESOR GUÍA: DIPL. ING. UDO RHEINSCHMIDT

PROFESOR CO-REFERENTE: PHD. ING. CARLOS ROSALES H

MAYO 2018

Agradecimientos

Agradezco por sobre todas las cosas a mi familia por ser un apoyo incondicional en todos los momentos claves de mi vida.

Agradezco a mis amigos y amigas, compañeros y compañeras porque sin su compañía este logro académico no hubiese sido posible.

Agradezco a profesores, docentes, apoyo académico y todos quienes hubiesen sido un aporte a mi formación académica por enseñarme el valor del trabajo. Especialmente al profesor Udo Rheinschmidt y al apoyo académico Ricardo Quinteros por el apoyo brindado en la realización de esta memoria.

Este trabajo está dedicado a la memoria de los mineros del carbón de Lota y el sacrificio de su labor, ya que detrás de todo logro siempre estará el esfuerzo de quienes nos antecedieron.

Resumen

En este trabajo se estudia y analiza la factibilidad técnica de bombear agua salada de mar en función a la energía de las olas por medio de dos sistemas de captación que corresponden a un “*comeolas*”, que es un dispositivo que por medio de una válvula anti retorno acumula la energía de las olas, y una “*bomba de ariete marina*”, que aprovecha el fenómeno del golpe de ariete formado por el impacto de las olas con una válvula de choque.

Se diseña y fabrican prototipos con los cuales se realizan mediciones y modelos matemáticos que permitan escalar los dispositivos para evaluar sus ventajas y desventajas.

Se diseñan dos soluciones que permiten bombear agua de mar a 25 metros sobre el nivel del mar con los dispositivos estudiados, concluyendo el potencial de la “*bomba de ariete marina*” como una tecnología atractiva y adecuada para este fin pese a las dificultades de su futura instalación.

Finalmente se realizan simulaciones numéricas por medio del software comercial Ansys Fluent para respaldar los modelos matemáticos y las parametrizaciones de las soluciones.

Se concluye la factibilidad de ambos dispositivos para el bombeo de agua de mar a diferentes alturas presentando los resultados en función de la profundidad del agua bajo el nivel del mar para la región de Valparaíso, obteniendo resultados relevantes para el aprovechamiento energético sobre los 10 metros de profundidad.

Abstract

This paper studies and analyzes the technical feasibility of pumping seawater through on the energy of the waves by means of two catchment systems that correspond to a “*comeolas*”, which is a device that by means of an anti-valve return accumulates the energy of the waves, and a “*sea ram pump*”, which takes advantage of the phenomenon of water hammer formed by the impact of waves with a shock valve.

Prototypes are designed and manufactured with which measurements and mathematical models are made to scale the devices to evaluate their advantages and disadvantages.

Two solutions designed to pump seawater at 25 meters above sea level are designed with the devices studied, concluding the potential of the “*sea ram pump*” as an attractive and appropriate technology for this purpose despite the difficulties of its future installation.

Finally, numerical simulations are carried out using Ansys Fluent commercial software to support the mathematical models and parameterisations of the solutions.

The feasibility of both devices for the pumping of seawater at different heights is concluded, presenting the results based on the depth of the water below sea level for the Valparaíso region, obtaining relevant results for the energy use over the 10 meters of depth.

Glosario

- ρ : Densidad del fluido $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
- g : Gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
- L : Longitud de la ola $[m]$
- H : Amplitud de la ola $[m]$
- a : Altura de la ola $[m]$
- h : Profundidad de la ola hasta el lecho marino $[m]$
- C : Celeridad de una ola $\left[\frac{m}{s}\right]$
- T : Periodo de la ola $[s]$
- u : Velocidad horizontal de las partículas dentro de una ola $\left[\frac{m}{s}\right]$
- v : Velocidad vertical de las partículas dentro de una ola $\left[\frac{m}{s}\right]$
- K : Numero de onda $[m^{-1}]$
- w : Frecuencia angular $[Hz]$
- C_g : Celeridad de un grupo de ola $\left[\frac{m}{s}\right]$
- H_s : Altura de ola significativa $[m]$
- H_{RMS} : Altura de ola media cuadrática $[m]$
- T_z : Periodo medio $[s]$
- T_s : Periodo significativo $[s]$
- Re : Numero de Reynolds $[-]$
- Fr : Numero de Froude $[-]$
- $\hat{\nu}$: Viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
- h_f : Perdidas de presión en una tubería $[m]$
- \bar{L} : Longitud tubería $[m]$
- F_a : Fuerza de arrastre $[Kgf]$
- C_a : Coeficiente de arrastre $[-]$
- A_v : Area valvula $[m^2]$
- F_r : Fuerza de arrastre de diseño $[Kgf]$
- U_c : Velocidad de cierre en la válvula $\left[\frac{m}{s}\right]$
- C_{vi} : Carrera de la válvula de choque $[mm]$
- Z : Profundidad del dispositivo bajo nivel del mar $[m]$
- U_z : Velocidad de la partícula de la ola a la altura Z ola $\left[\frac{m}{s}\right]$
- \bar{H} : Altura de la columna de agua $[m]$
- H_E : Altura de entrada equivalente $[m]$
- H_{EC} : Altura de entrada equivalente mínima $[m]$
- H_d : Altura de descarga $[m]$

C_a : Celeridad de la onda de sobrepresión $\left[\frac{m}{s}\right]$

e : Espesor de la tubería $[m]$

K : Modulo elástico $\left[\frac{m^2}{kg}\right]$

V_{ca} : Volumen cámara de aire $[m^3]$

D_c : Diámetro cámara de aire $[m]$

h_{ca} : Altura cámara de aire $[m]$

V_{te} : Volumen agua contenida en tubería de descarga $[m^3]$

\bar{d} : diámetro ducto de descarga $[m]$

Índice

Agradecimientos.....	2
Dedicatoria.....	3
Resumen.....	4
Abstract.....	4
Glosario.....	5
1. Introducción.....	15
2. Marco teórico.....	17
2.1. Principios de conservación de un fluido.....	17
2.1.1. Principio de conservación de la masa.....	17
2.1.2. Principio de la conservación del momentum.....	17
2.1.3. Principio de conservación de la energía.....	18
2.2. Teoría del oleaje.....	19
2.2.1. Características del oleaje.....	19
2.2.2. Formación del oleaje.....	20
2.2.3. Modelos Teóricos del oleaje.....	24
2.2.4. Oleaje real.....	33
2.3. Potencial energético del oleaje.....	37
2.3.1. Energía por corrientes.....	37
2.3.2. Energía mareomotriz.....	37
2.3.3. Energía por el oleaje.....	38
2.3.4. Energía total del oleaje.....	38
2.3.5. Distribución de la energía del oleaje.....	39
2.3.6. Energía del oleaje en Chile.....	40
2.4. Sistemas de captación de energía undimotriz.....	46
2.4.1. Clasificación por ubicación.....	46
2.4.2. Clasificación según orientación.....	47
2.4.3. Clasificación según principio de captación.....	48
2.5. Bombas hidráulicas.....	50
2.5.1. Configuración de bombas hidráulicas.....	50
2.5.2. Clasificación de bombas hidráulicas.....	51
2.6. Fluido en tuberías.....	55
2.6.1. Flujo laminar y turbulento.....	55
2.6.2. Pérdidas de presión.....	57
2.7. Análisis dimensional y semejanza.....	57
2.7.1. Numero de Reynolds.....	58

2.7.2.	Numero de Froude	59
3.	Antecedentes	60
3.1.	Tecnologías existentes de aprovechamiento energético undimotriz	60
3.1.1.	Electricidad	60
3.1.2.	Bombeo	63
3.1.3.	Osmosis	65
3.2.	Abastecimiento de agua del mar	65
3.2.1.	Granjas marinas	66
3.2.2.	Desalinizadores	67
3.3.	Impacto ambiental	71
3.3.1.	Impacto: Ruido	71
3.3.2.	Impacto: Contaminación por hidrocarburos	71
3.3.3.	Impacto: Remoción de sedimentos	71
3.3.4.	Impacto: Cambio del oleaje	72
3.3.5.	Impacto: Limitación al desplazamiento y migración de organismo marinos	72
3.3.6.	Impacto: Producción de nuevos sustratos para el asentamiento de especies	72
4.	Diseño de alternativas	73
4.1.	Descripción del problema	73
4.2.	Metodología	73
4.3.	Diseño conceptual	74
4.3.1.	Sistema de columna de agua oscilante con boya tipo piston	74
4.3.2.	Sistema de columna de agua oscilante con boya tipo diafragma	74
4.3.3.	Comeolas	75
4.3.4.	Bomba de ariete	75
4.4.	Ponderación	76
5.	Diseño de prototipos	76
5.1.	Diseño prototipo comeolas	76
5.1.1.	Fundamentos del diseño	76
5.1.2.	Diseño conceptual	77
5.1.3.	Descripción de las fases	77
5.1.4.	Elementos	78
5.1.5.	Dimensionamiento	79
5.2.	Diseño prototipo de ariete	80
5.2.1.	Fundamentos del diseño	80
5.2.2.	Esquema conceptual	81
5.2.3.	Descripción de fases	81
5.2.4.	Componentes	82

5.2.5.	Dimensionamiento	84
6.	Construcción	85
6.1.	Prototipo comeolas	85
6.1.1.	Listado de materiales	85
6.1.2.	Plano general del ensamble	85
6.1.3.	Componentes.....	86
6.1.4.	Ensamble	87
6.2.	Prototipo Ariete marino.....	88
6.2.1.	Listado de materiales	88
6.2.2.	Plano general del ensamble	89
6.2.3.	Componentes.....	90
6.2.4.	Ensamble	92
7.	Mediciones	93
7.1.	Canal de olas	93
7.1.1.	Especificaciones técnicas.....	93
7.2.	Prototipo Comeolas	94
7.2.1.	Montaje	94
7.2.2.	Altura V/S Amplitud del oleaje.....	94
7.3.	Prototipo Ariete	95
7.3.1.	Montaje	95
7.3.2.	Válvula de choque	95
7.3.3.	Altura máxima V/S Masa válvula de choque.....	97
7.3.4.	Relación de elevación máxima V/S Amplitud de la ola	98
7.3.5.	Modificaciones	98
8.	Dimensionamiento	99
8.1.	Soluciones del problema	99
8.1.1.	Primera solución.....	99
8.1.2.	Segunda solución	100
8.2.	Semejanzas.....	100
8.2.1.	Semejanzas geométricas	100
8.2.2.	Semejanzas dinámicas.....	100
8.3.	Parametrización	101
8.3.1.	Comeolas	101
8.3.2.	Bomba de ariete.....	104
8.4.	Condiciones del oleaje.....	108
8.5.	Dimensionamiento primera solución.....	109
8.5.1.	Comeolas	109

8.5.2.	Bomba de ariete.....	111
8.6.	Dimensionamiento segunda solución.....	114
8.6.1.	Atrapaolas.....	114
8.6.2.	Bomba de ariete.....	116
8.7.	Comparaciones caudales máximos entre soluciones	121
8.8.	Grafico caudal v/s altura teórico para la bomba de ariete marino.....	122
9.	Verificación.....	123
9.1.	Procedimiento simulación oleaje.....	123
9.1.1.	Geometría.....	124
9.1.2.	Mallado.....	131
9.1.3.	Configuración	132
9.2.	Resultados relevantes.....	140
9.2.1.	Altura minima	140
9.2.2.	Presión relativa.....	141
9.2.3.	Velocidad mínima y máxima.....	142
10.	Consideraciones finales.....	143
10.1.	Potencial comeolas.....	143
10.1.1.	Velocidad media y caudal por ola para tubería con 1 [m] de diámetro.	144
10.1.2.	Velocidad media y caudal por ola para tubería con 2 [m] de diámetro.	145
10.2.	Potencial bomba ariete marina	146
10.2.1.	Altura equivalente corregida para tubería con 1 [m] de diámetro.....	146
10.2.2.	Altura equivalente corregida para tubería con 2 [m] de diámetro.....	147
10.3.	Modelo bomba ariete marina	148
10.4.	Futuras mejoras.....	149
10.4.1.	Materialidad	149
10.4.2.	Emplazamiento.....	149
10.4.3.	Geometría atrapaolas.....	149
10.4.4.	Válvula de choque sumergida	149
11.	Conclusiones	150
12.	Referencias.....	152
13.	Anexos	154

Listado de figuras

Figura 2.1 Parámetros de una ola	19
Figura 2.2 Densidad de la energía del oleaje respecto a su periodo	20
Figura 2.3 Oleaje provocado por desprendimientos	20
Figura 2.4 Mareas por efecto combinado del sol y la luna	21
Figura 2.5 Mareas por efecto independiente del sol y la luna	21
Figura 2.6 Formación del oleaje provocado por el viento	22
Figura 2.7 Mar de viento	22
Figura 2.8 Mar de fondo.....	22
Figura 2.9 Efecto del viento sobre el mar.....	23
Figura 2.10 Origen del oleaje que impacta en Chile	23
Figura 2.11 Criterios de modelos matemáticos del oleaje	24
Figura 2.12 Desplazamiento de las partículas al interior de una ola.....	26
Figura 2.13 Comportamiento de la presión en el oleaje	27
Figura 2.14 Grupos de olas.....	29
Figura 2.15 Modelo de Stokes 2° orden	31
Figura 2.16 Modelo Cnoidal.....	32
Figura 2.17 Sobreposición de frecuencias del oleaje.....	34
Figura 2.18 Modelos de espectro del oleaje	35
Figura 2.19 Muestra característica de boyas de oleaje	35
Figura 2.20 Distribución característica del oleaje	36
Figura 2.21 Distribución de la potencia del oleaje en el planeta	39
Figura 2.22 Variación energética del oleaje	39
Figura 2.23 Distribución de la altura promedio	40
Figura 2.24 Distribución del periodo promedio	41
Figura 2.25 Variación de altura y periodo promedio a lo largo de la costa	41
Figura 2.26 Campo de altura promedio en Valparaíso	42
Figura 2.27 Campo de periodo promedio en Valparaíso	42
Figura 2.28 Profundidad de costa Valparaíso.....	43
Figura 2.29 Altura significativa en la macro zona de Valparaíso.....	43
Figura 2.30 Altura significativa anual entre Ritoque y Quintero.....	44
Figura 2.31 Altura significativa anual Playa Ancha	44
Figura 2.32 Altura significativa anual isla Lobos y cercanía	45
Figura 2.33 Altura significativa anual Quintay	45
Figura 2.34 Clasificación por ubicación de dispositivos undimotrices	46
Figura 2.35 Clasificación según orientación de dispositivos undimotrices	47
Figura 2.36 Clasificación según principio de captación de dispositivos undimotrices.....	48
Figura 2.37 Bombas en serie	50
Figura 2.38 Bombas en paralelo	50
Figura 2.39 Clasificación Bombas hidráulicas	51
Figura 2.40 Tipos de bombas de pistón	52
Figura 2.41 Bomba de diafragma	52
Figura 2.42 Bomba de ariete	53
Figura 2.43 Bomba eyectora.....	53
Figura 2.44 Bomba de soga	54
Figura 2.45 Bomba de tornillo.....	54
Figura 2.46 Bomba de paleta.....	54
Figura 2.47 Bomba de engranaje.....	55
Figura 2.48 Bomba peristáltica.....	55
Figura 2.49 Región de entrada en un tubo para flujo laminar	56
Figura 3.1 Sistema de columna de agua oscilante con turbina Wells	60
Figura 3.2 Proporción del agua en el planeta	67
Figura 3.3 Cantidad de agua dulce en países de la OCDE.....	68
Figura 3.4 Evolución del estrés hídrico esperado en Chile	69
Figura 3.5 Estrés hídrico en el planeta esperado para el 2040.....	69
Figura 4.1 Instalación de tanques de agua de mar	73

Figura 4.2 OWC con pistón.....	74
Figura 4.3 OWC con diafragma	74
Figura 4.4 Bomba comeolas	75
Figura 4.5 Bomba de ariete marina	75
Figura 5.1 Zona de emplazamiento	76
Figura 5.2 Esquema prototipo comeolas	77
Figura 5.3 Esquema prototipo experimental comeolas.....	78
Figura 5.4 Fenómeno golpe de ariete	80
Figura 5.5 Esquema prototipo bomba de ariete marina	81
Figura 5.6 Primera fase: Cierre brusco	81
Figura 5.7 Segunda fase: Expansión.....	82
Figura 5.8 Tercera fase: Contracción	82
Figura 5.9 Esquema prototipo experimental ariete marino.....	84
Figura 6.1 Cotas principales de prototipo comeolas.....	85
Figura 6.2 Componente atrapaola comeolas.....	86
Figura 6.3 Componente ducto principal comeolas	86
Figura 6.4 Componente ducto secundario comeolas	87
Figura 6.5 Ensamble comeolas	87
Figura 6.6 Cotas principales de prototipo ariete marino.....	89
Figura 6.7 Componente atrapaola ariete marino.....	90
Figura 6.8 Componente ducto principal y válvula de retención ariete marino	90
Figura 6.9 Componente cámara de aire ariete marino	91
Figura 6.10 Componente válvula de choque ariete marino	91
Figura 6.11 Componente ducto secundario ariete marino	92
Figura 6.12 Ensamble ariete marino.....	92
Figura 7.1 Canal de olas	93
Figura 7.2 Paleta canal de olas	93
Figura 7.3 Montaje prototipo comeolas.....	94
Figura 7.4 Montaje prototipo ariete marino.....	95
Figura 7.5 Válvula de choque.....	95
Figura 7.6 Masas detalle.....	96
Figura 7.7 Modificación ariete marina	98
Figura 8.1 Ubicación estanques agua de mar	99
Figura 8.2 Esquema primera solución	99
Figura 8.3 Esquema segunda solución	100
Figura 8.4 Modulo elástico para diferentes materiales	104
Figura 8.5 Resistencia a la presión tubos PVC.....	105
Figura 8.6 Relación de eficiencia para bombas de ariete.....	107
Figura 8.7 Fuerzas sobre el codo	107
Figura 8.8 Esquema comeolas	109
Figura 8.9 Diagrama de la instalación	111
Figura 8.10 Elección de tubería PVC	111
Figura 8.11 Fuerzas en el codo.....	113
Figura 8.12 Esquema bomba de ariete marina.....	114
Figura 8.13 Esquema atrapaolas.....	114
Figura 8.14 Elección tubería PVC	117
Figura 8.15 Fuerzas en el codo.....	121
Figura 9.1 Procedimiento simulación.....	123
Figura 9.2 Geometría.....	124
Figura 9.3 Selección de superficie.....	124
Figura 9.4 Superficies laterales	125
Figura 9.5 Superficie nombrada como "simetría"	125
Figura 9.6 Superficie salida de mar	126
Figura 9.7 Superficie nombrada como "finoleaje"	126
Figura 9.8 Superficie inferior	127
Figura 9.9 Superficie nombrada como "suelo"	127

Figura 9.10 Superficie superior	128
Figura 9.11 Superficie nombrada como “cielo”	128
Figura 9.12 Superficie dispositivo atrapaolas	129
Figura 9.13 Superficie nombrada como “tubería”	129
Figura 9.14 Superficie de interes	130
Figura 9.15 Superficie nombrada como “outlet”	130
Figura 9.16 Mallado	131
Figura 9.17 Vista de la malla	131
Figura 9.18 Configuración	132
Figura 9.19 Configuración general	132
Figura 9.20 Información general	132
Figura 9.21 Elección modelo de viscosidad	133
Figura 9.22 Configuración multifase	133
Figura 9.23 Selección segunda fase	134
Figura 9.24 Selección de agua líquida como segunda fase	134
Figura 9.25 Condiciones de borde	134
Figura 9.26 Dirección y velocidad de propagación de una ola	135
Figura 9.27 Características de la ola a modelar	136
Figura 9.28 Condición de simetría a superficies laterales	137
Figura 9.29 Condición “Wall” a dispositivo y suelo marino	137
Figura 9.30 Configuración “pressure outlet”	138
Figura 9.31 Configuración “pressure outlet”	138
Figura 9.32 Configuración “pressure outlet”	138
Figura 9.33 Condiciones de operación	139
Figura 9.34 Valores iniciales	139
Figura 9.35 Método híbrido de iniciación	139
Figura 9.36 Visualización fase con altura mínima	140
Figura 9.37 Visualización presión relativa	141
Figura 9.38 Velocidad máxima en el ducto	142
Figura 9.39 Velocidad mínima en el ducto	142
Figura 10.1 Modelo final bomba de ariete marina	148
Figura 10.2 Modelo final bomba de ariete marina	148

Listado de gráficos

Grafico 7.1 Elevación respecto la amplitud de la ola prototipo comeolas	94
Grafico 7.2 Altura elevación respecto masa válvula de choque	97
Grafico 7.3 Relación de elevación máxima respecto a amplitud de la ola	98
Grafico 8.1 Variación de la longitud de la onda respecto a la profundidad	108
Grafico 8.2 Altura máxima alcanzada respecto la profundidad emplazamiento	110
Grafico 8.3 Altura de entrada equivalente respecto a profundidad de emplazamiento	116
Grafico 8.4 Posición optima de la válvula respecto a la profundidad	118
Grafico 8.5 Altura equivalente corregida respecto a la profundidad	119
Grafico 8.6 Caudal final respecto a la altura de entrega de solución final	122
Grafico 10.1 velocidad media de una ola con tubería de 1 [m] de diámetro respecto a la profundidad	144
Grafico 10.2 Caudal de una ola con tubería de 1 [m] de diámetro respecto a la profundidad	144
Grafico 10.3 Velocidad media de una ola con tubería de 2 [m] de diámetro respecto a la profundidad	145
Grafico 10.4 Caudal de una ola con tubería de 2 [m] de diámetro respecto a la profundidad	145
Grafico 10.5 Altura equivalente corregida con tubería de 1 [m] de diámetro respecto a la profundidad	146
Grafico 10.6 Altura equivalente corregida con tubería de 2 [m] de diámetro respecto a la profundidad	147

Listado de tablas

Tabla 2.1 Tendencia de las funciones hiperbólicas	28
Tabla 2.2 Clasificación de del oleaje lineal	28
Tabla 2.3 Resumen teoría lineal	30
Tabla 3.1 Clasificación del agua según porcentaje de sales disueltas	67
Tabla 3.2 Clasificación de acceso al agua según la OMS [27]	68
Tabla 4.1 Ponderación de alternativas	76
Tabla 6.1 Listado de materiales prototipo comeolas	85
Tabla 6.2 Listado de materiales ariete marino	88
Tabla 7.1 Especificaciones técnicas canal de olas	93
Tabla 7.2 Masas utilizadas	96
Tabla 8.1 Caudal solución respecto a la profundidad	110
Tabla 8.2 Caudal descarga máximo comeolas	112
Tabla 8.3 Caudal de descarga máximo bomba de ariete marino respecto profundidad	120
Tabla 8.4 Comparación caudales entre soluciones con 10 [m] de profundidad	121

1. Introducción

La mayor parte del planeta está cubierta principalmente por agua formando vastos océanos con una cantidad enorme de recursos potenciales, que, aunque frágiles son atractivos para el desarrollo humano como el oleaje, las mareas y las corrientes oceánicas.

El oleaje es un fenómeno que corresponde a un movimiento cíclico que se genera en la superficie de los grandes depósitos de agua como océanos y grandes lagos. Provocado principalmente por tres causas como el desprendimiento de grandes superficies de tierra, el efecto gravitacional sobre el agua y el movimiento provocado por el viento siendo esta última la con mayor cantidad de energía por metro cuadrado.

Existen numerosos intentos de aprovechar la energía del oleaje existiendo en la actualidad miles de prototipos en diseño o en desarrollo buscando ofrecer la solución a este problema, pero ninguna tecnología se ha logrado imponer como una solución satisfactoria y universal. En este panorama Chile presenta una ventaja comparativa por el fácil acceso a la costa, la alta cantidad de energía del oleaje y su baja varianza anual, por estas razones hoy se están desarrollando distintas tecnologías en nuestro territorio buscando dar una solución adecuada basada en las características y desafíos que presenta el país es en este interés que se basa esta memoria.

El aprovechamiento de la energía undimotriz en Chile puede dar solución a tres grandes desafíos que el país presentara en los próximos años.

La sequía y difícil acceso al agua potable que se vive en el norte y centro del país ha llevado a considerar la desalinización del agua de mar para facilitar el acceso a este, pero la gran cantidad de energía demandada y su alto costo no la vuelve una tecnología tan competitiva como se quisiera, por lo tanto, se vuelve necesario lograr reducir todos los costos incluyendo la extracción del agua de mar buscando que esta tecnología sea adecuada a los requerimientos de las comunidades.

La escasa pesca a lo largo del territorio provocada por la sobreexplotación de los recursos marítimos ha llevado a un cambio de paradigma desde la recolección de recursos marinos al cultivo de recursos marinos en distintas áreas. Uno de los tantos desafíos que tiene esta innovadora industria es la extracción de agua de mar para distintas etapas del cultivo en granjas marinas que se encuentran sobre el nivel del mar.

Las energías renovables no convencionales en el sur del país no han tenido un desarrollo tan extendido como en el norte del país con la energía solar, esto debido en gran parte a la presión social de no alterar los ecosistemas únicos en el mundo que se presentan en esta zona del territorio y la baja radiación solar en comparación al norte del país. En este contexto la energía undimotriz se vuelve una alternativa atractiva si consideramos que el sur del país se

encuentra el mayor potencial energético undimotriz del mundo provocando que las tecnologías en desarrollo sean competitivas frente a otras fuentes de energía.

En la siguiente memoria se buscará el diseño, desarrollo y análisis de un prototipo que sea capaz de bombear agua de mar con la energía del propio oleaje con una tecnología adecuada al territorio y que dé respuesta a los desafíos de las comunidades costeras del país buscando que esta memoria sea un aporte al desarrollo de la energía undimotriz en el territorio nacional.

2. Marco teórico

2.1. Principios de conservación de un fluido

Existen tres principios básicos en los fluidos los principios de conservación de la masa, momentum y energía [1].

2.1.1. Principio de conservación de la masa

Este principio se expresa como: “La transferencia neta de masa hacia un volumen de control, o hacia afuera de este, durante un Δt es igual al cambio neto en la masa total que está dentro del volumen de control”.

$$m_{ent} - m_{sal} = \Delta m_{VC} \quad (2.1)$$

$$m'_{ent} - m'_{sal} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (2.2)$$

Donde m'_{ent} y m'_{sal} son las razones del flujo de masa dentro del volumen del control. De este principio se puede deducir la conservación del caudal en un volumen de control con flujo estacionario.

2.1.2. Principio de la conservación del momentum

Al considerar el movimiento de una partícula de un fluido y aplicar la conservación del momento obtenemos:

$$\sum F_s = ma_s \quad (2.3)$$

En las regiones donde las fuerzas netas de fricción son despreciables, las fuerzas significativas son la presión que actúa por ambos lados y el peso en dirección s.

$$P dA - (P + dP) dA - W \text{ sen}\theta = mV \frac{dV}{ds} \quad (2.45)$$

Al simplificar:

$$-dP - \rho g dz = \rho V dV \quad (2.4)$$

$$\frac{dP}{\rho} + g dz + \rho V dV = 0 \quad (2.5)$$

Integrando:

$$\int \frac{dP}{\rho} + g z + \frac{V^2}{2} = 0 \quad (2.6)$$

Finalmente, para flujos estacionarios e incompresibles:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = cte \quad (2.7)$$

Este principio da a entender que la suma de las energías del flujo, la energía cinética y energía potencial son iguales en cualquier punto de un mismo fluido estacionario e incompresible en su volumen de control.

2.1.3. Principio de conservación de la energía

Una de las leyes más fundamentales de la naturaleza es el principio de la conservación de la energía. Este principio expresa que la energía no se puede crear ni destruir en el transcurso de un proceso. Lo cual puede expresarse como:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Razón neta de transferencia} \\ \text{de energía hacia un VC} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Razón de cambio} \\ \text{respecto al tiempo} \\ \text{del contenido de energía} \\ \text{del VC} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Gasto neto de energía} \\ \text{hacia afuera de la superficie de control} \\ \text{por flujo de masa} \end{array} \right) \quad (2.8)$$

En flujos estacionarios:

$$Q_{ent} + W_{flecha} = \sum_{sal} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (2.9)$$

2.2. Teoría del oleaje

El oleaje es un fenómeno físico que se puede observar en grandes depósitos de agua como en los océanos, este fenómeno puede ser analizado como una onda que actúa en la parte superficial del agua.

2.2.1. Características del oleaje

Es necesario caracterizar correctamente el comportamiento del oleaje para entender cómo aprovechar eficientemente la energía de la misma. Las características del comportamiento de una ola son similares a una onda:

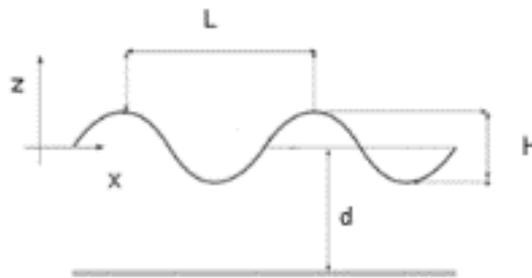


Figura 2.1 Parámetros de una ola

- La longitud de la ola L corresponde a la distancia entre dos crestas o valles de una misma ola en desplazamiento.
- La altura de la ola H corresponde a la altura desde el punto mínimo al máximo de una ola, la altura de la ola desde la superficie media del agua se denomina amplitud de la ola.
- La profundidad desde la altura media de la ola hasta una superficie sólida es una de las características más importantes de una ola y determina en gran medida el comportamiento de esta, se suele denominar con la letra d .
- La celeridad C de una ola corresponde a la velocidad de desplazamiento de la ola.
- El periodo T de una ola corresponde al tiempo que le toma a una ola volver a su misma posición.

2.2.2. Formación del oleaje

Existen tres grandes causas a la formación del oleaje a continuación se describen las causas desde la menos a la más relevante para el aprovechamiento energético.

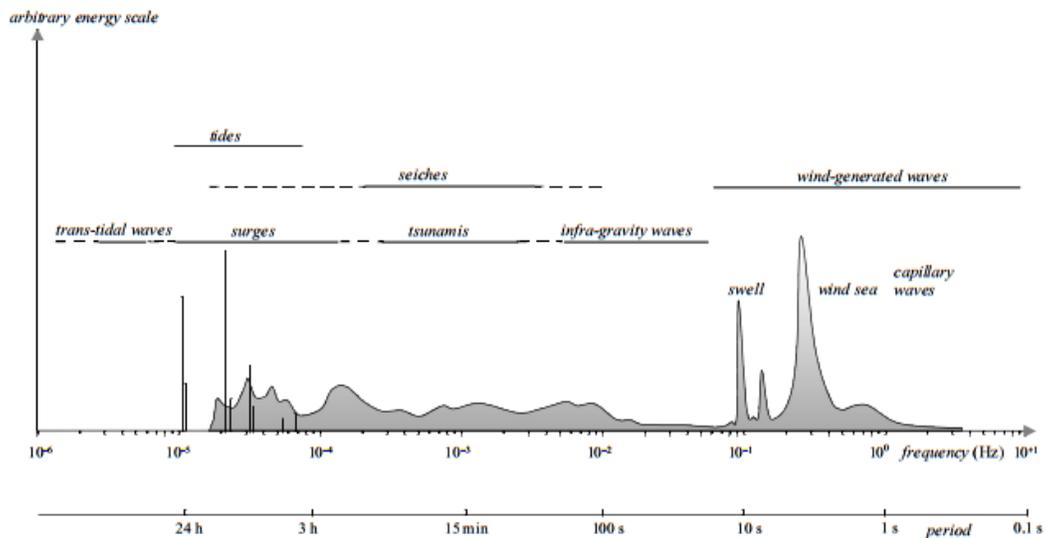


Figura 2.2 Densidad de la energía del oleaje respecto a su periodo

2.2.2.1. Oleaje provocado por desprendimientos de tierra (tsunami)

Los oleajes provocados por desprendimiento de tierra son un fenómeno bastante común en lagos y ríos al desprenderse porciones de tierra por aluviones o temblores. La versión más conocida de este fenómeno son los tsunamis provocados por grandes porciones de tierra que se desprenden por el movimiento de las placas tectónicas.

Este fenómeno es actualmente imposible de predecir lo que puede resultar muy contraproducente para el aprovechamiento energético.

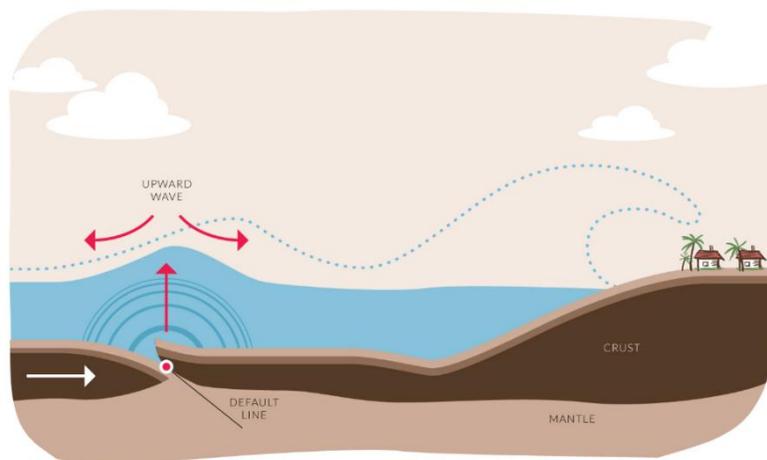


Figura 2.3 Oleaje provocado por desprendimientos

2.2.2.2. Oleaje provocado por fuerzas gravitacional externas (tides)

El oleaje provocado por fuerzas gravitacionales externas, también conocidas como mareas, es provocado principalmente por la fuerza de atracción que ejerce la luna y el sol sobre la tierra, además de la inclinación que la tierra tiene sobre su propio eje.

Las mareas solares provocan que aproximadamente cada 6 horas se produzca la bajamar o la pleamar dependiendo de la posición con el sol con el semieje mayor o menor. Las mareas lunares provocan que cada 7 días se puedan ver alteraciones en el nivel del mar dependiendo de la distancia con la luna.

En la realidad ambos fenómenos actúan de manera conjunta produciendo una variación en el nivel del mar fácil de predecir, además puede ocurrir el fenómeno que ambas fuerzas actúen en conjunto siendo causa de las mareas vivas o que ambas fuerzas actúen complementándose dando lugar a la marea muerta.

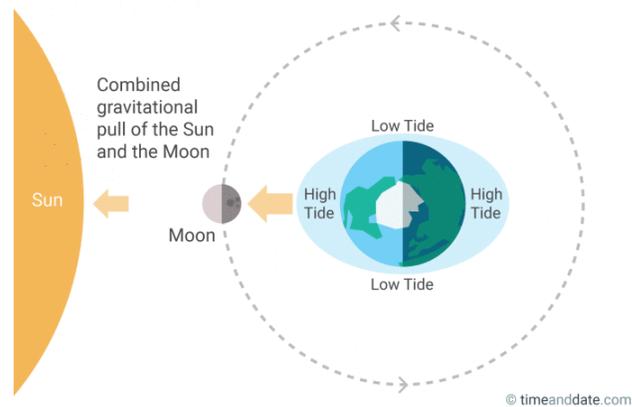


Figura 2.4 Mareas por efecto combinado del sol y la luna

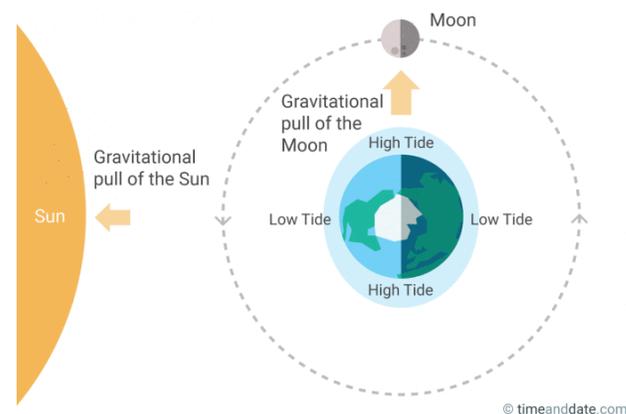


Figura 2.5 Mareas por efecto independiente del sol y la luna

2.2.2.3. Oleaje provocado por la fuerza del viento

El oleaje más común es el provocado por la fuerza del viento, además de contener la mayor cantidad de energía aprovechable por metro cuadrado de las energías renovables no convencionales. Al ser el viento provocado por la acción del sol sobre la tierra este oleaje es considerada una forma concentrada de energía solar.

La zona en donde actúa el viento se denomina *fetch* y es el lugar donde se produce el mar del viento siendo caótico e impredecible [2].

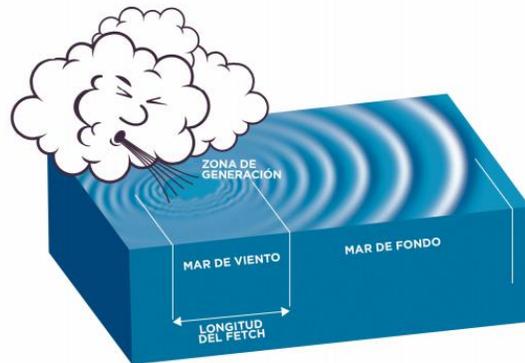


Figura 2.6 Formación del oleaje provocado por el viento

Una vez que el oleaje se estabiliza se genera el denominado mar de fondo con olas predecibles y homogéneas.



Figura 2.7 Mar de viento



Figura 2.8 Mar de fondo

La generación del oleaje se divide en dos fases principales:

- **Fase 1:** El viento impacta sobre el mar de manera caótica sobre la superficie generando pequeñas olas capilares hacia todas las direcciones.



Figura 2.9 Efecto del viento sobre el mar

- **Fase 2:** Cuando las olas capilares alcanzan cierto tamaño la gravedad las estabiliza y produce un tren de ola homogéneas de mayor amplitud.

El océano se comporta de manera similar a un canal abierto a la atmosfera y el frente de onda por la gravedad dependerá de la profundidad del mar hasta el lecho marino. Como esta profundidad es muy grande en los océanos se producen las olas de viento, las más comunes y las con mayor energía.

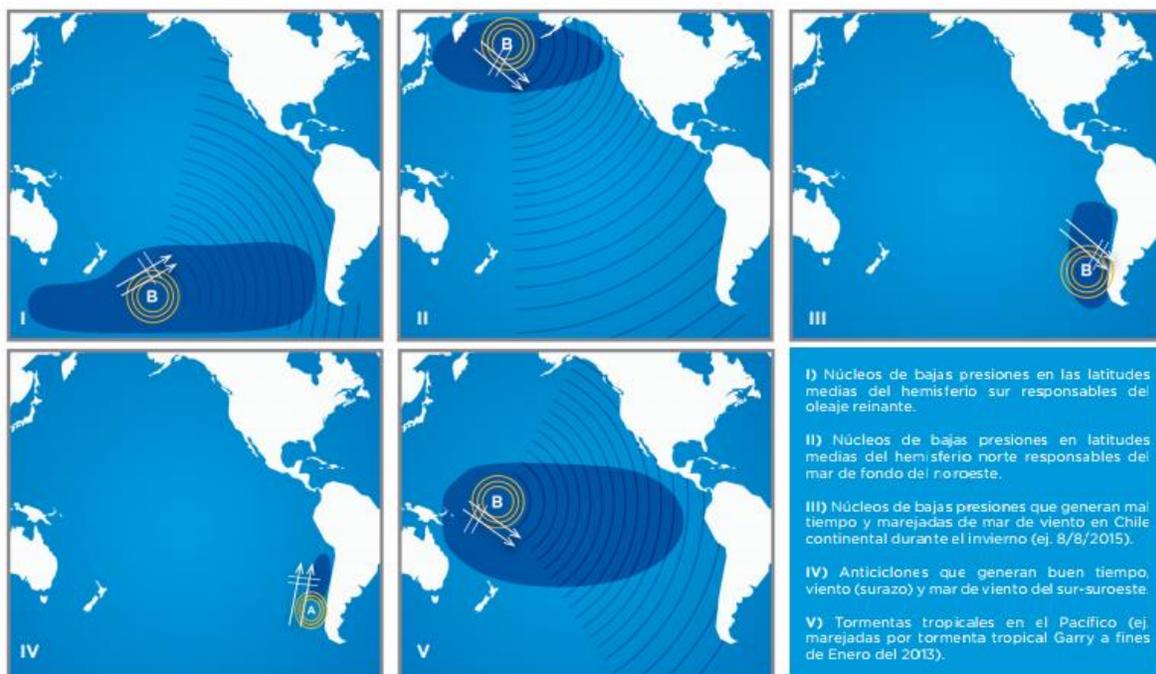


Figura 2.10 Origen del oleaje que impacta en Chile

2.2.3. Modelos Teóricos del oleaje

Una ola es una manifestación de una transferencia de energía en un flujo desde su origen hasta su ruptura, por esta razón el oleaje no supone un movimiento del flujo en la superficie o no al menos un movimiento significativo en comparación a la velocidad de traslación de la ola.

Se deben distinguir dos movimientos en el oleaje el primero es el movimiento ondular de la ola que se puede definir como una función cíclica que trasmite energía. El segundo movimiento corresponde al movimiento circular que generan las partículas dentro del movimiento ondular es este movimiento el que genera la impresión de que las olas se recogen y por el cual un objeto que flota sobre el mar presenta un pequeño desplazamiento sobre la superficie.

Existen diferentes modelos ondulares para describir el movimiento del oleaje cada uno con distintos supuestos. La principal clasificación de los modelos ondulares del oleaje corresponde a si este corresponde a aguas profundas, intermedias o en la costa esto dependerá de la profundidad respecto a la altura de la ola.

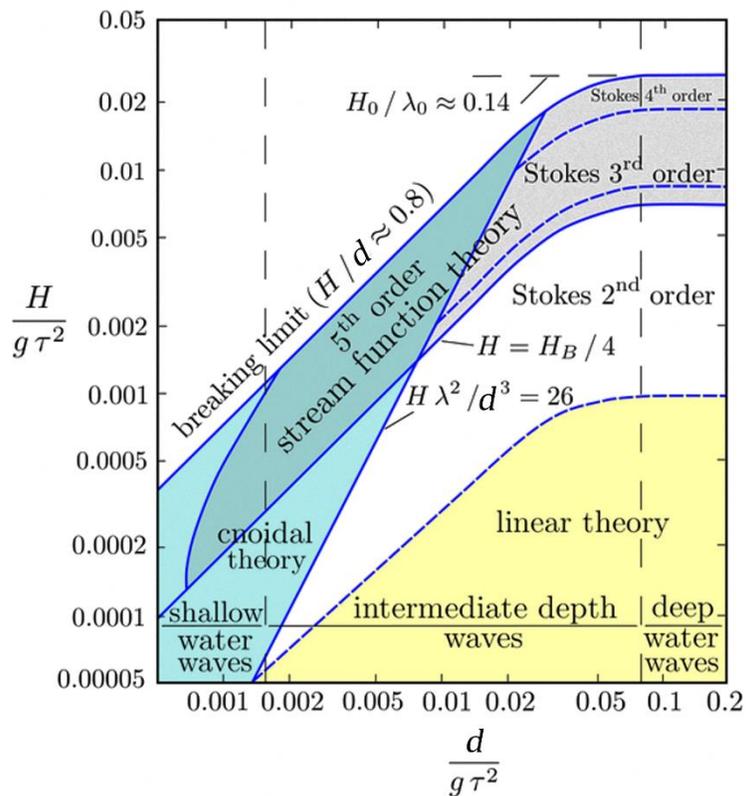


Figura 2.11 Criterios de modelos matemáticos del oleaje

2.2.3.1. Teoría lineal del oleaje

Una de las teorías más simples y extendidas en el oleaje es la teoría lineal de Ayri que data de 1845 y describe la mayor cantidad del oleaje, sus supuestos son [3]:

- El agua es homogénea e incompresible.
- La tensión superficial puede ser despreciada.
- El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser despreciado.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El agua del mar carece de viscosidad.
- El flujo es irrotacional, no existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.
- El fondo marino constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y en el espacio.
- Las olas son planas (de dos dimensiones).

El desarrollo de la teoría lineal se comienza desde la ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.10)$$

Donde ρ es la densidad y \vec{u} el vector de velocidad, como la densidad es constante resulta:

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.11)$$

La hipótesis de que el flujo es irrotacional implica que el campo deriva de un potencial que puede describirse como sigue:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.12)$$

Se conocen las siguientes condiciones de borde:

- En el fondo no hay movimiento de agua, por lo tanto:

$$v = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \text{ en } Z = -d \quad (2.13)$$

- El agua está contenida dentro de su superficie, esto quiere decir que las partículas se mueven a la misma velocidad que cambia la forma de la superficie

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = v \text{ en } Z = y \quad (2.14)$$

- La presión en la superficie se obtiene a través de la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz \quad (2.15)$$

Las soluciones para este problema se asumen armónicas en tiempo y se obtiene por separación de variables. Las soluciones tienen las siguientes formas:

$$\phi(t, x, z) = \frac{Hg}{2w} * \frac{\cosh(k(z + d))}{\cosh(kd)} * \cos(kx - wt) \quad (2.16)$$

La elevación de la superficie es:

$$y(t, x) = H_o * \cos(kx - wt) \quad (2.17)$$

Donde la frecuencia $w(k)$ está determinada por la dispersión:

$$w^2(k) = kg * \tanh(kd); \text{ donde } K = \frac{2\pi}{L} \quad (2.18)$$

2.2.3.1.1. Desplazamiento de las partículas de agua

Al analizar el modelo lineal del oleaje es fácil concluir que las partículas realizan un movimiento circular dentro de las olas. El movimiento circular de las partículas desciende en su diámetro de manera exponencial a medida que va aumentando la profundidad hasta que este movimiento desaparece.

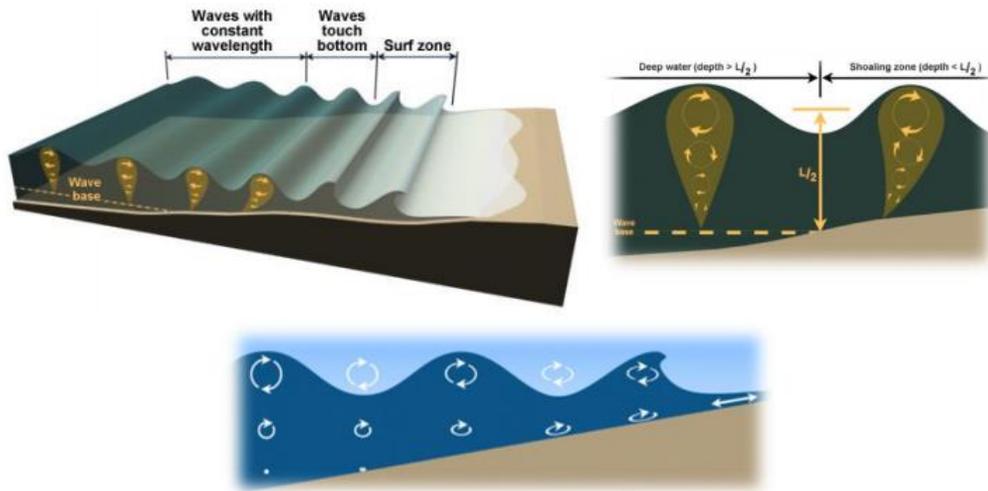


Figura 2.12 Desplazamiento de las partículas al interior de una ola

Al integrar respecto al tiempo las ecuaciones (2.12) con la función potencial ϕ se obtienen los desplazamiento de las partículas en sus ejes horizontal y vertical:

$$\xi = -\frac{H_o}{2} * \frac{\cosh(k(z + d))}{\cosh(kd)} * \sin(\theta) \quad (2.19)$$

$$\eta = \frac{H_o}{2} * \frac{\sinh(k(z + d))}{\cosh(kd)} * \cos(\theta) \quad (2.20)$$

siendo θ el angulo respecto a la ubicación de la partícula en el desplazamiento de la ola.

Desde estas ecuaciones por medio de identidades trigonométricas podemos obtener:

$$\frac{\xi^2}{A^2} + \frac{\eta^2}{B^2} = 1 \quad (2.21)$$

Con $A = \frac{2}{H_0} * \frac{\cosh(kd)}{\cosh(k(z+d))}$ y $B = \frac{2}{H_0} * \frac{\cosh(kd)}{\sinh(k(z+d))}$

Cuando $A = B$ el desplazamiento de las partículas describe una circunferencia, esto ocurre cuando la profundidad d es suficientemente grande. A medida que la profundidad de la costa va disminuyendo el movimiento de las partículas se mueve de manera elíptica hasta que finalmente colapsan.

2.2.3.1.2. Presión de una partícula en el oleaje

La presión de una partícula en el oleaje tiene relación con la masa de agua sobre ella. Se distinguen dos fenómenos de presión sobre las partículas el primero tiene relación con la masa de agua bajo el nivel promedio de la ola con un comportamiento lineal y el segundo fenómeno corresponde a la presión que ejerce la masa del movimiento ondular vertical del oleaje.

$$P = \rho g \left(\frac{H_0}{2} * \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} * \sin(\theta) - z \right) \quad (2.22)$$

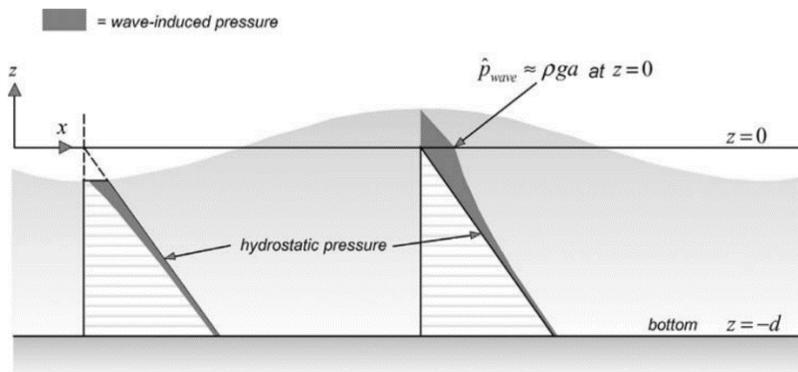


Figura 2.13 Comportamiento de la presión en el oleaje

2.2.3.1.3. Clasificación del oleaje lineal

La teoría de oleaje lineal describe el movimiento de una ola por medio de la función potencial $\emptyset(t, x, z)$ que esta descrita por medio de funciones hiperbólicas, es por esta razón que al utilizar las propiedades de esta funciones se pueden simplificar para cuando los argumentos tienden a cero o infinito.

Tabla 2.1 Tendencia de las funciones hiperbólicas

Función Hiperbólica	$kd \rightarrow 0$	$kd \rightarrow \infty$
$\sinh(kd)$	kd	$e^{\frac{kd}{2}}$
$\cosh(kd)$	1	$e^{\frac{kd}{2}}$
$tgh(kd)$	kd	1

A través de estas funciones se realiza una clasificación arbitraria del oleaje basado en la profundidad y la longitud de la ola:

Tabla 2.2 Clasificación de del oleaje lineal

kd	d/L	Clasificación	
0 a $\pi/10$	0 a $1/20$	Aguas someras	$d \leq L/20$
$\pi/10$ a π	$1/20$ a $1/2$	Aguas intermedias	$L/20 > d > L/20$
π a ∞	$1/2$ a ∞	Aguas profundas	$d \geq L/2$

2.2.3.1.4. Dispersión de las olas

La ecuación de una ola tiene la siguiente forma:

$$\eta = H * \text{sen}(\theta) \quad (2.23)$$

El modelo lineal del oleaje permite sumar diferentes olas para formar un grupo de olas que es mucho más cercano al comportamiento real del oleaje.

Es posible obtener desde la dispersión de las olas la celeridad de una ola sabiendo que $c = \frac{w}{k}$:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.24)$$

De la ecuación anterior se observa que mientras más grande sea el periodo de una ola esta se moverá más rápido. El concepto de la dispersión indica que las olas se agruparan por periodos a medida que se trasladen desde el área de generación.

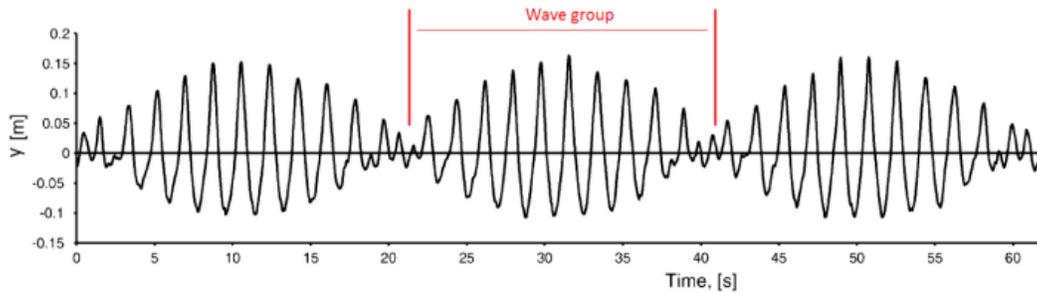


Figura 2.14 Grupos de olas

Se obtiene la ecuación de la longitud de la ola con la ecuación anterior:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.25)$$

Es posible obtener la celeridad de un grupo de ola por medio de $C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$:

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] * C \quad (2.26)$$

Es posible deducir de esta ecuación que:

- En aguas someras las olas se propagan a la velocidad del grupo.
- En agua profundas el grupo olas se propaga a la mitad de la velocidad de las olas individuales.

2.2.3.1.5. Resumen Teoría lineal del oleaje

Tabla 2.2 Resumen teoría lineal

	AGUAS SOMERAS* $d \leq L/20$	AGUAS INTERMEDIAS* $L/2 > d > L/20$	AGUAS PROFUNDAS* $d \geq L/2$
Ecuación de la superficie libre	$\eta = a \cdot \text{sen}(k \cdot x - \omega \cdot t)$		
Velocidad de fase (Celeridad)	$\sqrt{g \cdot d}$	$\frac{g}{\omega} \cdot \text{tgh}(k \cdot d)$	$\frac{g}{\omega}$
Longitud de onda	$T \cdot \sqrt{g \cdot d}$	$\frac{gT^2}{2\pi} \cdot \text{tgh}\left(\frac{2\pi \cdot d}{L}\right)$	$\frac{gT^2}{2\pi}$
Frecuencia angular	$\omega^2 = g \cdot k^2 \cdot d$	$g k \text{tgh}(k \cdot d)$	$g k$
Celeridad de grupo	$\sqrt{g \cdot d}$	$\frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\text{senh}(2kd)} \right] \cdot C$	$\frac{g}{2\omega} = \frac{1}{2} \cdot C$
Comp. horizontal de velocidad	$u = a \sqrt{\frac{g}{d}} \text{sen}(kx - \omega t)$	$\frac{agk}{\omega} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$	$a \cdot \omega \cdot e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$
Comp. vertical de velocidad	$w = a\omega \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos(kx - \omega t)$	$-\frac{agk}{\omega} \cdot \frac{\text{senh}[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - \omega t)$	$-a \cdot \omega \cdot e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Desp. horizontal de la partícula	$\xi_{\omega} = \frac{a}{\omega} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos(kx - \omega t)$	$\frac{agk}{\omega^2} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - \omega t)$	$a \cdot e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Desp. vertical de la partícula	$\zeta = a \left(1 + \frac{z}{d} \right) \text{sen}(kx - \omega t)$	$-\frac{agk}{\omega^2} \cdot \frac{\text{senh}[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$	$-a \cdot e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$
Presión (sobre la atmosférica)	$\frac{P}{\rho_{\omega} \cdot g} = \eta - z$	$\eta \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} - z$	$\eta \cdot e^{kz} - z$

2.2.3.2. Teorías no lineales

El desarrollo de las teorías lineales ha aportado a una mejor comprensión del fenómeno del oleaje, pero a medida que este se acerca a las costas los supuestos de la teoría lineal dejan de ser válidos.

A diferencia de la teoría lineal que es una solución particular de las ecuaciones de Laplace. Las teorías no lineales tienen un desarrollo más complejo, aunque siguen tomando parte de la teoría lineal para su desarrollo [4].

2.2.3.2.1. Teoría de Stokes

La teoría de Stokes descrita en 1847 introduce ligeros ajustes a la teoría lineal para crear una mejor aproximación a los fenómenos reales. El modelo de Stokes consiste en una suma de ondas de Stokes.

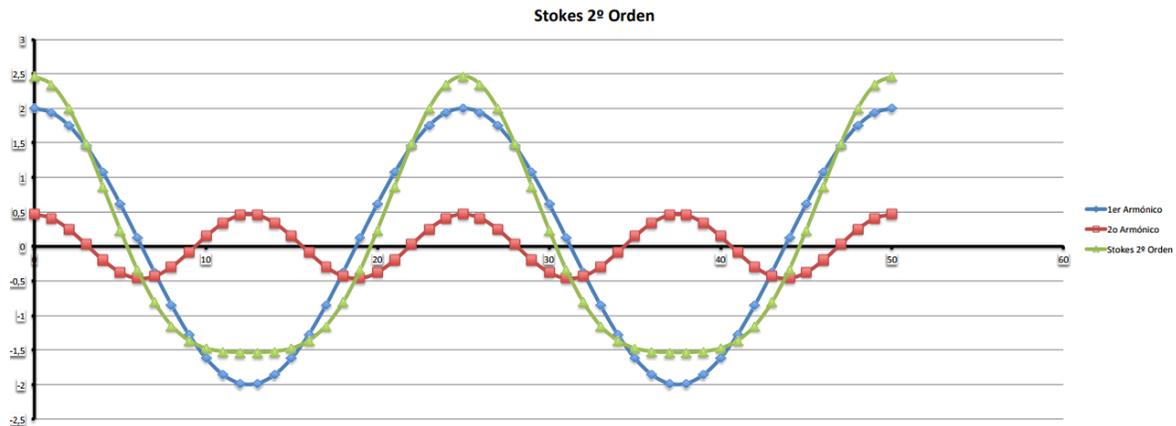


Figura 2.15 Modelo de Stokes 2º orden

El desarrollo de Stokes equivale a una sumatoria donde el primer término corresponde al modelo lineal. Se puede expresar el potencial de velocidad como:

$$\phi = \epsilon \phi_1 + \epsilon^2 \phi_2 + \dots + \epsilon^n \phi_n \quad (2.27)$$

Donde ϵ corresponde a la expansión de la perturbación.

La ecuación de segundo orden se puede expresar como:

$$y = H \cos(mx) + KH^2 \cos(2mx) \quad (2.28)$$

Donde:

$$m = \frac{2\pi}{L} \quad (2.29)$$

$$K = \frac{\pi}{L} \left[\frac{\left(e^{\frac{2\pi d}{L}} + e^{-\frac{2\pi d}{L}} \right) \left(e^{\frac{4\pi d}{L}} + e^{-\frac{4\pi d}{L}} + 4 \right)}{2 \left(e^{\frac{2\pi d}{L}} + e^{-\frac{2\pi d}{L}} \right)^3} \right] \quad (2.30)$$

$$H = \frac{a}{2} \quad (2.31)$$

Siendo d la profundidad y H la altura de la ola.

A medida que se va expandiendo a ecuaciones de Stokes de mayor orden los modelos se van complejizando con más términos que escapan al uso ingenieril. Es prudente tener en cuenta que la mayor complicación de Stokes es realizar la correlación entre el fenómeno natural y los modelos de Stokes.

2.2.3.2.2. Teoría Cnoidal

Esta teoría fue desarrollada en 1895 y parte del supuesto que la longitud de la onda es muy superior a la profundidad con el fondo, por lo tanto, es aplicable a aguas cercanas a la costa.



Figura 2.16 Modelo Cnoidal

La teoría Cnoidal se describe con las siguientes ecuaciones:

$$y_s = y_t + HCn^2 \left[2K(t) \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] k \quad (2.32)$$

$$L = \sqrt{\frac{16d^3}{3H}} k K(k) \quad (2.33)$$

$$T \sqrt{\frac{g}{d}} = \sqrt{\frac{16y_t d}{3H y_t}} \left[\frac{k K(k)}{1 + \frac{H}{y_t k^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{E(k)}{K(k)} \right)} \right] \quad (2.34)$$

Donde y_s es la altura desde el fondo hasta la ola e y_t a la altura desde el fondo hasta la depresión de la ola, H la altura media de la ola, C_n es la función elíptica de tipo coseno de Jacobi, $K(k)$ es la integral elíptica y k la excentricidad de la elipse.

Desde la teoría Cnoidal se puede desprender que cuando $k=1$ el modelo se reduce a una onda solitaria y cuando $k=0$ se reduce al modelo lineal.

2.2.4. Oleaje real

El oleaje real a diferencia de los modelos de ondas teóricas es impredecible en muchos aspectos por simple observación del oleaje se desprende que la altura de un grupo de ola no necesariamente será idéntica a la ola posterior.

El análisis del oleaje real se divide en dos simplificaciones:

- Componente de fluctuación; que estudia el comportamiento del mar en un tiempo determinado
- Componente de estado; que estudia el comportamiento del mar para diferentes estados como tormentas, pleamar, bajamar, tsunamis, etc.

Para el estudio de la fluctuación del mar se hacen dos hipótesis, que el oleaje es estacionario y homogéneo. Es de conocimiento que el oleaje real no es ni estacionario ni homogéneo, por lo tanto, parte del estudio de las fluctuaciones del oleaje corresponde a determinar el tiempo de estudio que se realizara hasta que el oleaje tienda significativamente a estas hipótesis.

Del estudio de las fluctuaciones se realizan dos tipos de descripciones espectral y estadístico [5].

2.2.4.1. Descripción espectral del oleaje

El análisis espectral del oleaje se basa en la descomposición por medio de la transformada de Fourier de la distribución de la energía $E(f)$ esto resulta muy útil para el uso ingenieril al entregar información sobre la densidad de energía asociada a cada frecuencia del oleaje medido.

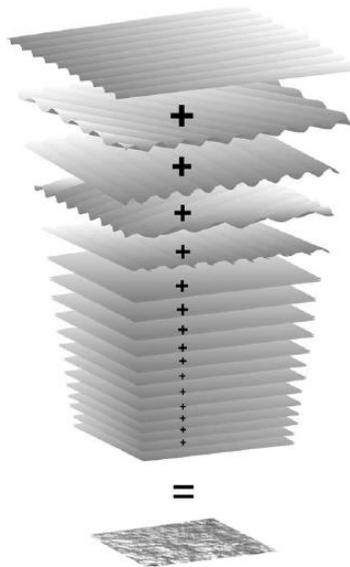


Figura 2.17 Sobreposición de frecuencias del oleaje

El espectro es obtenido por una serie de tiempo al espectro de energía obteniendo:

$$E(f) = \frac{1}{T_r} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \eta(n\Delta t) e^{2\pi(n\Delta t)} \Delta t \right]^2 \quad (2.35)$$

Otro aspecto interesante del análisis espectral es la obtención de espectros característicos teóricos que describen el oleaje. Las dos funciones más utilizadas son:

- Espectro Pierson–Moscowitz desarrollado en 1964 es utilizado para describir los espectros de oleajes totalmente desarrollados en agua profundas.

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^2} f^{-5} e^{-0,74 \left(\frac{g}{2\pi v f} \right)^4} \quad (2.36)$$

- Espectro JONSWAP desarrollado en 1969 describe el comportamiento del mar no totalmente desarrollados.

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^2} f^{-5} e^{-1,25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4}} \gamma e^{\left[\frac{\left(\frac{f}{f_p} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (2.37)$$

Ambos métodos descriptivos son ampliamente utilizados y los valores de los diferentes parámetros suelen ser entregados por agencias de estudio del comportamiento del oleaje en el caso de Chile por la Universidad de Valparaíso y la Armada de Chile.

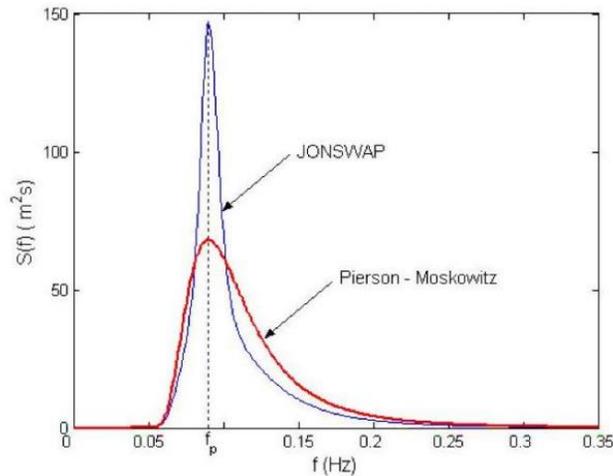


Figura 2.18 Modelos de espectro del oleaje

2.2.4.2. Análisis estadístico del oleaje

Como se ha mencionado el oleaje real es de carácter irregular e incluso caótico, pero a medida que se van tomando más datos es posible caracterizar su distribución para su estudio.

Normalmente las boyas de oleaje entregan información de las fluctuaciones como se muestra a continuación:

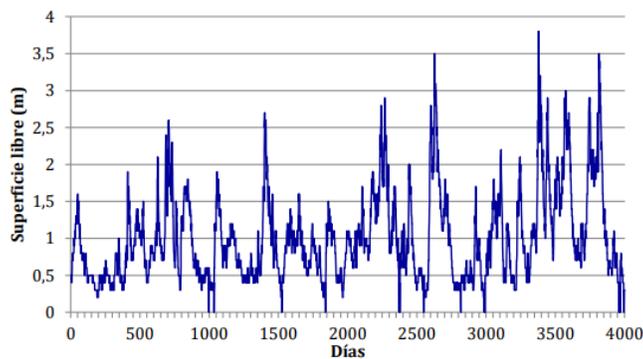


Figura 2.19 Muestra característica de boyas de oleaje

El desafío consiste en obtener información útil de estas mediciones, existen diferentes parámetros representativos utilizados en el oleaje real.

2.2.4.2.1. Altura de ola significativa (H_s o $H_{1/3}$)

Se define la altura significativa como la media aritmética del tercio de olas con mayor altura, esto entrega información útil sobre la altura aprovechable desde una perspectiva energética.

2.2.4.2.2. Altura de ola media cuadrática (H_{RMS})

La altura de ola cuadrática entrega información útil sobre la ola y representa eficazmente el estado de un mar.

$$H_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (2.38)$$

2.2.4.2.3. Altura de ola media (\bar{H})

La altura de ola media es simplemente la media de todas las olas.

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.39)$$

2.2.4.2.4. Periodo medio (T_z)

El periodo medio es el promedio de todos los periodos del oleaje.

2.2.4.2.5. Periodo significativo (T_s)

Corresponde al promedio de los periodos del tercio de olas de mayor altura, dicho en otras palabras, corresponde al periodo promedio de las olas significantes.

2.2.4.2.6. Distribuciones características del oleaje

Conocidos estos parámetros es posible obtener la distribución estadística del fenómeno del oleaje, usualmente se utiliza la función de tipo Rayleigh de densidad que parte del supuesto que el oleaje se distribuye de manera normal.

$$p(H) = \frac{2H}{(H_{RMS})^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{RMS}}\right)^2} \quad (2.40)$$

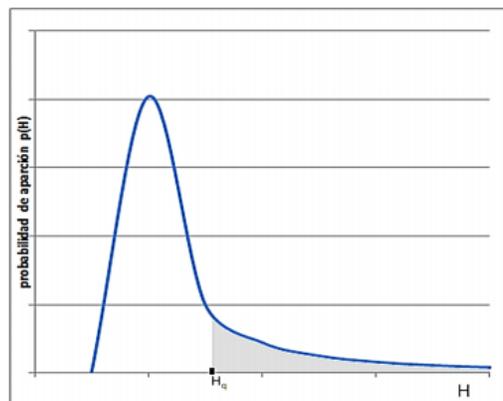


Figura 2.20 Distribución característica del oleaje

La integración de la función de densidad entrega la probabilidad de obtener un oleaje menor o igual al buscado:

$$P(H) = \int_0^H \frac{2H}{(H_{RMS})^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{RMS}}\right)^2} dH = 1 - e^{-\left(\frac{H}{H_{RMS}}\right)^2} \quad (2.41)$$

Aunque desde un punto de vista ingenieril es más interesante conocer la probabilidad de obtener una altura mayor a un cierto valor H :

$$Q(H) = 1 - P(H) = e^{-\left(\frac{H}{H_{RMS}}\right)^2} \quad (2.42)$$

Lo interesante de esta distribución es que solo basta conocer el valor de H_{RMS} para conocer la probabilidad de obtener cierta altura del oleaje en algún lugar determinado.

Otro resultado interesante de esta distribución es la siguiente aproximación:

$$H_{1/3} \approx 1,41H_{RMS} \quad (2.43)$$

Esto nos entrega información útil sobre la altura de las olas aprovechables energéticamente solo conociendo el valor de H_{RMS} .

2.3. Potencial energético del oleaje

La energía de las olas es considerada un tipo de energía renovable no convencional y se estima que la energía potencial explotable supera la demanda energética mundial. Solamente el potencial energético en Chile es de 1600 [TWh] superando en más de 23 veces la demanda energética nacional y representando el 9% del consumo energético global [6].

Existen tres fuentes claves para el aprovechamiento energético estas son las corrientes, las mareas y el oleaje.

2.3.1. Energía por corrientes

Las corrientes marinas son un fenómeno provocado en principal medida por el movimiento de rotación terrestre, además se complementan con los vientos, las temperaturas globales y la geometría de la superficie del planeta.

La energía provocada por las corrientes se aprovecha por medio de turbinas similares a las turbinas eólicas.

2.3.2. Energía mareomotriz

El efecto gravitacional de la luna produce una variación en la altura de la marea en las mañanas y en las noches. Es posible aprovechar la energía de las mareas por medio del movimiento en el nivel del mar.

2.3.3. Energía por el oleaje

La energía del oleaje provocado por el viento es la fuente con mayor densidad energética, además de producir un bajo daño ambiental. El atractivo del oleaje radica en que consiste en un fenómeno de cíclico de recurrencia que lo vuelve inagotable.

Existen tres fenómenos básicos de los cuales aprovechar su energía:

- Empuje de la ola, es posible utilizar el momentum de la ola que arrastra a cierta velocidad una gran cantidad de masa.
- Variación de la altura de la ola, se puede utilizar la variación potencial de una ola y aprovechar la energía generada por medio de algún sistema flotante que aproveche la fuerza de un cuerpo flotando.
- Variación de la presión bajo la ola, se puede aprovechar la variación de presión que genera una ola al pasar por medio de un sistema de columna oscilante.

2.3.4. Energía total del oleaje

La energía total del oleaje es equivalente a la suma de la energía cinética y potencial de una ola por su recurrencia.

Según la teoría lineal del oleaje esto se puede expresar como:

$$E = E_c + E_p \quad (2.44)$$

$$E = \frac{\rho g L b H^2}{8} \quad [kJ] \quad (2.45)$$

Donde ρ es a densidad del agua, L corresponde a la longitud de onda, b el ancho del tren de ola y H es la amplitud de la onda.

Finalmente, la potencia del oleaje por metro de ancho de una ola se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{g^2 \rho H^2 T}{32 \pi} \left[\frac{KW}{m} \right] \quad (2.46)$$

Siendo T el periodo de la ola, por lo tanto, la potencia energética de una ola se concentrará principalmente en la altura de la ola (con poca variación en los trenes de ola en condiciones regulares) y en el periodo de la ola que presenta grandes variaciones entre los trenes de ola.

2.3.5. Distribución de la energía del oleaje

La energía de las olas como toda fuente de energía está distribuida de manera desigual en el planeta y está relacionada principalmente con la acción de los vientos y la distribución de las masas continentales. Al tener relación con el viento el oleaje de mayor densidad energética se puede encontrar a medida que nos alejamos de la línea del ecuador.

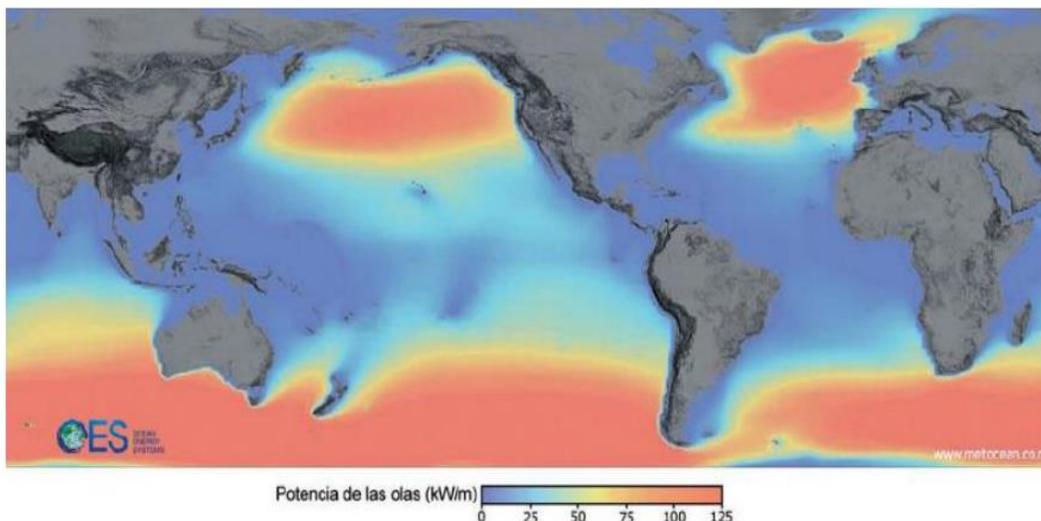


Figura 2.21 Distribución de la potencia del oleaje en el planeta

Otra variable a consideración es la variación energética del mar, ya que entre menor sea la variación del oleaje será más fácil aprovechar una mayor cantidad de energía.

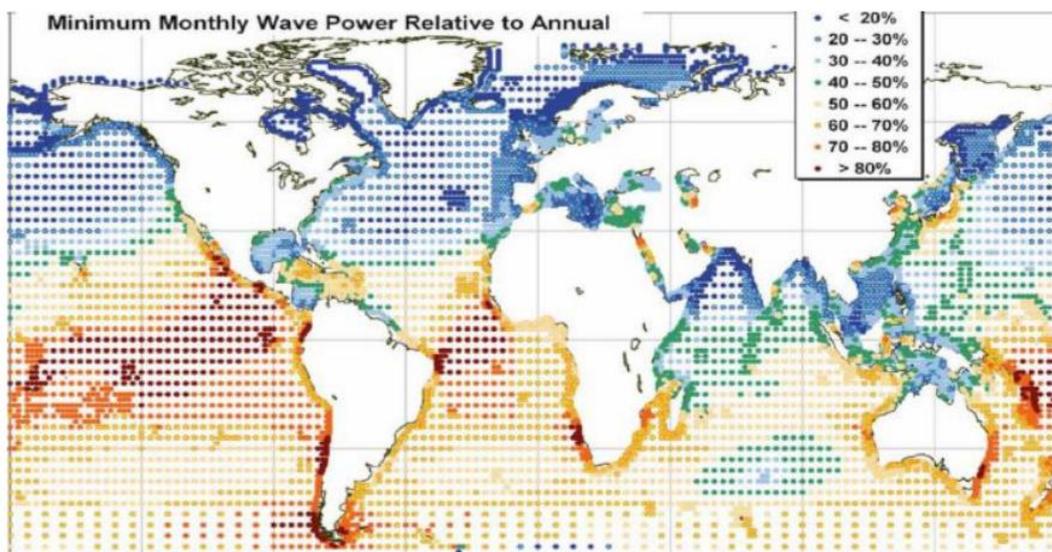


Figura 2.22 Variación energética del oleaje

2.3.6. Energía del oleaje en Chile

Se puede observar que la costa chilena presenta ventajas a nivel global para el desarrollo de la energía undimotriz presentando:

- Oleaje regular en la costa chilena
- Desarrollo de altas pendiente en el fondo marino
- Un alto potencial energético en el oleaje
- Una gran extensión de la costa y proximidad de los centros urbanos a la misma

Además, es necesario considerar dos factores claves en el potencial de la energía undimotriz en Chile. En primer lugar es necesario considerar el esfuerzo que se está realizando en el mundo y especialmente en nuestro país para expandir el uso de las energías renovables buscando una descentralización y cambio de la matriz energética para satisfacer la demanda energética aprovechando el potencial de las ERNC. En segundo lugar, debemos notar la sequía que se está viviendo en el país y la necesidad de generar un cambio sociocultural en el uso del agua junto a la búsqueda de nuevas fuentes de agua potable como el agua del mar.

Hoy en día se puede ver el desarrollo de tecnologías undimotriz para dos propósitos en el país: uno enfocado a reducir los costos de desalinización de agua de mar en la zona centro y norte del país y un segundo desarrollo de tecnologías que generen electricidad para aprovechar el enorme potencial energético de la zona sur y austral del país.

Los datos presentados a continuación corresponden al atlas de oleaje en Chile elaborado por la Universidad de Valparaíso [7].

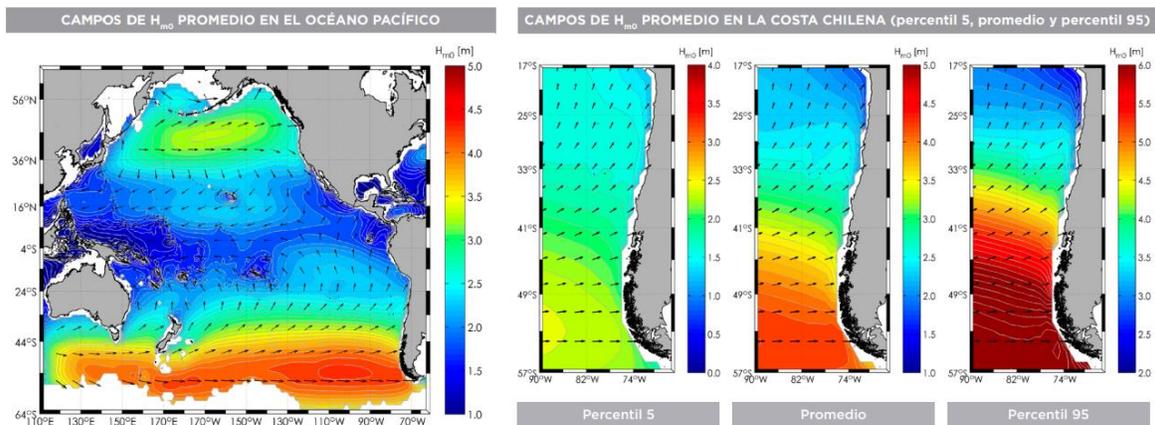


Figura 2.23 Distribución de la altura promedio

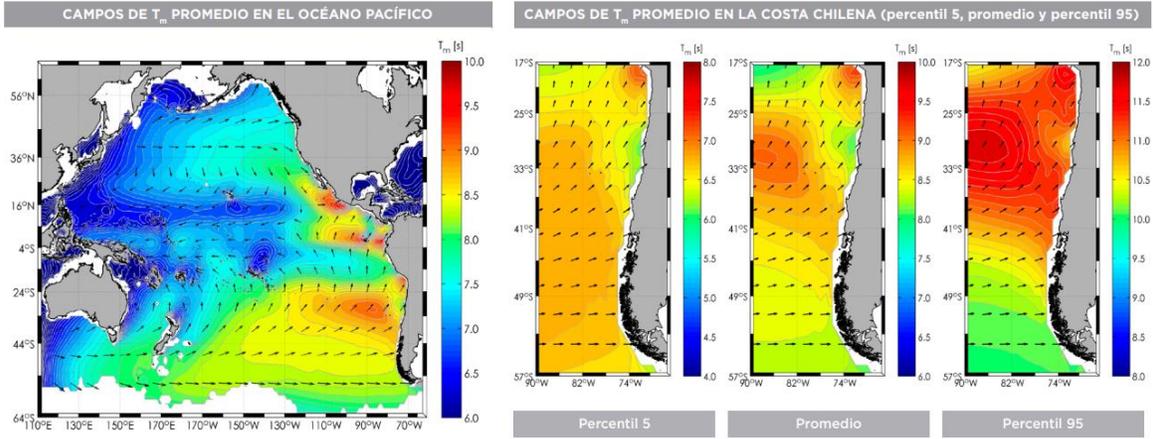


Figura 2.24 Distribución del periodo promedio

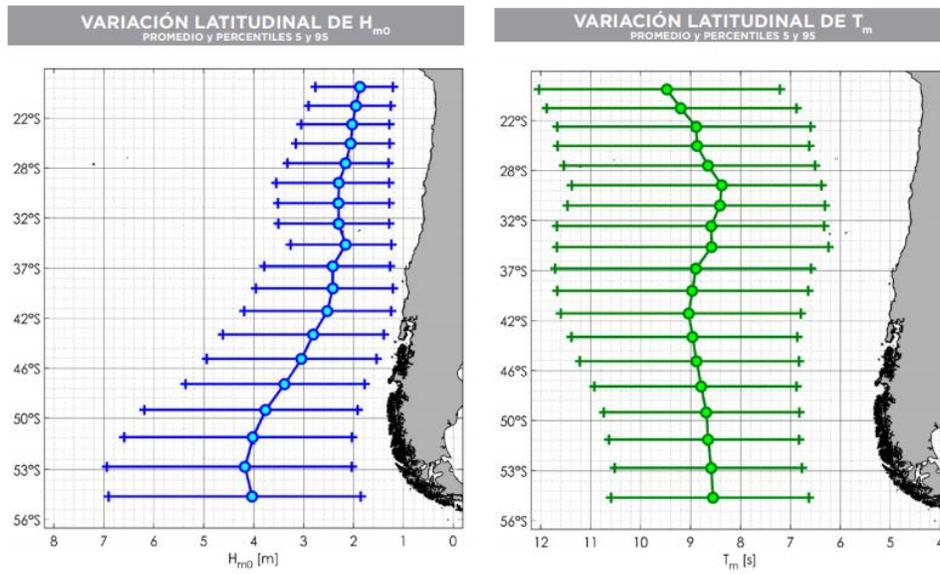


Figura 2.25 Variación de altura y periodo promedio a lo largo de la costa

2.3.6.1. Energía del oleaje en macro zona de Valparaíso

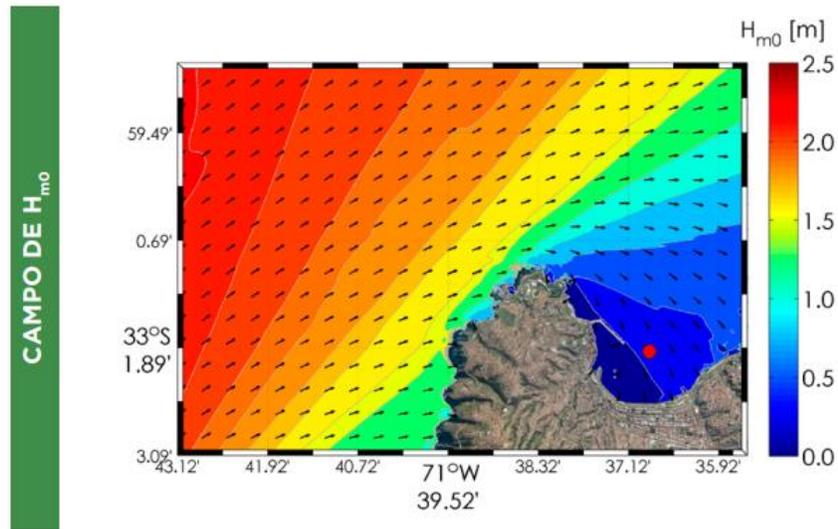


Figura 2.26 Campo de altura promedio en Valparaíso

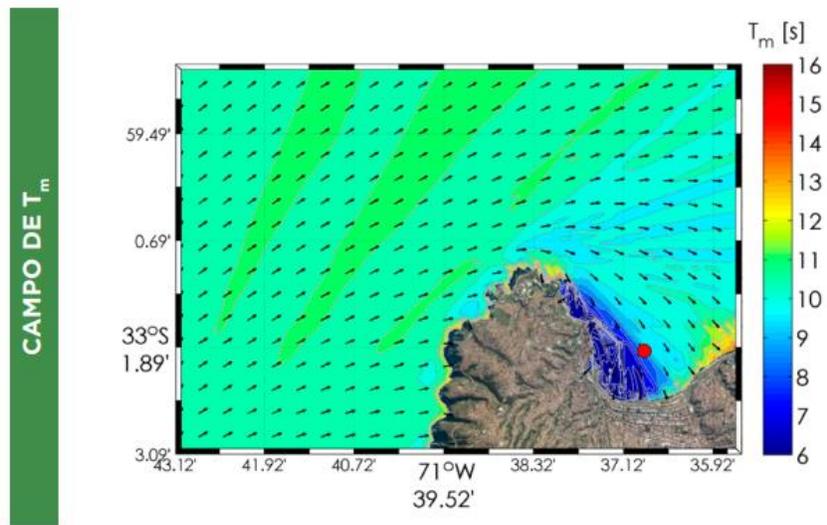


Figura 2.27 Campo de periodo promedio en Valparaíso

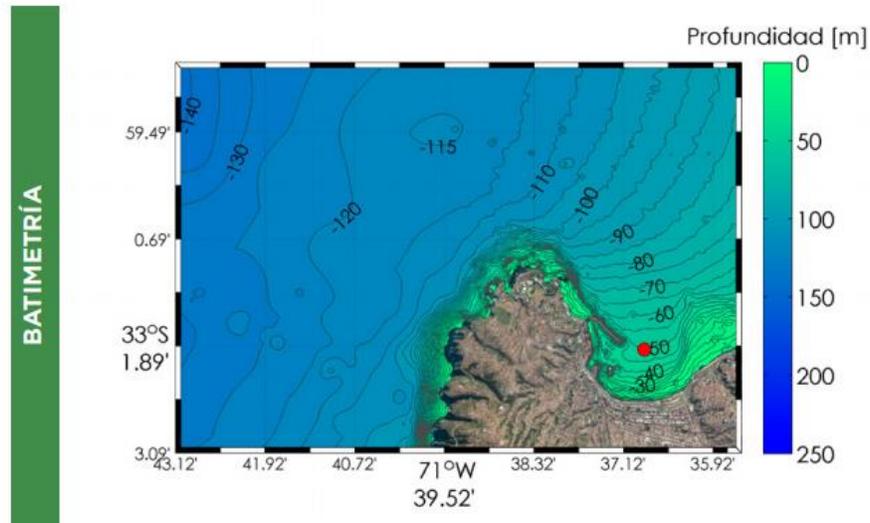


Figura 2.28 Profundidad de costa Valparaíso

2.3.6.1.1. “Zonas Calientes”

Se denominara “zonas calientes” a los lugares con alto potencial energético undimotriz. Mediante el explorador de energía marina del ministerio de energía [8] se puede encontrar los datos promedios de altura y periodo de las olas de toda la costa nacional, al analizar la macro zona de Valparaíso se encuentran las siguientes “zonas calientes”.

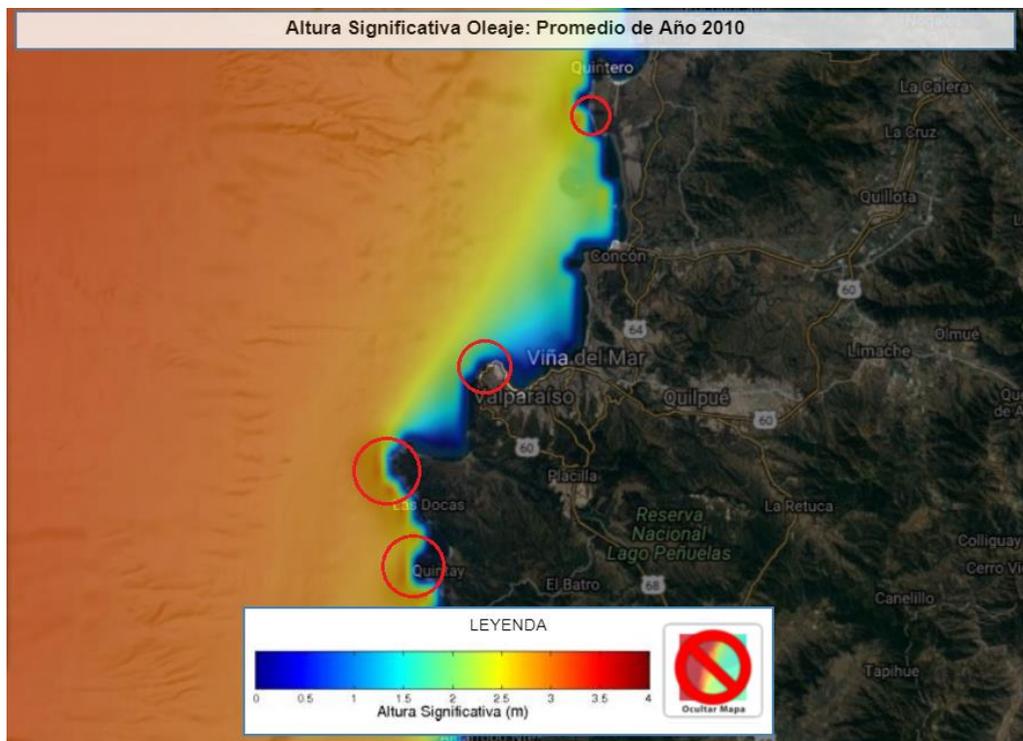


Figura 2.29 Altura significativa en la macro zona de Valparaíso

2.3.6.1.1.1. Zona entre Ritoque y Quintero

En esta zona se encuentra una altura significativa de 2,4 [m]

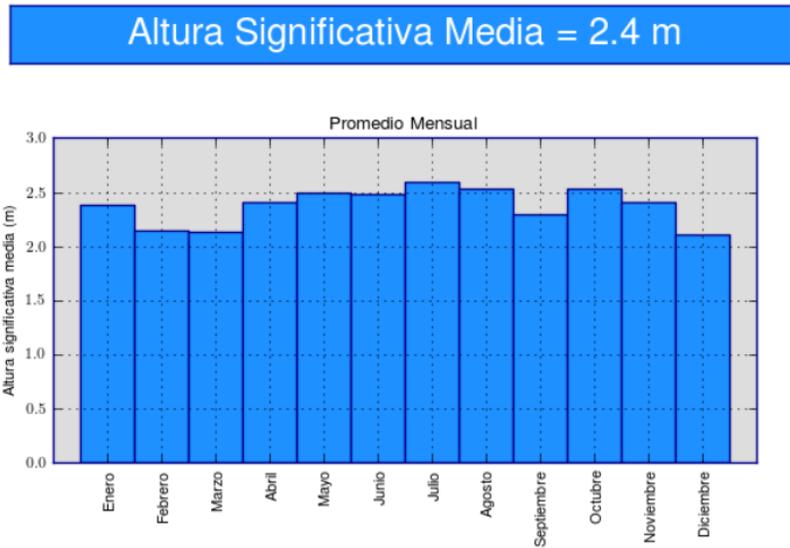


Figura 2.30 Altura significativa anual entre Ritoque y Quintero

2.3.6.1.1.2. Zona playa ancha

En esta zona se encuentra una altura significativa de 1,6 [m]

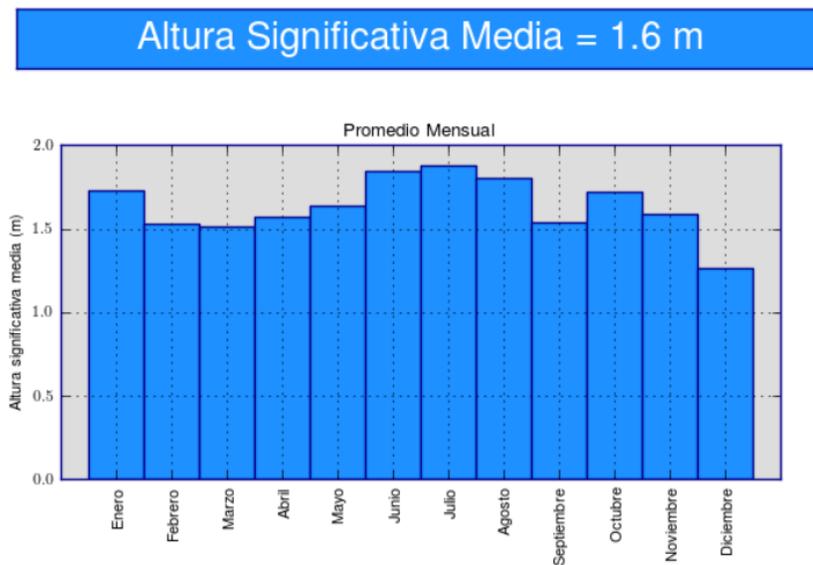


Figura 2.31 Altura significativa anual Playa Ancha

2.3.6.1.1.3. Zona sur de Quintay

En esta zona se encuentra una altura significativa de 2,2 [m]

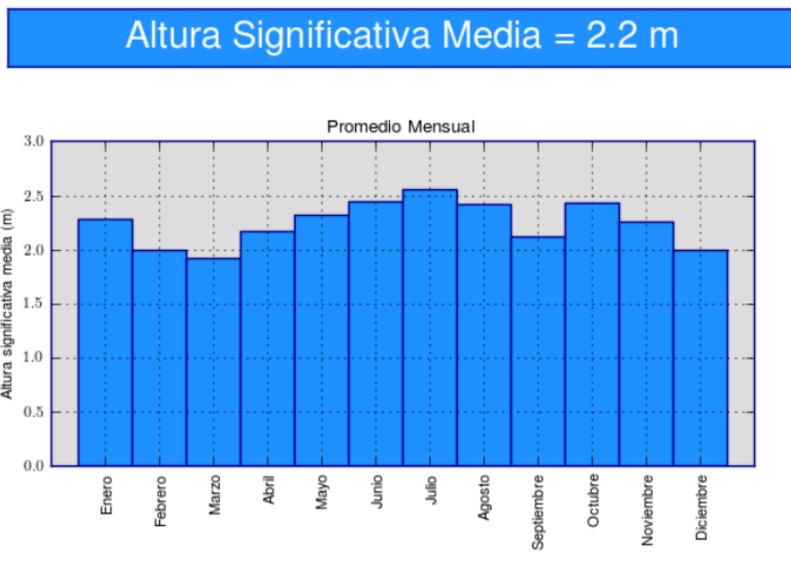


Figura 2.32 Altura significativa anual Quintay

2.3.6.1.1.4. Zona Isla lobos en laguna verde y cercanas

En esta zona se encuentra una altura significativa de 2,6 [m] y debido a su gran extensión en comparación a las otras zonas representa el lugar más atractivo para el desarrollo de tecnologías de aprovechamiento energético undimotriz.

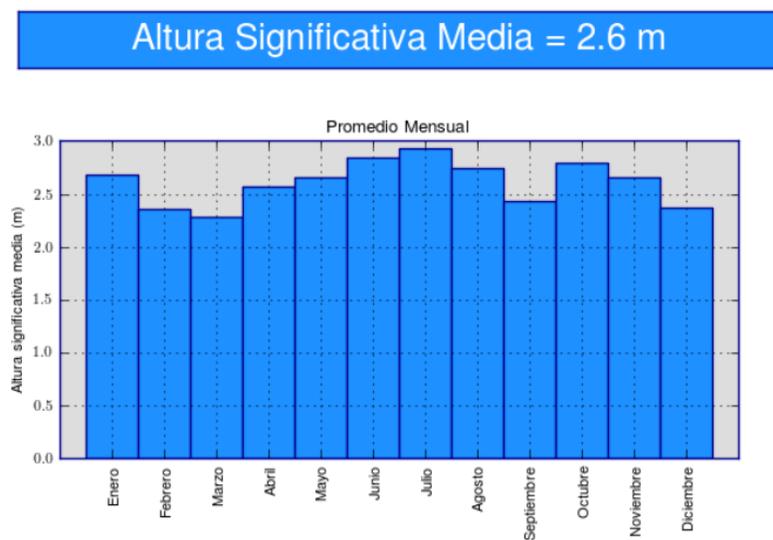


Figura 2.33 Altura significativa anual isla lobos y cercanía

2.4. Sistemas de captación de energía undimotriz

Actualmente existe una amplia variedad de prototipos que aprovechan la energía undimotriz alrededor del mundo, pese a este alentador panorama ninguna tecnología ha logrado imponerse hasta ahora sobre las otras.

Estos sistemas pueden ser clasificados de distintas maneras como [9]:

2.4.1. Clasificación por ubicación

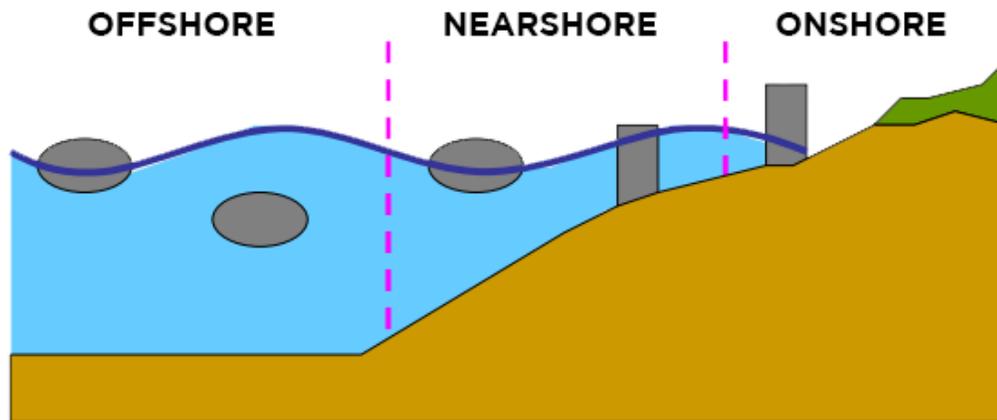


Figura 2.34 Clasificación por ubicación de dispositivos undimotrices

Esta clasificación corresponde al distinto comportamiento del oleaje según la profundidad de la bahía. A modo de referencia se puede considerar el *offshore* sobre los 40 metros desde la bahía, el *nearshore* entre 5 a 40 metros y el *onshore* corresponde a la bahía.

2.4.2. Clasificación según orientación

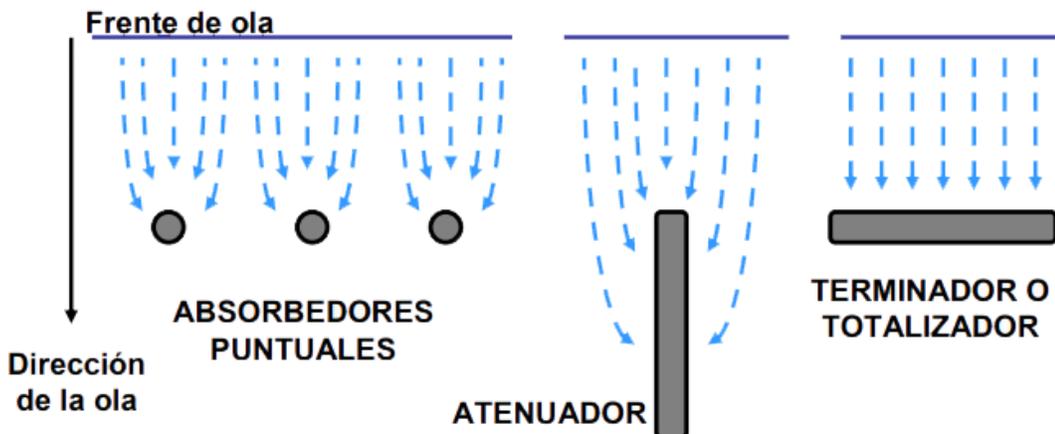


Figura 2.35 Clasificación según orientación de dispositivos unidimensionales

2.4.2.1. Absorbedores Puntuales

Son estructuras pequeñas en comparación con la ola incidente; suelen ser cilíndricas y, por lo tanto, indiferentes a la dirección de la ola; generalmente se colocan varios agrupados formando una línea.

2.4.2.2. Atenuadores

Se colocan paralelos a la dirección de avance de las olas, y son estructuras largas que van extrayendo energía de modo progresivo; están menos expuestos a daños y requieren menores esfuerzos de anclaje que los terminadores.

2.4.2.3. Terminadores o totalizadores

Están situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola (paralelos al frente de onda) y pretenden captar la energía de una sola vez.

2.4.3. Clasificación según principio de captación

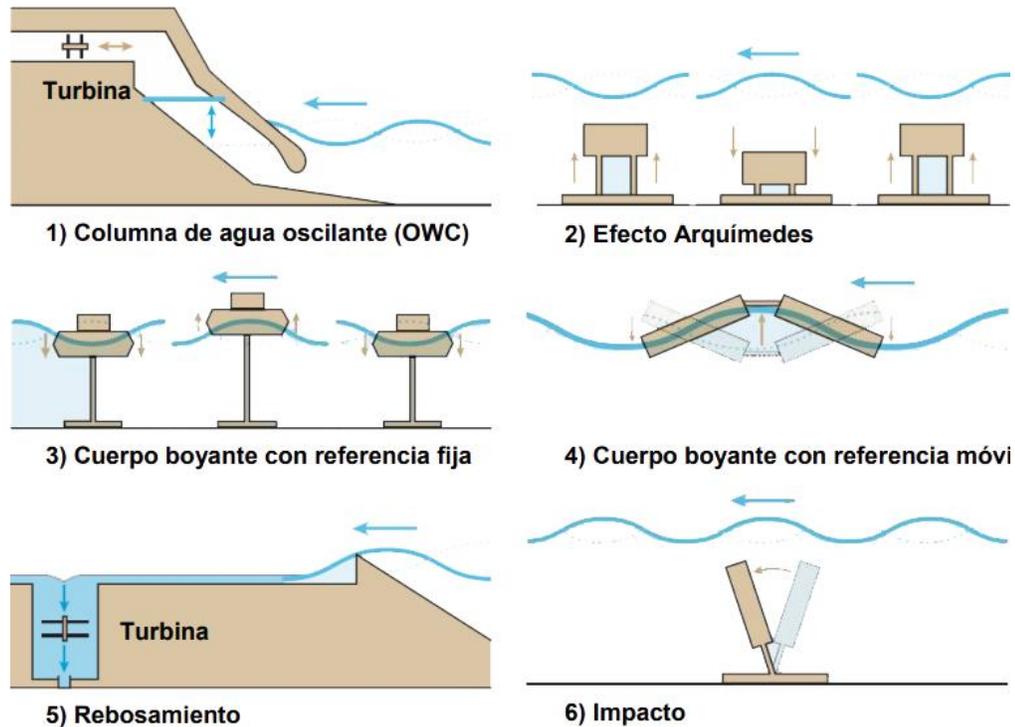


Figura 2.36 Clasificación según principio de captación de dispositivos undimotrices

2.4.3.1. Columna de agua oscilante (OWC)

El sistema de columna de agua oscilante es uno de los más extendidos en el uso de aprovechamiento de energía undimotriz, básicamente consiste en una estructura en la costa que puede ser del tipo puntual o totalizador que homogeniza el movimiento de la ola para facilitar la captura de su energía. En algunos casos se incluye una turbina del tipo Wells conectada a un generador que aproveche la compresión del aire por la fuerza de la ola.

2.4.3.2. Efecto Arquímedes

Los sistemas basados en el efecto arquímedes, conocido formalmente como empuje hidrostático, consiste en el principio de que una estructura en condiciones óptimas de diseño buscará flotar hacia la superficie, pero por causa de la presión periódica que genera la altura del oleaje esta estructura tendrá un desplazamiento cíclico que puede ser aprovechado. Este sistema tiene la ventaja de no enfrentarse directamente a marejadas.

2.4.3.3. Cuerpo boyante con referencia fija.

Estos sistemas están basados en el empuje hidrostático y actualmente se está transformando en uno de los sistemas más populares en investigaciones principalmente por la baja inversión que significan. El sistema consiste en un objeto flotante como una boya unida a una referencia fija en el fondo que puede ser desde un pistón a un generador de esta manera se aprovecha el movimiento del oleaje para extraer la energía de la misma. Su principal desventaja son los elevados costos de mantención.

2.4.3.4. *Cuerpo flotante con referencia móvil*

Estos sistemas son actualmente los más explotados comercialmente y consisten en la instalación de grandes superficies de un sistema flotante que genera un movimiento relativo entre sus diferentes módulos por causa del movimiento cíclico del oleaje. Habitualmente se instalan en alta mar para aprovechar la mayor potencia de energía que caracteriza al oleaje a estas distancias.

2.4.3.5. *Rebosamiento*

Estos sistemas ofrecen actualmente la mayor eficiencia en la generación energética y un esperanzador futuro como una alternativa atractiva de generación energética. La tecnología más simple consiste en una estructura en la costa que va almacenando agua en un estanque para luego ser aprovechado por una turbina y devolver el agua al mar; actualmente se está avanzando en un sistema basado en mismo principio, pero ubicada en altamar que busca capturar desde una estructura flotante una mayor energía provocada por una mayor energía del oleaje en altamar.

2.4.3.6. *Impacto*

Los sistemas de impacto aprovechan la energía de la presión cinemática del oleaje al ver reducida fuertemente su velocidad en un tiempo muy breve, estos sistemas son actualmente ampliamente investigados y se espera a que en un mediano a largo plazo se transformen en una alternativa atractiva. La gran desventaja que presentan estos sistemas es un elevado costo de inversión y mantención, pero la opción que teóricamente aprovecha de mejor manera la energía del oleaje.

2.5. Bombas hidráulicas

Una bomba hidráulica es una máquina que aporta energía mecánica a un fluido para su posterior uso o almacenamiento [10].

2.5.1. Configuración de bombas hidráulicas

Existen dos configuraciones básicas de las bombas hidráulicas, en serie y en paralelo según las necesidades.

2.5.1.1. Bombas en serie

Cuando se ajustan en serie la impulsión de una bomba partirá desde la impulsión de la bomba anterior y todas trabajarán en un mismo caudal.

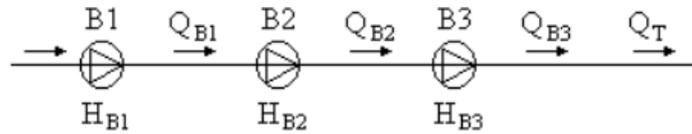


Figura 2.37 Bombas en serie

$$Q_t = Q_{B1} = Q_{B2} = Q_{B3} \quad (2.47)$$

$$H_{BT} = H_{B1} + H_{B2} + H_{B3} \quad (2.48)$$

2.5.1.2. Bombas en paralelo

Cuando se ajustan en paralelo la impulsión de las bombas será similar para todas, pero cada bomba manejará un caudal específico.

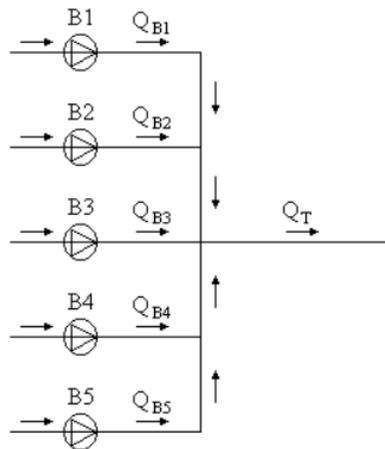


Figura 2.38 Bombas en paralelo

$$Q_t = Q_{B1} + Q_{B2} + Q_{B3} + Q_{B4} + Q_{B5} \quad (2.49)$$

$$H_{BT} = H_{B1} = H_{B2} = H_{B3} = H_{B4} = H_{B5} \quad (2.50)$$

2.5.2. Clasificación de bombas hidráulicas

A continuación, se presentarán diferentes tipos de bombas hidráulicas según su principio de funcionamiento:

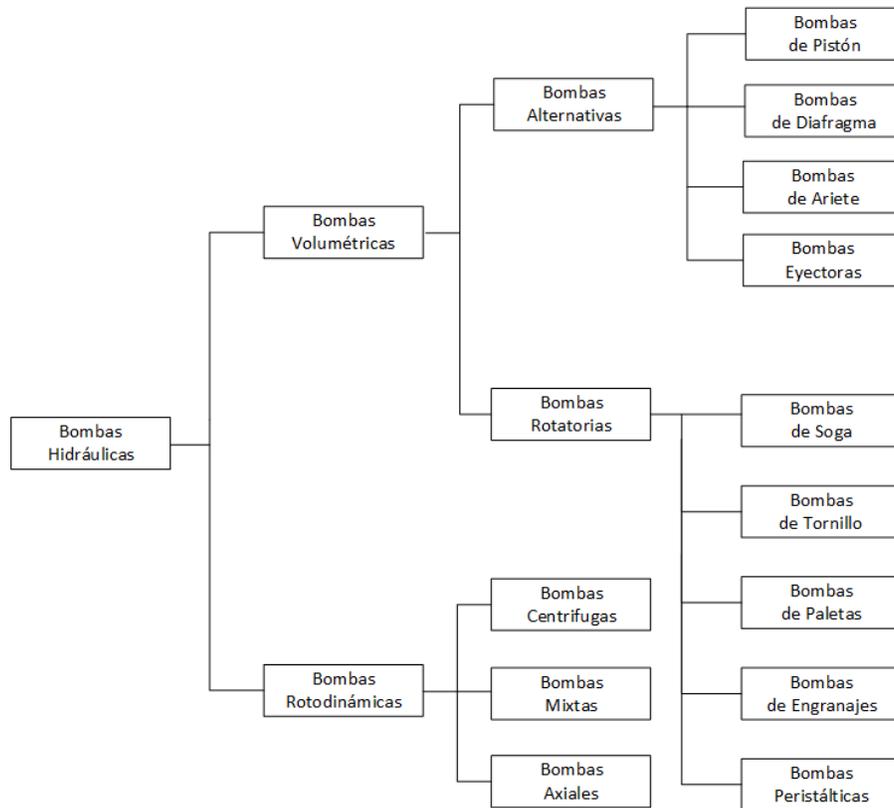


Figura 2.39 Clasificación Bombas hidráulicas

Principalmente las bombas hidráulicas se separan en dos grandes grupos las volumétricas y las rotodinámicas, es de conocimiento que las bombas volumétricas tienen un funcionamiento más simple que las rotodinámicas aunque estas últimas son las que alcanzan una mayor presión en el fluido a impulsar.

2.5.2.1. Bombas Volumétricas

Las bombas volumétricas, o de desplazamiento positivo, son ingenios mecánicos que transportan el fluido en forma de paquetes discretos que no interactúan entre sí.

La transferencia de energía es debida al desplazamiento del fluido a su paso por la máquina, acompañado normalmente de un proceso de compresión dentro o fuera de la misma, esta forma de impulsión tiene una serie de consecuencias bastante evidentes: por un lado, interrumpe el avance de fluido y, por tanto, la ecuación de la energía sólo se puede aplicar si se realiza un promedio temporal de sus términos; pero, por otro lado, favorece el transporte de fluidos viscosos a alta presión y hace que su caudal sea casi independiente de la presión. Esta última circunstancia las hace muy indicadas en sistemas de transmisión de energía y de dosificación [11].

2.5.2.1.1. Bombas alternativas

Se entiende como bombas alternativas aquellas que no funcionan con mecanismos rotatorios:

2.5.2.1.1.1. Bomba de Pistón

Estas bombas son frecuentemente utilizadas para realizar bombeo de fuentes hídricas por medio de bombas manuales o de émbolos por la simpleza en su construcción y uso. Existen bombas de simple o doble efecto según aspiren por una o dos caras.

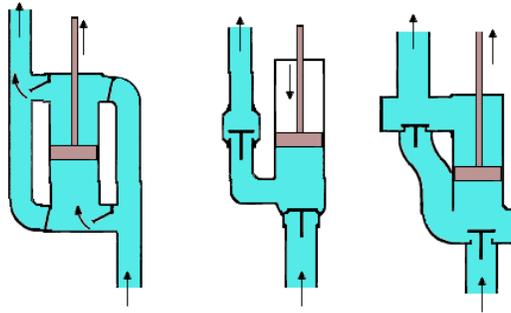


Figura 2.40 Tipos de bombas de pistón

2.5.2.1.1.2. Bombas de diafragmas

Las bombas de diafragma o de membrana consisten en una membrana elástica que produce un cambio de presión debido al cambio de volumen de la membrana. Tienen la ventaja de tener una larga vida útil en comparación con otras bombas.

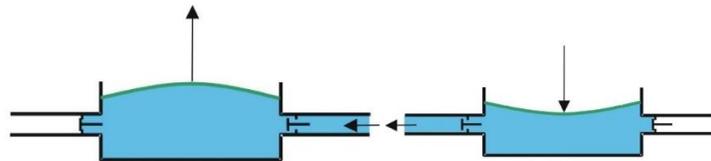


Figura 2.41 Bomba de diafragma

2.5.2.1.1.3. Bombas de Ariete

Las bombas de ariete funcionan utilizando el fenómeno del golpe de ariete que consiste en la variación de presión producida al frenar un fluido compresible como el agua y la generación de una onda de choque.

La bomba de ariete consiste en dos válvulas que funcionan en sentidos opuestos, cuando el agua alcanza cierta velocidad la válvula de choque se cierra produciendo una sobrepresión que impulsa el agua hasta la cámara de aire la vuelva a cerrar y se repite el ciclo.

Esta bomba es ampliamente utilizada para trasladar agua en comunidades de países subdesarrollados. Tiene la desventaja de perder agua si esta no es recapturada.

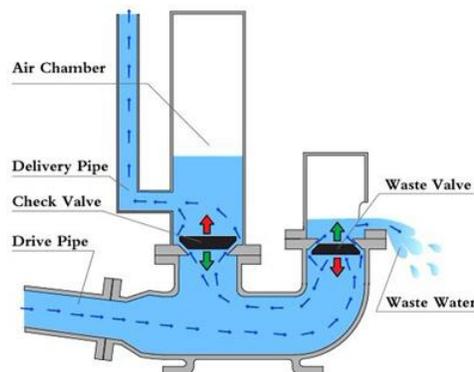


Figura 2.42 Bomba de ariete

2.5.2.1.1.4. Bombas Eyectoras

Las bombas eyectoras funcionan impulsando aire comprimido por una tobera, debido a la variación del área transversal se genera una sobrepresión que permite impulsar otro fluido produciéndose una mezcla de ambos fluidos. La presión del fluido impulsado dependerá de la capacidad del compresor del aire.

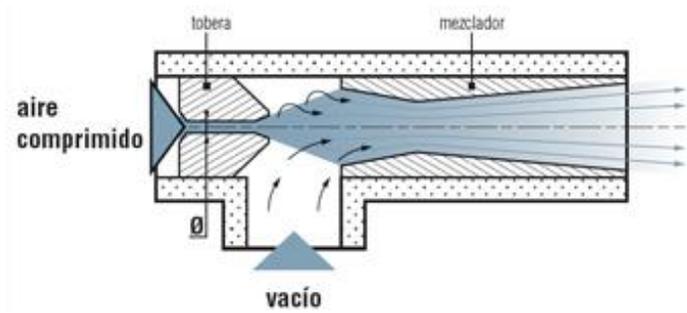


Figura 2.43 Bomba eyectora

2.5.2.1.2. Bombas Rotatorias

Las bombas rotatorias como su nombre lo indica consiste en el desplazamiento de un fluido provocado por el desplazamiento de un volumen accionado por la rotación de un mecanismo [12].

2.5.2.1.2.1. Bombas de sogas

Las bombas de sogas consisten en una soga con pequeños contenedores con agua que se desplazan a medida que una rueda va girando produciendo un bombeo de agua. Comúnmente son utilizadas en comunidades rurales.

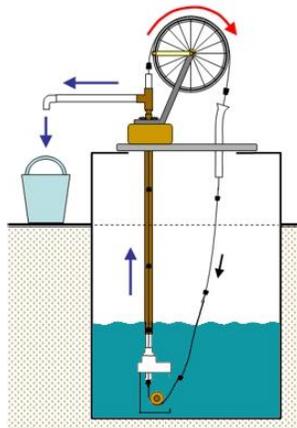


Figura 2.44 Bomba de soga

2.5.2.1.2.2. Bombas de tornillo

Las bombas de tornillo funcionan por medio de un tornillo sin fin en una camisa que va elevando un fluido de manera escalonada por la rotación del tornillo.

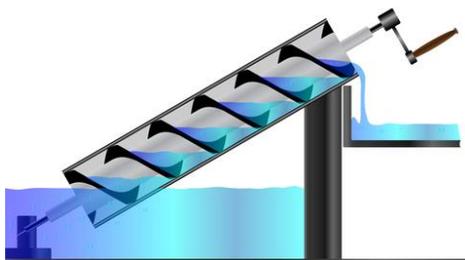


Figura 2.45 Bomba de tornillo

2.5.2.1.2.3. Bombas de paleta

Las bombas de paleta tienen un conjunto de paletas rotativas que por medio de su movimiento van impulsando un fluido.

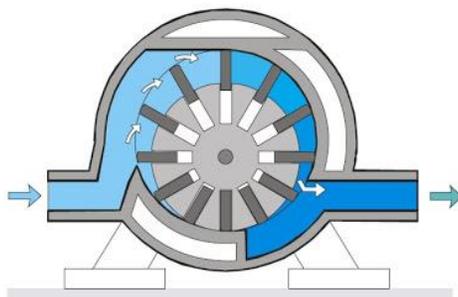


Figura 2.46 Bomba de paleta

2.5.2.1.2.4. Bombas de engranajes

Las bombas de engranajes consisten en un par de ruedas dentadas que por medio de su rotación impulsan un fluido, existen diferentes diseños de los engranajes en su interior lo cual eleva su costo a medida que el diseño se va perfeccionando.

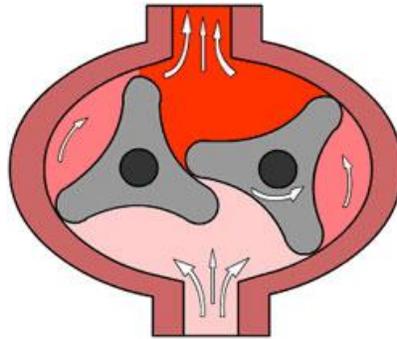


Figura 2.47 Bomba de engranaje

2.5.2.1.2.5. Bombas peristálticas

Las bombas peristálticas se suelen ocupar para caudales pequeños y de precisión, su funcionamiento consiste en una manguera elástica que es deformada a medida que un lóbulo gira produciendo un desplazamiento del fluido en su interior.

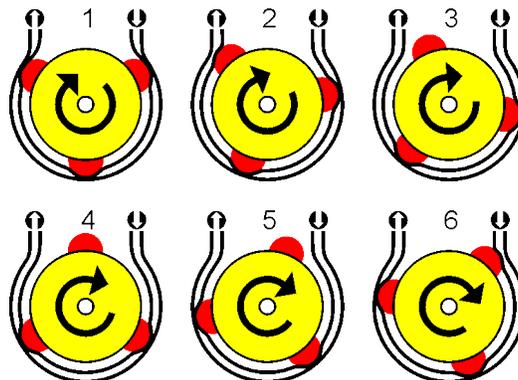


Figura 2.48 Bomba peristáltica

2.6. Fluido en tuberías

A continuación, se realizará una breve descripción de un fluido en una tubería para explicar el comportamiento del agua del mar al ingresar a una tubería [13].

2.6.1. Flujo laminar y turbulento

Se pueden distinguir dos fases en el comportamiento de un fluido la primera corresponde a los flujos laminares que se pueden caracterizar por líneas de corrientes suaves y la segunda a los flujos turbulentos que se caracteriza por un comportamiento caótico y fluctuaciones de la velocidad, además podemos distinguir una fase de transición.

Por observación se puede determinar que en general los fluidos a bajas velocidades y en tuberías angostas se suelen comportar de manera laminar y los fluidos a altas velocidades y tuberías anchas se comportan de manera turbulenta.

2.6.1.1. Numero de Reynolds

El número de Reynolds corresponde a un número adimensional que entrega información útil sobre si un fluido se comporta de manera laminar o turbulenta comparando las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas se expresa como:

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{V_{pro} D}{\hat{\nu}} [-] \quad (2.51)$$

Siendo $\hat{\nu}$ la viscosidad cinemática de un fluido.

Se considera para el uso ingenieril los siguientes rangos:

$$\begin{aligned} Re &\leq 2300 \text{ (Flujo laminar)} \\ 2300 &\leq Re \leq 4000 \text{ (Flujo transicional)} \\ Re &\geq 4000 \text{ (Flujo turbulento)} \end{aligned}$$

2.6.1.2. Región de entrada

Debido a la condición de no-deslizamiento las partículas del fluido en contacto con la superficie de la tubería se detienen por completo. Esto provoca que las partículas del fluido adyacentes a la tubería comienzan a frenar y las partículas al centro de la tubería comienzan a acelerar para mantener la razón de flujo másica. Como resultado a lo largo de la tubería se crea un gradiente de velocidad.

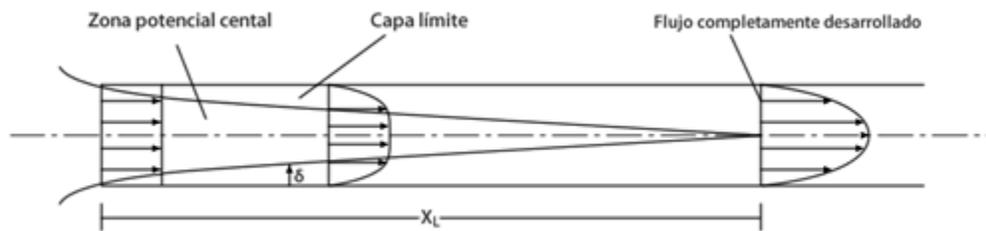


Figura 2.49 Región de entrada en un tubo para flujo laminar

En los flujos laminares se considera la longitud de entrada hasta donde el esfuerzo de corte representa un 2% para considerarlo un fluido desarrollado.

$$\frac{L_{laminar}}{D} \approx 0,05 Re \quad (2.52)$$

En los flujos turbulentos las fluctuaciones aleatorias usualmente ensombrecen los efectos de los esfuerzos cortante. Lo que se aproxima como:

$$\frac{L_{turbulento}}{D} \approx 1,39 D Re^{\frac{1}{4}} \quad (2.53)$$

Podemos notar la poca dependencia del fluido al número de Reynolds, por lo tanto, para uso ingenieril se aproxima como:

$$\frac{L_{turbulento}}{D} \approx 10 \quad (2.54)$$

2.6.2. Pérdidas de presión

Un elemento de interés en el análisis de flujos en tuberías son las pérdidas de presión que ocurren a lo largo de la misma.

En general se puede expresar las pérdidas de presión en un fluido como:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.55)$$

Donde f es conocido como factor de fricción de Darcy y su valor dependerá a las condiciones del fluido y la tubería.

Cuando existen pérdidas puntuales por la geometría de las tuberías u obstáculos como válvulas se expresa la pérdida como:

$$\Delta P = \sum K_L \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.56)$$

Donde K_L representa el factor de pérdida.

Finalmente podemos expresar la caída de presión en una tubería como:

$$\Delta P = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.57)$$

2.7. Análisis dimensional y semejanza

El análisis dimensional es una herramienta que permite simplificar el estudio de cualquier fenómeno en donde estén involucradas muchas magnitudes físicas tal como suele ocurrir en el estudio de fenómenos en la mecánica de fluidos.

Mediante el análisis dimensional podemos formar agrupaciones adimensionales y trabajar con ellas en lugar de las numerosas magnitudes físicas reduciendo las variables según el número de magnitud básicas que intervienen. Cuantas menos agrupaciones se realicen serán necesarias menos experiencias y mediciones.

Una ventaja adicional que proporciona la teoría dimensional es la semejanza en base a modelos a escala que permite predecir los resultados para distintas condiciones al cumplirse semejanza geométrica y dinámica.

- Semejanza geométrica

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda; \frac{l_p^2}{l_m^2} = \lambda^2; \frac{l_p^3}{l_m^3} = \lambda^3 \quad (2.58)$$

Donde λ la esca

- Semejanza dinámica

Se cumple cuando las fuerzas en puntos homólogos son semejantes.

Existe una amplia cantidad de números adimensionales que se aplican en diferentes ámbitos del prototipaje a continuación de describirán los números de Reynolds y Froude [14].

2.7.1. Numero de Reynolds

Cuando el cuerpo está sumergido en un flujo subsónico la fuerza predominante es la de viscosidad cumpliéndose la semejanza de Reynolds

$$Re_p = Re_m \quad (2.59)$$

El número de Reynolds es una comparación entre las fuerzas viscosas e inerciales y entrega información útil sobre las condiciones de un fluido

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{V_{pro} D}{\hat{\nu}} [-] \quad (2.60)$$

Siendo V la velocidad promedio y $\hat{\nu}$ la viscosidad cinemática.

De este número adimensional se pueden obtener las siguientes relaciones útiles:

2.7.1.1. Relación de velocidad

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{\hat{\nu}_p}{\hat{\nu}_m} \frac{1}{\lambda} \quad (2.61)$$

Si se trata del mismo fluido entonces $\hat{\nu}_p = \hat{\nu}_m$ cumpliéndose:

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.62)$$

2.7.1.2. Relación de caudales

$$\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_m} = \frac{\rho_p}{\rho_m} \frac{\hat{\nu}_p}{\hat{\nu}_m} \lambda = \frac{V_p}{V_m} \lambda^2 \quad (2.63)$$

2.7.1.3. Relación de fuerzas

$$\frac{F_p}{F_m} = \left(\frac{\hat{v}_p}{\hat{v}_m} \right)^2 \frac{\rho_p}{\rho_m} \quad (2.64)$$

Si se tratara del mismo fluido se reduce a:

$$\frac{F_p}{F_m} = \left(\frac{\hat{v}_p}{\hat{v}_m} \right)^2 \quad (2.65)$$

2.7.2. Numero de Froude

Cuando el flujo presenta una superficie libre abierta a la atmosfera se cumple la semejanza de Froude.

$$Fr_p = Fr_m \quad (2.66)$$

El número de Froude es una comparación entre las fuerzas de inercia y de gravedad indicando cual es la predominante en un flujo que se transporta sobre una superficie.

$$Fr^2 = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de gravedad}} = \frac{V^2}{gD_H} \quad (2.67)$$

Siendo V la velocidad promedio del canal y D_H el diámetro hidráulico.

De este número adimensional se pueden obtener las siguientes relaciones útiles:

2.7.2.1. Relación de velocidad

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{g_p}{g_m} \lambda} \quad (2.68)$$

Como $g_p = g_m$ se reduce a:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\lambda} \quad (2.69)$$

2.7.2.2. Relación de caudales

$$\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_m} = \frac{S_p V_p}{S_m V_m} = \lambda^{5/2} \quad (2.70)$$

2.7.2.3. Relación de fuerzas

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \lambda^3 \quad (2.71)$$

Si utilizamos el mismo fluido entonces $\gamma_p = \gamma_m$

$$\frac{F_p}{F_m} = \lambda^3 \quad (2.72)$$

3. Antecedentes

3.1. Tecnologías existentes de aprovechamiento energético undimotriz

En el desarrollo del aprovechamiento energético undimotriz se han creado diferentes tecnologías con este fin, pese a la innumerable cantidad de patentes y proyectos hasta el día de hoy ninguna tecnología se ha logrado imponer ante las demás como la más óptima.

A continuación, se describen las tecnologías más innovadoras y prometedoras, cabe destacar que existan muchas tecnologías similares y las que se escogieron destacan por su originalidad o prometedor desarrollo frente a sus similares.

Se clasificará estas tecnologías según el uso para el que fueron diseñadas.

3.1.1. Electricidad

Debido a la alta densidad energética del oleaje hay numerables esfuerzos a nivel mundial de generar electricidad con el oleaje.

3.1.1.1. Columna de agua oscilante con turbina Wells

Esta es una de las tecnologías más comunes de sistemas de agua oscilantes e incluso en la literatura se suele ocupar como el único tipo de tecnología de agua oscilante.

Su principio de funcionamiento consiste en un sistema de columna oscilante que impulsa una masa de aire que pasa a través de una turbina Wells que tiene la característica de girar siempre en el mismo sentido independiente de la dirección del aire, por medio de esta turbina se transfiere la potencia un generador eléctrico. Hoy en día existen varios prototipos reales de estudio en los países europeos del norte con una potencia promedio de 250 [Kw], la primera planta comercial con esta tecnología se encuentra en Mutriku España y consta de 16 generadores.

Esta tecnología es considerada estable y funcional, aunque lo costos de las obras civiles encarecen los costos de inversión [15].

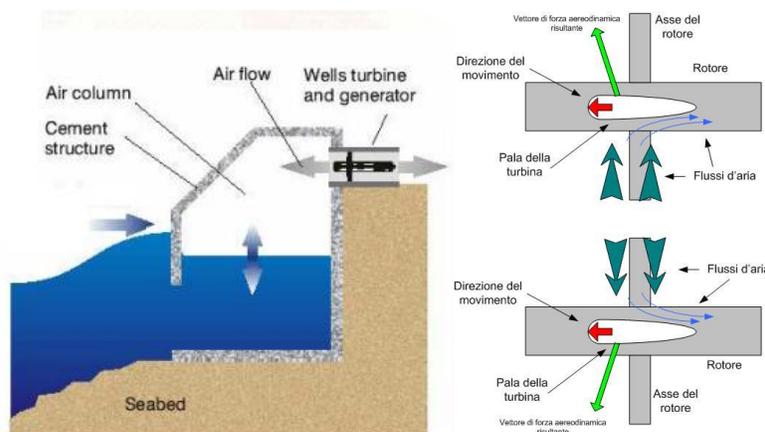


Figura 3.1 Sistema de columna de agua oscilante con turbina wells

3.1.1.2. Pelamis

El sistema *Pelamis wave generator* es uno de los más extendidos en la actualidad y ha alcanzado un carácter comercial, el sistema consiste en un conjunto de tubos que a medida que flotan sobre las olas van generando un movimiento en sus módulos los cuales accionan un acumulador oleohidráulico que acciona un motor conectado a un generador eléctrico.

Actualmente estos sistemas tienen una potencia promedio de 750 [Kw] con un diámetro de 3,5 metros, un largo de 150 metros y un peso de 70 toneladas [16].

La mayor potencia instalada en la actualidad se encuentra en Povoia de Varzim en Portugal con una instalación pre comercial que espera llegar a 30 dispositivos con una potencia esperada de 22 [MW].

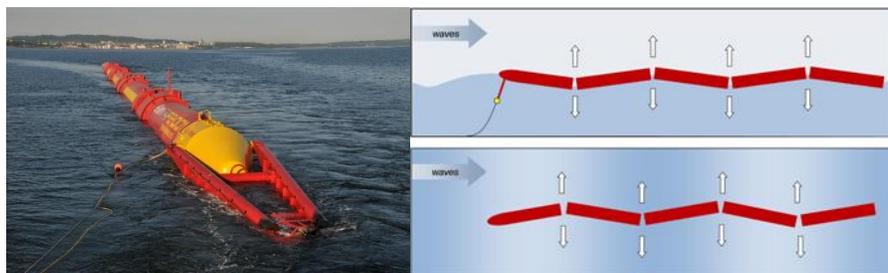


Figura 3.2 Pelamis Wave Generator

3.1.1.3. PowerBuoy

Este sistema consiste en una boya, una bomba oleohidráulica y un motor oleohidráulico. Hoy en día existen numerosos dispositivos similares por su simplicidad y bajo costo, aunque su gran desventaja es la resistencia ante tormentas y oleajes inesperados.

Actualmente se encuentra a la venta el modelo PB-3 que tiene una generación de 3 [Kw] y en desarrollo el modelo PB-15 que tendrá una potencia de 15 [Kw]. Una de las particularidades de este modelo frente a similares es la instalación una batería que permite almacenar energía y aumentar la potencia entregada.

Existe una planta piloto en New Jersey con una potencia de 50 [W], 5 metros de diámetro y 14 metros de largo [17].

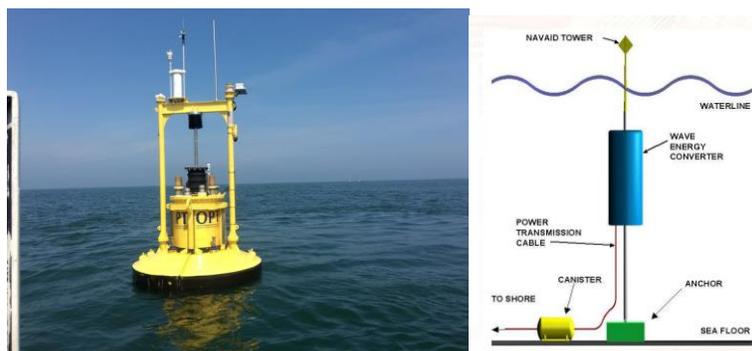


Figura 3.3 PowerBuoy

3.1.1.4. WaveDragon

El sistema WaveDragon diseñado en Dinamarca consiste en una rampa que canaliza el oleaje por medio del rebalse de una estructura la que genera una altura aprovechable por medio de una turbina Kaplan. Actualmente existen modelo de 1,5 [Mw], 4 [Mw], 7 [Mw] y 12 [Mw] siendo la tecnología con mayor potencia de generación eléctrica en comparación a otras tecnologías undimotrices.

Los modelos van de 58 x 33 metros a 390 x 220 metros y están diseñados para ser utilizadas en aguas profundas. Su mayor desventaja son los altos costos de mantenimiento frente a su alta generación eléctrica [18].



Figura 3.4 WaveDragon

3.1.1.5. TAPCHAN

TAPCHAN, TAPERed CHANnel en inglés, es un dispositivo que sorprende por su simpleza consiste en un atrapaola que impulse el oleaje sobre el nivel del mar para luego aprovechar la energía potencial con una turbina Kaplan. Actualmente existe un modelo instalado en noruega con una potencia de 350 [Kw].

La mayor ventaja en este sistema radica en su simpleza, bajos costos y confiabilidad, aunque su necesidad de condiciones geográficas y de oleaje tan específicas dificulta su instalación como una tecnología de carácter comercial masiva [19].

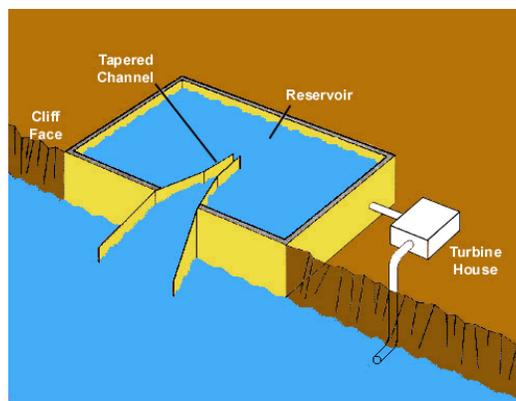


Figura 3.5 Tapered Channel

3.1.1.6. *Coppe Subsea Technology*

Esta tecnología diseñada en Brasil se encuentra instalada a 60 [Km] de Fortaleza y tiene una generación de 50 [Kw]. La instalación consiste en una plataforma que impulsa un pistón oleohidráulico mientras esta plataforma flota sobre el oleaje [20].



Figura 3.6 Coppe subsea technology

3.1.2. Bombeo

Aunque menos popular que las tecnologías que buscan general electricidad, también existen propuestas que han buscado bombear agua de mar con el mismo movimiento del oleaje.

3.1.2.1. *AquaBuoy*

Esta tecnología desarrollada en los Estados Unidos Americanos consiste en un gran pistón hidráulico que aprovecha el movimiento del mar para bombear agua, se ha estudiado instalar una turbina Pelton para generar electricidad con el bombeo de agua.

En la actualidad existen varias tecnologías similares de bombeo por medio de la fuerza de empuje de una estructura sobre el movimiento del mar.

Se encuentra instalada en la bahía de Makah con un diámetro de 3 metros y un largo de 30 metros [21].



Figura 3.7 AquaBuoy

3.1.2.2. *Lilyppad*

El Sistema Lilyppad fue desarrollado en Suecia en los años 80 y es pionero en el bombeo de agua de mar, el dispositivo consiste en una manguera construida de un elastómero que permite el ingreso de agua al expandirse y el desplazamiento del agua al contraerse pasando por unas válvulas de retención.

El sistema Lilyppad consiste en una serie de mangueras instaladas en la actualidad existen varios prototipos instalados, pero no ha logrado un desarrollo comercial principalmente por su dificultad de resistir marejadas imprevistas [22].

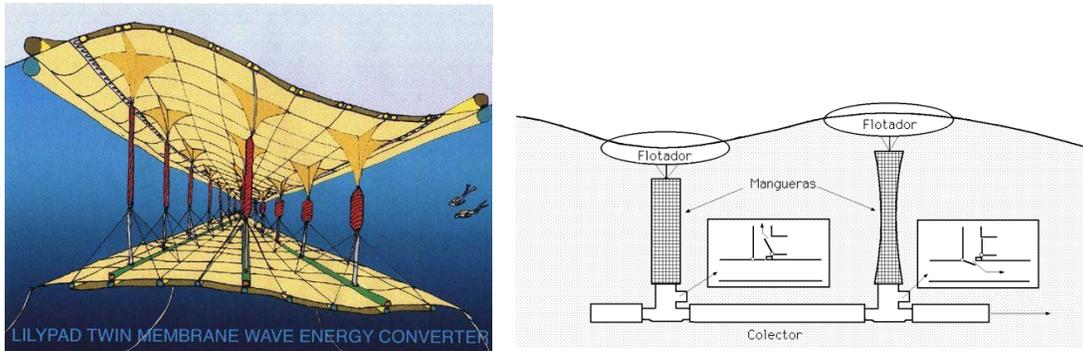


Figura 3.8 Lilyppad

3.1.2.3. *OYSTER*

El dispositivo OYSTER es la tecnología más avanzada en comparación a sus similares y ha logrado convertirse en una tecnología comercial.

Este sistema consiste en una estructura que se instala a unos 15 metros de profundidad y aprovecha la fuerza de impacto del oleaje para desplazar unos pistones oleohidráulicos que bombea agua de mar a alta presión, posteriormente esta agua puede ser almacenada o utilizada en generación eléctrica [23].

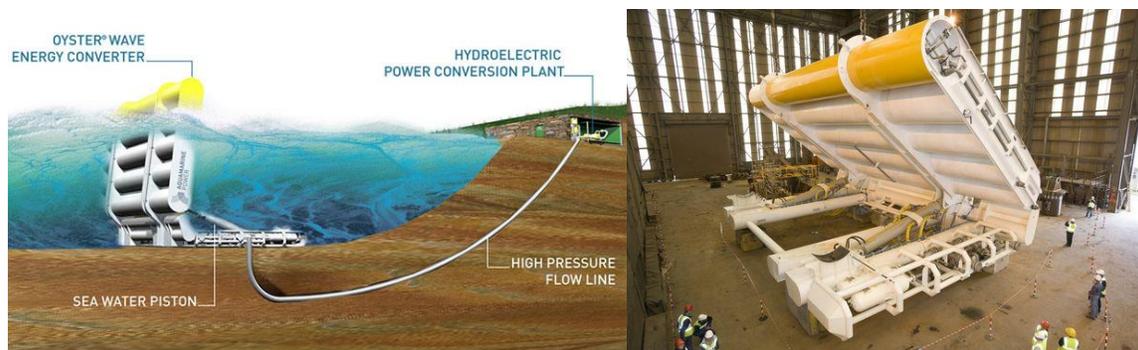


Figura 3.9 OYSTER

3.1.3. Osmosis

En la última década debido en gran parte a la escasez de agua dulce en todo el planeta se ha buscado impulsar la investigación y el desarrollo de desalinizadores de osmosis que funcionan generando una gran presión que supere a la presión osmótica de tal manera que se produzca agua dulce. Existen en la actualidad una gran cantidad de prototipos similares que buscan aprovechar la presión generada al impactar una ola en su estructura y bombear agua dulce directamente.

3.1.3.1. WILEKFO

WILEKFO significa “*brillo de agua*” en mapudungun y es un dispositivo de origen chileno y vanguardista en la generación de agua dulce. El dispositivo consiste en una estructura que aprovecha la fuerza generada por el oleaje para romper la presión osmótica y generar agua dulce, la cual es posteriormente bombeada por la misma energía. Además, permite la generación eléctrica de manera similar al sistema OYSTER

Actualmente se encuentra en fase de desarrollo y existen prototipos a escala real, pero no ha logrado convertirse en una tecnología comercial, aunque es una tecnología altamente prometedora si continua su desarrollo [24].

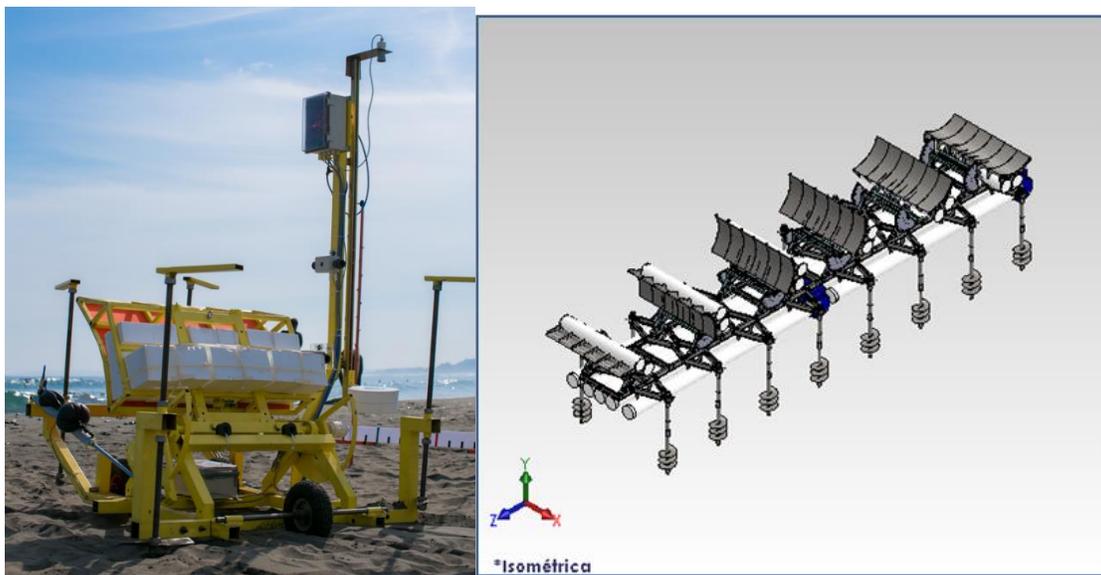


Figura 3.10 WILEKFO

3.2. Abastecimiento de agua del mar

En las últimas décadas la escasez de recursos naturales, el crecimiento demográfico incontrolado y los efectos del cambio climático han llevado a la explotación de nuevas fuentes de distintos recursos.

Uno de los recursos que se ha vuelto más escaso los últimos años especialmente en el país es el acceso al agua, ya sea por falta del recurso o mala gestión del mismo, en la actualidad se

ha buscado el empleo de agua de mar para la acuicultura, la desalinización, almacenamiento de energía e incluso el uso en la industria de la minería.

En esta memoria se abordará el uso no intensivo de agua de mar como puede ser los cultivos de baja intensidad como las granjas marinas o el uso para la desalinización de agua a pequeñas o medianas comunidades. De igual manera se espera que los resultados de este trabajo puedan servir como base para mayores caudales.

3.2.1. Granjas marinas

Desde la década de los 90 los recursos marinos a nivel mundial han comenzado a escasear en la actualidad son varios los países que han buscado regular la extracción de recursos marinos para evitar el deterioro de los ya sobreexplotados ecosistemas marinos.

Para lograr dar abasto a la creciente demanda de productos marinos provocados principalmente por el crecimiento demográfico se han tenido que buscar medidas alternativas para la producción de pescados, mariscos y algas.

En este contexto la acuicultura ha tomado un crecimiento en su producción llegando a igualar según la FAO la extracción desde el mar. En la actualidad aún existen grandes retos para este sector como los altos costos frente a una consolidada industria extractiva y el abuso de antibióticos junto con precarias condiciones en ciertos cultivos [25].

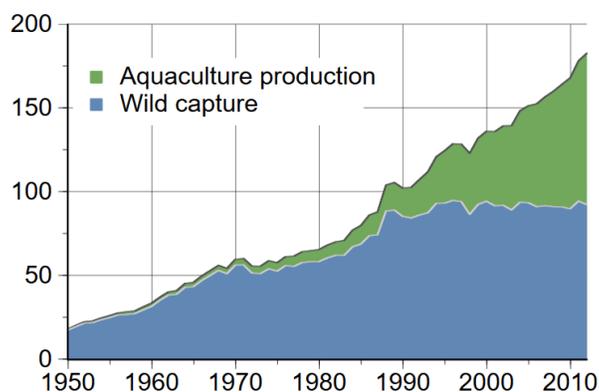


Figura 3.11 Crecimiento de acuicultura en el mundo

En nuestro país en las últimas década se ha masificado el cultivo de grandes volúmenes de salmones y en los últimos años se ha visto un crecimiento en el cultivo de moluscos bivalvos especialmente en la zona norte centro del país, además la creación de espacios de protección marina junto a las asignaciones de cuotas para los pescadores artesanales y la destrucción completa de ecosistemas ha favorecido al nacimiento de las granjas marinas que se caracterizan por un cultivo de mediana intensidad amigables con los ecosistemas.

Uno de los grandes retos de los acuicultivos de baja intensidad como las granas marinas corresponde a la necesidad de profesionalizar y tecnificar este sector, buscando una producción competitiva frente a la industria extractivista y los mercados globales.

En el cultivo acuícola es necesario instalar grandes estanques con agua de mar en la tierra para distintos usos que pueden estar relacionados con la producción de alimento para los cultivos, la investigación, el cultivo de peces y bivalvos en sus etapas tempranas e incluso en el crecimiento de los bivalvos hasta alcanzar un calibre comercial.

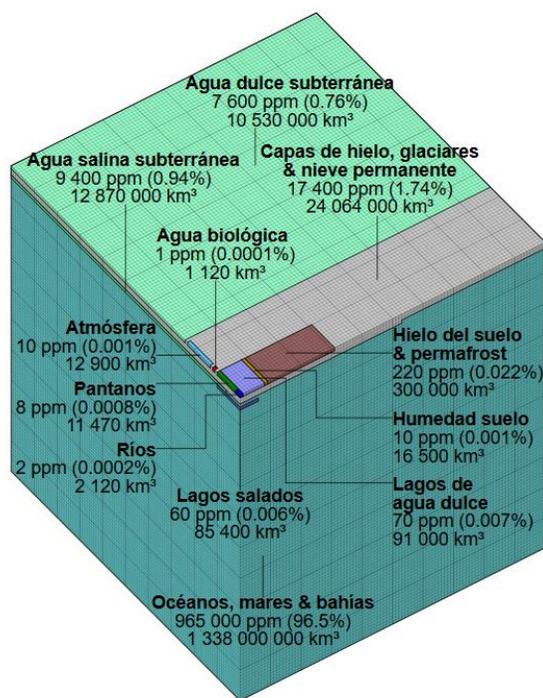


Figura 3.2 Proporción del agua en el planeta

3.2.2. Desalinizadores

El crecimiento demográfico descontrolado ha llevado a buscar nuevas fuentes del recurso hídrico para dar abasto al consumo directo e indirecto de agua como las actividades de la industria alimenticia y minera. En la actualidad la cantidad de agua dulce en comparación al agua de los océanos es bajísima, aunque sin este vital recurso la vida como la conocemos sería imposible de existir.

Tabla 3.1 Clasificación del agua según porcentaje de sales disueltas

Agua dulce	Agua salubre	Agua salada	Salmuera
< 0,05 %	0,05-3 %	3-5 %	> 5 %

Nuestro país es en actualidad uno de los países con mayores reservas estratégica de agua dulce en el mundo siendo el quinto país de la OCDE con mayores reservas per cápita con una increíble cifra de 57000 [M³/pp]. Este índice que posiciona a nuestro país en una posición estratégica oculta la desigualdad del recurso hídrico a nivel nacional, ya que mientras en la Patagonia existen amplias zonas protegidas del recurso en el norte y centro del país la sequía

y el desierto avanzan alterando los ecosistemas de manera preocupante para garantizar condiciones óptimas del recurso para el consumo humano [26].

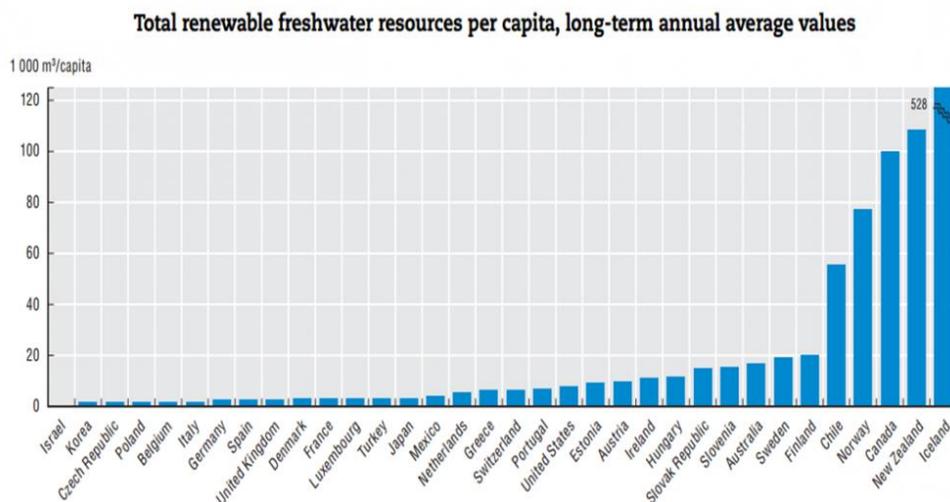


Figura 3.3 Cantidad de agua dulce en países de la OCDE

En el país se calcula que el promedio de consumo de agua diario por persona es de unos 125 a 200 litros alcanzando un valor de 600 litros en las comunas más pudientes del país. Esto nos ubica según la OMS en un acceso al agua dulce de carácter óptimo en la mayor parte del país existiendo crisis hídricas aun en lugares muy puntuales en donde la región de Valparaíso no ajena a este fenómeno tiene como ejemplo la comuna de La Ligua en donde el consumo es de 50 litros diarios en promedio.

Tabla 3.2 Clasificación de acceso al agua según la OMS [27]

Nivel del servicio	Medición del acceso	Necesidades atendidas	Nivel del efecto en la salud
Sin acceso (cantidad recolectada generalmente menor de 5 l/r/d)	Más de 1.000 m ó 30 minutos de tiempo total de recolección	Consumo – no se puede garantizar Higiene – no es posible (a no ser que se practique en la fuente)	Muy alto
Acceso básico (la cantidad promedio no puede superar 20l/r/d)	Entre 100 y 1.000 m ó de 5 a 20 minutos de tiempo total de recolección	Consumo – se debe asegurar Higiene – el lavado de manos y la higiene básica de la alimentación es posible; es difícil garantizar la lavandería y el baño a no ser que se practique en la fuente	Alto
Acceso intermedio (cantidad promedio de aproximadamente 50 l/r/d)	Agua abastecida a través de un grifo público (o dentro de 100 m ó 5 minutos del tiempo total de recolección)	Consumo – asegurado Higiene – la higiene básica personal y de los alimentos está asegurada; se debe asegurar también la lavandería y el baño	Bajo
Acceso óptimo (cantidad promedio de 100 l/r/d y más)	Agua abastecida de manera continua a través de varios grifos	Consumo – se atienden todas las necesidades Higiene – se deben atender todas las necesidades	Muy bajo

El impacto del cambio climático en el acceso al recurso hídrico se estudia con el indicador estrés hídrico, que representa la demanda de agua versus la cantidad disponible, se confirmar algo que ya puede ser percibido. Nuestro país será uno de los más afectados a nivel mundial por la falta de agua potable debido al avance del cambio climático ya sea en termino de estrés hídrico o de la tasa de aumento en este [28].

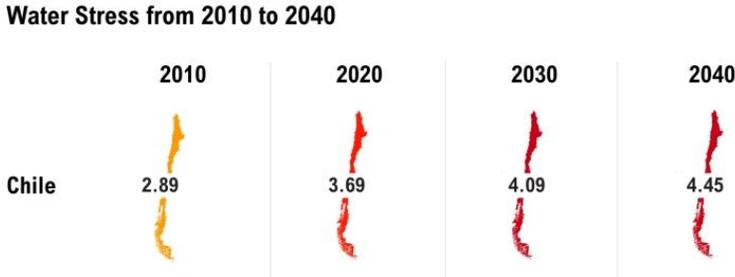


Figura 3.4 Evolución del estrés hídrico esperado en Chile

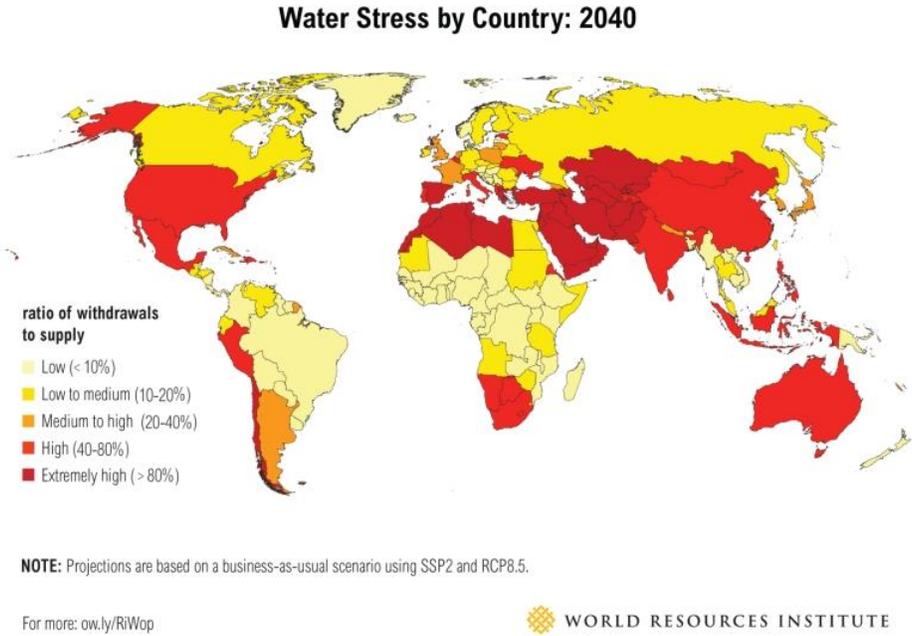


Figura 3.5 Estrés hídrico en el planeta esperado para el 2040

Este desolador panorama a nivel nacional y global ha llevado a una serie de desafíos para evitar que esta escasez hídrica global tenga efectos devastadores en la población.

La principal respuesta a este problema ha sido la promoción e investigación de los desalinizadores para abastecer con agua dulce a la población extrayendo las sales de la abundante agua de mar a nivel global y que caracteriza especialmente a nuestro país.

En la actualidad existen diferentes tipos de desalinizadores y entre sus desventajas se encuentran sus altos costos debido a la gran cantidad de energía y superficie que demanda tratar con grandes volúmenes de agua para el consumo humano. Reducir estos costos e implementar las energías renovables es el gran desafío de los desalinizadores para transformarse en una tecnología apta para dar respuesta a la crisis hídrica que se aproxima.

Existen distintos tipos de tecnología en los desalinizadores, a continuación, se presenta una pequeña reseña de las tecnologías existentes para contextualizar:

3.2.2.1. *Desalinizadores solares*

Los desalinizadores solares se basan en el principio del fenómeno de evaporación de la capa superficial de una masa de agua al estar expuesta a la radiación solar. Es una tecnología simple y de bajo costo, pero las grandes superficies necesarias para abastecer el consumo de una comunidad la hacen poco competitiva a gran escala.

3.2.2.2. *Desalinizador por osmosis inversas*

La osmosis consiste en el fenómeno que sucede a juntar dos fluidos de distintas concentraciones por medio de una membrana y el paso de los minerales desde el fluido de mayor concentración al de menor concentración. Esta tecnología consiste en alcanzar presiones superiores a la presión osmótica de tal manera que la concentración de sales se logre eliminar del fluido. La mayor desventaja de esta tecnología consiste en la gran cantidad de energía que necesita para tratar los grandes volúmenes de agua necesarios.

3.2.2.3. *Desalinizador por evaporación relámpago*

Esta tecnología consiste en una serie de tubos a alta temperatura en donde se introduce agua pulverizada a alta presión buscando que esta se evapore rápidamente para extraer las sales. Esta tecnología necesita grandes cantidades de energía y de desarrollo.

3.2.2.4. *Desalinizador por congelación*

Esta tecnología consiste en la reducción drástica de la temperatura buscando la formación superficial de cristales de agua pura para posteriormente ser retirados y utilizada como agua potable. Esta tecnología aun esta en desarrollo.

3.2.2.5. *Desalinizador por destilación*

Esta tecnología consiste en evaporar una masa de agua por diferentes etapas para posteriormente condensarla y utilizarla de tal manera de recrear el ciclo hídrico que ocurre en la naturaleza. Esta tecnología necesita grandes cantidades de energía y actualmente es utilizada principalmente para invernaderos en lugares desérticos que recrean este ciclo.

3.2.2.6. *Desalinizador por electrodiálisis*

Esta tecnología consiste en el fenómeno mediante el cual al hacer pasar corriente eléctrica en una solución iónica los iones positivos se moverán hacia el electrodo negativo y los iones negativos se moverán al electrodo positivo quitando gradualmente las sales del agua. El alto consumo energético es la principal desventaja de esta tecnología.

3.3. Impacto ambiental

La tecnología de aprovechamiento undimotriz al igual que el resto de las energías renovables presenta un bajo, aunque no nulo impacto ambiental. La legislación ambiental chilena no estipula sobre que un dispositivo de bombeo de agua de mar o similar debiera ingresar al sistema de evaluación de impacto ambiental, aunque esto está más relacionado a la falta de legislación de estas tecnologías, siendo solamente la remoción de sedimentos a gran escala si es que ocurriera en su instalación el único factor a considerar en la legislación.

En condiciones extremas como las tormentas es común que estos dispositivos se estropeen pudiendo ser una fuente de contaminantes al tener que soportar cargas fácilmente 100 veces mayor a las condiciones ordinarias.

El impacto ambiental puede diferir según el tipo y ubicación de la tecnología y su mayor impacto está relacionado con las instalaciones costeras al provocar cambios en la morfología de la zona en que se emplaza

A continuación, se presenta un análisis sobre los potenciales impactos ambientales de estas instalaciones haciendo énfasis en la instalación y operación [29].

3.3.1. Impacto: Ruido

En primer lugar, hay que considerar que el ambiente marino y costero no es un ambiente silencioso es común el ruido del oleaje y del viento, sumado a que la comunicación entre las especies marinas consiste en la emisión de ruidos.

El impacto de ruido será significativo en la instalación del dispositivo principalmente si este requiere obras civiles y remoción de sedimentos, en tanto en su operación dependerá de los ruidos que acumulen la propia mecánica del dispositivo al aprovechar la energía undimotriz

3.3.2. Impacto: Contaminación por hidrocarburos

Es común que los dispositivos captadores de la energía undimotriz utilicen pistones y motores oleohidráulicos que buscan aprovechar la densidad superior de estos fluidos versus el agua del mar.

Aunque la probabilidad de ocurrencia es baja produciría un impacto significativo en el lugar de emplazamiento, aunque bastante reducido en su área afectada.

3.3.3. Impacto: Remoción de sedimentos

La remoción de sedimentos dependerá del tipo de tecnología y es propia de las instalaciones costeras, el impacto de la remoción de escombros se produce en la instalación del dispositivo y dependerá del tamaño del mismo y las obras civiles necesarias para la instalación.

El cambio de la morfología costera puede provocar un fuerte impacto en las poblaciones marinas desplazándolas de su hábitat original.

3.3.4. Impacto: Cambio del oleaje

El oleaje al tener un comportamiento ondular puede cambiar sus características de propagación al verse enfrentado a un obstáculo, esto puede provocar un impacto en la etapa de operación del dispositivo undimotriz si no es previsto con anterioridad.

El cambio en el oleaje puede cambiar completamente el ecosistema o provocar oleajes perjudiciales en algún lugar cercano de la instalación.

3.3.5. Impacto: Limitación al desplazamiento y migración de organismo marinos

La limitación al desplazamiento de especies migrantes es un impacto de ocurrencia en la etapa de operación del dispositivo y dependerá principalmente del tamaño y los amarres que tenga el mismo.

Existen registros de mamíferos que impactan sobre estructuras marinas, al ser Chile un país en donde variadas especies realizan migraciones como pingüinos o ballenas será necesario realizar un estudio que asegure que el dispositivo no se encuentre dentro de las rutas migratorias.

Es común que los dispositivos tengan luces para alertar a embarcaciones sobre el emplazamiento esto puede atraer a ciertas aves marinas que se pueden ver afectadas.

3.3.6. Impacto: Producción de nuevos sustratos para el asentamiento de especies

Los cambios morfológicos en las zonas de emplazamiento y los anclajes de los dispositivos suelen atraer la formación de algas y posteriormente fauna marina que utiliza estas estructuras para formar ecosistemas totalmente nuevos.

Es común observar estas formaciones en estructuras costeras como puertos, asentamientos petroleros y dispositivos de aprovechamiento energético undimotriz.

Este impacto positivo para la fauna marina dependerá principalmente del ruido que pueda tener el dispositivo.

4. Diseño de alternativas

4.1. Descripción del problema

El objetivo de este trabajo es estudiar la factibilidad de bombear agua de mar aprovechando la energía undimotriz, el lugar de emplazamiento corresponde al sur de laguna verde en la comuna de Valparaíso.

Se diseñará un dispositivo y se estudiará la factibilidad para lograr bombear según los requerimientos.

En el lugar existen tres estanques con agua de mar con diferentes alturas y capacidades como se puede ver en la siguiente ilustración:

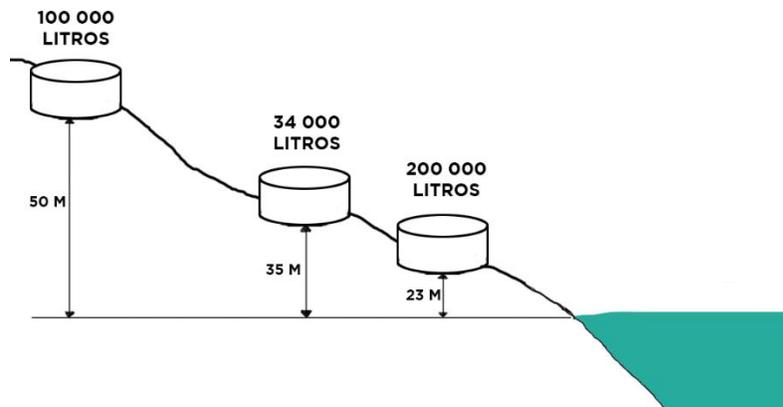


Figura 4.1 Instalación de tanques de agua de mar

4.2. Metodología

Se utilizará la siguiente metodología para diseñar un dispositivo con la finalidad de bombear agua de mar con aprovechamiento undimotriz:

1. Diseño conceptual: En primer lugar, se plantearán diferentes alternativas que puedan dar respuesta al bombeo de agua de mar para posteriormente escoger dos alternativas.
2. Prototipado: Se construirán dos prototipos experimentales para estudiar el fenómeno del oleaje y de bombeo.
3. Mediciones: Se realizarán mediciones a los prototipos en un canal de olas que permita escalar el dispositivo.
4. Soluciones: Se construirá un modelo paramétrico que permita dimensionar y dar solución a escala real con ayuda del análisis de las mediciones.
5. Dimensionamiento: Se procederá a dimensionar dos dispositivos a escala real que den respuesta a las necesidades de diseño.
6. Verificación: Utilizando el software comercial Ansys Fluent se verificará la factibilidad del dispositivo de bombeo.

4.3. Diseño conceptual

Para dar solución al problema se realiza el diseño conceptual de cuatro dispositivos buscando realizar una innovación en los mecanismos ya existentes. Por una cuestión de requerimientos los cuatro dispositivos están diseñados para ser instalados cercanos a la costa.

A continuación, se detalla una pequeña explicación de los dispositivos:

4.3.1. Sistema de columna de agua oscilante con boya tipo piston

Una de los principales problemas en los sistemas de bombeo con boya tipo piston es la poca capacidad que tienen para aguantar solicitaciones de esfuerzos ante tormentas o marejadas, desde esta desventaja surge la idea de acoplar un sistema de boya con piston dentro de un sistema de columna agua oscilante (OWC) que tienen la capacidad de filtrar y atenuar las irregularidades del oleaje dando como resultado un movimiento con una frecuencia predecible y homogénea.

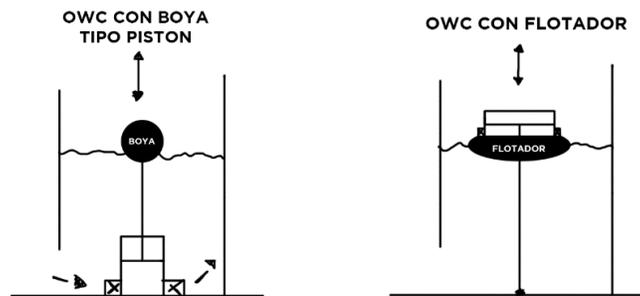


Figura 4.2 OWC con piston

4.3.2. Sistema de columna de agua oscilante con boya tipo diafragma

Este sistema nace del inconveniente que tienen los sistemas con pistones por sus partes mecánicas y la frecuencia en las fallas, además debemos considerar que el agua de mar es corrosiva y encarece los sistemas de pistones. Desde esta desventaja surge la idea de acoplar la bomba a un sistema de bomba de diafragma lo cual reduciría las partes móviles y daría mayor libertad de movimiento a la boya. En este dispositivo la elección de un material elástico que cumple con las solicitaciones sería el elemento más importante

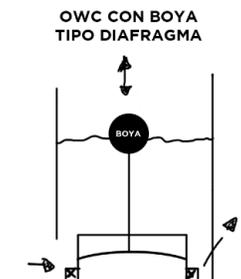


Figura 4.3 OWC con diafragma

4.3.3. Comeolas

El comeolas tiene un funcionamiento simple que consiste en un ducto para capturar las olas y direccionar el fluido por medio de una válvula de retención, en teoría el fluido alcanzaría una altura equivalente a la energía cinética y potencial que transporta la ola logrando elevar un oleaje hasta alguna plataforma con una altura a calcular por medio de mediciones experimentales.

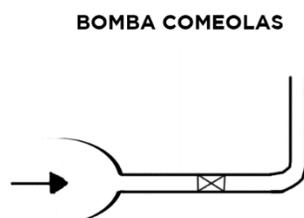


Figura 4.4 Bomba comeolas

4.3.4. Bomba de ariete

Actualmente las bombas de ariete están despertando un interés por su potencial para abastecer agua a bajo costo y de manera simple a comunidades centroamericanas y africanas. En las últimas décadas se ha logrado investigar y optimizar estos sistemas para distinto usos, aunque no se han utilizado para impulsar agua de mar probablemente por el desconocimiento que se tiene de estas bombas. El dispositivo consistiría en un ducto que canalizaría las olas incidentes que cerraría una válvula provocando una sobrepresión.

La principal desventaja de este sistema es que el nivel del mar no es idéntico en la pleamar y bajamar lo que dificultaría su funcionamiento las 24 horas para esto lo ideal sería la construcción de una parte flexible con flotador que garantice que las olas incidentes sean canalizadas óptimamente.

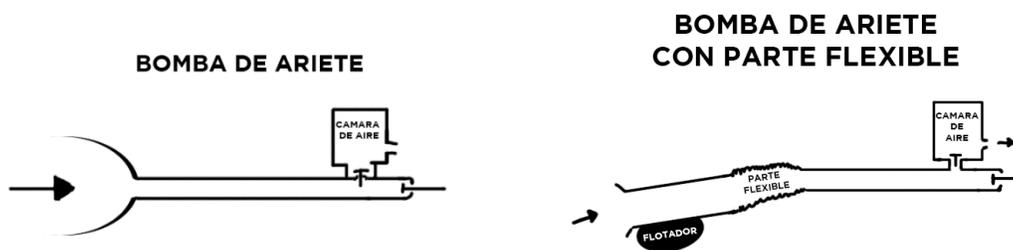


Figura 4.5 Bomba de ariete marina

4.4. Ponderación

Tabla 4.1 Ponderación de alternativas

	Originalidad	Costos	Facilidad de construcción	Confiabilidad	Impacto Ambiental	Ponderación
OWC de boya con pistón	1	1	2	1	1	6
OWC de boya con diafragma	3	2	1	3	2	11
Bomba de ariete marina	4	3	3	2	3	15
Comeolas	2	4	4	4	4	18

5. Diseño de prototipos

5.1. Diseño prototipo comeolas

Se construirá un primer prototipo para entender de mejor manera el comportamiento real del oleaje.

5.1.1. Fundamentos del diseño

El diseño del prototipo será desarrollado con los siguientes principios:

- Construcción modular que permita ser modificado para la construcción de futuros prototipos.
- Utilizar el máximo momento posible del oleaje para impulsar el agua de mar.
- Disminuir las pérdidas de presión internas del prototipo lo máximo posible.
- Utilizar la presión cinemática como fuente de energía.
- Facilitar la medición y descripción del fenómeno de sobrepresión.

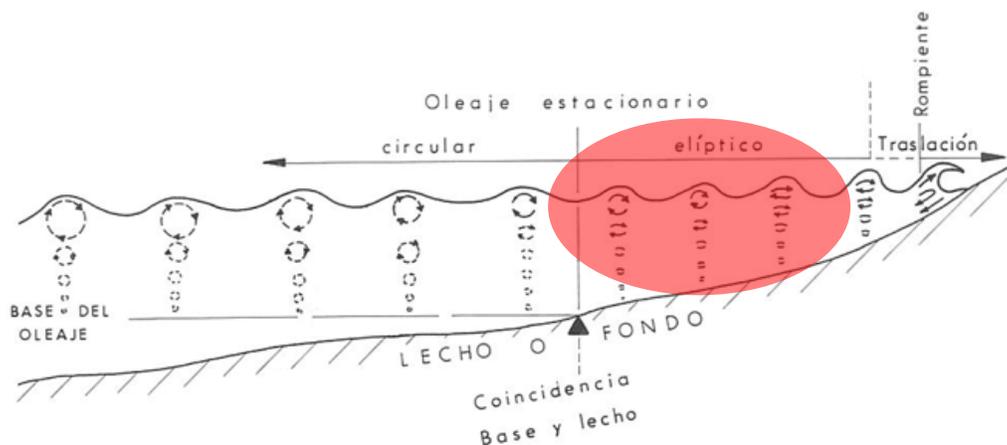
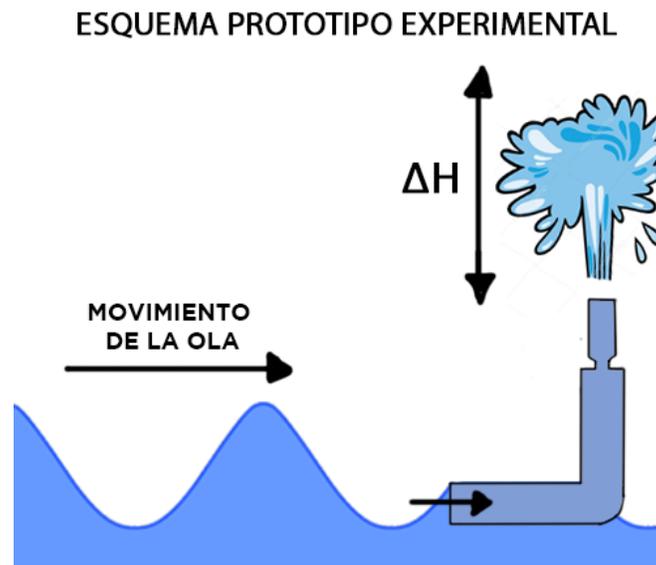


Figura 5.1 Zona de emplazamiento

Debido a la pronunciada pendiente del lecho marino en la zona central es posible capturar la ola en su etapa elíptica e incluso circular en la costa, es necesario entender que en esta fase de transición la ola comienza a aumentar su altura y disminuir su velocidad hasta que la ola finalmente colapsara.

Debido a que la cantidad de energía del oleaje depende de la altura de la ola necesitamos capturarla cuando esta tenga el mayor tamaño. El prototipo se espera ubicar en a nivel del mar por tener las mejores condiciones aparentes de aprovechamiento energético de la ola.

5.1.2. Diseño conceptual



El funcionamiento del prototipo consiste en la captura del oleaje por medio de una tubería buscando medir la altura de la columna de agua impulsada por medio de una válvula de retención.

Este primer prototipo facilitará la descripción del fenómeno y permitirá comenzar el diseño de futuros prototipos.

5.1.3. Descripción de las fases

Se identifican dos fases dentro del prototipo el primero corresponde al oleaje cuando entra al prototipo hasta superar la válvula de retención y la segunda fase corresponde a la elevación de una columna de agua causada por la sobrepresión generada por la transformación de la presión cinemática en potencial.

5.1.3.1. Primera Fase

En esta fase el fluido entra y es impulsado con una reducción del área hasta que traspase la válvula de retención hasta que las presiones cinemática y potencial sean iguales.

5.1.3.2. *Segunda fase*

En esta fase el fluido es direccionado por una sobrepresión formada por la energía cinética que permite impulsar una columna de agua

5.1.4. Elementos

Se identifican los siguientes elementos en el prototipo:

5.1.4.1. *Atrapaola*

El atrapaola consiste en una reducción del área transversal que acelere el fluido que entra al prototipo

5.1.4.2. *Ducto principal*

El ducto principal tiene dos funciones, la primera consiste en funcionar como estructura del prototipo y la segunda consiste en trasladar el fluido buscando las menores pérdidas por fricción.

5.1.4.3. *Válvula de retención*

La válvula de retención consiste en retener el fluido para que una vez que se origina la sobrepresión este no se devuelva

5.1.4.4. *Ducto secundario*

El ducto secundario consiste en el ducto por el cual se buscará contener la columna de agua elevada por la sobrepresión

ESQUEMA PROTOTIPO EXPERIMENTAL FINAL

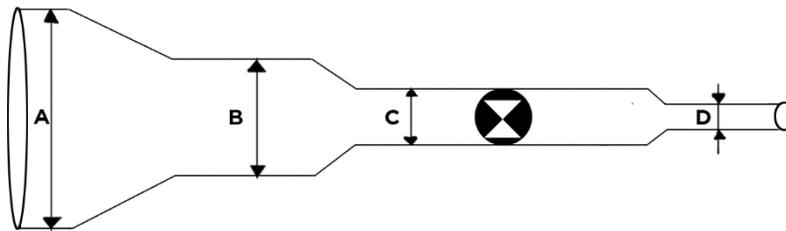


Figura 5.3 Esquema prototipo experimental comeolas

5.1.5. Dimensionamiento

El prototipo debe aguantar 1500 [pas] y debería poder elevar desde 10 [mm] a 160 [mm] dependiendo a la amplitud de la ola

5.1.5.1. Atrapaola y Ducto principal

El oleaje se puede considerar como débilmente estacionario, por lo tanto, se cumple el teorema de Bernoulli dentro del ducto.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + h_f \quad (5.1)$$

Debemos considerar:

- La reducción de costos
- La necesidad de impulsar la velocidad del fluido
- Las pérdidas de presión internas deben ser menor a la presión de entrada del fluido

Existen varias combinaciones de diámetros y longitud, pero finalmente se escogen:

$\emptyset A = 125$ [mm] (Diámetro atrapaola)

$\emptyset B = 32$ [mm] (Diámetro ducto principal)

$\emptyset C = 25$ [mm] (Diámetro valvula)

$\emptyset D = 13$ [mm] (Diámetro ducto final)

$AB = 70$ [mm] (Longitud atrapaola)

$BC = 150$ [mm] (Longitud ducto principal)

$CD = 75$ [mm] (Longitud ducto vertical)

5.1.5.2. Válvula de retención

Se Busca una válvula de retención de $\emptyset 3/4'$ de bronce.

5.1.5.3. Ducto secundario

El ducto secundario será de $\emptyset 21$ [mm] y constara de una manguera transparente de 500 [mm] marcada cada 10 [mm].

5.2. Diseño prototipo de ariete

El prototipo de ariete se construye para entender su comportamiento y la factibilidad de instalarlo directamente en el mar.

5.2.1. Fundamentos del diseño

El diseño del prototipo será desarrollado siguiendo los siguientes principios:

- Construcción modular que permita ser modificado para la construcción de futuros prototipos.
- Utilizar el máximo momentum posible del oleaje para impulsar el agua de mar.
- Disminuir las pérdidas de presión internas del prototipo lo máximo posible.
- Utilizar la presión cinemática como fuente de energía.
- Facilitar la medición y descripción del fenómeno de sobrepresión.

La velocidad que alcanza el oleaje en su propagación puede alcanzar en promedio $10 \left[\frac{m}{s} \right]$, esta velocidad es mayor a la que utilizan las bombas de ariete en sus configuraciones típicas.

Se buscará realizar modificaciones en los diseños clásicos de las bombas de ariete para adaptarlo al oleaje del mar para poder encontrar parámetros que faciliten su construcción.

5.2.1.1. Golpe de ariete

El golpe de ariete es un fenómeno común que se da en tuberías y es una de las causas más comunes de avería. El golpe de ariete se origina debido a que el agua, aunque se trate teóricamente como fluido no compresible en la realidad es ligeramente elástico, por lo mismo al frenar bruscamente el agua el fluido tiene a comprimirse y luego expandirse por medio de una onda de sobrepresión que comúnmente al no considerarse puede causar que las tuberías revienten. En nuestro caso utilizaremos este fenómeno para impulsar al fluido hasta cierta altura [30].

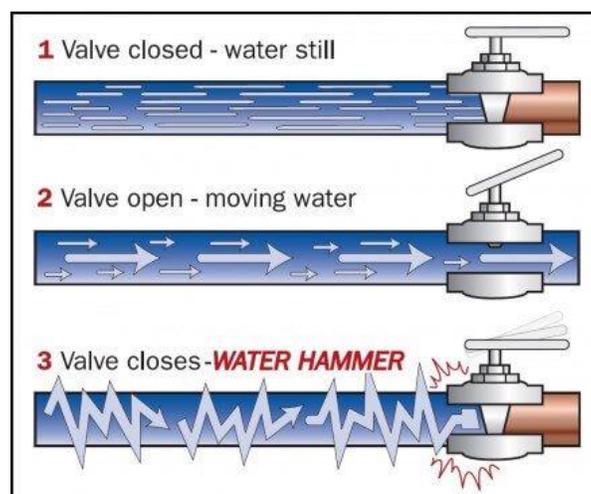


Figura 5.4 Fenómeno golpe de ariete

5.2.2. Esquema conceptual

ESQUEMA PROTOTIPO EXPERIMENTAL

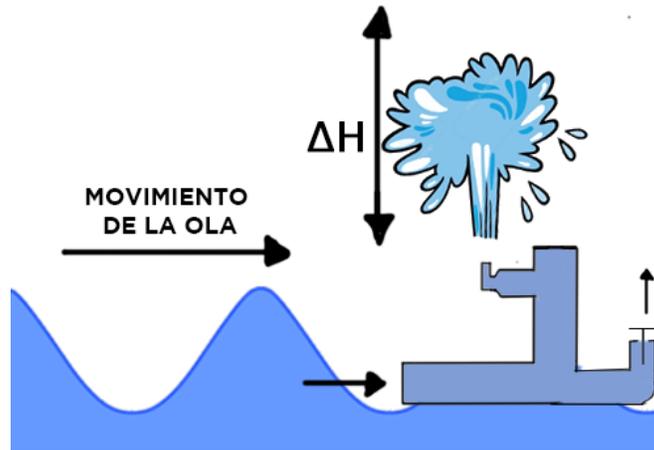


Figura 5.5 Esquema prototipo bomba de ariete marina

El funcionamiento del prototipo consiste en la captura del oleaje por medio de una tubería la cual fluirá hasta el final hasta alcanzar cierta velocidad y caudal que cierre bruscamente la válvula provocando el fenómeno del golpe de ariete que provocara una sobrepresión que impulsará el fluido con ayuda de una cámara de aire que guarde la energía provocada en ese instante permitiendo el bombeo del agua hasta cierta altura a determinar.

Este prototipo buscara estudiar la factibilidad de la bomba de ariete de mar.

5.2.3. Descripción de fases

5.2.3.1. Primera fase: Cierre brusco

En esta fase el agua del oleaje entra al dispositivo luego de ser acelerada por el atrapaolas. El fluido es expulsado por la válvula de choque que se cierra bruscamente cuando el fluido alcanza suficiente velocidad.

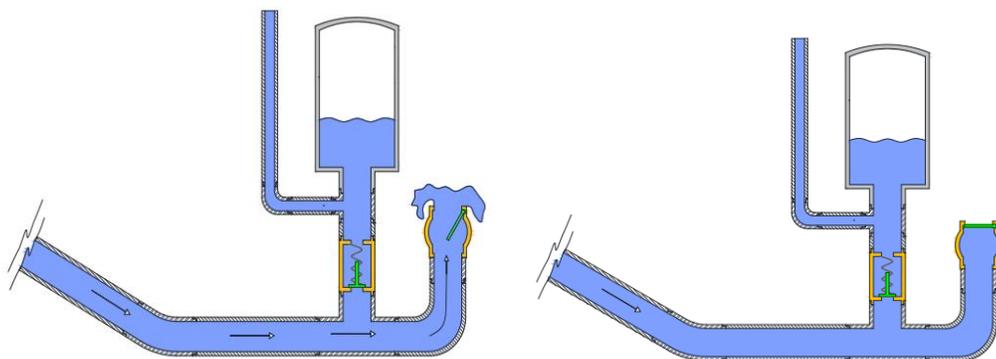


Figura 5.6 Primera fase: Cierre brusco

5.2.3.2. Segunda fase: Expansión

Al producirse un cierre brusco se produce una onda de sobrepresión que impulsa el fluido por medio de la válvula de retención que se ubica en la mitad del dispositivo de esta manera el fluido se almacena en la cámara de aire.

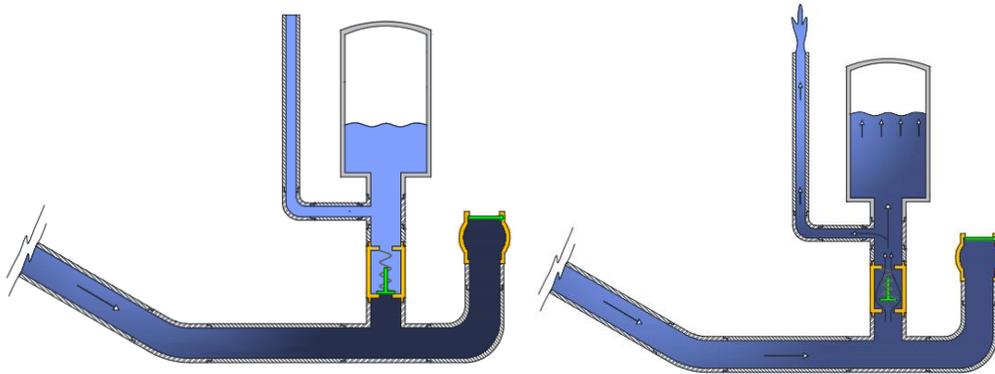


Figura 5.7 Segunda fase: Expansión

5.2.3.3. Tercera fase: Contracción

Una vez que la onda de sobrepresión libera su energía por la válvula de paso a cámara de aire funciona de manera elástica ayudando al fluido a ser bombeado hasta cierta altura. Al mismo tiempo la onda de contracción cierra la válvula de paso y abre nuevamente la válvula de choque para repetir el proceso.

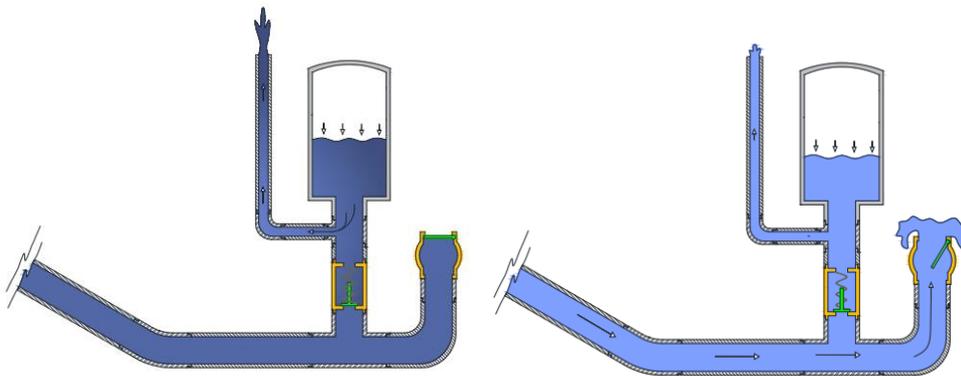


Figura 5.8 Tercera fase: Contracción

5.2.4. Componentes

5.2.4.1. Ducto principal

El ducto principal será el encargado de transportar la onda de sobrepresión y contracción para esto en la literatura se establece que es necesario cumplir la siguiente relación:

$$\frac{\bar{L}}{D} = 10 \text{ a } 500 \quad (5.2)$$

De esta forma se asegura un flujo totalmente desarrollado para el transporte de la onda.

5.2.4.2. *Válvula de retención*

La válvula de retención será la encargada de actuar entre el ducto principal y la cámara de aire, en estricto rigor basta que la resistencia de esta válvula sea menor a la sobrepresión para que el agua pueda moverse hacia el pulmón.

5.2.4.3. *Cámara de aire*

La cámara de aire será la encargada de impulsar el fluido hasta una cierta altura, para su construcción se busca que el volumen de aire en su interior sea igual al volumen de agua a impulsar. Es necesario tener en cuenta que una vez que la bomba es puesta en marcha la cámara de aire se ira llenando de agua reduciendo su capacidad de bombeo por lo tanto es necesario sobredimensionarla o introducir pelotas en su interior.

5.2.4.4. *Válvula de choque*

La válvula de choque será la encargada de producir un cierre brusco que genere la onda de sobrepresión para esto se busca determinar un peso de la válvula que maximice la velocidad del fluido dentro del tubo principal.

La fuerza del fluido en la válvula se puede obtener con la siguiente relación:

$$F_a = C_a * A_v * \rho * \frac{V^2}{2g} \quad (5.3)$$

Donde:

F_a = Fuerza de arrastre [Kgf]

C_a = Coeficiente de arrastre

A_v = Área de válvula [m^2]

V = Velocidad del fluido

En la literatura de bomba de ariete se suele hacer la siguiente recomendación:

$$F_r \approx 0.85F_a \quad (5.4)$$

Donde F_r es la fuerza de arrastre de diseño en el prototipo.

Otra relación a tener a consideración es la velocidad de impulso de la válvula donde se utiliza la siguiente ecuación:

$$U_c = 0.135 * C_{vi} \quad (5.5)$$

Donde:

U_c = Velocidad de cierra en la válvula (m/s)

C_{vi} = Carrera de la válvula de choque (mm)

5.2.4.5. *Ducto secundario*

El ducto secundario es el encargado de transportar el fluido desde la bomba hasta una cierta altura determinada.

5.2.5. Dimensionamiento

ESQUEMA PROTOTIPO EXPERIMENTAL FINAL

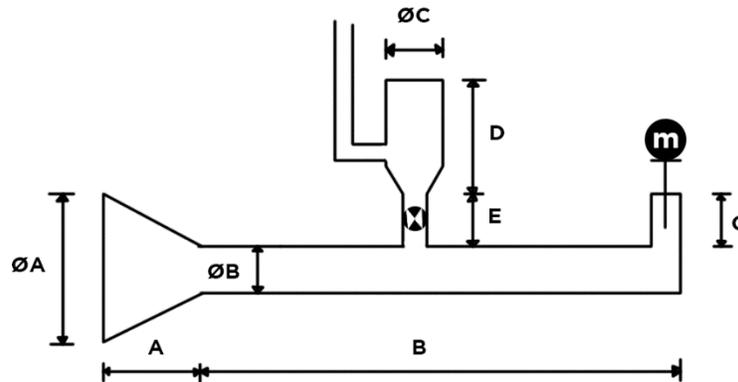


Figura 5.9 Esquema prototipo experimental ariete marino

5.2.5.1. *Ducto principal*

El ducto principal está formado por el atrapaolas y la tubería principal.

5.2.5.1.1. Atrapaolas

$$\text{Ø}A = 150 \text{ [mm]}$$

$$A = 100 \text{ [mm]}$$

5.2.5.1.2. Tubería Principal

$$\text{Ø}B = 27 \text{ [mm]}$$

$$B = 300 \text{ [mm]}$$

5.2.5.2. *Válvula de paso*

La válvula de paso a utilizar será una válvula vertical de paso de $\text{Ø}3/4'$.

5.2.5.3. *Cámara de aire*

La cámara de aire tiene las siguientes dimensiones:

$$\text{Ø}C = 50 \text{ [mm]}$$

$$D = 180 \text{ [mm]}$$

$$E = 100 \text{ [mm]}$$

5.2.5.4. Válvula de choque

La válvula de choque se construirá con diámetro de 1/2' y se probarán distintas masas según las características del oleaje.

5.2.5.5. Ducto secundario

El ducto secundario será una manguera transparente de 1/2' con 1 [m] de largo con marcas cada 10 [mm].

6. Construcción

6.1. Prototipo comeolas

6.1.1. Listado de materiales

Tabla 6.1 Listado de materiales prototipo comeolas

Componente	Material	Cantidad
Atrapaola	Unión estanque Ø2'	1
	Botella 6 litros	1
	Reducción Ø50 -Ø 40	1
	Reducción Ø40 -Ø 32	1
Ducto principal	Terminal HI Ø32 - 3/4'	2
	Válvula paso horizontal 3/4'	1
	Copla Ø32	1
	Reducción Ø32 - Ø25	1
	Tubería Ø25	50 mm
	Terminal HE Ø20 - 1/2'	1
Ducto secundario	Manguera transparente Ø1/2'	1000 mm
	Conexión manguera 1/2'	1

6.1.2. Plano general del ensamble

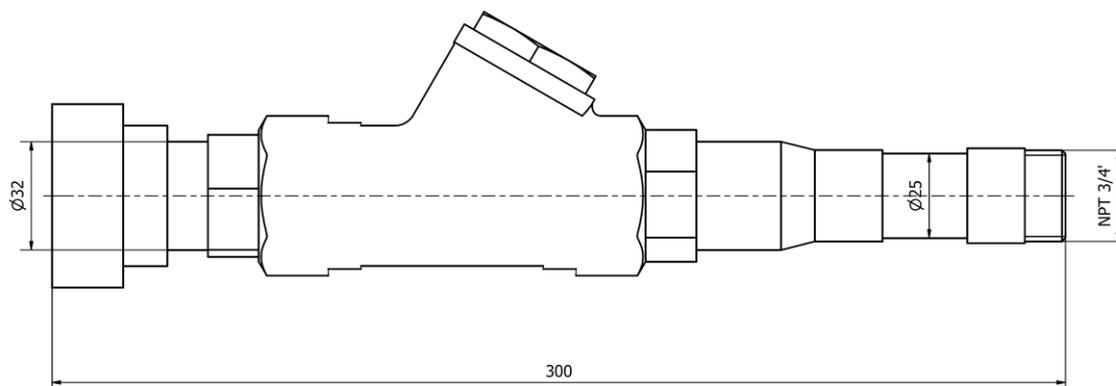


Figura 6.1 Cotas principales de prototipo comeolas

6.1.3. Componentes

6.1.3.1. *Atrapaola*



Figura 6.2 Componente atrapaola comeolas

6.1.3.2. *Ducto principal*



Figura 6.3 Componente ducto principal comeolas

6.1.3.3. *Ducto secundario*

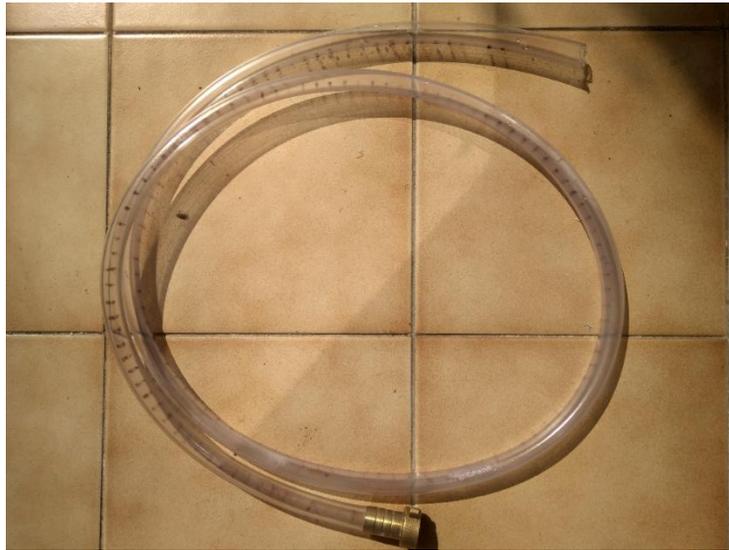


Figura 6.4 Componente ducto secundario comeolas

6.1.4. **Ensamble**



Figura 6.5 Ensamble comeolas

6.2. Prototipo Ariete marino

6.2.1. Listado de materiales

Tabla 6.2 Listado de materiales ariete marino

Componente	Material	Cantidad
Atrapaola	Unión estanque Ø2´	1
	botella 6 litros	1
	Reducción Ø50 -Ø 40	1
	Reducción Ø40 -Ø32	1
Ducto principal	Terminal HI Ø32 - 3/4´	3
	Copla roscada 3/4´	1
	Copla T Ø32	1
Válvula de paso	Terminal HI Ø32 - 3/4´	2
	Válvula de pie 3/4´	1
Cámara de aire	Terminal HI Ø32 - 3/4´	1
	Copla T Ø32	1
	Reducción Ø32 - Ø25	1
	Tubería Ø25	50 mm
	Terminal HE Ø20 - 1/2´	1
	Tubería Ø32	50 mm
	Reducción Ø51 - Ø32	1
	Tubería Ø51	180 mm
	Tapa Ø51	1
Válvula de choque	Copla roscada 3/4´	1
	Terminal HI Ø32 - 3/4´	1
	Codo 90° Ø32	1
	Reducción Ø32 - Ø25	1
	Tubería Ø25	50 mm
	Terminal HE Ø20 - 1/2´	1
Ducto secundario	Manguera transparente Ø1/2´	1000 mm
	Conexión manguera 1/2´	1

6.2.2. Plano general del ensamble

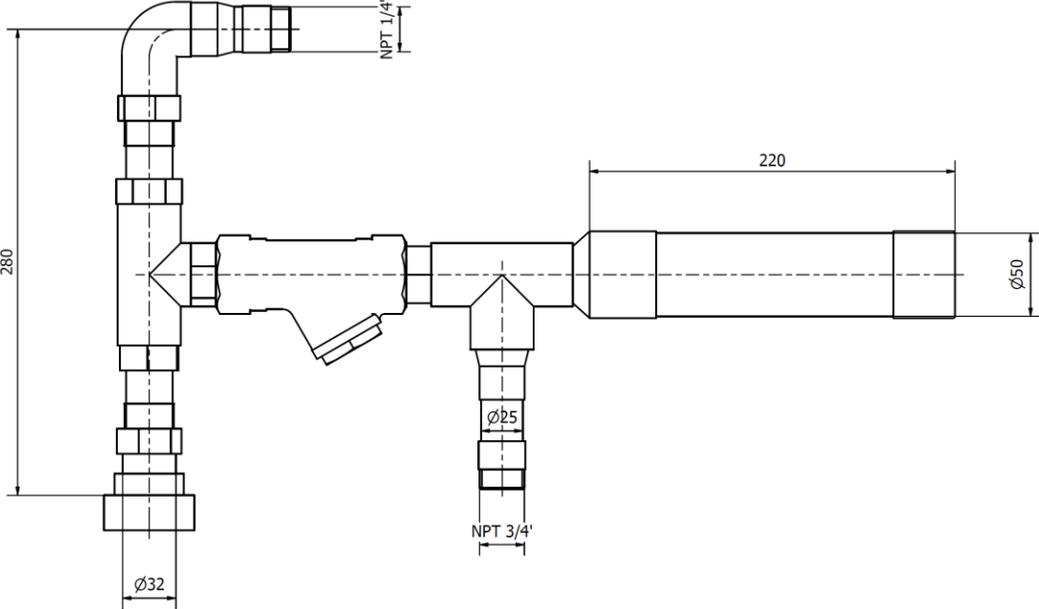


Figura 6.6 Cotas principales de prototipo ariete marino

6.2.3. Componentes

6.2.3.1. *Atrapaola*



Figura 6.7 Componente atrapaola ariete marino

6.2.3.2. *Ducto principal y Válvula de retención*



Figura 6.8 Componente ducto principal y válvula de retención ariete marino

6.2.3.3. *Cámara de aire*



Figura 6.9 Componente cámara de aire ariete marino

6.2.3.4. *Válvula de choque*



Figura 6.10 Componente válvula de choque ariete marino

6.2.3.5. *Ducto secundario*

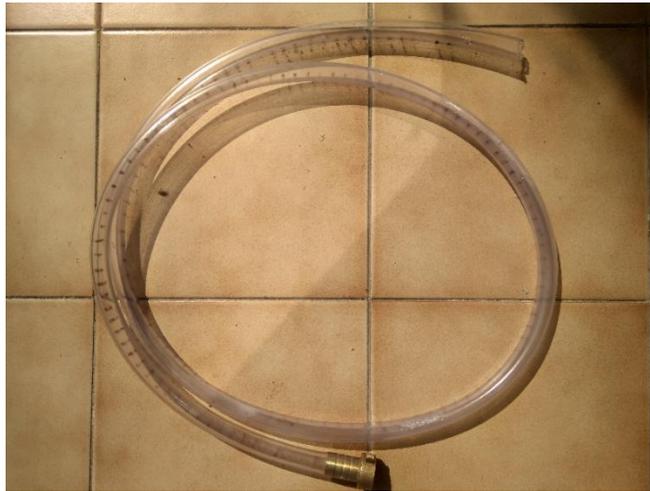


Figura 6.11 Componente ducto secundario ariete marino

6.2.4. **Ensamble**



Figura 6.12 Ensamble ariete marino

7. Mediciones

7.1. Canal de olas

El departamento de obras civiles facilito el uso de su canal de olas ubicado en el campus de San Joaquín para realizar distintas mediciones con los prototipos

7.1.1. Especificaciones técnicas

Tabla 7.1 Especificaciones técnicas canal de olas

Fabricante	ARMFIELD
Modelo	S6 MK II
Ancho	300 mm
Profundidad	450 mm
Longitud	5 m
Rango altura olas	5 mm – 60 mm
Rango frecuencia olas	0.5 Hz – 1.5 Hz



Figura 7.1 Canal de olas

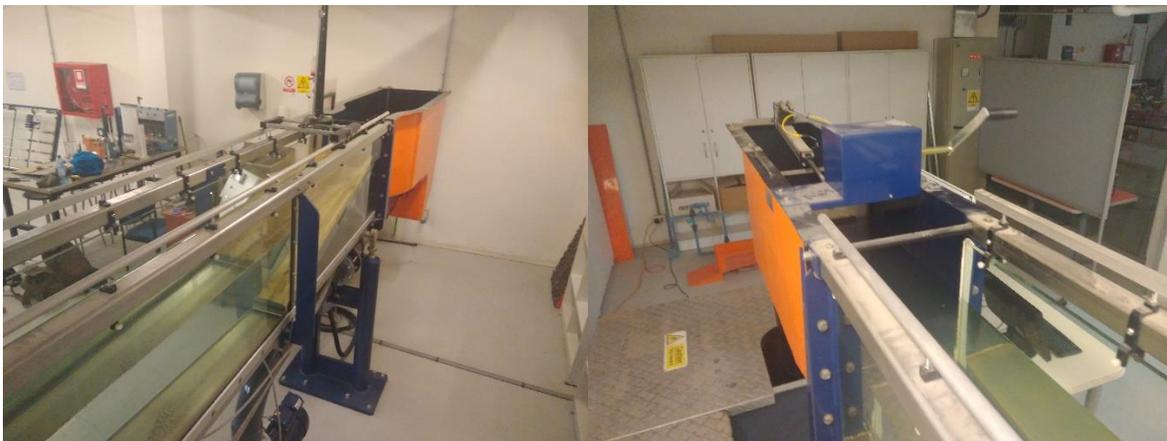


Figura 7.2 Paleta canal de olas

7.2. Prototipo Comeolas

Entre menor sea el valor de la frecuencia del oleaje será mayor la energía que podrá capturar un dispositivo undimotriz en este caso las mediciones están limitadas por una frecuencia de 0.6 [Hz] que es la menor que puede alcanzar el canal de olas y una profundidad de 20 [cm]. En la zona costera de Valparaíso se tiene una frecuencia aproximada de 0.1 [Hz]

7.2.1. Montaje

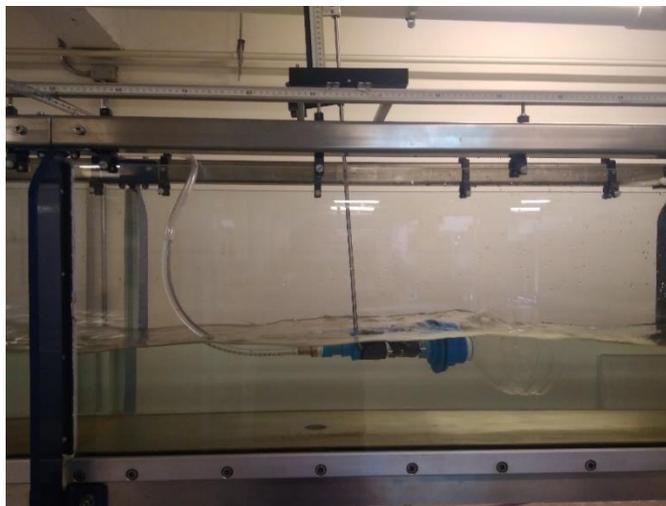


Figura 7.3 Montaje prototipo comeolas

7.2.2. Altura V/S Amplitud del oleaje

Las alturas máximas de elevación del fluido versus la amplitud de la ola se puede observar la tendencia de la reducción del aumento de la elevación del agua a medida que se aumenta la amplitud del oleaje.

La elevación se mide desde la amplitud de la ola.

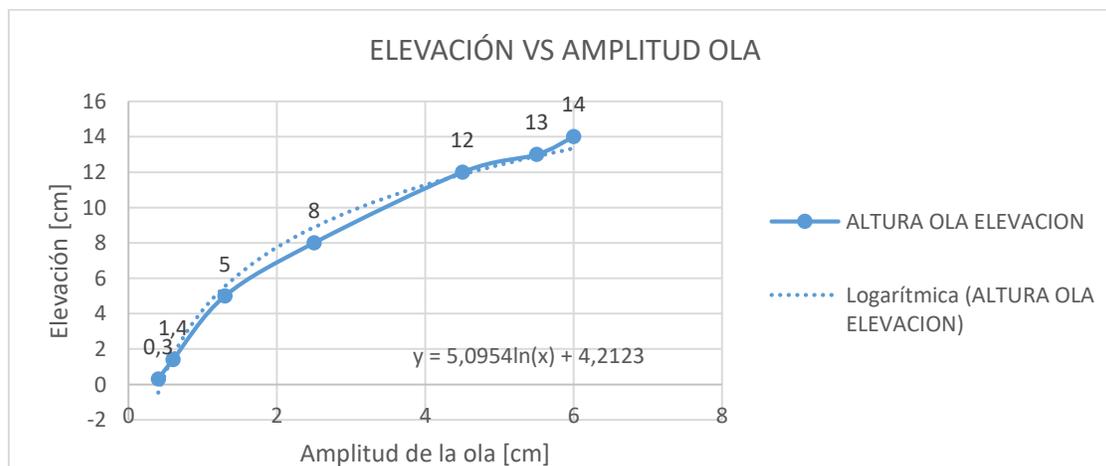


Grafico 7.1 Elevación respecto la amplitud de la ola prototipo comeolas

7.3. Prototipo Ariete

Al igual que en el prototipo anterior las mediciones están limitadas por a una frecuencia de 0.6 Hz que es la menor que puede alcanzar el canal de olas con una profundidad de 15 [cm]. En la zona costera de Valparaíso se tiene una frecuencia aproximada de 0.1 Hz.

7.3.1. Montaje

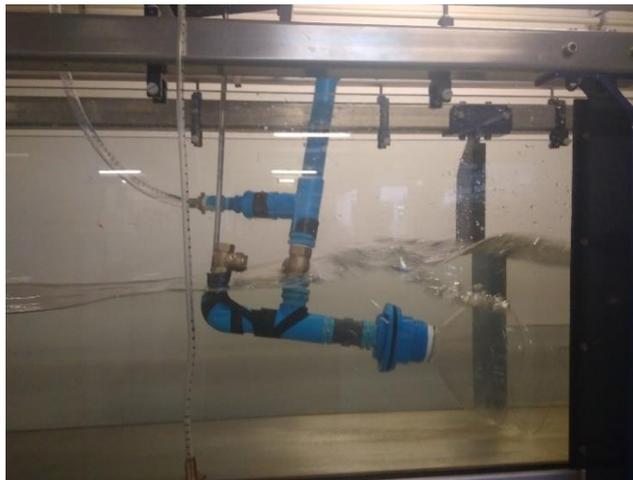


Figura 7.4 Montaje prototipo ariete marino

7.3.2. Válvula de choque

Uno de los componentes más importantes de las bombas de ariete es la válvula de choque, ya que de esta depende la formación óptima de la onda de sobrepresión, por lo mismo se ha diseñado una válvula de choque con una pequeña plataforma que permite intercambiar masas para facilitar la medición y optimizar su funcionamiento.

El peso de la válvula sin masas añadidas es de 5,2 [g].



Figura 7.5 Válvula de choque

7.3.2.1. Masas

Las masas que se utilizaron para las mediciones son las que se ven en la imagen a continuación y sus valores son:

Tabla 7.2 Masas utilizadas

Ítem	Masa
A	3,2 [g]
B	9,6 [g]
C	7,4 [g]
D	7,6 [g]
E	7,9 [g]
F	16,9 [g]



Figura 7.6 Masas detalle

7.3.3. Altura máxima V/S Masa válvula de choque

Se obtienen los siguientes resultados de altura alcanzada según la masa de la válvula de choque es necesario hacer notar que la fuerza del fluido sobre la válvula coincide con la velocidad media del fluido que teóricamente alcanza al impactar en la válvula.

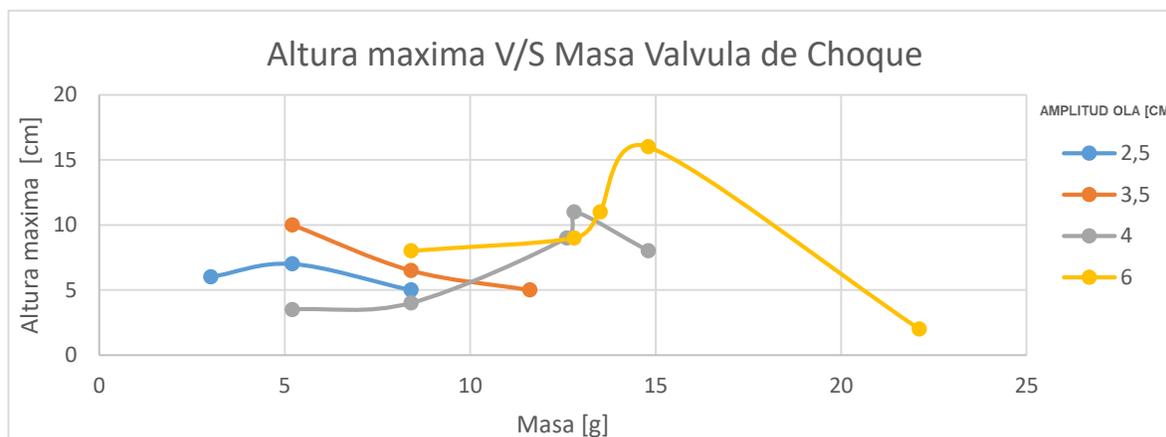


Gráfico 7.2 Altura de elevación máxima respecto masa válvula de choque

Esta altura máxima fue lograda con una manguera de $\frac{1}{2}$ '. Al reducir el diámetro de la manguera se logran mayores alturas y al aumentar el tamaño de la manguera se reduce la altura, pero siempre se mantiene la curva característica respecto a la masa en la válvula siendo este cambio de altura elevada no significativo.

Se observa que la medición con 3,5 [cm] de amplitud alcanza su máximo con una masa cercana a la ola de 2,5 [cm] esto es debido a que esta medición fue realizada con una mal montaje del dispositivo lo que produjo una pérdida de la velocidad que impacta en la válvula de choque, pese a este problema de medición se presenta por entregar información útil de que el aumento de caudal sobre el dispositivo produce un aumento de la altura de elevación aunque operen a la misma velocidad en la válvula de choque, lo cual es relevante para el escalado del prototipo.

7.3.4. Relación de elevación máxima V/S Amplitud de la ola

La relación de elevación corresponde a la altura de elevación respecto a la altura equivalente de la velocidad que desplaza la masa. La relación calculada es la máxima donde el caudal es igual a cero y por lo tanto deja de ser utilizable la bomba de ariete marina.

Se puede observar como a medida que aumenta la amplitud de la ola, indirectamente la velocidad, esta relación aumenta. Cabe mencionar que este comportamiento es acorde a los estudios sobre el funcionamiento de la bomba de ariete.

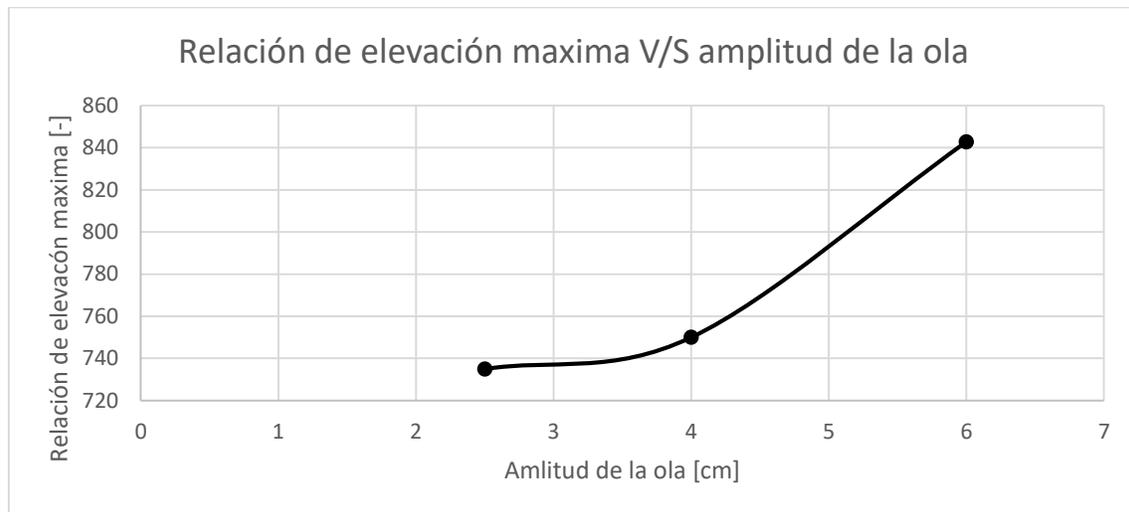


Gráfico 7.3 Relación de elevación máxima respecto a amplitud de la ola

Se utilizaron solamente tres puntos para este gráfico debido a que la amplitud de 3,5 [cm] corresponde a una muestra que por error de montaje no es comparativa.

7.3.5. Modificaciones

La principal dificultad que presenta el montar la bomba de ariete directamente en el oleaje consiste en que entra aire en cada bombeo perdiendo notoriamente caudal, por lo mismo se realizó una modificación que permitiese evitar la entrada de aire dando como resultado un caudal más sostenido, pero una notable reducción en la altura alcanzada.



Figura 7.7 Modificación ariete marina

8. Dimensionamiento

8.1. Soluciones del problema

Los resultados de las mediciones de los prototipos permiten entender de mejor manera el bombeo de agua de mar con energía undimotriz comprendiendo su gran potencial y claras limitaciones.

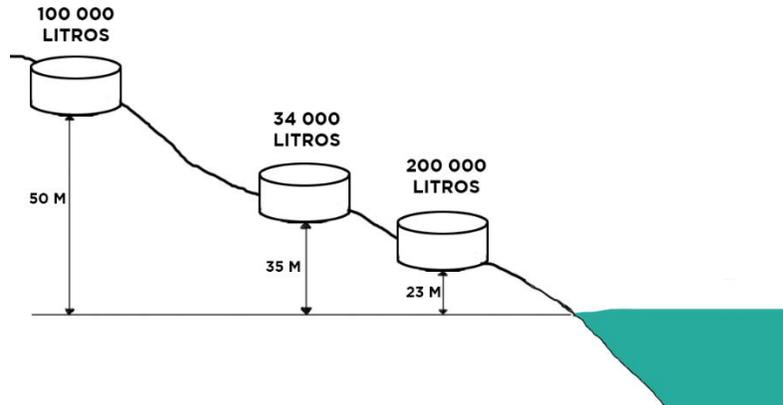


Figura 8.1 Ubicación estanques agua de mar

Los resultados de las mediciones entregan suficiente información para plantear dos posibles soluciones al problema para llegar al primer estanque.

8.1.1. Primera solución

Se puede alcanzar el primer estanque utilizando una combinación de ambos prototipos como se presenta a continuación:

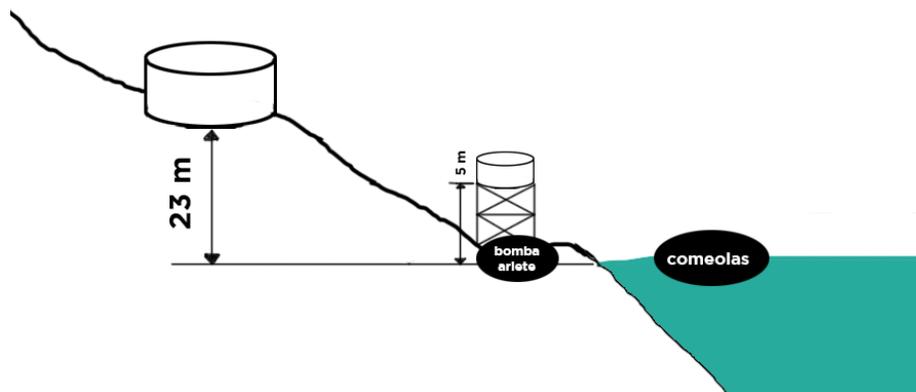


Figura 8.2 Esquema primera solución

El propósito de esta configuración consiste en aprovechar las ventajas de cada prototipo. Una vez que el agua sea acumulada en un estanque intermedio se podría utilizar la energía potencial con una bomba de ariete valiéndose de la extensa documentación que existe de bombas de ariete con configuraciones similares.

8.1.2. Segunda solución

La segunda solución consiste en una modificación de la bomba de ariete que permita montarla directamente sobre el mar. Como se observó en las mediciones la elevación de agua corresponde a la velocidad media de la ola dentro del ducto.

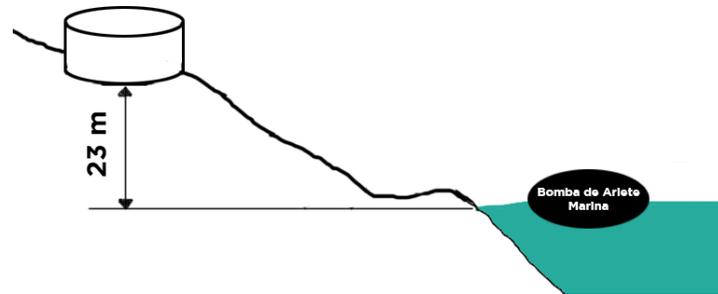


Figura 8.3 Esquema segunda solución

Esta configuración presenta una innovación respecto a las tecnologías que aprovechan la energía undimotriz, pero actualmente es de difícil construcción por la variedad de factores que es necesario controlar.

8.2. Semejanzas

Una de las ventajas de trabajar con prototipos a escala es que permite escalar sus resultados por medio de los grupos dimensionales reduciendo los costos y facilitando las mediciones.

8.2.1. Semejanzas geométricas

Como sabemos las semejanzas geométricas cumplen que:

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda; \frac{l_p^2}{l_m^2} = \lambda^2; \frac{l_p^3}{l_m^3} = \lambda^3 \quad (8.1)$$

Siendo λ la escala a ocupar en este caso 100.

Por lo tanto, podemos escalar la tactilidad de un dispositivo con 2 metros de diámetro que funcione con una ola de 2,5 metros de amplitud a 20 metro de profundidad puede elevar hasta 9 metros sobre la altura de la ola.

8.2.2. Semejanzas dinámicas

Como sabemos existen dos grupos dimensionales que rigen nuestro prototipo, en primer lugar, el oleaje es escalable con el número de Froude que nos puede entregar información útil sobre la velocidad de entrada del fluido al dispositivo, luego de que el fluido entra al dispositivo es el número de Reynolds el que entregar información útil sobre el prototipo.

Lamentablemente ambos grupos dimensionales no son equivalentes como se ha mencionado con anterioridad y no se puede hacer un escalamiento que entregue información relevante sobre el dispositivo, aunque si puede ser útil para entender el comportamiento de la velocidad y caudal en el prototipo.

- Relación de velocidad de Froude

$$\frac{u_p}{u_m} = 10 \quad (8.2)$$

- Relación de velocidad de Reynolds

$$\frac{u_p}{u_m} = \frac{1}{100} \quad (8.3)$$

Por lo tanto, las relaciones dinámicas del prototipo no son directamente escalables y será necesario realizar una verificación mediante herramientas de análisis numérico como se tenía previsto.

8.3. Parametrización

Mediante las mediciones, la literatura disponible, los modelos de continuidad y de oleaje lineal es posible parametrizar los componentes claves que faciliten el dimensionamiento de las soluciones para distintos oleajes.

8.3.1. Comeolas

8.3.1.1. Elección del diámetro atrapaolas

La función de atrapaolas consiste en atrapar el oleaje de manera íntegra para su posterior uso, se puede obtener con la siguiente relación:

$$D_1 \geq 2A + D_2 \quad (8.4)$$

Donde:

A: Amplitud del oleaje (m)

*D*₂: Diámetro ducto principal (m)

8.3.1.2. Ubicación vertical de dispositivo

El dispositivo debe ubicarse a una altura que garantice una alta presión cinemática y estática, pero además es necesario que la válvula del dispositivo se encuentre en todo momento bajo el nivel del mar, por lo tanto, su ubicación vertical será:

$$Z = -\left(a + \frac{D_2}{2}\right) \quad (8.5)$$

Donde:

a: Altura de la ola (m)

8.3.1.3. Relación de diámetro del atrapaolas y el ducto principal

Se debe utilizar una relación de diámetros que nos entregue una aceleración al fluido cuando se encuentre en su punto máximo de energía para producir un óptimo aprovechamiento energético:

$$\frac{D_1}{D_2} \geq 1 + \frac{2g(a-z)}{(C+U_z)^2} \quad (8.6)$$

Donde:

C : Velocidad de la ola $\left(\frac{m}{s}\right)$

U_z : Velocidad de la partícula de la ola a la altura Z $\left(\frac{m}{s}\right)$

8.3.1.4. Ubicación de la válvula de paso y largo del ducto

Para garantizar un movimiento óptimo de la válvula es necesario que el perfil del fluido este cercano a estar completamente desarrollado se puede ubicar la válvula con la siguiente relación:

$$6 \leq \frac{\bar{L}}{D_2} \leq 10 \quad (8.7)$$

Donde:

L : Ubicación horizontal de la válvula de paso en el ducto principal (m)

Respecto al largo del ducto este dependerá finalmente de la geografía de la zona a ubicar, aunque siempre es recomendable reducir el largo para minimizar las perdidas.

8.3.1.5. Caudal y altura teórica del dispositivo

La función que describe la velocidad del fluido corresponde a la siguiente:

$$V_f(t) = \sqrt{V_i(t)^2 + \frac{2P_i(t)}{\rho} - \left[\left(f \left(\frac{\bar{L}}{D_2} + \frac{\bar{L}_2}{D_3} \right) + \sum k \right) V_m * \text{sen}(-wt) \right] - 2\bar{H}g} \quad (8.8)$$

Donde:

$$V_i(t) = C + \frac{H g k}{w} * \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} * \text{sen}(-wt) \quad (8.9)$$

$$P_i(t) = \rho g \left[H * \text{sen}(-wt) \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} - z \right] \quad (8.10)$$

Y V_m es la velocidad media.

Se puede estimar el caudal teórico que sale desde el dispositivo con cada ola mediante:

$$\dot{Q} = V_m * Area \quad (8.11)$$

Donde:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T V_f(t) dt \quad (8.12)$$

8.3.2. Bomba de ariete

8.3.2.1. Altura de entrada equivalente

Las bombas de ariete suelen ser diseñadas respecto a la altura de entrada del fluido, pero en el caso del ariete marino esta altura no existe por lo cual se utilizará H_E que corresponde a la altura equivalente de entrada del fluido respecto a la velocidad media que alcanza la ola, este parámetro será el de mayor importancia para el dimensionamiento y potencial del dispositivo.

$$H_E = \frac{V_m^2}{2g} \quad (8.13)$$

8.3.2.2. Altura de entrada equivalente corregida

Se describirá como altura de entrada equivalente corregida a la diferencia de altura entre la altura de entrada equivalente y la posición de la válvula de choque respecto al ducto principal. Para fijar la altura de la válvula de choque es necesario determinar la altura mínima que alcanza la columna de agua oscilante en el ducto.

$$H_{EC} = H_E - H_{min}$$

8.3.2.3. Tubería de suministro

La relación entre la tubería de suministro y el caudal debe cumplir la siguiente relación:

$$\frac{\bar{L}}{D} = 10 \text{ a } 500 \quad (8.15)$$

8.3.2.4. Celeridad de la onda de sobrepresión

La sobrepresión originada por el fenómeno del golpe de ariete se traslada dentro del ducto por medio de una onda. Es posible calcular la celeridad de esta onda con la siguiente expresión:

$$C_a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \frac{D}{e}}} \quad (8.14)$$

Donde:

D : Diámetro tubería (m)

e : Espesor de la tubería (m)

K : Modulo elástico $\left(\frac{m^2}{Kg}\right)$

Material de la tubería	K
Palastros de hierro y acero	0.5
Fundición	1
Hormigón (sin armar)	5
Fibro cemento	5.5 (5-6)
PVC	33.3 (20-50)
PE baja densidad	500
PE alta densidad	111.11

Figura 8.4 Modulo elástico para diferentes materiales

8.3.2.5. Presión interna

La presión interna que puede alcanzar el ducto pueden destruir el dispositivo si es que no se escoge correctamente el material y espesor de la tubería principal.

$$\Delta P = C_a * \rho * \Delta V \quad (8.15)$$

Donde:

C_a : Celeridad de la onda $\left(\frac{m}{s}\right)$

ρ : Densidad de fluido $\left(\frac{m^3}{kg}\right)$

ΔV : Variación de velocidad del fluido $\left(\frac{m}{s}\right)$

PN	Presión de Trabajo		
	Kgf/cm ²	mca	psi
6	6	60	90
8	8	8	120
10	10	10	150
12,5	12,5	125	188
16	16	160	240
20	20	200	300
25	25	250	500

Figura 8.5 Resistencia a la presión tubos PVC

8.3.2.6. Velocidad de cierre válvula de choque

Es importante tener en consideración la velocidad que puede alcanzar la válvula de choque para evitar inconvenientes:

$$U_c = 0.135 * C_{vi} \quad (8.16)$$

Donde:

U_c = Velocidad de cierra en la válvula $\left(\frac{m}{s}\right)$

C_{vi} = Carrera de la válvula de choque (mm)

8.3.2.7. *Fuerza de choque*

La fuerza de choque corresponde a la fuerza que ejerce el fluido en la válvula de choque lo que genera una onda de sobrepresión al cerrarse bruscamente, el determinar óptimamente la fuerza que ejerce nos ayudara a elevar una mayor altura:

$$F_a = C_a * A_v * \rho * \frac{V^2}{2g} \quad (8.17)$$

Donde:

F_a : Fuerza de arrastre (Kgf)

C_a : Coeficiente de arrastre (-)

A_v Area valvula de choque (m^2)

8.3.2.8. *Cámara de aire y ducto de entrega*

Es necesario que el volumen de aire contenido en la cámara de aire sea igual al volumen de agua en el ducto de entrega:

$$V_{ca} = V_e \quad (8.18)$$

$$V_{ca} = \frac{\pi(D_c)^2}{4} * h_{ca} \quad (8.19)$$

Donde:

V_{ca} : Volumen cámara de aire (m^3)

D_c : Diámetro cámara de aire (m)

h_{ca} : Altura cámara de aire (m)

$$V_{te} = \frac{\pi(\bar{d})^2}{4} * H_d \quad (8.20)$$

Donde:

V_{te} : Volumen agua contenida en tubería de descarga (m^3)

\bar{d} : diámetro ducto de descarga (m)

H_d : Altura de descarga (m)

8.3.2.9. Caudal de descarga

El caudal de descarga se puede estimar con la siguiente relación:

$$q = \frac{H_d}{H_{EC}} * R * Q \quad (8.21)$$

Donde:

H_d : Altura de descarga (m)

H_{EC} : Altura de entrada equivalente (m)

Q : Caudal de entrada ($\frac{m^3}{s}$)

Donde R tiene valores cercanos a:

H/h	2	3	4	6	8	10	12
R	0,85	0,81	0,76	0,67	0,57	0,43	0,23

Figura 8.6 Relación de eficiencia para bombas de ariete

Es importante señalar que la razón entra la altura máxima de descarga y la altura equivalente de entrada va aumentando a medida que la velocidad también lo hace [31].

8.3.2.10. Fuerzas en la bomba

Es importante tener una estimación de las fuerzas que el fluido realiza sobre el dispositivo para evitar una falla del mismo:

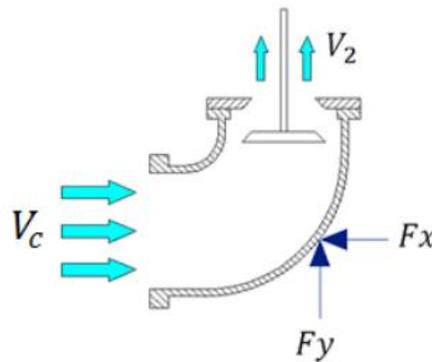


Figura 8.7 Fuerzas sobre el codo

$$\vec{F} = \rho Q \Delta \vec{V} \quad (8.22)$$

8.4. Condiciones del oleaje

El oleaje que impacta en la zona sur de laguna verde tiene las siguientes características:

$$H = 2.6 [m] \quad T = 10 [s]$$

Adema existe la siguiente relación entre a longitud de la onda y la profundidad de la costa:

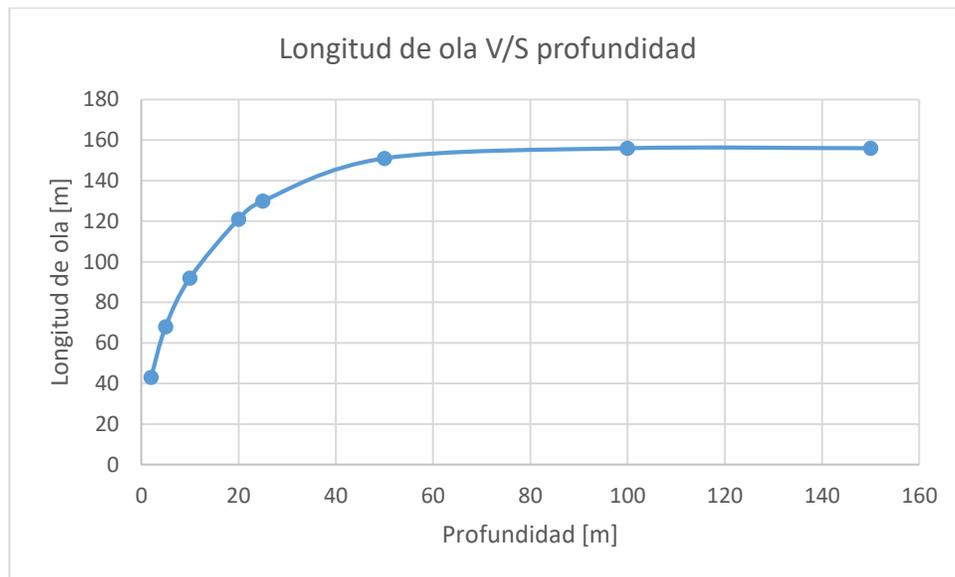


Gráfico 8.1 Variación de la longitud de la onda respecto a la profundidad

8.5. Dimensionamiento primera solución



Figura 8.8 Esquema comeolas

8.5.1. Comeolas

8.5.1.1. Elección del diámetro atrapaolas

Según la norma chilena NCH399 el tamaño máximo de ducto de PVC es de 400 [mm] por lo tanto se obtiene:

$$D_1 \geq 5,6 [m] \quad (8.23)$$

8.5.1.2. Ubicación vertical de dispositivo

Para asegurar un funcionamiento óptimo de la válvula de paso se debe ubicar en:

$$Z = -1,5 [m] \quad (8.24)$$

8.5.1.3. Relación de diámetro del atrapaolas y el ducto principal

La relación de diámetro asegura que la masa de ola capturada por el atrapaolas sea utilizada de la manera más óptima posible:

$$D_2 < 4,64 [m] \quad (8.25)$$

Por lo tanto, la elección de un diámetro de 400 [mm] garantiza un óptimo funcionamiento que corresponde al mayor tamaño comercializable de PVC según la norma chilena NCH399.

8.5.1.4. Ubicación de la válvula de paso y largo del ducto

Se debe asegurar que el flujo al interior del ducto principal este cercano a estar desarrollado para facilitar el movimiento de la válvula de paso para esto:

$$L \approx 2,5 [m] \quad (8.26)$$

8.5.1.5. Condiciones geográficas del lugar de emplazamiento

Con el dimensionamiento básico listo es necesario comprender la potencialidad del dispositivo según el lugar de emplazamiento, a continuación, se muestra la altura máxima que puede alcanzar el dispositivo según la profundidad y la amplitud de la ola:

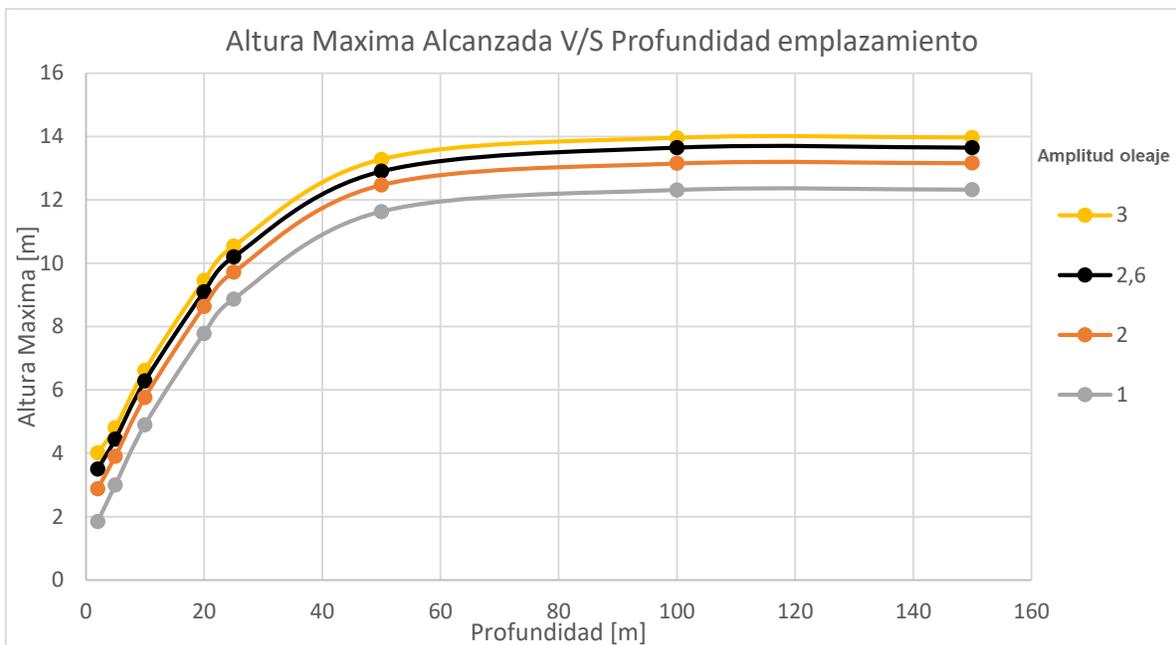


Gráfico 8.2 Altura máxima alcanzada respecto a la profundidad emplazamiento

Se puede observar la importancia de la profundidad para asegurar una buena relación altura/caudal, por lo tanto, la importancia del emplazamiento geográfico del dispositivo no lo vuelve factible para transformarse en una solución universal al bombeo de agua, pero si otorga un buen comportamiento si las condiciones cumplen los requerimientos.

8.5.1.6. Caudal y altura teórica del dispositivo

Se busca obtener el caudal para una ola de 2,6[m] con una profundidad de 10 [m], 15 [m], 20[m] y 50 [m] para estudiar la factibilidad técnica del caudal en el lugar de emplazamiento.

Se obtienen para una altura de 6 [m] sobre el nivel del mar los siguientes caudales con una manguera de 3 pulgadas y 8 [m] de largo conectada a un dispositivo de 5 [m] de largo:

Tabla 8.1 Caudal solución respecto a la profundidad

Profundidad [m]	Caudal [lt/min]
10	4,36
15	13,38
20	25,09
50	42,9

8.5.2. Bomba de ariete

8.5.2.1. Diagrama de la instalación

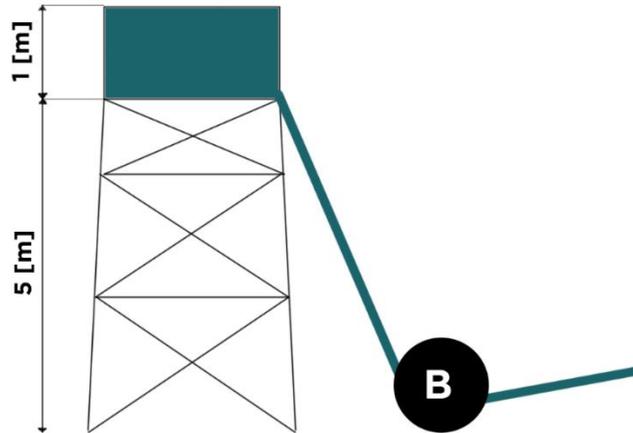


Figura 8.9 Diagrama de la instalación

8.5.2.2. Tubería de suministro

Se selecciona una tubería de 25 [mm] y con una tubería cercana a 6 [m] lo que cumple la relación entre el diámetro y el largo de la tubería.

8.5.2.3. Celeridad de la onda

Se calcula la celeridad de la onda para una tubería de para una tubería de PVC.

$$C_a \approx 117 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8.27)$$

8.5.2.4. Presión Interna

Se calcula la sobrepresión para determinar el espesor de la tubería de PVC.

$$\Delta P \approx 1050 [kPas] \quad (8.28)$$

Considerando la presión interna que puede alcanzar se escoge una tubería del tipo PN-12,5.

PN	Presión de Trabajo		
	Kgf/cm ²	mca	psi
6	6	60	90
8	8	8	120
10	10	10	150
12,5	12,5	125	188
16	16	160	240
20	20	200	300
25	25	250	500

Figura 8.10 Elección de tubería PVC

8.5.2.5. *Velocidad de cierre válvula de choque*

La válvula de choque tiene una carrera cercana a los 50 [mm] por lo tanto la velocidad promedio en la válvula de choque será:

$$U_c \approx 6.75 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8.29)$$

8.5.2.6. *Fuerza de choque*

La fuerza de choque es quizás el elemento más importante de la bomba de ariete, ya que el calcular correctamente la fuerza nos ayudara a seleccionar el peso de la válvula lo cual optimizara nuestro sistema:

$$F_a \approx 4.7 [KgF] \quad (8.30)$$

Considerando un factor de arrastre cercano a 1.17 y un diámetro de 32 [mm].

8.5.2.7. *Cámara de aire y ducto de entrega*

Se selecciona una manguera de 1 pulgada desde la bomba hasta el estanque final para esto será necesario construir una cámara de aire con un diámetro de 0.2 [m] y 0.55 de largo [m].

8.5.2.8. *Caudal de descarga*

Se puede realizar una estimación del caudal basado en la amplia literatura sobre el funcionamiento de las bombas de ariete, considerando los caudales de entrada se pueden tener los siguientes caudales de salida esperados para una altura de 25 [m]:

Tabla 8.2 Caudal descarga máximo comeolas

Profundidad [m]	Caudal entrada máximo [lt/dia]	Caudal salida máximo [lt/dia]
10	6280	955
15	18282	2782
20	36128	5497
50	61774	9400

Es necesario destacar que el caudal que puede alcanzar la bomba es mucho mayor, pero estará limitada por el caudal de entrada desde el mar, por lo tanto, los caudales de salida que se muestran son diarios y no necesariamente el caudal alcanzado en el instante de funcionamiento.

8.5.2.9. Fuerzas en la bomba

Siendo un caudal de $0.004 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ las fuerzas que debe resistir la bomba son:

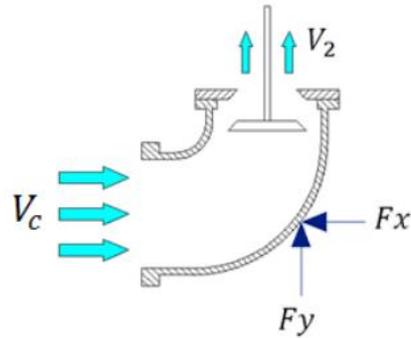


Figura 8.11 Fuerzas en el codo

$$\vec{F}_x = \rho Q \Delta \vec{V}$$

$$\vec{F}_x = 1000 * 0.004 * 9.98 \quad (8.31)$$

$$\vec{F}_x \approx 38.5 \text{ [n]} \quad (8.32)$$

$$\vec{F}_y = \rho Q \Delta \vec{V} \quad (8.33)$$

$$\vec{F}_y = 1000 * 0.004 * 9.5 \quad (8.34)$$

$$\vec{F}_y \approx 37 \text{ [n]} \quad (8.35)$$

8.6. Dimensionamiento segunda solución

La segunda solución consiste en montar directamente la bomba de ariete, esta solución tiene la dificultad de la instalación correcta de la válvula de choque para evitar que no funcione a su óptimo, que entre agua por su parte superior o su instalación incorrecta a lo largo del ducto que la contiene.

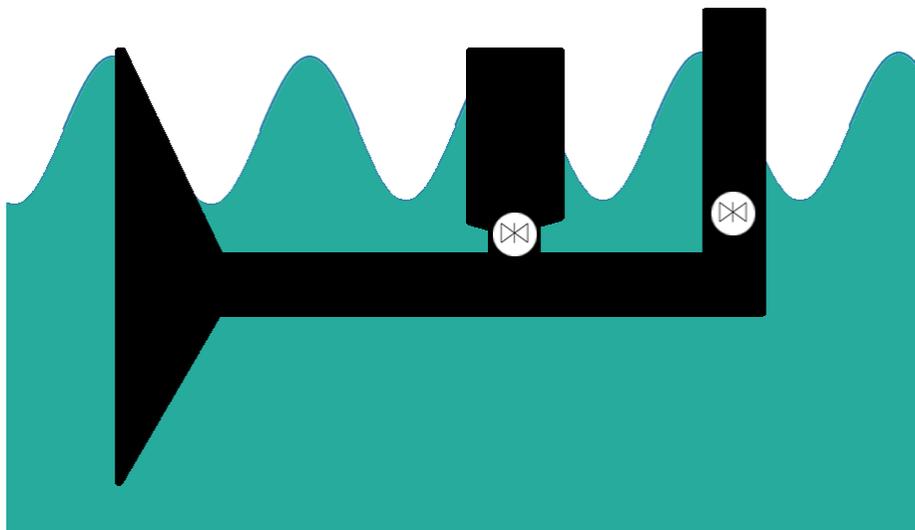


Figura 8.12 Esquema bomba de ariete marina

8.6.1. Atrapaolas

En primer lugar, es necesario instalar un ducto atrapaolas sin válvulas de paso que asegure un flujo desarrollado y una alta velocidad media.

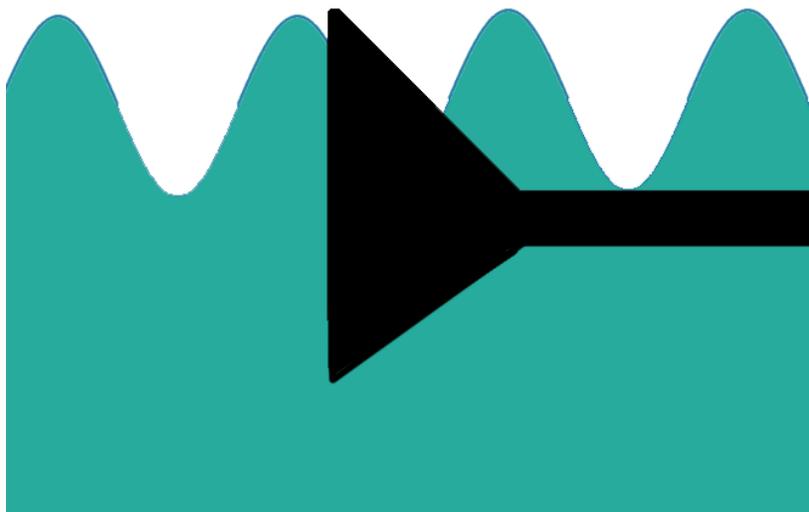


Figura 8.13 Esquema atrapaolas

8.6.1.1. Elección del diámetro atrapaolas

Según la norma chilena NCH399 el tamaño máximo de ducto de PVC es de 400 [mm] por lo tanto se obtiene:

$$D_1 \geq 5,6 [m] \quad (8.36)$$

8.6.1.2. Ubicación válvula vertical de dispositivo

Para asegurar un funcionamiento óptimo de la válvula de paso vertical se debe ubicar en:

$$Z = -1,5 [m] \quad (8.37)$$

8.6.1.3. Relación de diámetro del atrapaolas y el ducto principal

La relación de diámetro asegura que la masa de ola capturada por el atrapaolas sea utilizada de la manera más óptima posible:

$$D_2 < 4,64 [m] \quad (8.38)$$

Por lo tanto, la elección de un diámetro de 400 [mm] garantiza un óptimo funcionamiento que corresponde al mayor tamaño comercializable de PVC según norma nacional.

8.6.1.4. Largo del ducto

Se debe asegurar que el flujo al interior del ducto principal este cercano a estar desarrollado para facilitar el movimiento de la válvula de choque para esto:

$$L \approx 4 [m] \quad (8.39)$$

8.6.2. Bomba de ariete

8.6.2.1. Altura de entrada equivalente

Tal como se determinó en las mediciones la bomba de ariete marina funciona según la velocidad media que alcanza una ola en un ciclo, a continuación, se presenta la altura de entrada equivalente calculada con la velocidad media para distintas amplitudes con un periodo de 10 [s] a medida que aumenta la profundidad del emplazamiento de la bomba.

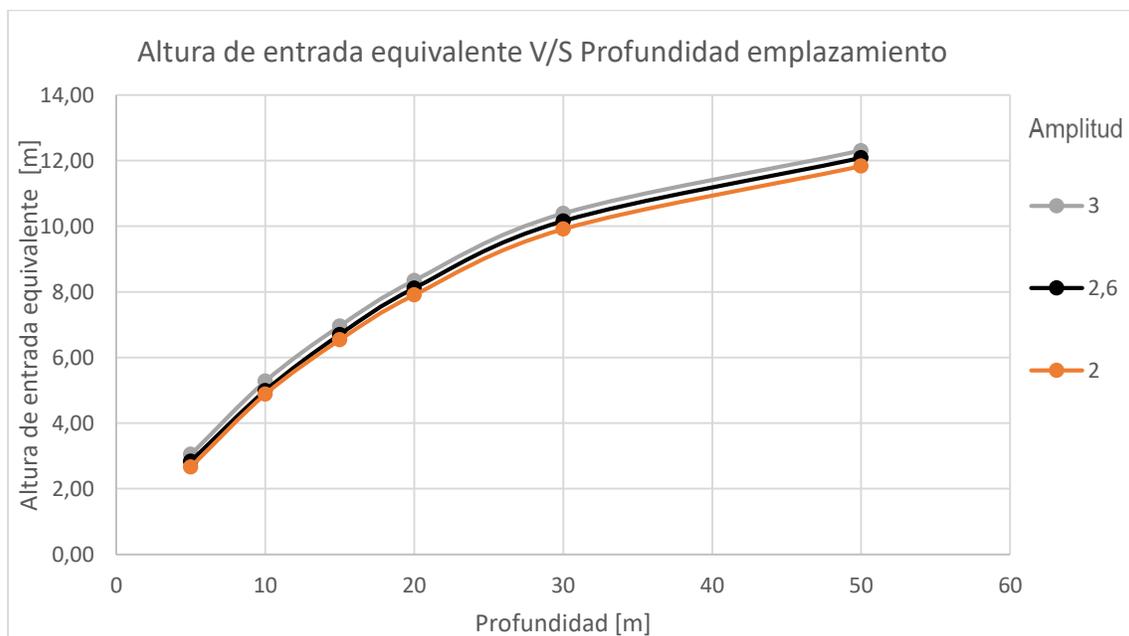


Gráfico 8.3 Altura de entrada equivalente respecto a profundidad de emplazamiento

Se puede observar que se obtiene una buena altura equivalente a bajas profundidades que transforman a este dispositivo en una tecnología atractiva para su uso.

En nuestro caso se instalará aproximadamente a una profundidad de 10 [m] donde se alcanzaría una altura equivalente de 5 [m] con la finalidad de comparar adecuadamente con la solución anterior, ya que esta es la profundidad mínima para que pueda funcionar la primera solución.

8.6.2.2. Celeridad de la onda

Se calcula la celeridad de la onda para una tubería de para una tubería de PVC.

$$C_a \approx 117 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8.40)$$

8.6.2.3. Presión interna

Se calcula la sobrepresión para determinar el espesor de la tubería de PVC.

$$\Delta P \approx 1170 \text{ [kPas]} \quad (8.41)$$

Considerando la presión interna que puede alcanzar se escoge una tubería del tipo PN-12,5.

PN	Presión de Trabajo		
	Kgf/cm ²	mca	psi
6	6	60	90
8	8	8	120
10	10	10	150
12,5	12,5	125	188
16	16	160	240
20	20	200	300
25	25	250	500

Figura 8.14 Elección tubería PVC

8.6.2.4. Posición válvula de choque

Es crítico determinar con precisión la posición vertical de la válvula de choque respecto al nivel del mar, ya que una válvula sobre este punto óptimo no aprovechara adecuadamente la velocidad media potencia que puede alcázar el dispositivo y una válvula ubicada bajo el punto óptimo será cubierta por agua de mar que dificultara su funcionamiento al agregar masa sobre esta.

Para determinar este punto se determinó la altura mínima que alcanza el agua dentro del dispositivo cuando la ola está en su punto más bajo para diferentes amplitudes con periodo de 10 [s] respecto a la profundidad de emplazamiento según la profundidad recomendada del dispositivo.

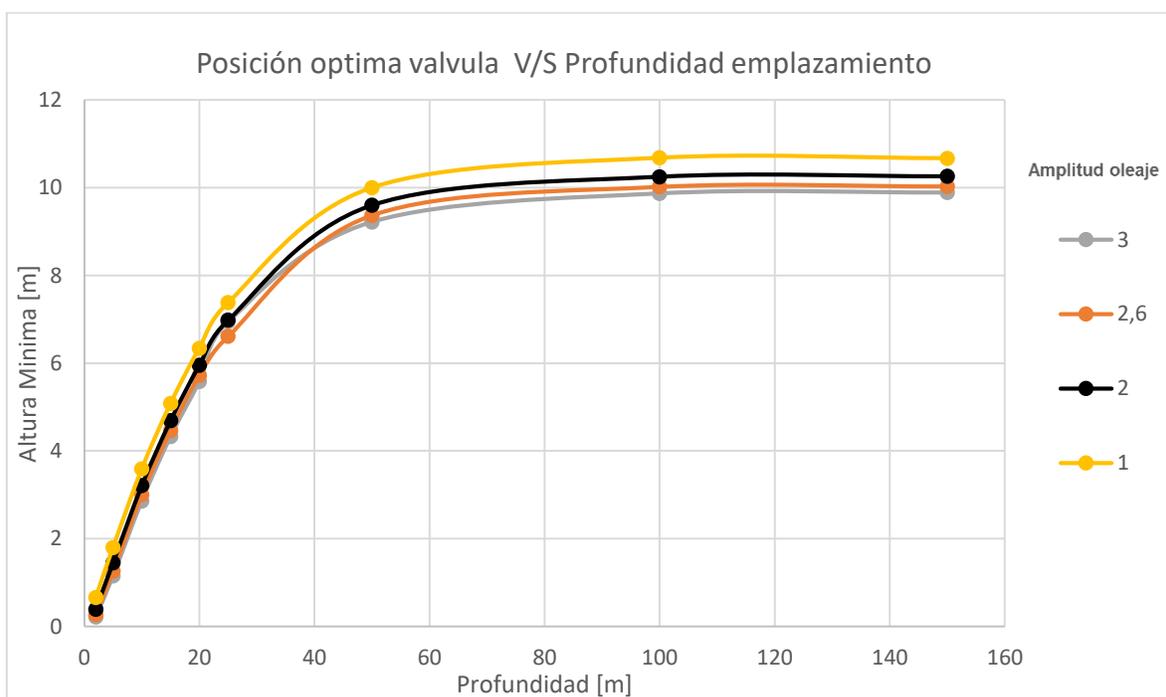


Gráfico 8.4 Posición óptima de la válvula respecto a la profundidad

Al utilizar una ola aproximada de 2,6 [m] de amplitud y una profundidad de 10 [m] la ubicación vertical deberá ser de 3 [m] respecto al centro del ducto principal.

8.6.2.5. *Altura de entrada equivalente corregida*

La necesidad de instalar la válvula de choque sobre la altura del ducto principal causa una pérdida de altura equivalente que es necesaria corregir para dimensionar correctamente la bomba de ariete marina.

A continuación, se presenta la altura equivalente corregida para un periodo de 10 [s]:

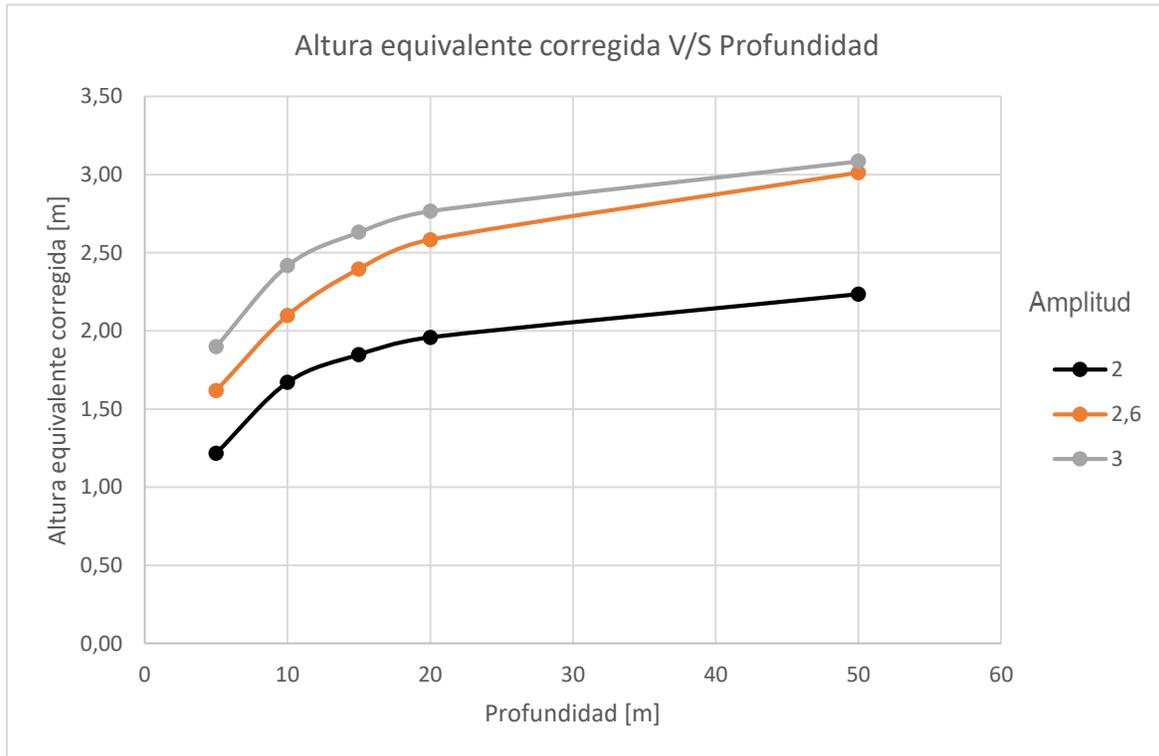


Grafico 8.5 Altura equivalente corregida respecto a la profundidad

Se puede observar la tendencia de la altura equivalente corregida y como esta tiende a estacar a medida que aumenta la profundidad. Para una profundidad de 10 [m] se tiene una altura equivalente corregida de 2,10 [m].

8.6.2.6. *Velocidad de cierre válvula de choque*

La válvula de choque tiene una carrera cercana a los 50 [mm] por lo tanto la velocidad promedio en la válvula de choque será:

$$U_c \approx 6.75 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8.42)$$

8.6.2.7. *Fuerza de choque*

La fuerza de choque es quizás el elemento más importante de la bomba de ariete, ya que el calcular correctamente la fuerza nos ayudara a seleccionar el peso de la válvula lo cual optimizara nuestro sistema:

$$F_a \approx 19 [KgF] \quad (8.43)$$

Considerando un factor de arrastre cercano a 1.17 y un diámetro de salida de 10 [cm].

8.6.2.8. *Cámara de aire y ducto de entrega*

Se selecciona una manguera de 2 pulgada desde la bomba hasta el estanque final para esto será necesario construir una cámara de aire con un diámetro de 0.25 [m] y 1,5 [m] de largo.

8.6.2.9. *Caudal de descarga*

Se puede realizar una estimación del caudal basado en la amplia literatura sobre el funcionamiento de las bombas de ariete para una altura de 25 [m]:

Tabla 8.3 Caudal de descarga máximo bomba de ariete marino respecto profundidad

Profundidad [m]	Caudal entrada máximo [lt/min]	Caudal salida máximo [lt/min]
5	5600	152
10	7500	204
15	8600	234
20	9500	259
30	10600	289
50	11600	316

Para una estimación más cercana del caudal de salida es necesario construir la bomba de ariete marina y tomar mediciones para determinar su eficiencia real de bombeo.

8.6.2.10. Fuerzas en la bomba

Siendo un caudal de $0.12 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ las fuerzas que debe resistir la bomba son:

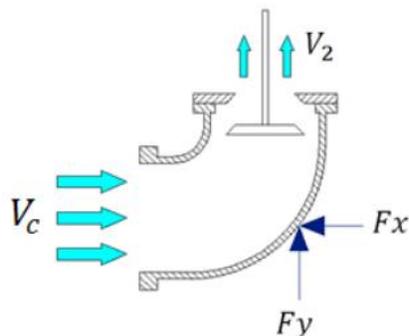


Figura 8.15 Fuerzas en el codo

$$\vec{F}_x = \rho Q \Delta \vec{V} \quad (8.44)$$

$$\vec{F}_x = 1000 * 0.12 * 7.44 \quad (8.45)$$

$$\vec{F}_x \approx 892 [n] \quad (8.46)$$

$$\vec{F}_y = \rho Q \Delta \vec{V} \quad (8.47)$$

$$\vec{F}_y = 1000 * 0.12 * 6.41 \quad (8.48)$$

$$\vec{F}_y \approx 770 [n] \quad (8.49)$$

8.7. Comparaciones caudales máximos entre soluciones

Tabla 8.4 Comparación caudales entre soluciones con 10 [m] de profundidad

Profundidad = 10 [m]	Caudal de salida máximo (m3/día)
Solución 1 Comeola + Ariete	0,95
Solución 2 Ariete marino	288

*Estos resultados teóricos se obtienen con el caso hipotético que los dispositivos funcionen 24 horas tanto en pleamar como bajamar.

8.8. Grafico caudal v/s altura teórico para la bomba de ariete marino

La segunda solución ofrece una mejor respuesta al problema del bombeo de ariete marino. A continuación, se presenta un gráfico caudal v/s altura teórico para la configuración de diseño, esto es decir una amplitud de 2,6 [m], un periodo de 10 [s], una profundidad de 10 [m] y un ducto de 0,4 [m] de diámetro.

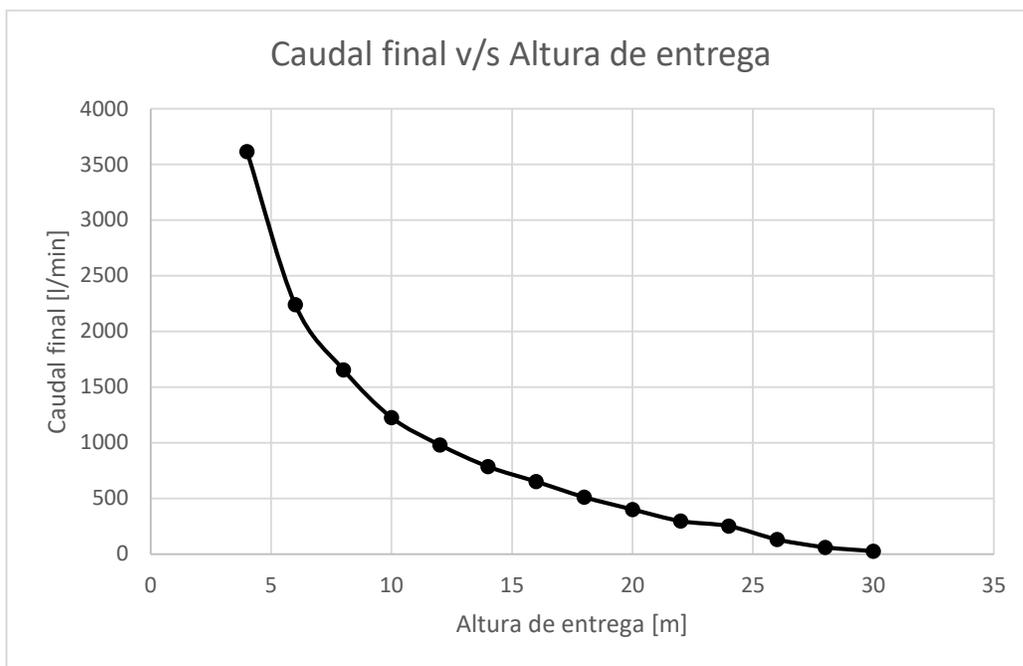


Grafico 8.6 Caudal final respecto a la altura de entrega de solución final

9. Verificación

Se verificarán las condiciones del oleaje con una profundidad de 10 [m], se utilizará el software comercial Ansys Fluent para realizar una simulación numérica del oleaje sobre el atrapaola esperando que las velocidades dentro del ducto sean similares a la esperada.

9.1. Procedimiento simulación oleaje

A continuación, se mostrará el procedimiento y las condiciones de borde necesarias para realizar el análisis deseado.



Figura 9.1 Procedimiento simulación

El software Ansys funciona por medio de módulos que realizan diferentes tareas:

- **Geometría:** En este módulo se importa o crea la geometría y se nombran las superficies para posteriormente dar condiciones de borde.
- **Mallado:** En este módulo se crea una malla con diferencias finitas que permiten realizar el análisis deseado
- **Configuración:** En este módulo es donde se seleccionan los modelos de viscosidad, las condiciones de borde y los valores iniciales.
- **Cálculos:** En este módulo se realizan los cálculos según las condiciones deseadas, además se exportarán los datos que se seleccionen previamente
- **Resultados:** En este módulo se puede manipular los resultados obtenidos por medio de gráficos y animaciones.

9.1.1. Geometría

El primer paso consiste en importar la geometría que se utilizara para la simulación y crear diferentes superficies que luego serán utilizadas para asignar las condiciones de borde.

La figura fue diseñada con el software Autodesk Inventor 2017 con el dimensionamiento del capítulo anterior.

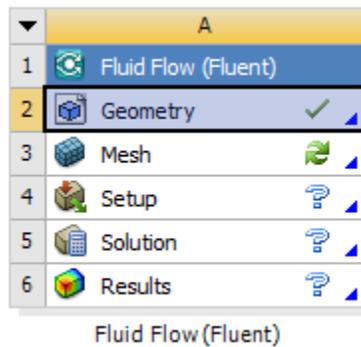


Figura 9.2 Geometria

Se seleccionan las distintas superficies de la geometría para asignarles un nombre repitiendo en procedimiento que se muestra a continuación:

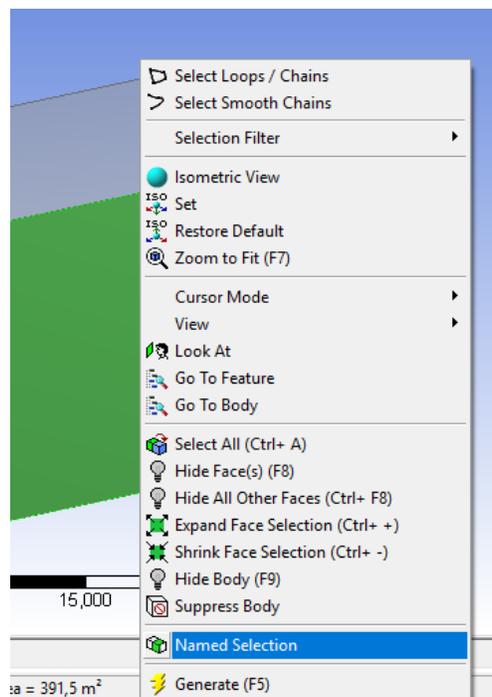


Figura 9.3 Seleccion de superficie

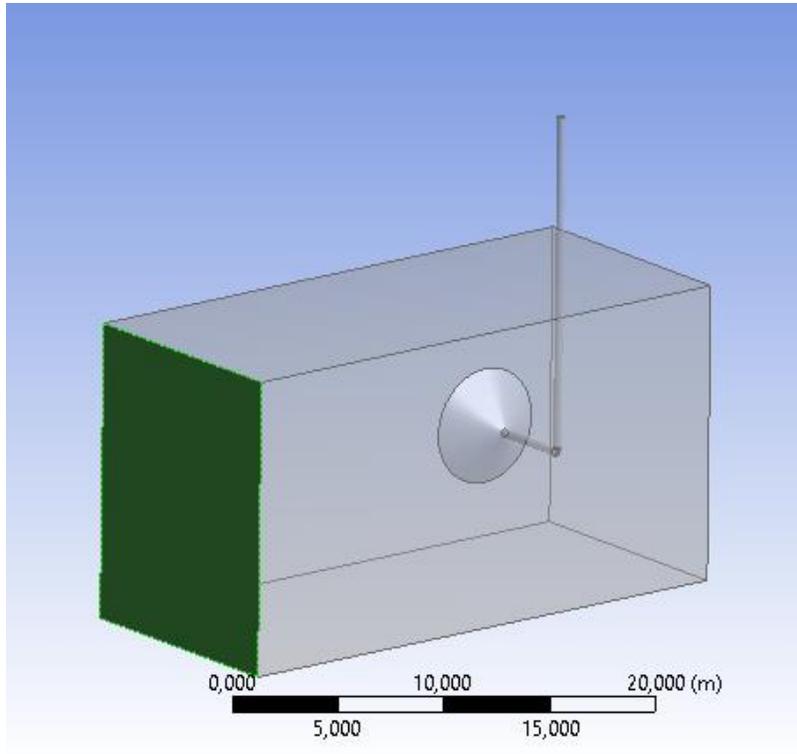


Figura 9.4 Superficies laterales

Details View	
<input type="checkbox"/> Details of simetria	
Named Selection	simetria
Geometry	2 Faces
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes
Include In Legend	Yes

Figura 9.5 Superficie nombrada como "simetría"

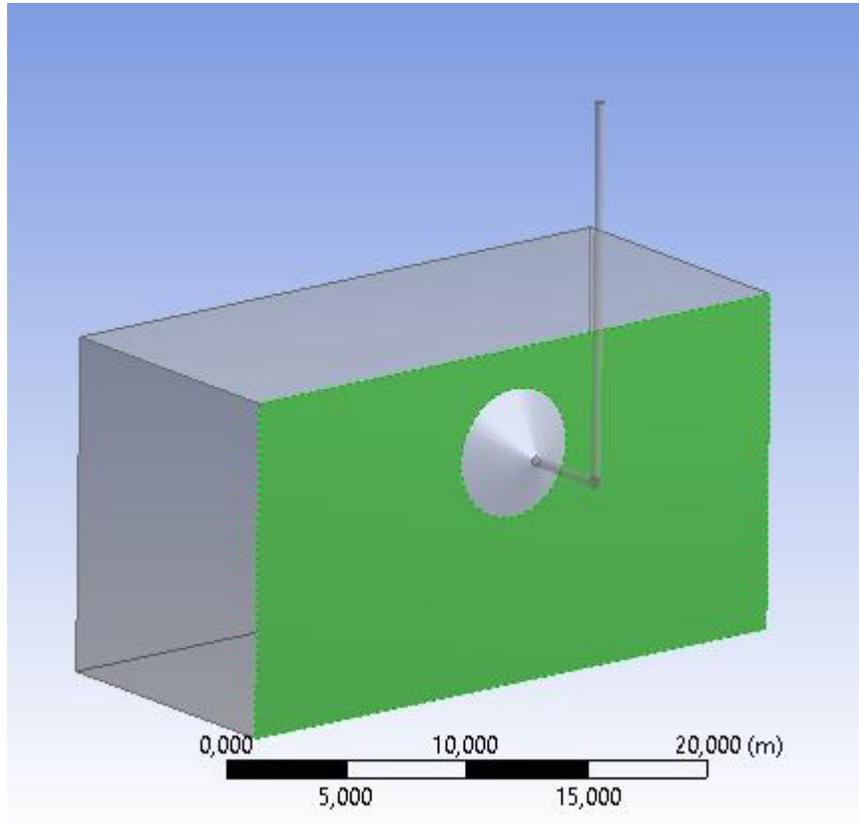


Figura 9.6 Superficie salida de mar

Details View	
Details of finoleaje	
Named Selection	finoleaje
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes
Include In Legend	Yes

Figura 9.7 Superficie nombrada como “finoleaje”

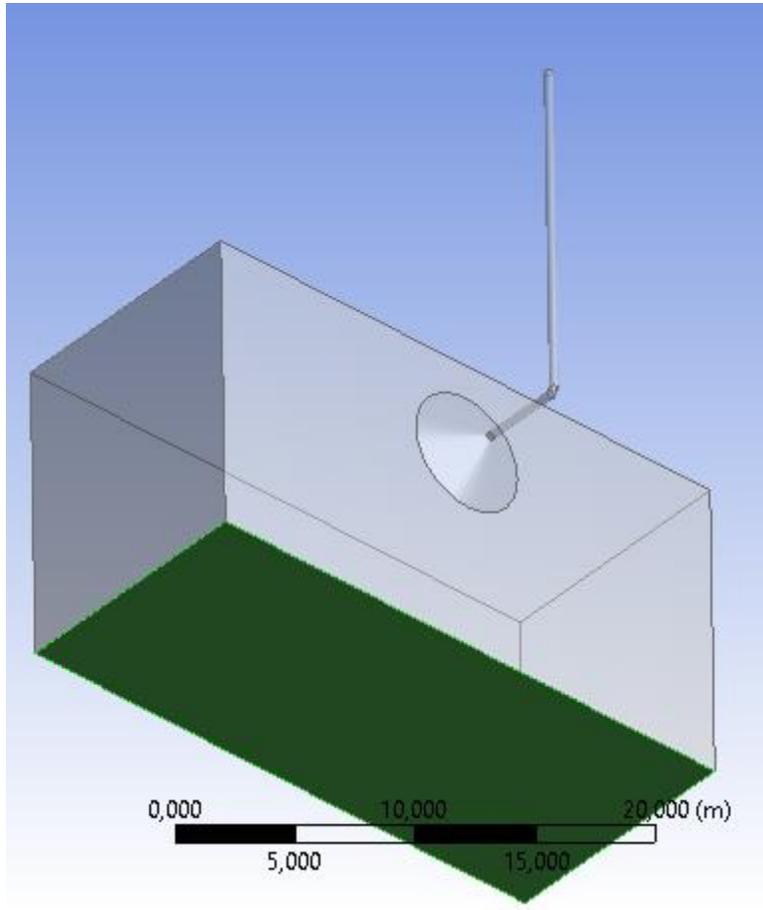


Figura 9.8 Superficie inferior

Details View	
<input type="checkbox"/> Details of suelo	
Named Selection	suelo
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes
Include In Legend	Yes

Figura 9.9 Superficie nombrada como "suelo"

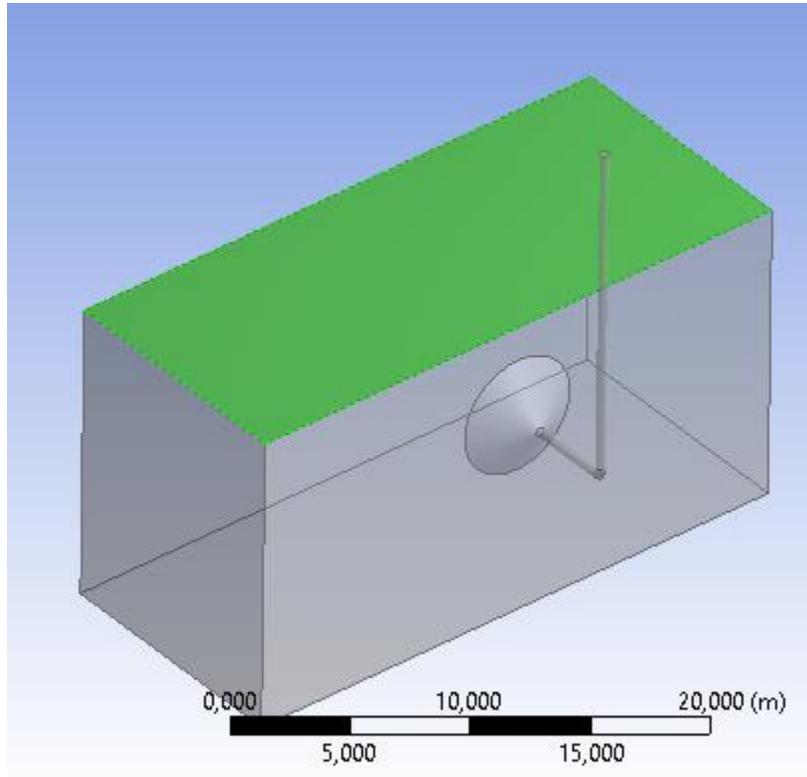


Figura 9.10 Superficie superior

Details View	
<input type="checkbox"/> Details of cielo	
Named Selection	cielo
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes
Include In Legend	Yes

Figura 9.11 Superficie nombrada como "cielo"

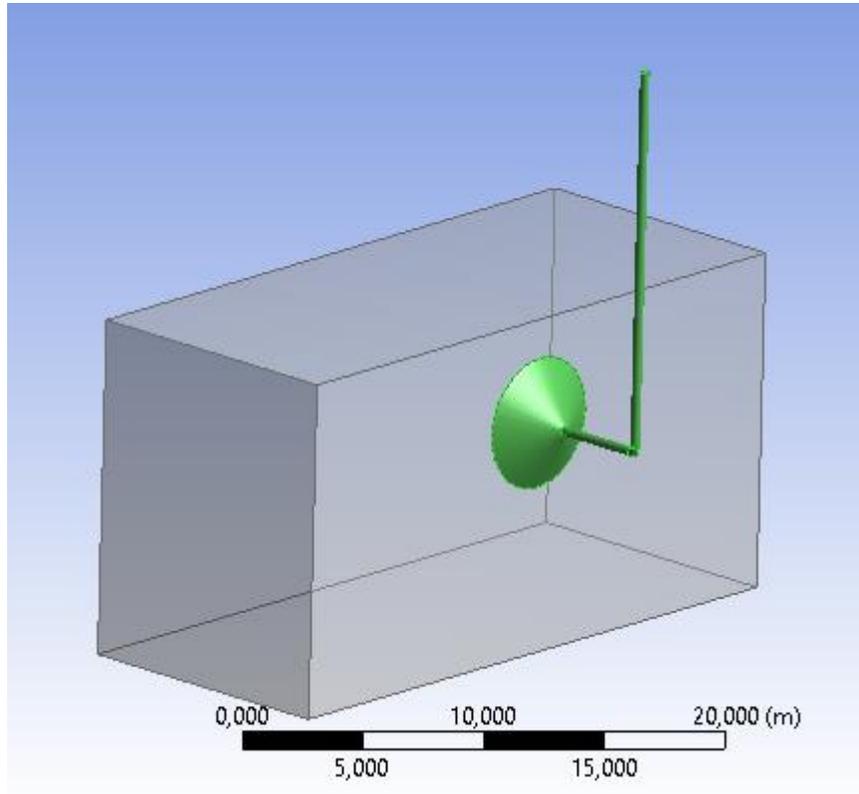


Figura 9.12 Superficie dispositivo atrapaolas

Details View	
<input type="checkbox"/> Details of tuberia	
Named Selection	tuberia
Geometry	2 Faces
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes
Include In Legend	Yes

Figura 9.13 Superficie nombrada como “tuberia”

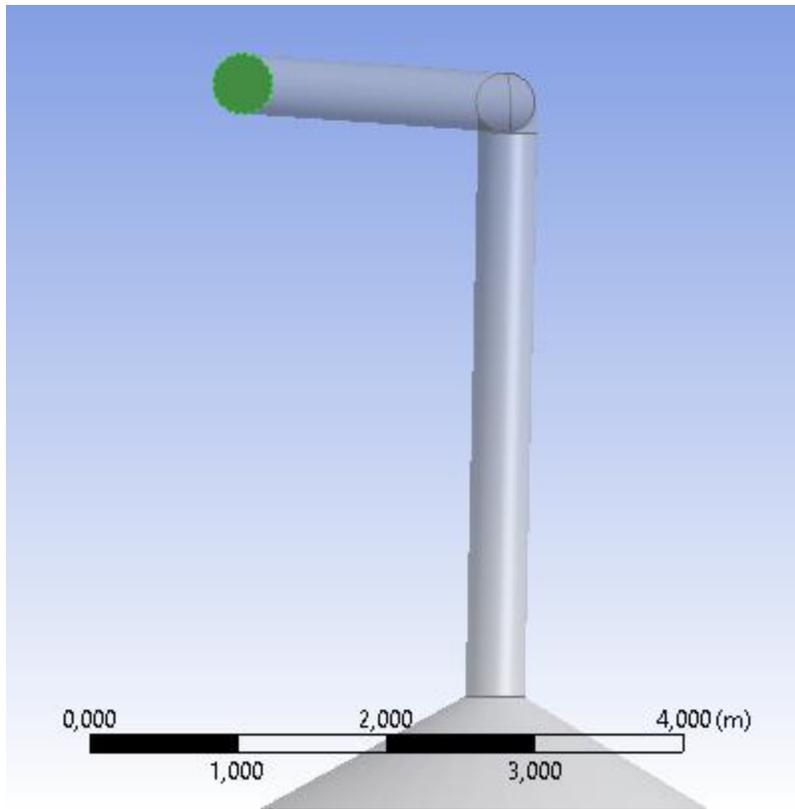


Figura 9.14 Superficie de interes

Details View	
<input type="checkbox"/> Details of outlet	
Named Selection	outlet
Geometry	1 Face
Propagate Selection	Yes
Export Selection	Yes
Include In Legend	Yes

Figura 9.15 Superficie nombrada como "outlet"

9.1.2. Mallado

Se procede al mallado de la geometría, al ser una figura relativamente simple se utiliza el mallado automático.

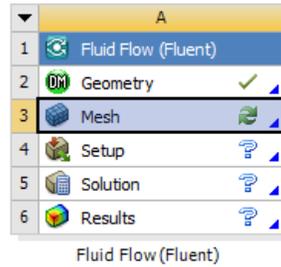


Figura 9.16 Mallado

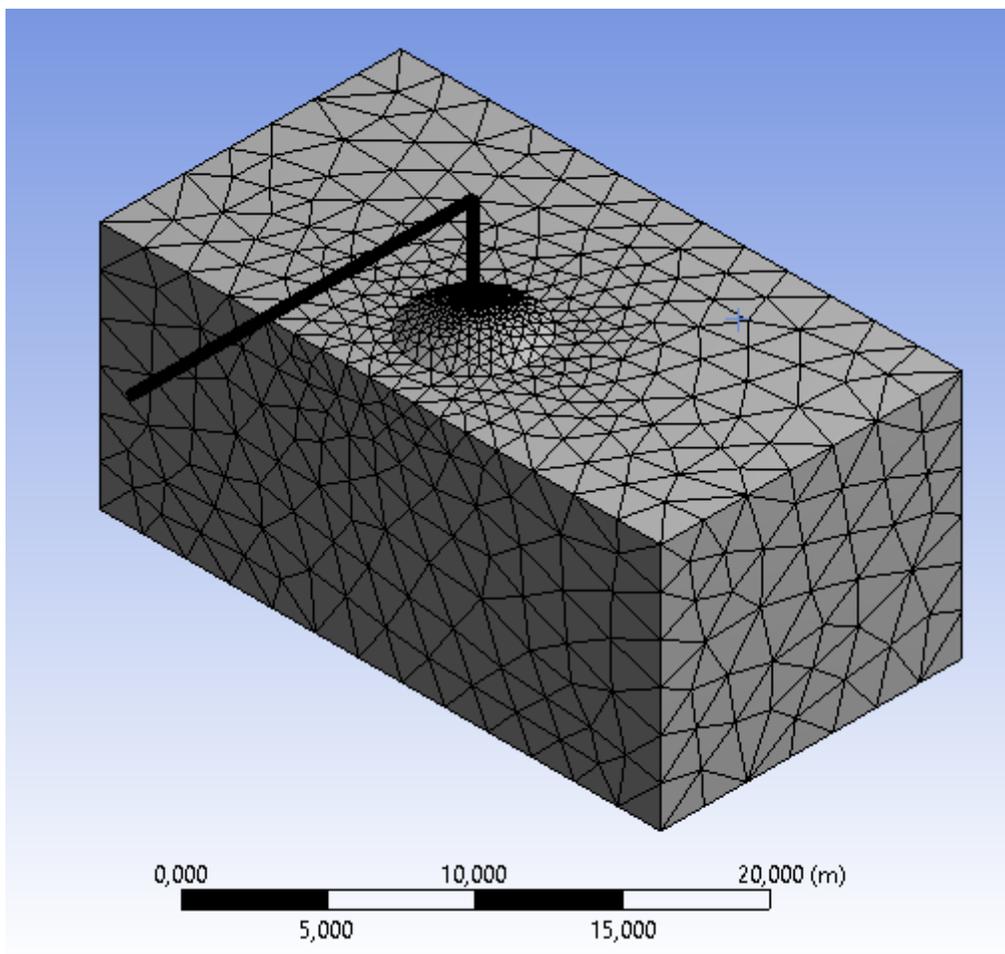


Figura 9.17 Vista de la malla

9.1.3. Configuración

Este es el modulo más importante en primer se definirán las condiciones generales del modelo, luego el modelo de viscosidad, las condiciones de borde y valores iniciales.

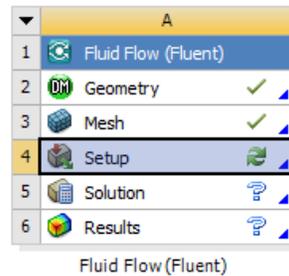


Figura 9.18 Configuración

Se configuran el fluido como transiente se le entrega valor a la gravedad en el eje z y se realiza un *check* para obtener las dimensiones generales de la geometría previamente importada.

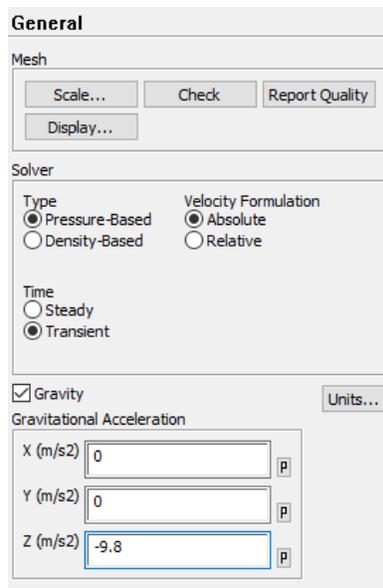


Figura 9.19 Configuración general

```
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -1.350000e+01, max (m) = 1.350000e+01
  y-coordinate: min (m) = -6.000000e+00, max (m) = 9.500000e+00
  z-coordinate: min (m) = -1.150000e+01, max (m) = 3.000000e+00
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 1.117238e-05
  maximum volume (m3): 2.178833e+00
  total volume (m3): 4.711396e+03
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 9.182037e-04
  maximum face area (m2): 3.565742e+00
Checking mesh.....
Done.
```

Figura 9.20 Información general

Se configura un modelo de viscosidad basado en las recomendaciones que realiza Ansys para modelar simulaciones de oleaje. Esto es mediante el modelo k-omega SST.

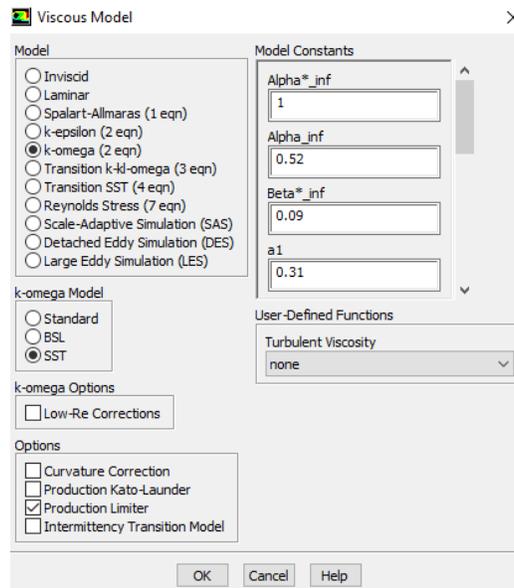


Figura 9.21 Elección modelo de viscosidad

Posteriormente se selecciona *Multiphase model* donde se crean dos fases y se asigna *open channel flow*, para crear un canal abierto a la gravedad y *open channel wave BC* para activar las opciones de oleaje.

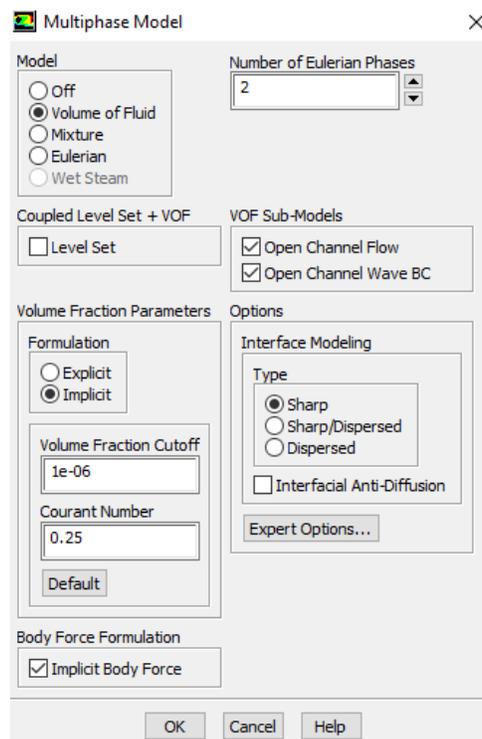


Figura 9.22 Configuración multifase

Creada las fases será necesario agregar el agua líquida a la segunda fase recién creada, siendo por defecto el aire para la primera fase.

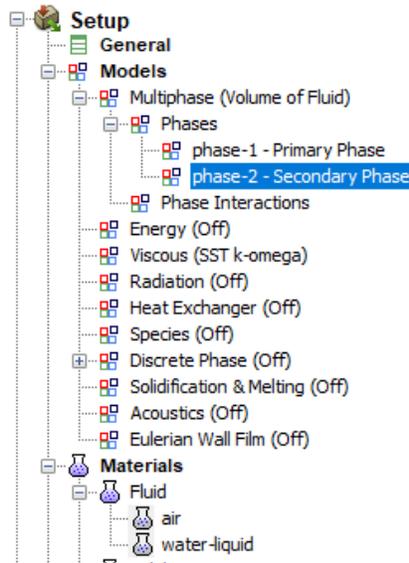


Figura 9.23 Selección segunda fase

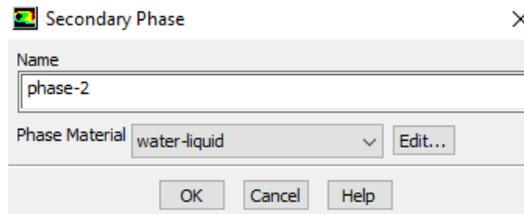


Figura 9.24 Selección de agua líquida como segunda fase

9.1.3.1. Condiciones de borde

La parte más importante será asignar correctamente las condiciones de borde a las superficies creadas con anterioridad.

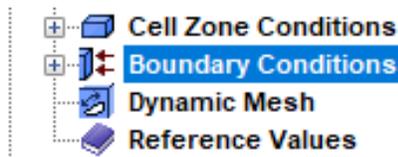


Figura 9.25 Condiciones de borde

Se comenzará configurando la superficie *inlet* con las condiciones del oleaje deseado. En primer lugar, se selecciona la opción *open channel wave BC*, luego se introduce la velocidad de traslación de la ola junto a su dirección, la velocidad de la ola es calculada por medio de la longitud de la ola y el periodo de la misma.

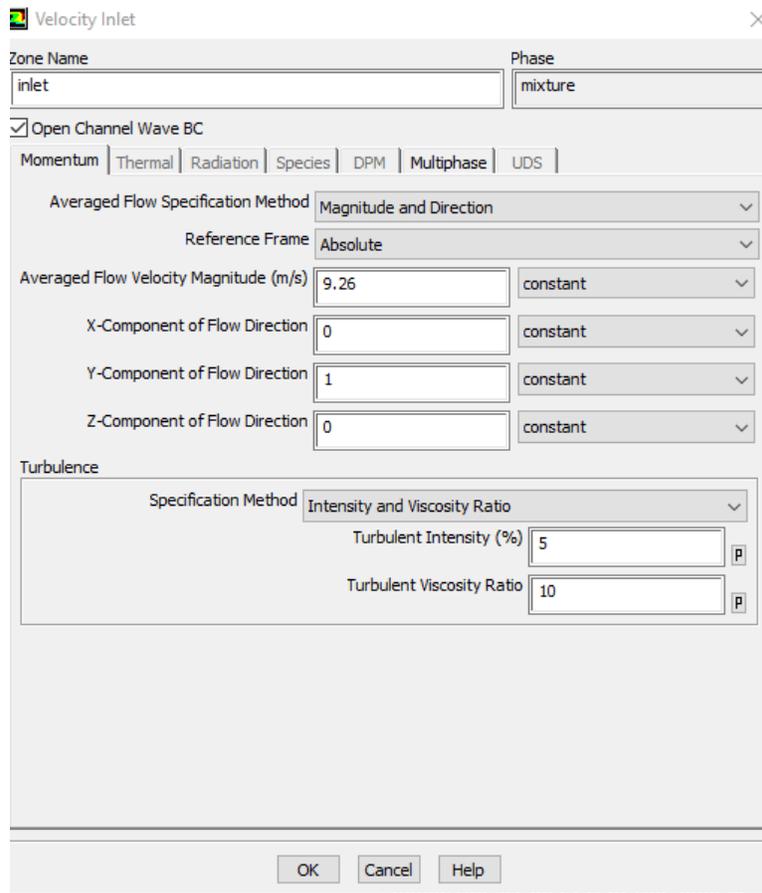


Figura 9.26 Dirección y velocidad de propagación de una ola

Para finalizar las opciones del *inlet* se selecciona la pestaña *multiphase* donde se le da valores a *free Surface level*, que corresponde al nivel de mar, y a *bottom level*, que corresponde a la profundidad del oleaje. Luego se selecciona la *wave theory* como *second order Stokes* que corresponde al modelo teórico de nuestro oleaje y posteriormente se introduce *wave height* que es la amplitud de la ola y finalmente *wave length* que corresponde la longitud de la onda.

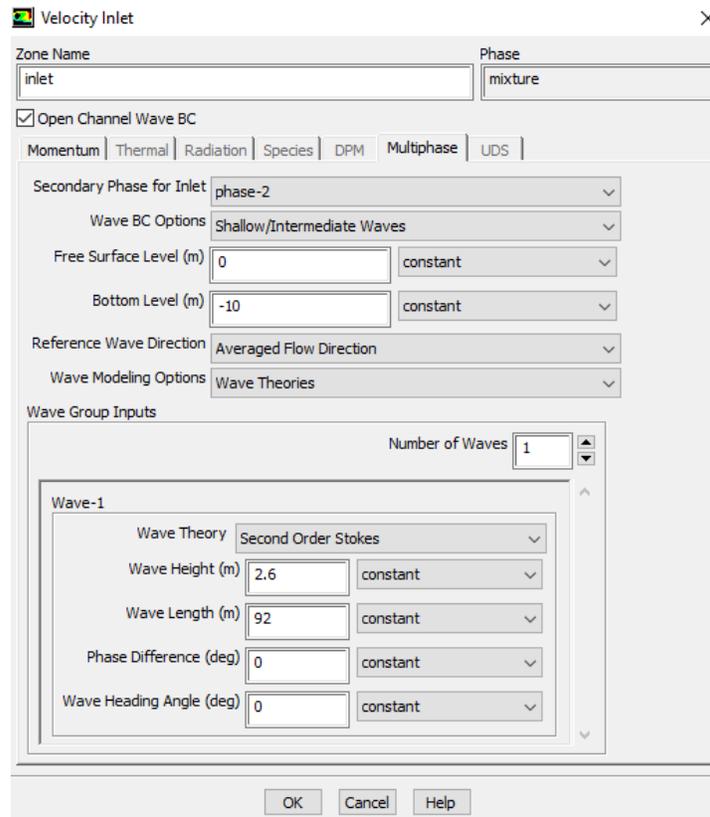


Figura 9.27 Características de la ola a modelar

Se continúa dando condiciones de borde a las superficies restantes siguiendo con las superficies laterales con *simmetry* para que esta superficie no interfiera en el análisis

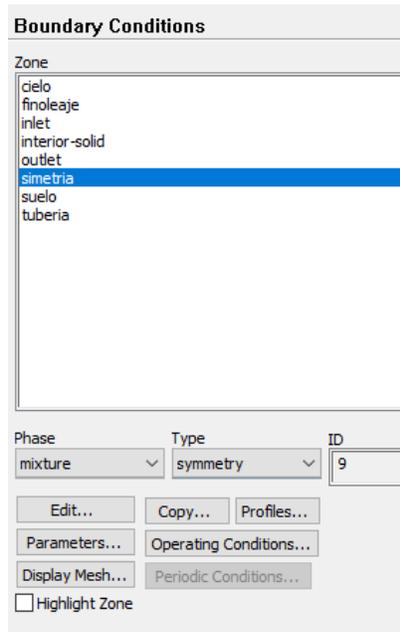


Figura 9.28 Condición de simetría a superficies laterales

Se le da la condición de *Wall* a la tubería y al suelo de modo que interfieran con el oleaje.

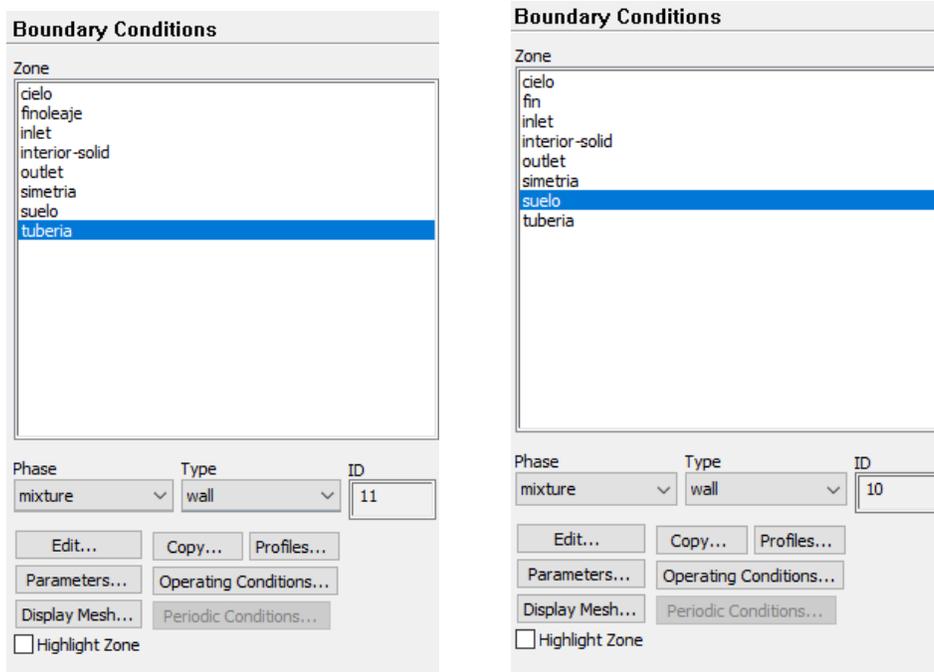


Figura 9.29 Condición "Wall" a dispositivo y suelo marino

Para finalizar las condiciones de borde se le asignara *pressure outlet* a la salida del dispositivo, a la superficie abierta a la atmosfera y la superficie donde el oleaje sigue su trayecto. Se asignarán nuevamente *free Surface level* y *bottom level*

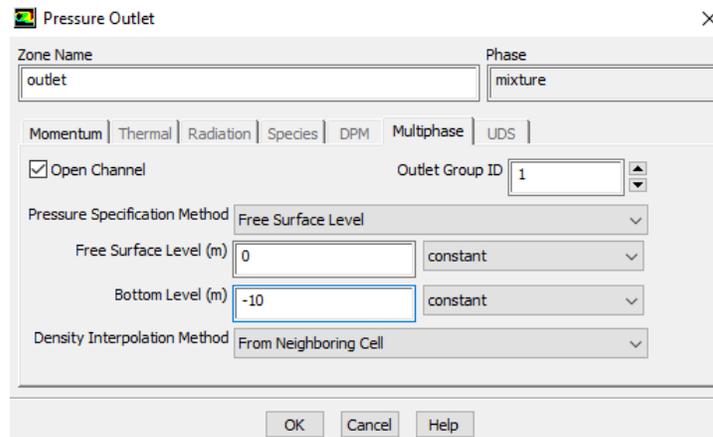


Figura 9.30 Configuración "pressure outlet"

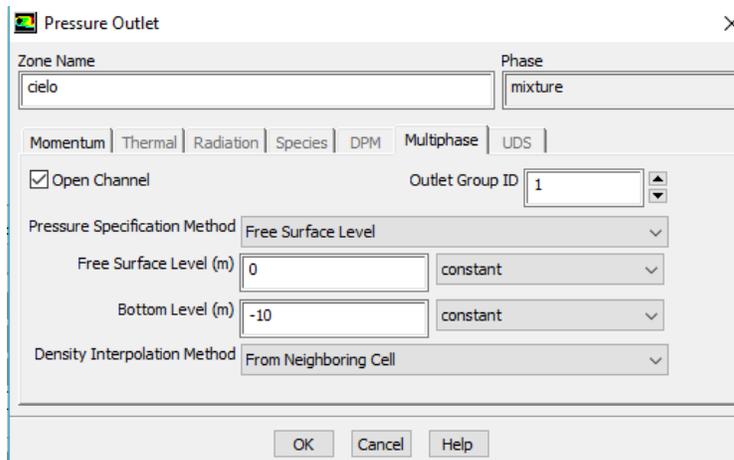


Figura 9.31 Configuración "pressure outlet"

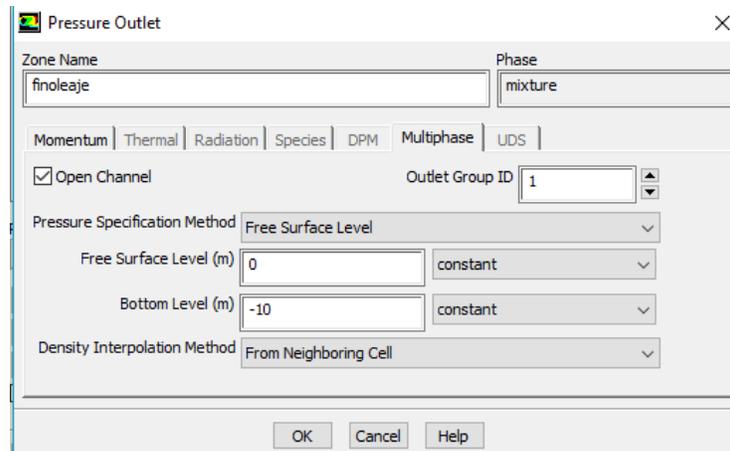


Figura 9.32 Configuración "pressure outlet"

Posteriormente se definen las *operating conditions* dando la ubicación de la presión de referencia y la densidad del aire.

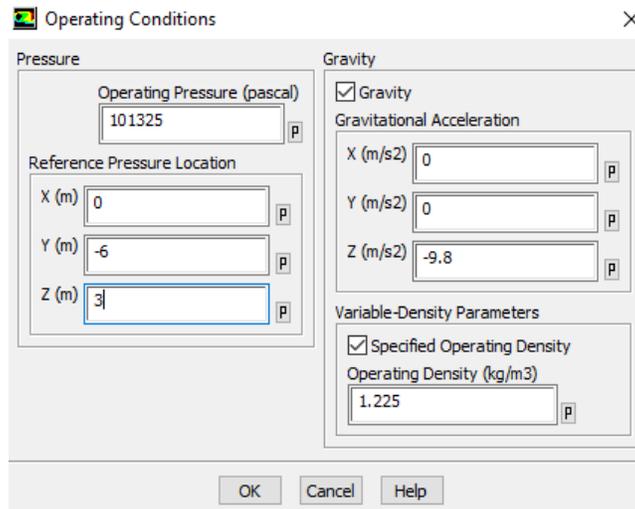


Figura 9.33 Condiciones de operación

9.1.3.2. Valores iniciales

Se establecen los valores iniciales según las recomendaciones que realiza Ansys para modelar oleaje.

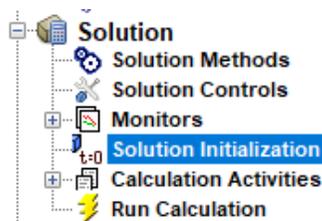


Figura 9.34 Valores iniciales

Se selecciona *hybrid initialization*, luego *compute from: inlet* y *open channel initialization method: flat*.

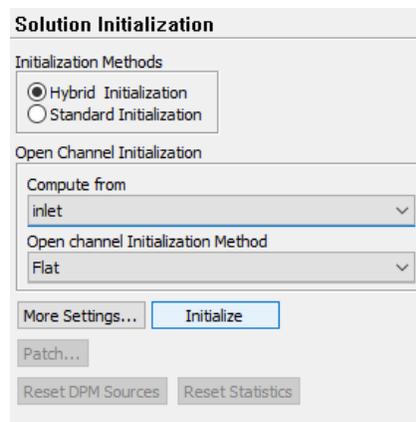


Figura 9.35 Método híbrido de iniciación

9.2. Resultados relevantes

9.2.1. Altura minima

Se puede observar como el agua siempre está sobre el ducto que contiene la válvula de retención y la altura minima del fluido dentro del ducto donde se instalara la válvula de choque es ligeramente menor a los 3 metros esperados, por lo tanto, se verifica a posición mínima de la válvula de choque.

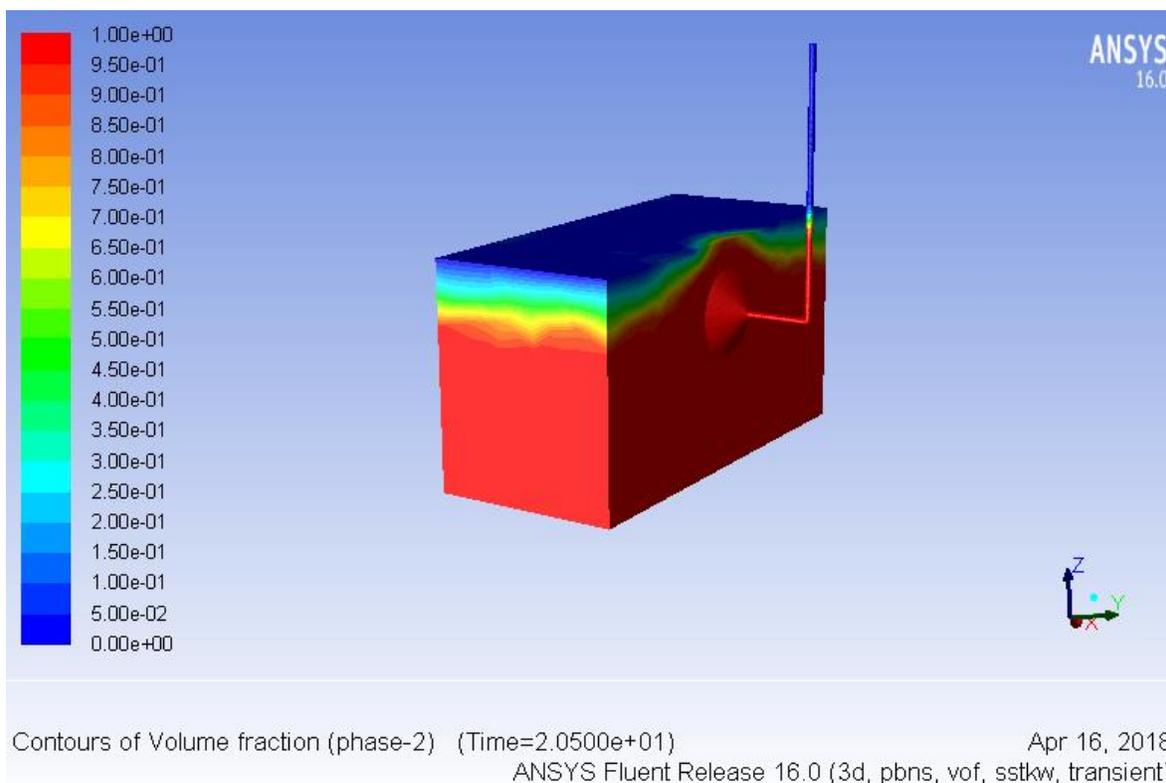


Figura 9.36 Visualización fase con altura minima

9.2.2. Presión relativa

Se puede observar como la presión relativa impulsa el agua dentro del atrapaola y como dentro de la tubería la presión desciende ligeramente en comparación a la presión externa.

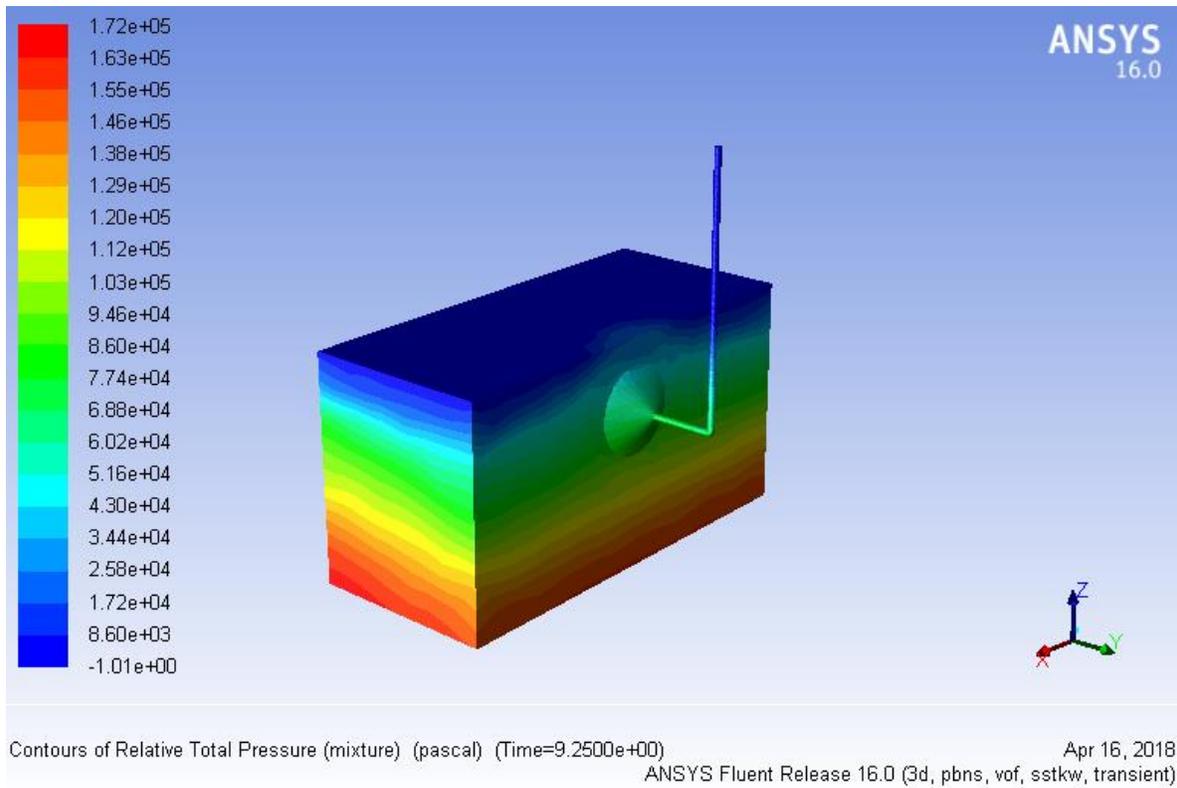


Figura 9.37 Visualización presión relativa

9.2.3. Velocidad mínima y máxima

Finalmente se puede observar como la componente de la velocidad en dirección de la propagación del oleaje alcanza una velocidad máxima cercana a $12.3 \left[\frac{m}{s} \right]$ la cual está dentro de lo esperado y una velocidad mínima cercana a $7.65 \left[\frac{m}{s} \right]$, por lo tanto el dispositivo tiene un comportamiento similar al esperado validando los resultados con un modelo de Stokes de 2° orden con los calculados con anterioridad con la teoría lineal.

Existe una ligera variación de la velocidad mínima siendo esta ligeramente menor a la calculada, aunque esto no cambia los resultados es importante indicar que una menor velocidad mínima es deseable para obtener una mayor altura equivalente corregida.

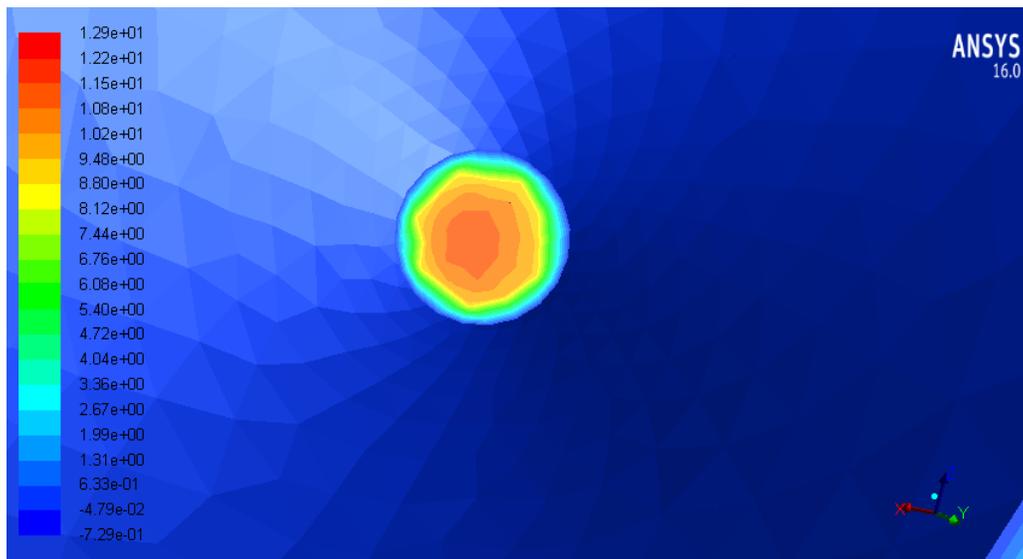


Figura 9.38 Velocidad máxima en el ducto

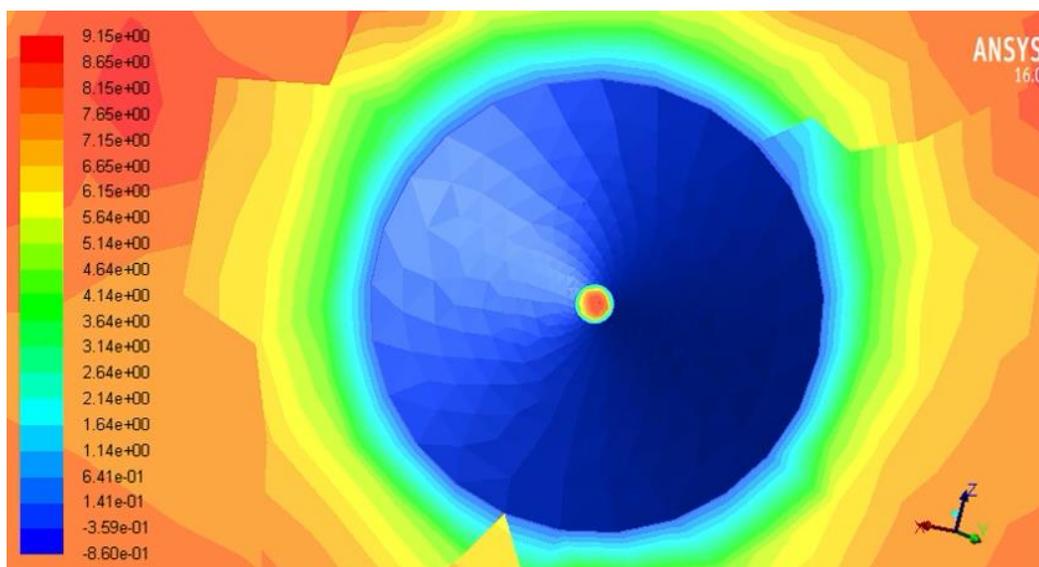


Figura 9.39 Velocidad mínima en el ducto

10. Consideraciones finales

Finalmente, con los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo se establecerán las potencialidades que tienen ambos dispositivos y un modelo de la bomba de ariete marina respecto al dimensionamiento y validación previamente realizados.

10.1. Potencial comeolas

El dispositivo comeolas tiene su principal ventaja en lograr direccionar el flujo del oleaje en una sola dirección mediante la válvula de retención, aunque corresponde a un dispositivo simple presenta una gran ventaja para la generación eléctrica en profundidades medias y costeras.

Uno de las principales desventajas de los dispositivos que intentan generar electricidad mediante turbinas es el desplazamiento positivo y negativo del fluido que impiden mover óptimamente las turbinas, para solucionar este problema se han utilizado tecnologías con turbinas Wells y el desplazamiento de aire, con menor densidad que el agua, o mediante el emplazamiento de los dispositivos a grandes profundidades aumentando los costos realizando grandes proyectos.

A continuación, se muestran las velocidades medias y caudales esperados del dispositivo comeolas respecto a la profundidad para 1 [m] y 2 [m] de diámetro, ya que sobre 1 [m] es posible instalar turbinas de generación eléctrica.

10.1.1. Velocidad media y caudal por ola para tubería con 1 [m] de diámetro.

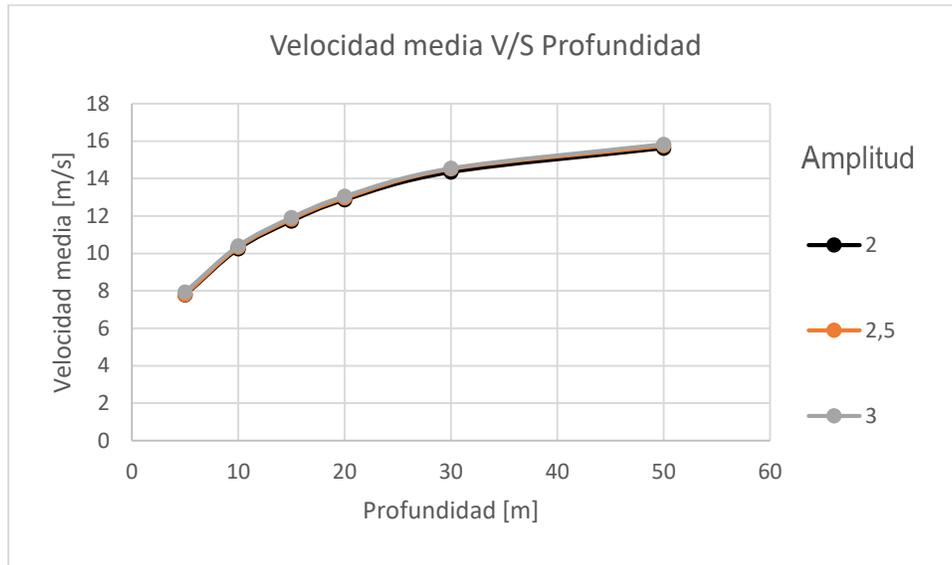


Grafico 10.1 velocidad media de una ola con tubería de 1 [m] de diámetro respecto a la profundidad

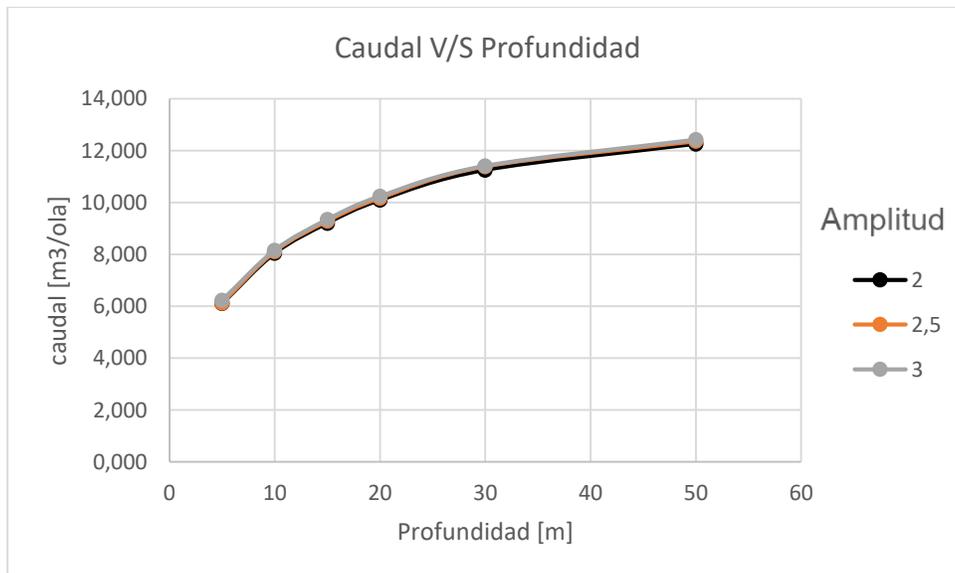


Grafico 10.2 Caudal de una ola con tubería de 1 [m] de diámetro respecto a la profundidad

10.1.2. Velocidad media y caudal por ola para tubería con 2 [m] de diámetro.

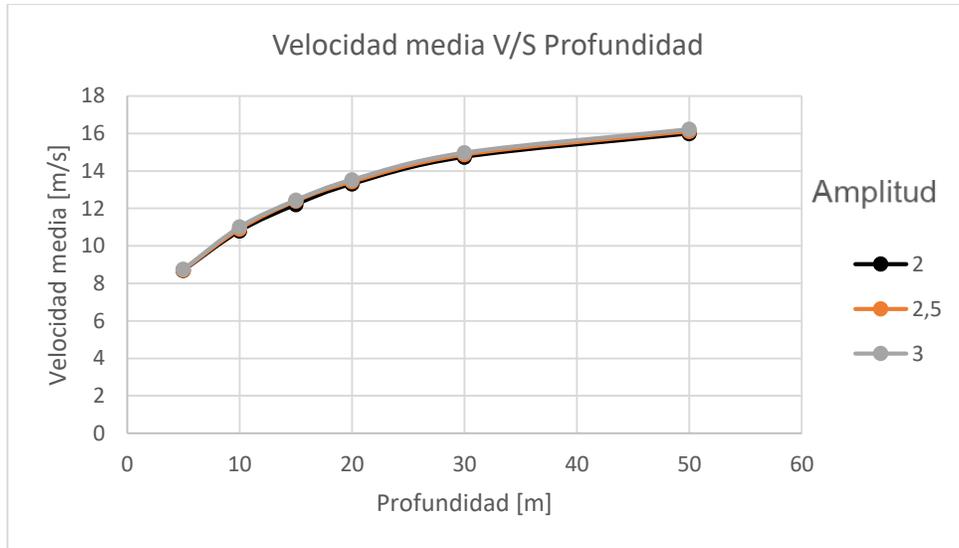


Grafico 10.3 Velocidad media de una ola con tubería de 2 [m] de diámetro respecto a la profundidad

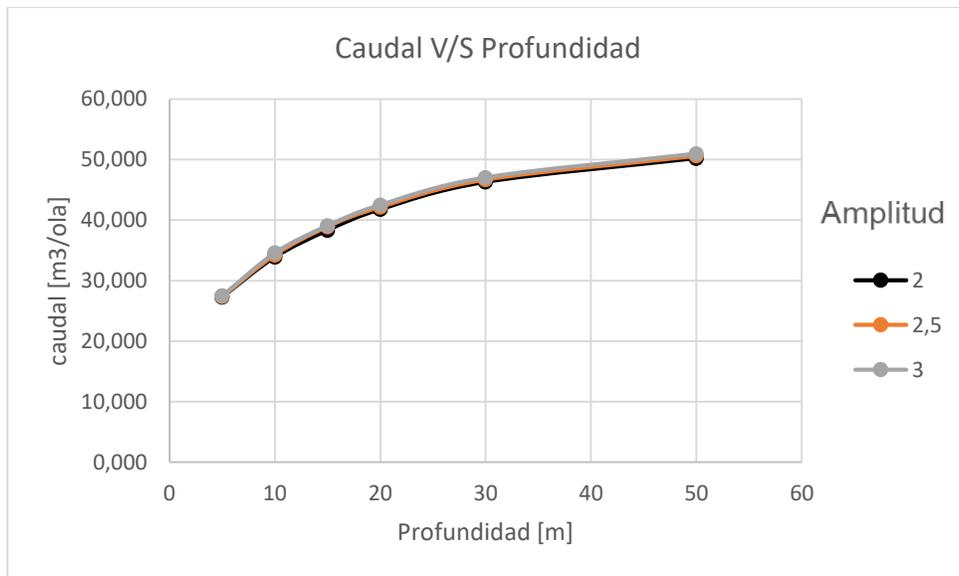


Grafico 10.4 Caudal de una ola con tubería de 2 [m] de diámetro respecto a la profundidad

10.2. Potencial bomba ariete marina

La bomba de ariete marina presenta un gran potencial para el bombeo de agua de mar y su posterior uso, además de presentar una innovación respecto al uso que actualmente se hace de las bombas de ariete.

El dispositivo presenta dos grandes desventajas el primero corresponde a la necesidad de grandes caudales debido a las pérdidas que presenta el dispositivo y la segunda desventaja corresponde a la dificultad teórica de dimensionar esta tecnología debido a las diferencias que existen entre los modelos matemáticos el oleaje y el oleaje real.

A continuación, se presenta la altura equivalente corregida para un diámetro de 1 [m] y 2 [m] se puede observar el considerable aumento de caudal y altura equivalente corregida.

10.2.1. Altura equivalente corregida para tubería con 1 [m] de diámetro.

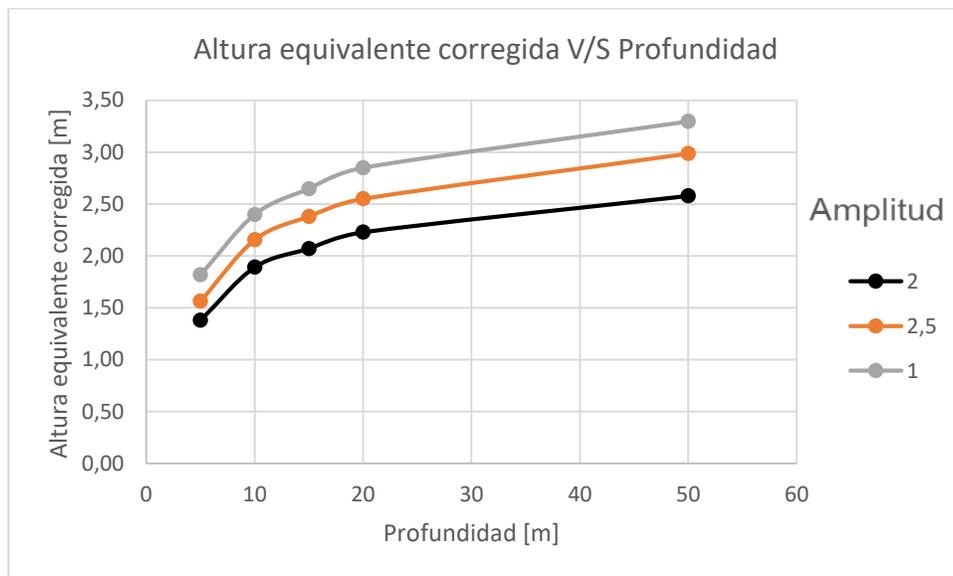


Grafico 10.5 Altura equivalente corregida con tubería de 1 [m] de diámetro respecto a la profundidad

10.2.2. Altura equivalente corregida para tubería con 2 [m] de diámetro.

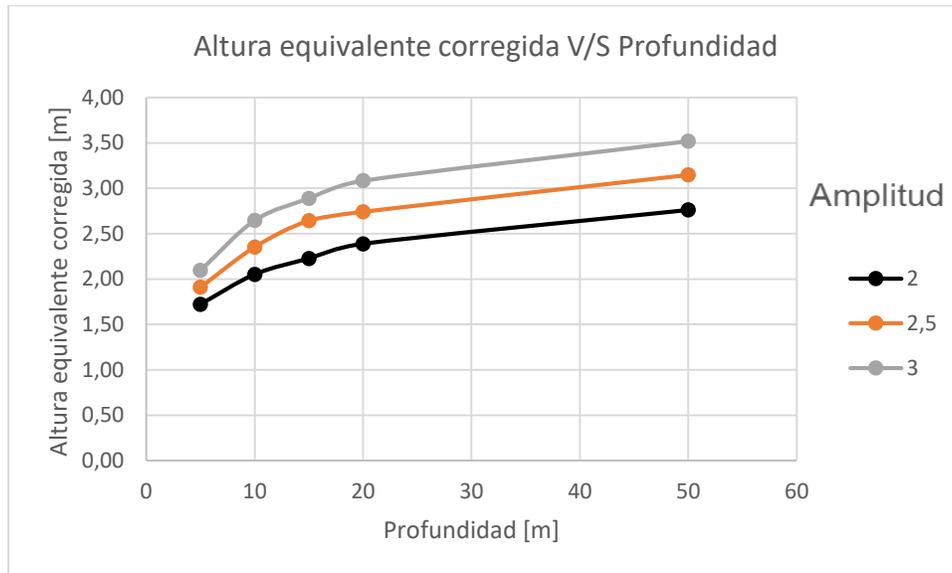


Grafico 10.6 Altura equivalente corregida con tubería de 2 [m] de diámetro respecto a la profundidad

10.3. Modelo bomba ariete marina

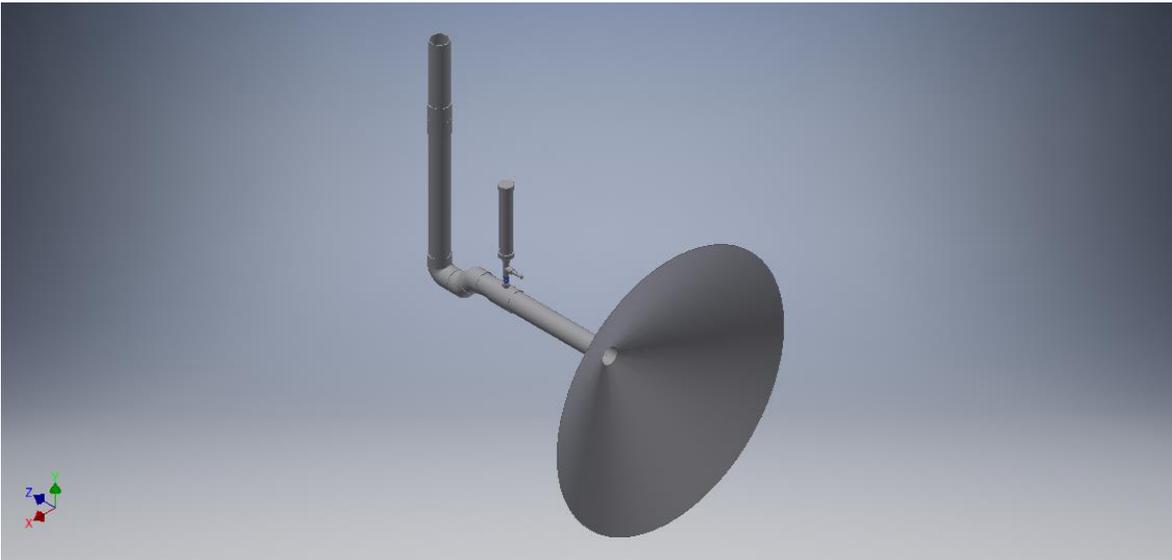


Figura 10.1 Modelo final bomba de ariete marina

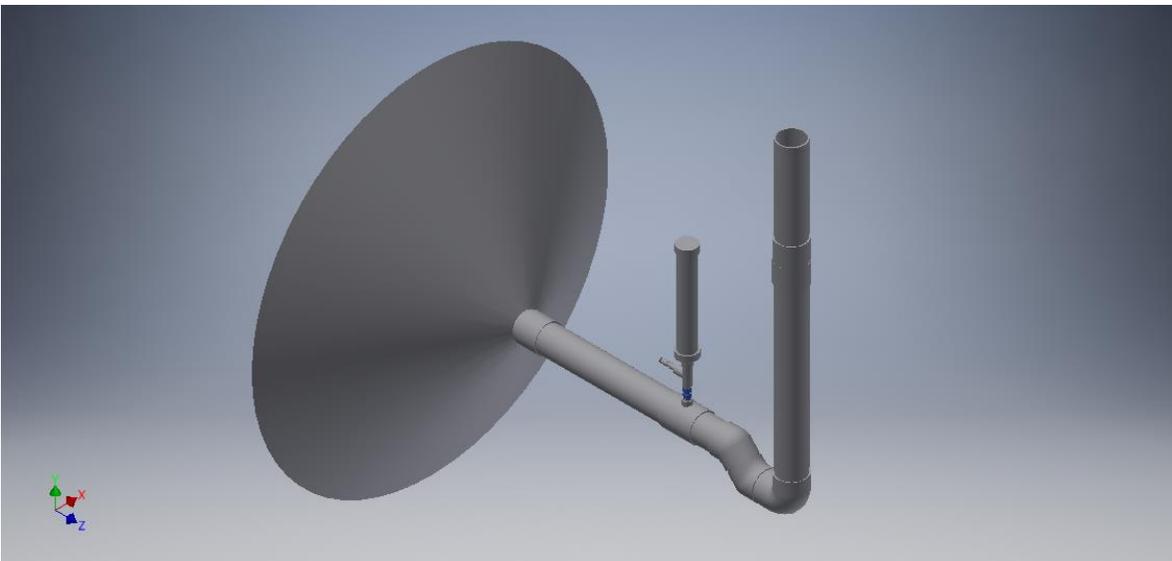


Figura 10.2 Modelo final bomba de ariete marina

10.4. Futuras mejoras

Existen al menos cuatro áreas en donde es necesario investigar y desarrollar para mejora el rendimiento de ambos dispositivos estos son materialidad, emplazamiento, geometría del atrapaolas y optimización de la válvula de choque.

10.4.1. Materialidad

Los actuales dispositivos fueron diseñados y dimensionados para su construcción en PVC. Si se quisiera escalar los dispositivos a un mayor tamaño será necesario buscar otros materiales que cumplan las desfavorables condiciones del agua de mar junto al aumento de magnitud de la onda de sobrepresión por el cambio de material como el fibrocemento o el acero galvanizado.

10.4.2. Emplazamiento

El emplazamiento del dispositivo debe cumplir varios requisitos para aprovechar el potencial de los dispositivos como soportar las sollicitaciones, funcionar tanto en pleamar como en bajamar y mantenerse fijos sobre el mar.

10.4.3. Geometría atrapaolas

El atrapaolas se ha dimensionado de tal forma que la altura de la ola incidente no pierda la energía que desplaza por su propia altura.

Se logra observar en las costas que al encausar el oleaje incidente mediante dos grandes paletas verticales este aumenta su velocidad de propagación y su altura. El estudio de este fenómeno puede significar una gran mejora a los dispositivos.

10.4.4. Válvula de choque sumergida

Es posible optimizar la bomba de ariete marina si es que se optimiza la válvula de choque de tal manera que funcione sumergida. La principal razón para que la válvula de choque este hacia la atmosfera es debido a la baja densidad del aire produce una fuerza de reacción despreciable.

10.4.4.1. Válvula de choque vertical

Si se considerara el peso de la masa de agua sobre la válvula de choque para aumentar la altura equivalente se podría aumentar entre 0,3 y 0,5 [m], aunque a medida que la válvula de choque aumenta su velocidad el agua ejercerá una mayor resistencia impidiendo el correcto funcionamiento de la misma.

10.4.4.2. Válvula de choque horizontal

Es teóricamente posible instalar la válvula de choque de forma horizontal en la bomba de ariete marina para aumentar notablemente la altura equivalente, sin embargo, las mediciones realizadas en el canal de olas mostraron dos inconvenientes que pueden ser corregidos con un mayor análisis. Existe el riesgo que al acortar la longitud del ducto principal el flujo no se desarrolle correctamente y no permita una correcta traslación de la onda de sobrepresión, también es necesario notar que al ser el agua un fluido que genera una alta resistencia a la válvula de choque será necesario estudiar el comportamiento del área de la válvula de choque respecto a distintas velocidades para lograr diseñar una válvula que optimice notoriamente la bomba de ariete marina.

11. Conclusiones

- El potencial energético del mar frente a otras fuentes de energías renovables como la eólica y la solar es claramente superior, además la oportunidad estratégica de nuestro país frente a la energía del mar desde la zona centro a la austral del país entrega una posibilidad de aprovechamiento energético único en el mundo.
- El potencial energético del oleaje en nuestro país y especialmente en las zonas con menor radiación del país le da una gran ventaja para el desarrollo e investigación de dispositivos de aprovechamiento energético, aunque la materialidad en la construcción y los altos costos de mantenimiento son actualmente la gran desventaja de este tipo de tecnología frente a otras alternativas energéticas.
- El canal de olas para la experimentación y escalado de prototipos es una alternativa con gran potencial para el entendimiento y estudio de factibilidad de dispositivos undimotrices aunque presenta claras limitaciones respecto al escalado de ciertas propiedades, la dificultad de generar olas con propiedades específicas, la medición de caudales y el cambio del comportamiento de la ola provocada por las paredes del canal.
- Se puede observar que los dispositivos de aprovechamiento undimotriz están en gran medida limitados por las condiciones geográficas de la zona de emplazamiento siendo la profundidad del oleaje la más importante para escoger un lugar de emplazamiento, después del periodo y altura del oleaje, estas limitaciones reducen las ubicaciones costeras para el aprovechamiento energético, pero da cuenta del gran potencial que tienen los dispositivos undimotriz en el mar profundo.
- Las herramientas de simulación numérica son una herramienta de gran utilidad para el análisis de dispositivos undimotriz principalmente para la simulación con teorías de oleajes no lineales que son más representativas al comportamiento real del oleaje.
- El dispositivo comeolas puede ser una alternativa interesante de generación eléctrica al mediante una turbina al aumentar el diámetro del ducto principal en sectores de emplazamiento como muelles y formaciones rocosas.
- La bomba de ariete marino presentada en esta memoria presenta grandes dificultades en su emplazamiento geográfico para el bombeo de agua, aunque de todas maneras puede ser una solución interesante de abastecimiento de agua para caletas, muelles e islotes con un caudal máximo alcanzable de 288 metros cúbicos diarios a 25 metros de altura.

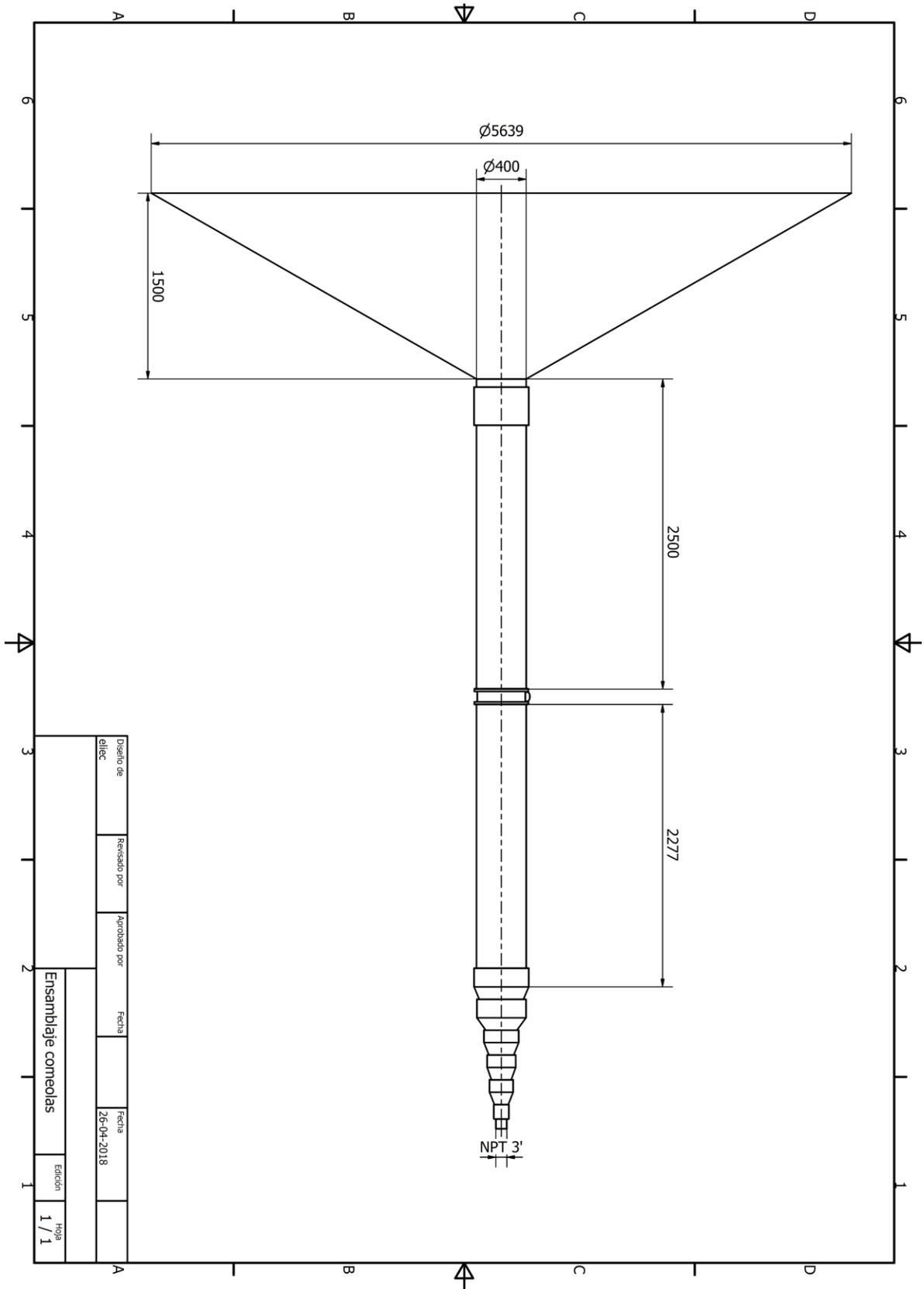
- La energía undimotriz presenta una clara oportunidad de desarrollo en nuestro país para solucionar problemas energéticos y de acceso al agua que con el paso del tiempo se van transformando en prioridades estratégicas. La necesidad de una legislación clara que regule e incentive el desarrollo de tecnologías undimotrices es clave en su desarrollo futuro.

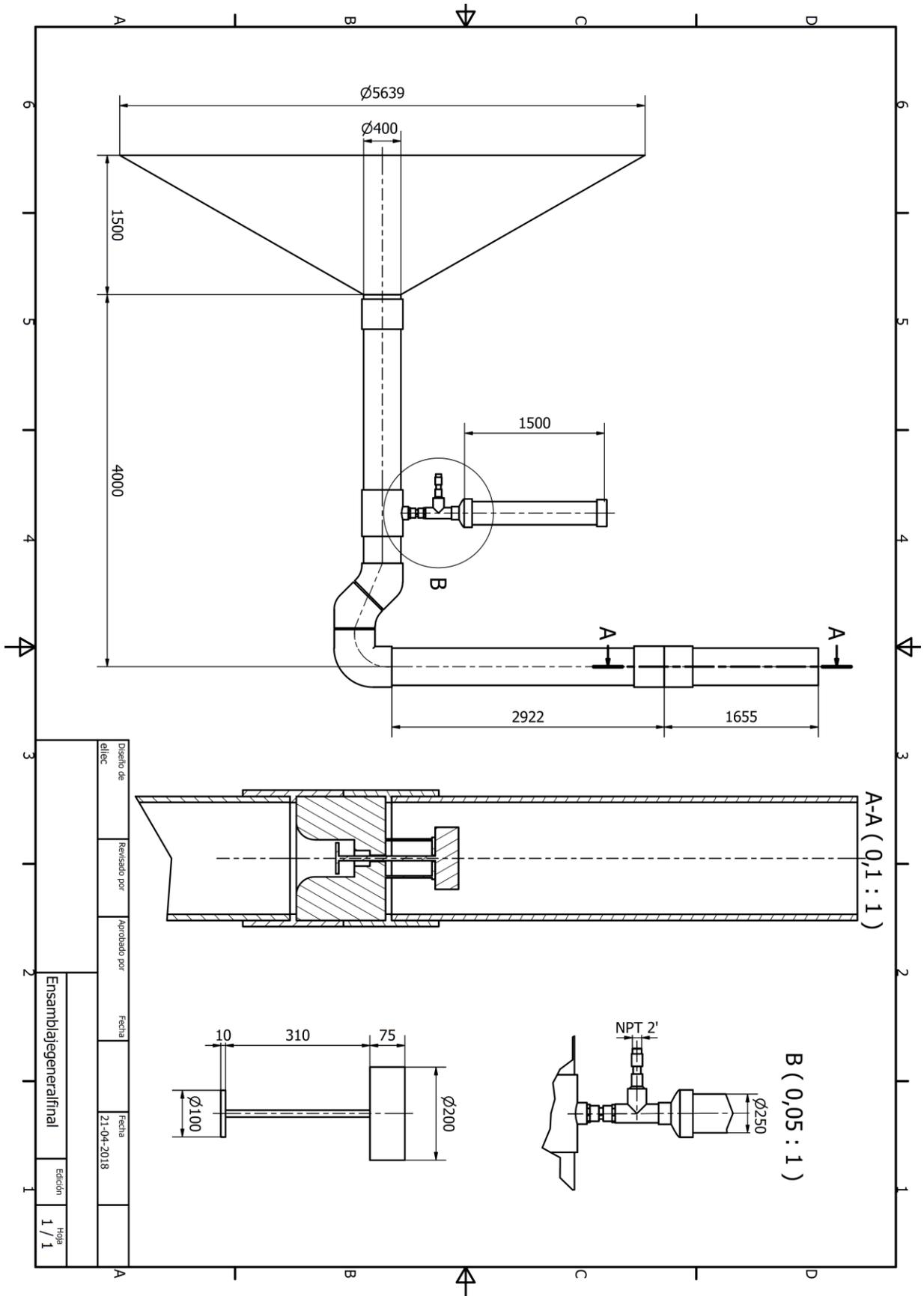
12. Referencias

1. Pritchard P (2011). Introduction to fluid mechanics. Manhattan College.
2. Montoya R, Osorio A (2007). Los modelos de generación de oleaje del viento: Características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. Universidad de Medellín.
3. Palomino M, Almazán J (2000). Descripción, medida y análisis del oleaje. Universidad politécnica de Madrid.
4. Tinoco H, López I (2014). Ondas superficiales en el mar. Universidad de Alicante.
5. Holthuijsen L (2007). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University.
6. Cruz J, Thomson M, Stavroulia E (2009). Preliminary site selection – Chilean marine energy resources. Inter-American Development Bank.
7. Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
8. Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2010). <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/> (referencia online). El Explorador de Energía Marina se desarrolla como parte de un Convenio de Cooperación entre el Ministerio de Energía, con apoyo del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y la Dirección de Investigación, Programas y Desarrollo de la Armada (DIPRIDA)
9. Ibañez P (2008). Energía de las olas: Situación y futuro. Xornada sobre enerxia que vén do mar.
10. Marbello R (2007). Bombas hidráulicas rotodinámicas: Teoría y aplicaciones. Universidad nacional de Colombia.
11. Soldevila J (2011). Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas. Universidad politécnica de Catalunya.
12. Martín I, Salcedo R, Font R (2011), Mecánica de fluidos: Impulsión de fluidos. Universidad de Alicante.
13. Cengel Y, Cimbala J (2010). Mecanica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. Mc Graw Hill Education.
14. Agüera J (2011). Análisis dimensional y semejanza. Universidad de Córdoba.
15. Morales E (2016), Análisis de un dispositivo oscilante como medio de captación de energía undimotriz. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile.
16. Rojas J (2009). Evaluación Técnico Económica de una Central Undimotriz con Tecnología Pelamis en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile.

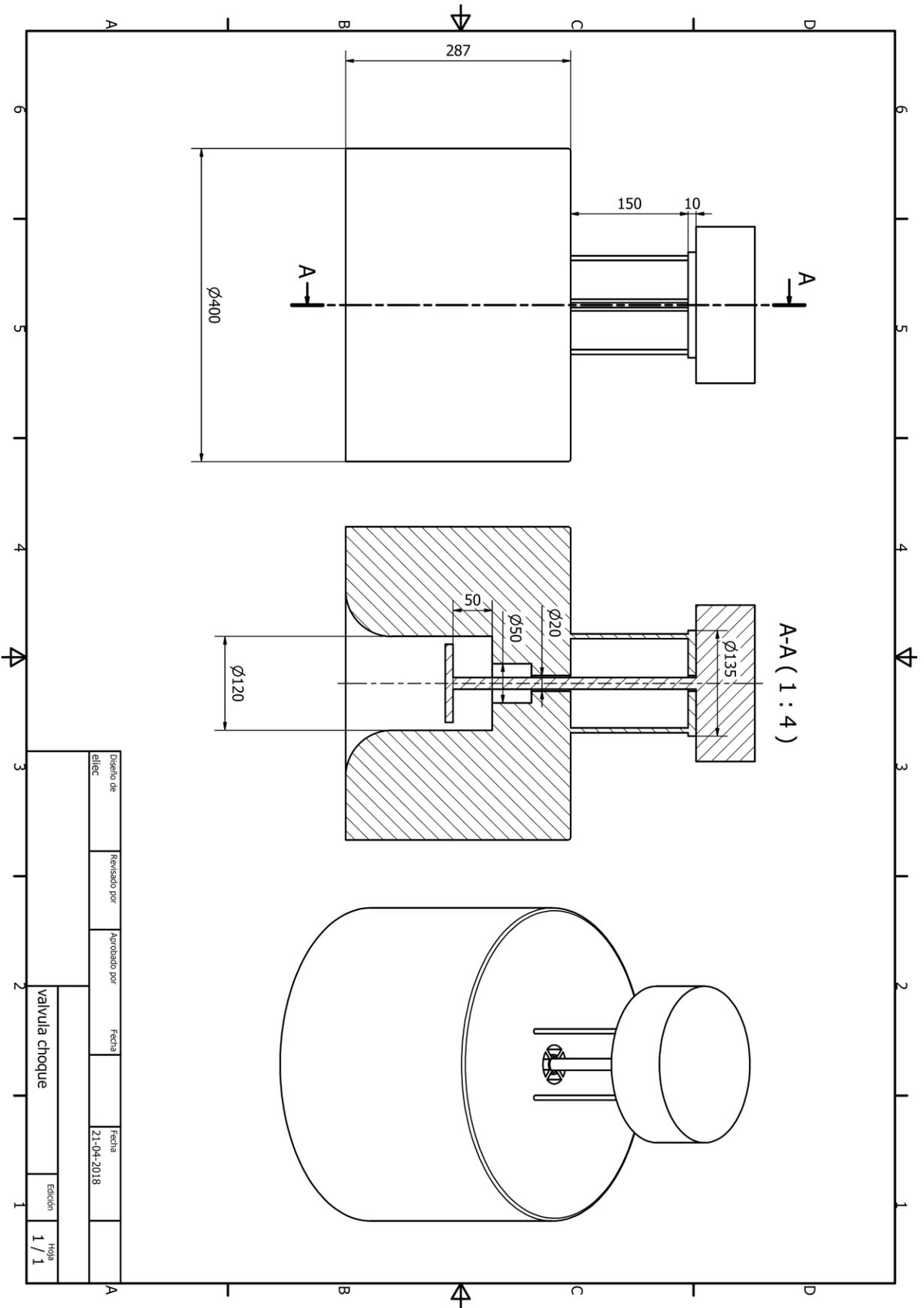
17. Mekhiche M, Edwards K (2014). Ocean power technologies powerbuoy®: system-level design, development and validation methodology. 2° Marine Energy Technology Symposium.
18. christensen I, friis-Madsen E, Kofoed J (2005). The wave energy challenge: The Wave Dragon case. PowerGen 2005 Europe conference.
19. Fernández P (2004). Energía del mar. Universidad de Cantabria.
20. Segen E (2015). Ocean Energy Development in Brazil. EU-Brazil Atlantic Ocean Research Cooperation Rio de Janeiro.
21. Weinstein A, Fedrikson G, Parks M (2004), AquaBuoy – The offshore wave energy converter Numerical modeling and optimization. AquaEnergy Group Ltd.
22. Lilypad. [Referencia online].
<http://www.energyisland.com/projects/lilypad/lilypad.html>
23. Cameron I, Doherty R, Doherty , Van´t Hoff J, Kaye D, Naylor D (2006). Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter. 3° International Conference on ocean Energy, Bilbao.
24. Egaña E (2014). WILEFKO: Sistema undimotriz para olas de rompiente con una fase intermedia de almacenamiento de energía. WILEKFO SpA.
25. Norambuena R, González L (2005). Visión general del sector acuícola nacional - Chile. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO.
26. OECD (2015). Environment at a Glance 2015: OECD Indicators. OECD Publishing, Paris.
27. WHO/UNICEF (2015). Progress on sanitation and drinking wáter. World Health organization.
28. Luo T, Young R, Reig P (2015). “Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings.” Technical note. World Resources Institute.
29. Garcia C (2014). ENERGÍA UNDIMOTRIZ: Evaluación de su potencial factibilidad ambiental en Chile. Tesis de grado para optar a Bióloga Marina, Universidad Austral de Chile.
30. Watt S (1981). A manual on the hydraulic ram for pumping wáter. The intermediate technology development group.
31. Rivadeneira S, Silva L (2013), Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana, Quito.

13. Anexos

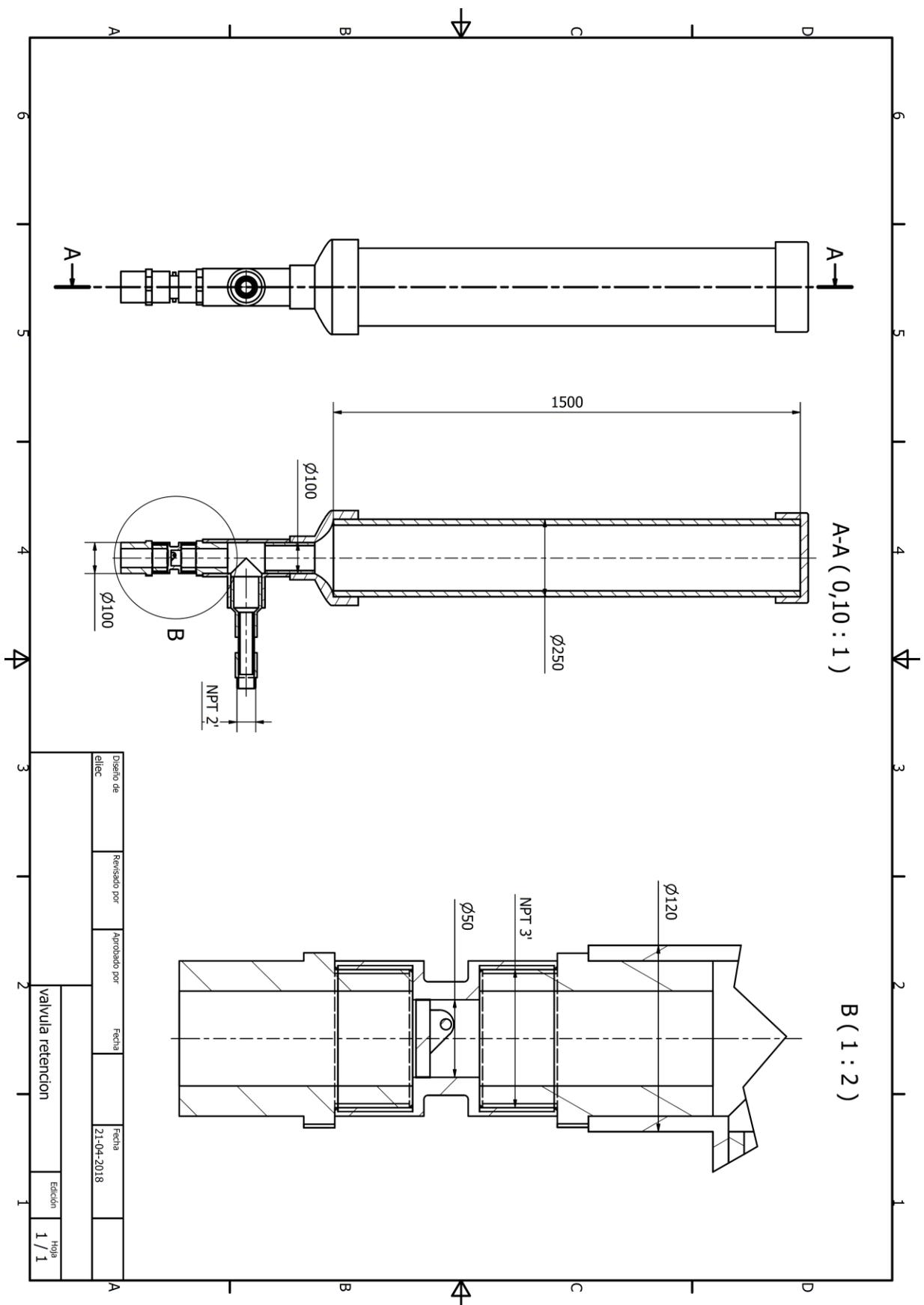




Director de el/lec	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Edición
			21-04-2018		1 / 1
Ensamblaje general final					



Diseno de ellic	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Edición	Hoja
			21-04-2018			1 / 1
valvula choque						



A-A (0,10 : 1)

B (1 : 2)

Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Edición	Hoja
alic			21-04-2018		1	1 / 1
valvula retencion						