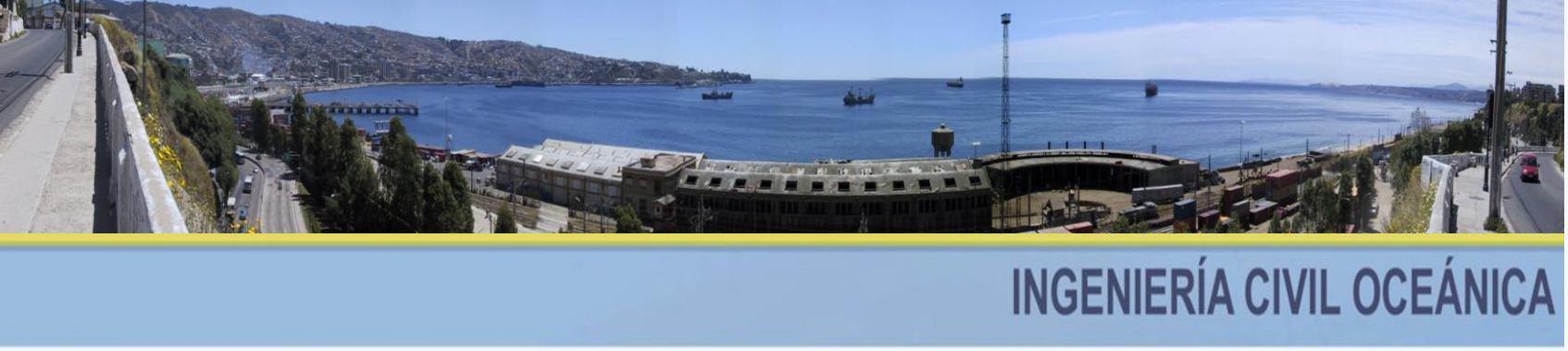


UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
CHILE

UNIVERSIDAD DE VALPARAISO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

"DISEÑO DE CONVERTIDOR DE ENERGÍA DE OLEAJE PARA ESTRUCTURAS APOYADAS SOBRE PILOTES"

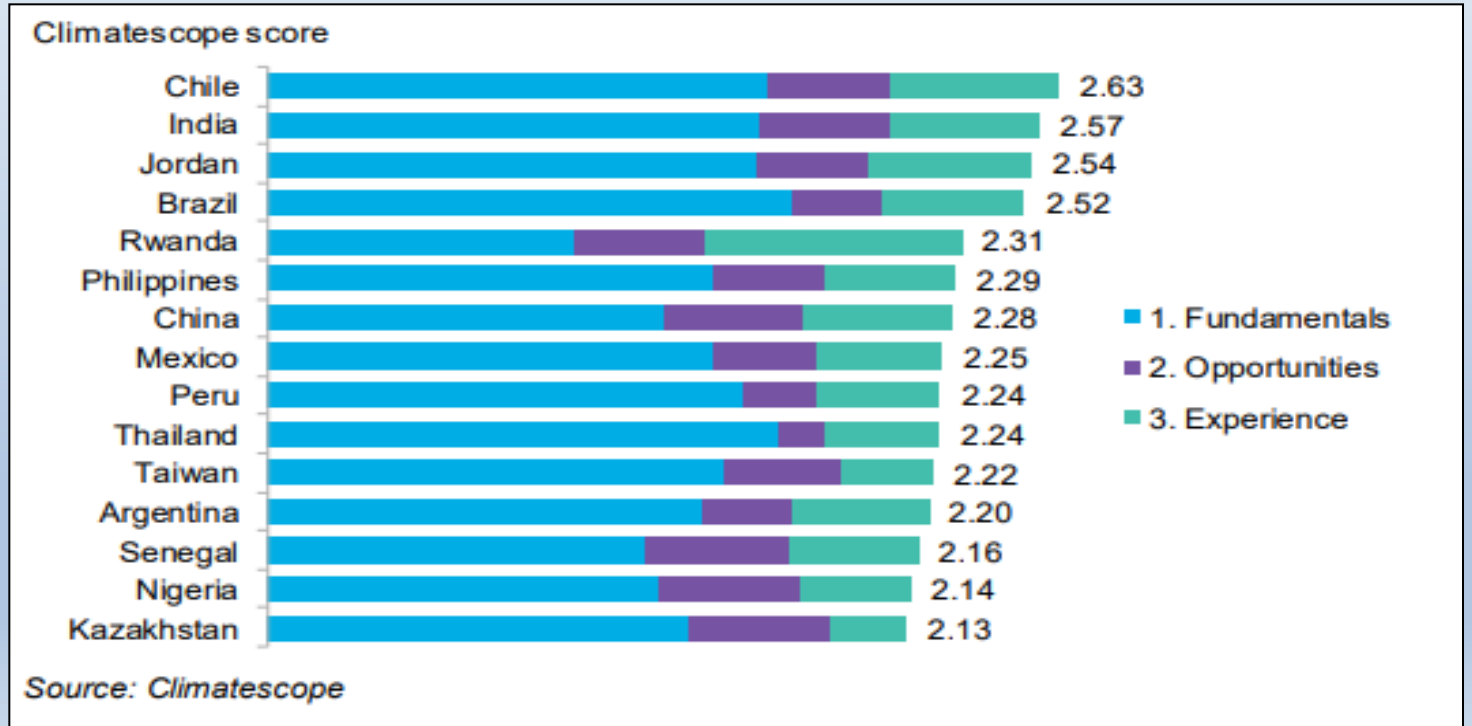
GERÓNIMO PULIDO IPARRAGUIRRE

Presentación del proyecto para optar al Título de

Ingeniero Civil Oceánico

EL PROBLEMA GLOBAL Y EL PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

- **Desarrollo energético sustentable**
- **Transformación de la matriz energética eléctrica nacional**



EL PROBLEMA GLOBAL Y EL PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

- **El hombre se abre camino al mar a través de estructuras costeras.**

- **¿Puede desarrollarse un sistema que permita generación energética en estructuras existentes apoyadas sobre pilotes? Y**
- **¿Cuál es la metodología para el diseño de dicho sistema?**

VENTAJAS

- Al utilizar los pilotes como eje de movimiento se eliminan todos los otros grados de libertad, simplificando enormemente los cálculos asociados al diseño

- La instalación no requiere sistemas de anclajes al lecho marino, cableado submarino y es de fácil acceso para su inspección y mantención

- Proporcionaría energía eléctrica para los equipos instalados en la estructura y para la iluminación de la misma, convirtiendo muelles existentes en parcial o totalmente autosustentables energéticamente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un dispositivo convertidor de energía de oleaje del tipo absorbedor puntual en función de las condiciones morfológicas, estructurales y de oleaje que se presentan en el muelle GNL de Quintero y en la Caleta El membrillo de Valparaíso.

OBJETIVOS

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- **Determinar la geometría y características de los distintos dispositivos de flotación a diseñar de acuerdo a las condiciones locales.**
- **Obtener la frecuencia natural del dispositivo y compararla con la frecuencia del oleaje local para determinar el tipo de diseño.**
- **Utilizar la ecuación de movimiento para definir la desnivelación de un flotador limitado solamente al movimiento vertical y obtener la fuerza que la ola ejerce sobre él.**
- **Obtener la energía total del sistema y la potencia mecánica para cada dispositivo**
- **Determinar la mejor alternativa para cada sector**

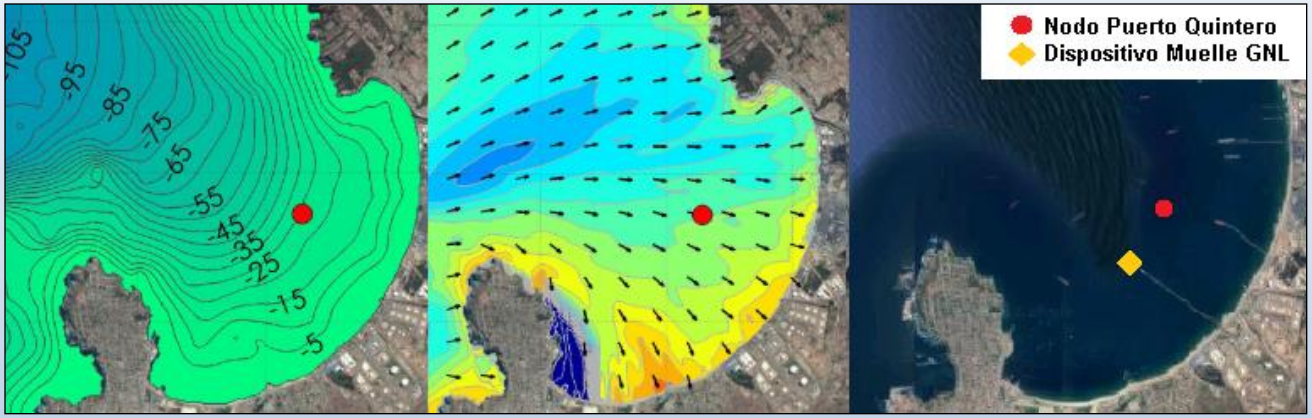
ANTECEDENTES PARA EL DISEÑO

- **En la etapa de diseño se consideran 2 formas de flotadores: rectangular y circular. Por cada forma se evalúan 3 tamaños distintos**

- **El diseño está en función de las condiciones de 2 localidades distintas con muelles existentes, el muelle GNL de Quintero y la Caleta El Membrillo de Valparaíso**

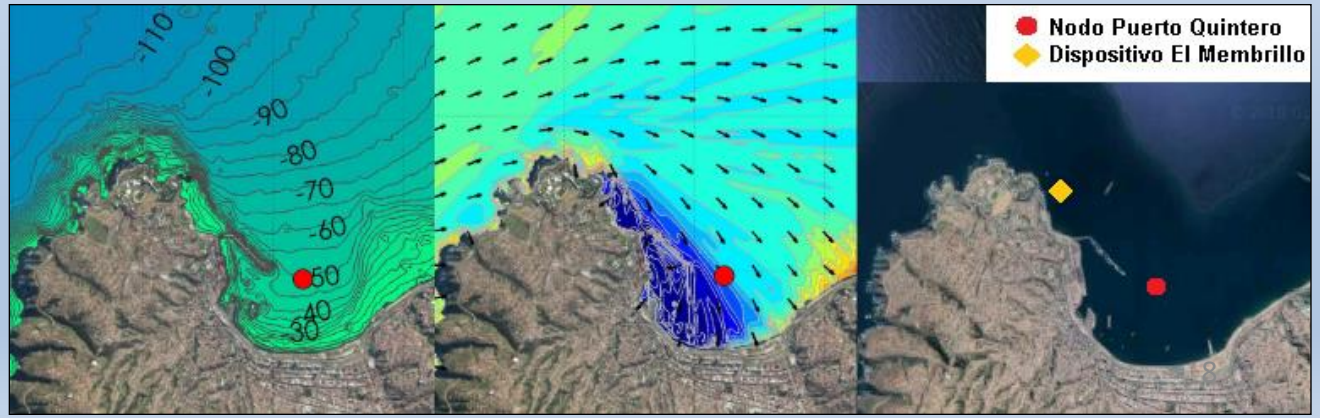
- **Para los parámetros de oleaje, se evaluará y diseñará con los periodos y alturas medias obtenidos del análisis de clima medio que proporciona la página www.oleaje.uv.cl.**

ANTECEDENTES PARA EL DISEÑO



Batimetría, campo de T_m y ubicación de lugar de estudio Quintero.

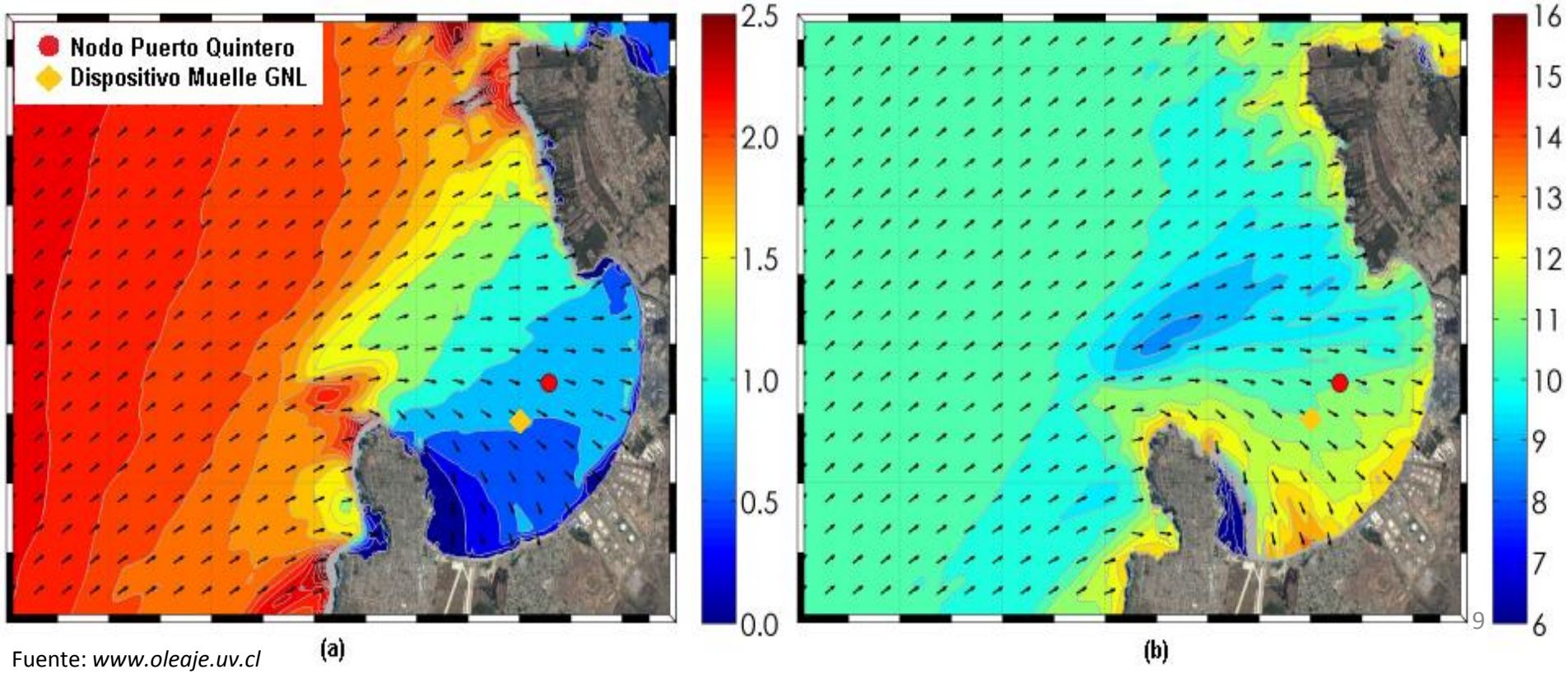
Batimetría, campo de T_m y ubicación de lugar de estudio Valparaíso.



Fuente: *www.oleaje.uv.cl*

ANTECEDENTES PARA EL DISEÑO

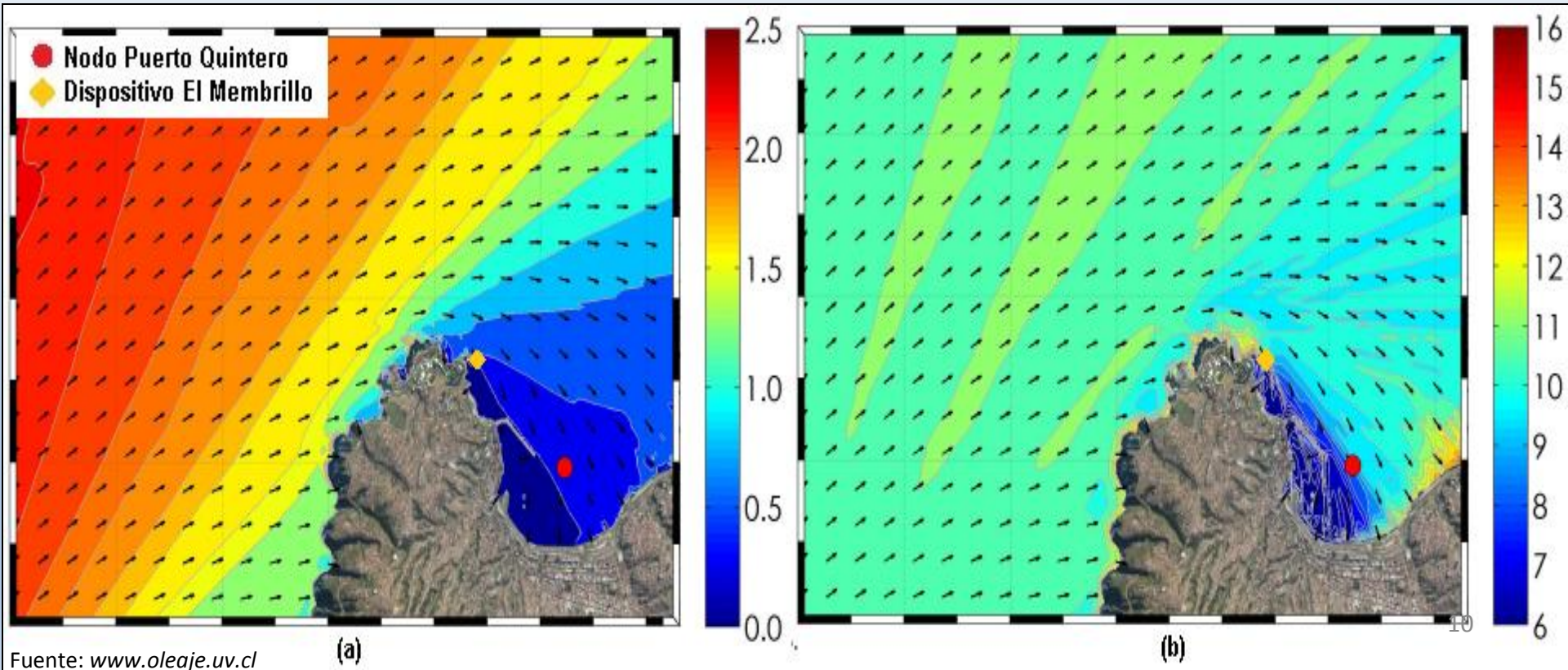
Campos de H_{mo} y T_m Quintero.



Fuente: *www.oleaje.uv.cl*

ANTECEDENTES PARA EL DISEÑO

Campos de H_{mo} y T_m Valparaíso.



Fuente: *www.oleaje.uv.cl*

ANTECEDENTES PARA EL DISEÑO

- **Parámetros de diseño Quintero.**

Hm0 [m]	Tm [s]	d [m]	Ø [m]
0,88	9,1	24	1,2

- **Longitud de onda ʎ= 112,6 [m]**
- **Aguas intermedias**

- **Parámetros de diseño Valparaíso.**

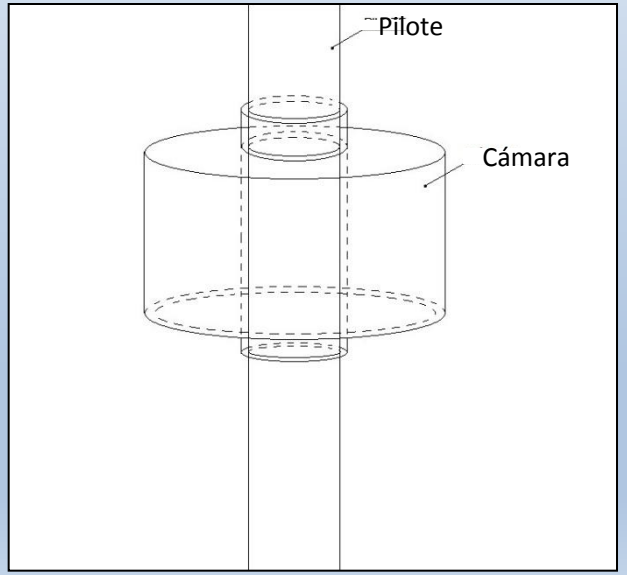
Hm0 [m]	Tm [s]	d [m]	Ø [m]
0,31	10,2	10	0,4

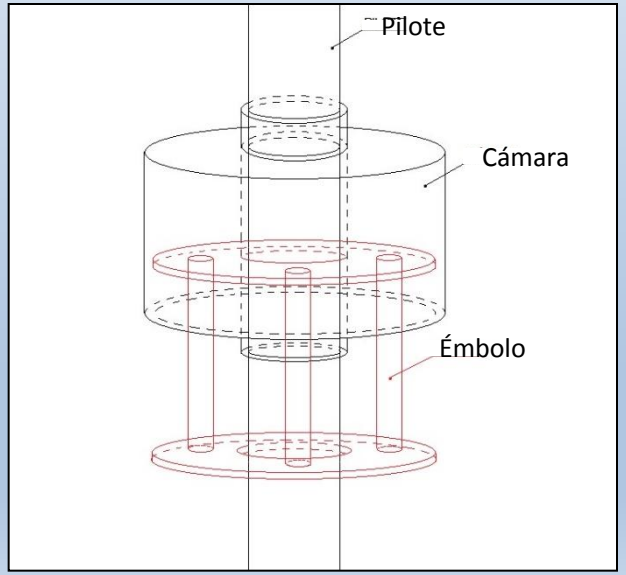
- **Longitud de onda ʎ= 94,4 [m]**
- **Aguas intermedias**

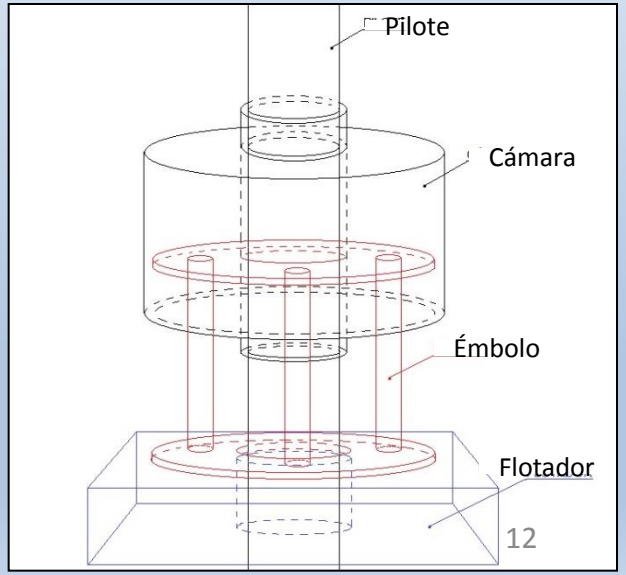
Fuente: *www.oleaje.uv.cl*

METODOLOGÍA DE DISEÑO

- **Geometría inicial de las partes del dispositivo.**
  - **Utilización del pilote como eje del absorbedor puntual**
  - **Dimensionamiento de los elementos considerando el diámetro del pilote.**







METODOLOGÍA DE DISEÑO

- **Geometría inicial de las partes del dispositivo.**
  - **Diseño del flotador considerando las condiciones de oleaje, tamaños y material.**

Masa añadida: **Corresponde a la masa adicional que un objeto aparenta tener cuando éste se acelera relativo a un fluido.**

Frecuencia Natural**: Frecuencia con la que un sistema mecánico se sigue moviendo después de detener la señal de excitación.**

Razón de amortiguación: **Término que representa la capacidad del sistema para disipar la energía.**

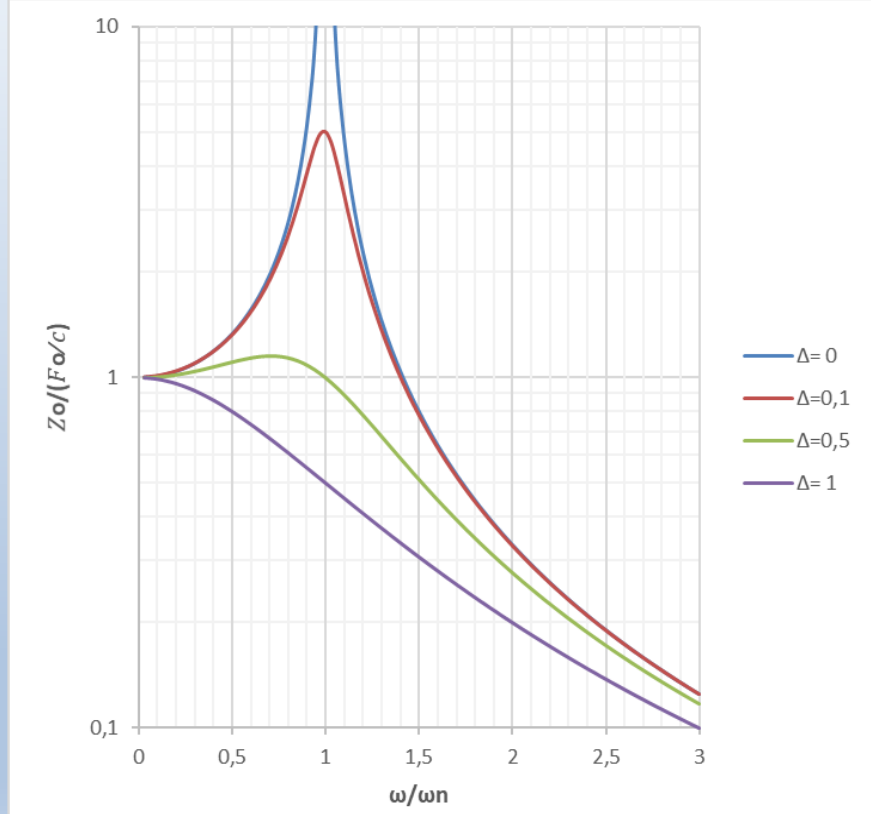
METODOLOGÍA DE DISEÑO

Ecuación de movimiento:

$$z = \frac{F_o/c}{\sqrt{\left(1 - \omega^2/\omega_n^2\right)^2 + \left[\frac{2\Delta\omega}{\omega_n}\right]^2}} \cos(\omega t - \sigma)$$

$$= Z_o \cos(\omega t - \sigma)$$

F_o= Fuerza inducida por la ola
Z_o= Amplitud del movimiento
σ = Ángulo de fase
Δ= Razón de amortiguamiento
ω= Frecuencia angular
ω_n=Frecuencia natural angular



Fuente: *Elaboración propia*

METODOLOGÍA DE DISEÑO

Posición → z

Velocidad → $\frac{dz}{dt}$

$$E_{Pz} = \frac{1}{2}\rho g A_w z^2$$

$$P_Z = F_Z \frac{dz}{dt}$$

$$E_{Kz} = \frac{1}{2}(m + m_w)\left(\frac{dz}{dt}\right)^2$$

→ **Energía y Potencia**

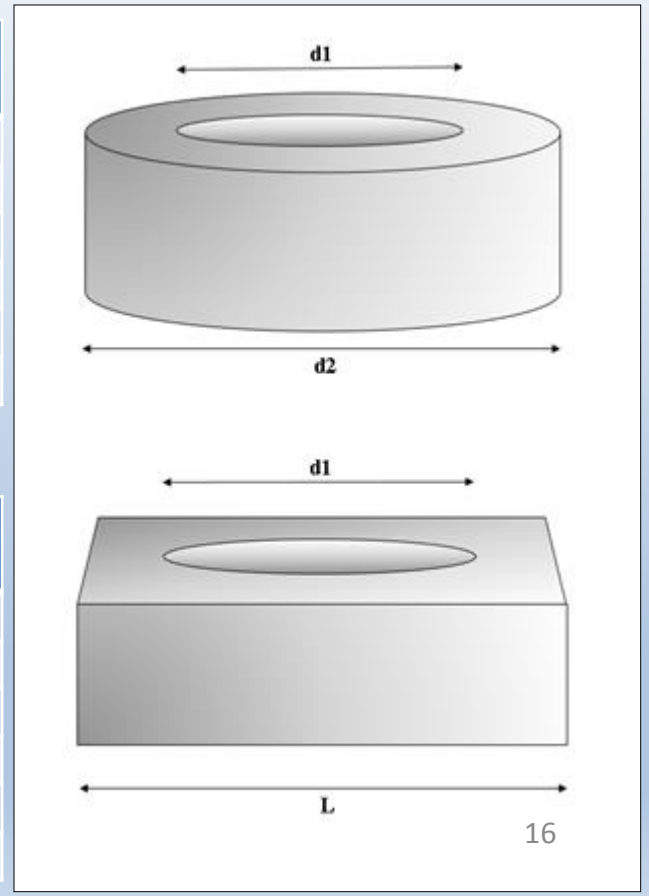
DESARROLLO Y RESULTADOS: Geometría inicial

Quintero

Forma	Tipo	d_1 [m]	d_2 [m]	L [m]	Área flotación [m²]
Cilíndrica	1	1,4	3,4	-	7,54
	2	1,4	4,4	-	13,67
	3	1,4	5,4	-	21,36
Rectangular	4	1,4	-	3,0	7,54
	5	1,4	-	3,9	13,67
	6	1,4	-	4,8	21,36

Valparaíso

Forma	Tipo	d_1 [m]	d_2 [m]	L [m]	Área flotación [m²]
Cilíndrica	1	0,6	1,50	-	1,48
	2	0,6	1,80	-	2,26
	3	0,6	2,10	-	3,18
Rectangular	4	0,6	-	1,33	1,48
	5	0,6	-	1,60	2,26
	6	0,6	-	1,86	3,18



DESARROLLO Y RESULTADOS: Masa añadida

Forma	Volumen [m³]	Masa [kg]	Km	Masa añadida [kg]
Cilíndrica	11,3	1.470,3	-	5.091,52
	27,3	3.553,1	-	12.424,08
	53,4	6.942,9	-	24.282,52
Rectangular	11,3	1.470,3	0,53	8.833,47
	27,3	3.553,1	0,53	21.555,01
	53,4	6.942,9	0,53	42.128,67

Quintero

***Material*: Poliuretano de alta densidad de 130 [kg/m³]**

$$m_w = \frac{K_m \pi \rho L B^2}{4}$$

$$m_w = \frac{\rho D^3}{6}$$

Valparaíso

Forma.	Volumen [m³]	Masa [kg]	Km	Masa añadida [kg]
Cilíndrica	1,00	130,26	-	444,77
	1,83	238,18	-	836,62
	3,01	390,77	-	1.395,16
Rectangular	0,89	115,44	0,53	771,64
	1,62	211,08	0,53	1.451,49
	2,66	346,31	0,53	2.420,51

DESARROLLO Y RESULTADOS: Frecuencia natural

Frecuencia Natural: $$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g A_{wp}}{m + m_w}}$$

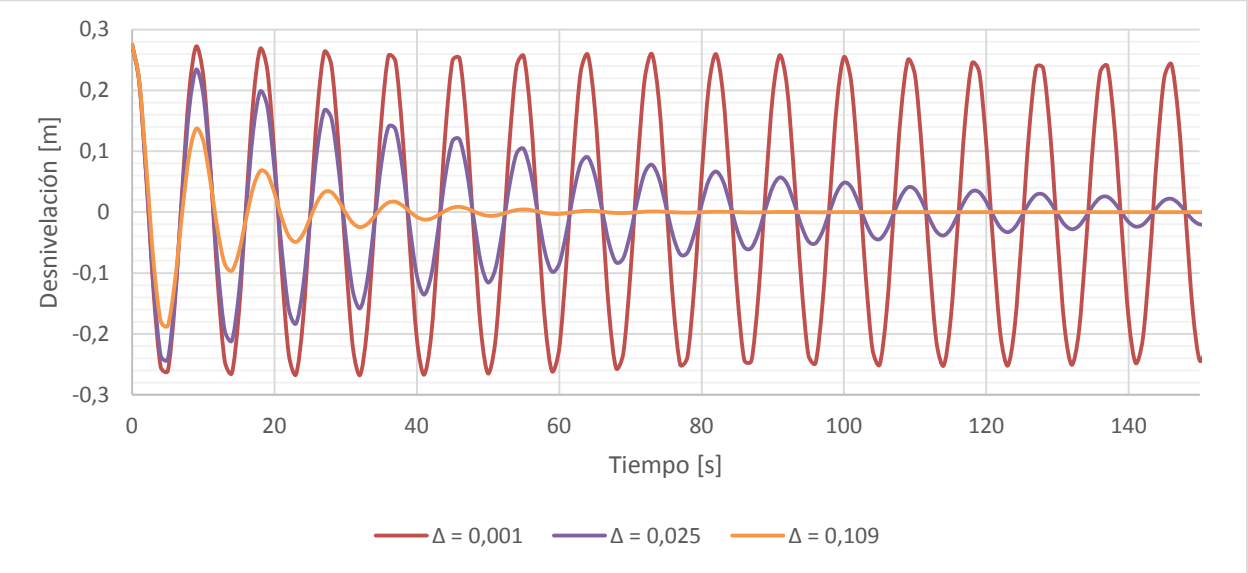
Quintero

Forma	Tipo	Masa añadida [kg]	Masa [kg]	Área flotación [m²]	ω_n [Hz]
Cilíndrica	1	5.091,5	1.470,27	7,54	3,40
	2	12.424,1	3.553,14	13,67	2,93
	3	24.282,5	6.942,92	21,36	2,62
Rectangular	4	8.833,5	1.470,27	7,54	2,71
	5	21.555,0	3.553,14	13,67	2,34
	6	42.128,7	6.942,92	21,36	2,09

Valparaíso

Forma	Tipo	Masa añadida [kg]	Masa [kg]	Área flotación [m²]	ω_n [Hz]
Cilíndrica	1	444,8	130,26	1,48	5,09
	2	836,6	238,18	2,26	4,60
	3	1.395,2	390,77	3,18	4,23
Rectangular	4	771,6	115,44	1,48	4,10
	5	1.451,5	211,08	2,26	3,70
	6	2.420,5	346,31	3,18	3,40

DESARROLLO Y RESULTADOS: Razón de amortiguamiento



Fuente: *Elaboración propia*

$$\Delta = \frac{b}{2\sqrt{\rho g A_{wp}(m + m_w)}}$$

Factor amortiguamiento b	Expresión
McCormick, 1973	$\frac{\pi \rho g^2}{8\omega_n^3}\int_{-L/2}^{L/2} \bar{A}^2 d\varepsilon$
Cozijn, 2005	$\frac{4}{3\pi}\rho C_D A_f \omega z$
Nazari & Gassemi, 2013	$\frac{8}{3\pi}\left[\frac{z}{0{,}5T}\right](0{,}5\rho C_D D d)$

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

UNIVERSIDAD DE VALPARAISO CHILE

DESARROLLO Y RESULTADOS: Desplazamiento vertical, energía y eficiencias

Quintero

Tipo	N°	z [m]	Ek [N*m]	Ep [N*m]	Et [N*m]	Energía de oleaje [N*m]	Eficiencia
Cilíndrico	1	0,28	118,6	2.874,5	2.993,1	372.256,8	0,8%
	2	0,50	954,5	17.224,9	18.179,4	481.744,1	3,8%
	3	0,49	1.752,4	25.295,2	27.047,6	591.231,3	4,6%
Rectangular	4	1,09	2.915,2	45.007,2	47.922,3	329.904,0	14,6%
	5	1,02	6.192,1	71.107,0	77.299,1	426.934,6	18,2%
	6	0,99	11.485,4	105.493,7	116.979,1	523.965,1	22,4%

Valparaíso

Tipo	N°	z [m]	Ek [N*m]	Ep [N*m]	Et [N*m]	Energía de oleaje [N*m]	Eficiencia
Cilíndrico	1	0,18	3,77	254,15	257,92	17.086,24	1,5%
	2	0,17	6,29	345,92	352,21	20.503,49	1,7%
	3	0,17	9,79	455,83	465,62	23.920,74	1,9%
Rectangular	4	0,47	37,73	1.649,81	1687,54	21.638,72	7,8%
	5	0,44	63,18	2.246,12	2309,30	25.966,46	8,9%
	6	0,43	98,56	2.960,82	3059,38	30.294,20	10,1%

DESARROLLO Y RESULTADOS

Quintero

Tipo	N°	Fuerza total vertical [N]	Potencia promedio [Watt]
Cilíndrico	1	39.133,3	3.725,1
	2	64.972,5	11.250,0
	3	97.018,6	16.288,3
Rectangular	4	77.236,9	29.116,3
	5	127.667,0	44.962,9
	6	189.831,9	65.177,8

Valparaíso

Tipo	N°	Fuerza total vertical [N]	Potencia promedio [Watt]
Cilíndrico	1	2.714,0	155,5
	2	3.896,6	211,0
	3	5.288,2	277,3
Rectangular	4	6.863,9	1.002,3
	5	9.838,9	1.358,2
	6	13.331,8	1.782,1

DESARROLLO Y RESULTADOS

Sistemas de toma de fuerza (PTO): Energía neumática

Quintero

Tipo	N°	P [Watt]	Eficiencia
Cilíndrico	1	3,26	0,1%
	2	176,83	1,6%
	3	745,49	4,6%
Rectangular	4	201,88	0,7%
	5	1.483,23	3,3%
	6	6.349,45	9,7%

Valparaíso

Tipo	N°	P [Watt]	Eficiencia
Cilíndrico	1	0,01	0,0077%
	2	0,01	0,0070%
	3	0,03	0,0123%
Rectangular	4	0,22	0,0218%
	5	0,27	0,0200%
	6	0,61	0,0344%

DESARROLLO Y RESULTADOS

Sistemas de toma de fuerza (PTO): Inductancia lineal

Quintero

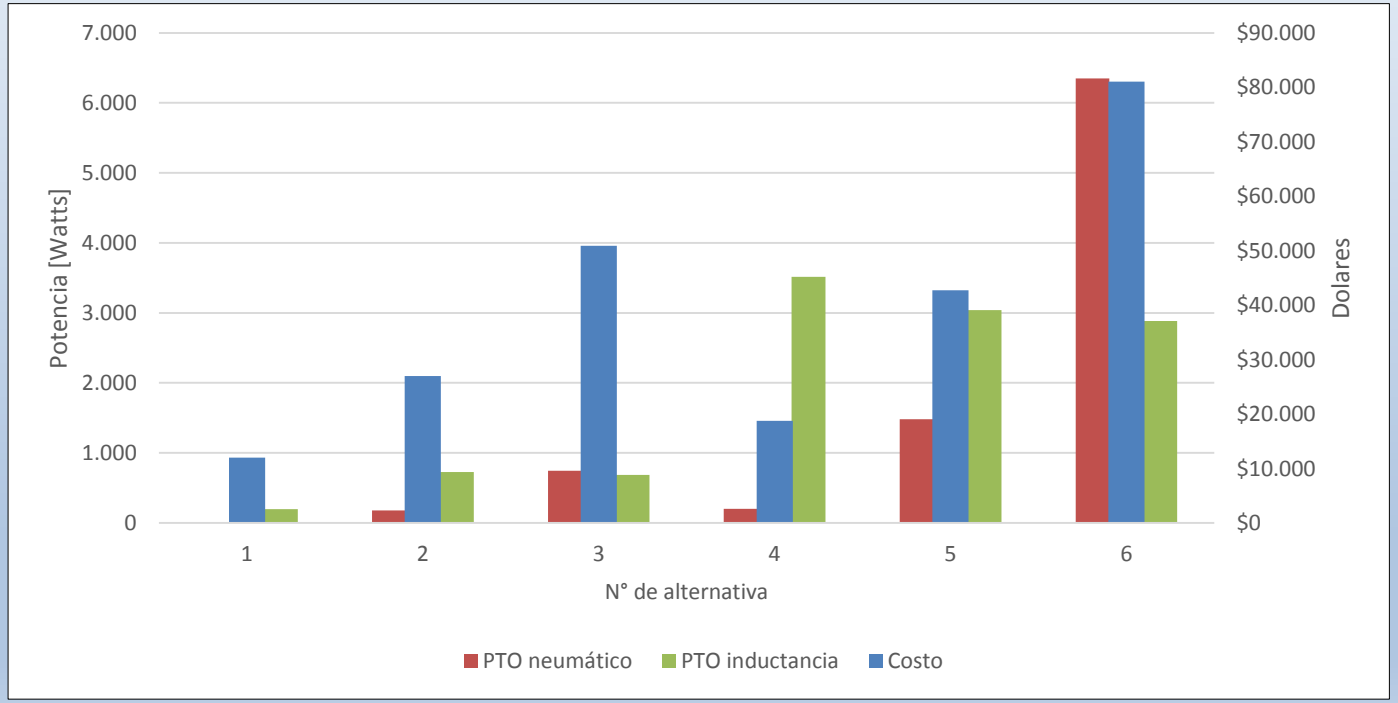
Tipo	N°	$\widehat{P_e}$ [Watt]	Eficiencia
Cilíndrico	1	236,81	5%
	2	783,51	6%
	3	736,59	4%
Rectangular	4	3.712,46	12%
	5	3.240,09	7%
	6	3.079,25	4%

Valparaíso

Tipo	N°	$\widehat{P_e}$ [Watt]	Eficiencia
Cilíndrico	1	87,41	55%
	2	78,47	36%
	3	73,85	26%
Rectangular	4	329,58	42%
	5	305,5	28%
	6	293,19	20%

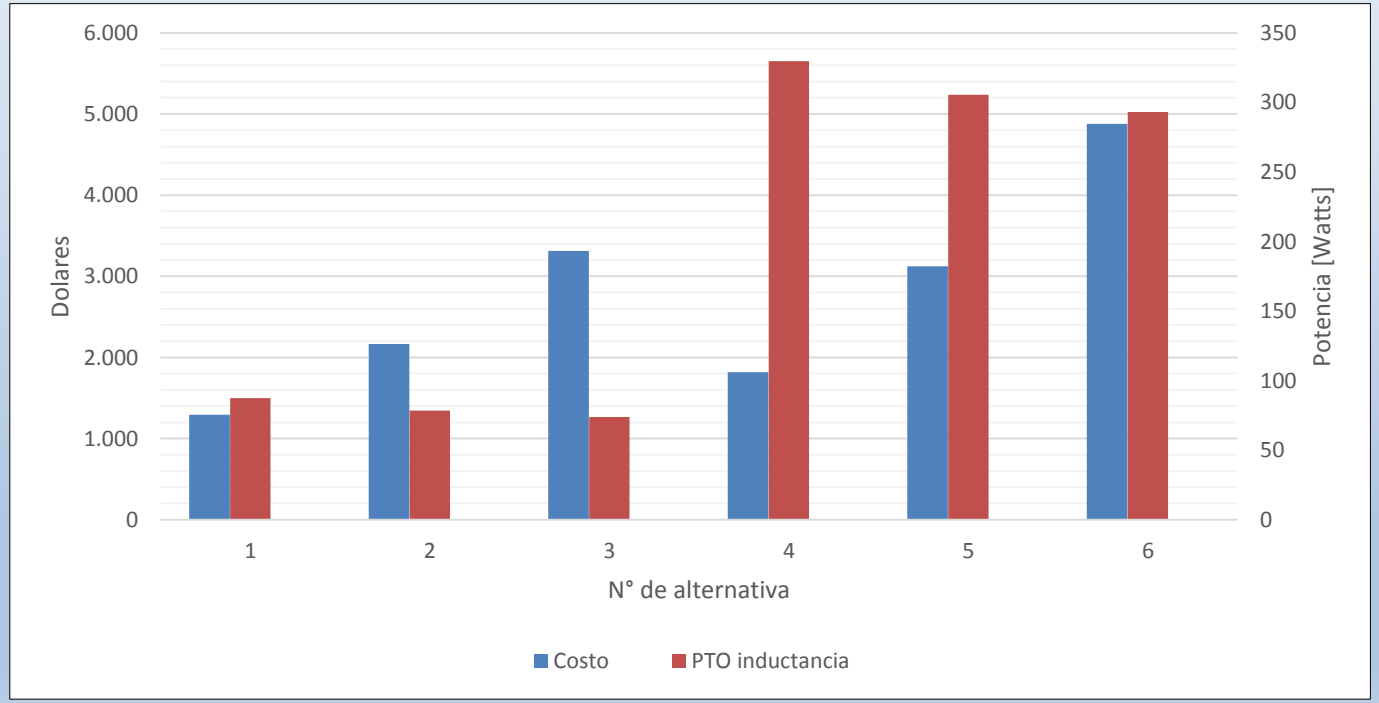
EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Quintero



EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Valparaíso



EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Quintero: Matriz de potencia alternativa N°6

Potencia mecánica promedio [Kw]		T [s]								
		7	8	9	10	11	12	13	14	15
H [m]	0,3	27,9	24,9	22,5	20,4	18,7	17,2	15,9	14,9	13,9
	0,6	55,9	49,9	44,9	40,8	37,3	34,4	31,9	29,7	27,8
	0,9	83,8	74,8	67,4	61,2	56,0	51,6	47,8	44,6	41,7
	1,2	111,7	99,7	89,8	81,6	74,7	68,8	63,8	59,4	55,6
	1,5	139,7	124,7	112,3	102,0	93,3	86,0	79,7	74,3	69,5
	1,8	167,6	149,6	134,7	122,4	112,0	103,2	95,7	89,1	83,4
	2,1	195,6	174,6	157,2	142,8	130,7	120,4	111,6	104,0	97,3
	2,4	223,5	199,5	179,7	163,2	149,3	137,6	127,5	118,8	111,2

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Valparaíso: Matriz de potencia alternativa N°4

Potencia mecánica promedio [Kw]		T [s]								
		7	8	9	10	11	12	13	14	15
H [m]	0,3	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7
	0,6	2,8	2,5	2,2	2,0	1,8	1,7	1,5	1,4	1,3
	0,9	4,2	3,7	3,3	3,0	2,7	2,5	2,3	2,1	2,0
	1,2	5,6	4,9	4,4	4,0	3,6	3,3	3,1	2,8	2,7
	1,5	7,0	6,1	5,5	4,9	4,5	4,1	3,8	3,5	3,3
	1,8	8,4	7,4	6,6	5,9	5,4	5,0	4,6	4,3	4,0
	2,1	9,8	8,6	7,7	6,9	6,3	5,8	5,3	5,0	4,6
	2,4	11,2	9,8	8,8	7,9	7,2	6,6	6,1	5,7	5,3

ENUNCIADO DE CONCLUSIONES

- **Sobre la geometría**
- **La frecuencia natural y la condición de resonancia.**
- **Sobre la energía y potencia mecánica obtenida**
- **Sobre el amortiguamiento**
- **Elección de diseño**