



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

# **DISEÑO DE CONVERTIDOR DE ENERGIA DE OLEAJE PARA ESTRUCTURAS APOYADAS SOBRE PILOTES**

**Gerónimo Pulido Iparraguirre**

Noviembre 2018

**DISEÑO DE CONVERTIDOR DE ENERGIA DE OLEAJE PARA ESTRUCTURAS APOYADAS  
SOBRE PILOTES**

Gerónimo Pulido Iparraguirre

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

**Jaime Leyton Espoz**

Profesor guía

---

---

**Patricio Winckler Grez**

Docente

---

---

**Mauricio Reyes Gallardo**

Docente

---

---

## **DECLARACIÓN**

---

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

*Para mis papás, mis hermanos y todos  
los que me esperaron tanto*

*Los mandamientos de la creatividad:*

*Estarás interesado*

*Serás valiente*

*Serás humilde*

Isaac Asimov

# CONTENIDOS

---

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>Introducción</b> .....   | <b>IX</b> |
| <b>2</b>     | <b>Objetivos</b> .....  | <b>2</b>  |
| 2.1          | Objetivos generales .....   | 2         |
| 2.2          | Objetivos específicos.....  | 2         |
| <b>3</b>     | <b>Marco teórico</b> .....  | <b>3</b>  |
| 3.1          | Teoría lineal de oleaje .....                                       | 3         |
| 3.2          | Energía del oleaje.....   | 6         |
| 3.3          | Oleaje no lineal.....   | 7         |
| 3.4          | Interacción oleaje -absorbedor puntual.....                         | 8         |
| 3.5          | Generación de energía neumática.....                                | 15        |
| 3.6          | Generación por inductancia Lineal.....                              | 17        |
| <b>4</b>     | <b>Análisis y consideraciones previas</b> .....                     | <b>19</b> |
| <b>5</b>     | <b>Diseño</b> .....   | <b>24</b> |
| 5.1          | Diseño absorbedor puntual bahía Quintero .....                      | 24        |
| 5.2          | Diseño absorbedor puntual bahía Valparaíso .....                    | 35        |
| <b>6</b>     | <b>Sistema de toma de fuerza (PTO)</b> .....                        | <b>42</b> |
| 6.1          | Evaluación PTO dispositivo Quintero.....                            | 42        |
| 6.1.1        | PTO -Energía neumática.....   | 42        |
| 6.1.2        | PTO - Inductancia lineal.....                                       | 43        |
| 6.2          | Evaluación PTO dispositivo Valparaíso .....                         | 45        |
| 6.2.1        | PTO - Energía neumática.....  | 45        |
| 6.2.2        | PTO - Inductancia lineal .....                                      | 46        |
| <b>7</b>     | <b>Evaluación de alternativas</b> .....                             | <b>47</b> |
| <b>8</b>     | <b>Conclusiones</b> .....   | <b>51</b> |
| <b>9</b>     | <b>Bibliografía</b> .....   | <b>53</b> |
| <b>ANEXO</b> | .....   | <b>55</b> |
| Anexo A.     | Solución estacionaria ecuación de movimiento.....                   | 55        |
| A.1.         | Fuerza inducida por el movimiento.....                              | 56        |
| A.2.         | Fuerza restauradora hidrostática.....                               | 57        |
| A.3.         | Amortiguamiento .....   | 58        |
| A.4.         | Fuerza inducida por la ola .....                                    | 60        |
| A.5.         | Ecuación de movimiento vertical .....                               | 61        |
| Anexo B.     | Calculo experimental y estimación de factor de amortiguamiento..... | 64        |

|   |    |
|---|----|
| B.1. Cálculo de razón de amortiguamiento experimentalmente .....      | 64 |
| B.2. Estimación valores teóricos de la razón de amortiguamiento ..... | 65 |
| Anexo C. Curvas de movimiento .....                                   | 69 |
| C.1. Curvas de movimiento - Quintero .....                            | 69 |
| C.2. Curvas de movimiento – Valparaíso .....                          | 73 |
| Anexo D. Planos alternativa N°6 – Quintero .....                      | 77 |
| Anexo E. Derivación frecuencia natural .....                          | 78 |

## ILUSTRACIONES

---

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1: Características onda sinusoidal .....   | 3  |
| Ilustración 2: Grados de libertad y movimientos que experimenta un cuerpo flotando .....           | 8  |
| Ilustración 3: Esquema flotador en movimiento vertical puro .....                                  | 9  |
| Ilustración 4: Flotadores bajo la acción de oleaje; (a) con $L=\lambda$ ; (b) $L=N\lambda/2$ ..... | 9  |
| Ilustración 5: Esquema para análisis de conversión de energía neumática .....                      | 15 |
| Ilustración 6: Esquema generador de inducción lineal .....   | 17 |
| Ilustración 7: Esquema preliminar dispositivo completo .....                                       | 25 |
| Ilustración 8: Esquema preliminar opciones de flotadores. ....                                     | 26 |
| Ilustración 9: Geometrías de áreas equivalentes .....  | 30 |
| Ilustración 10: Esquema embolo; (a) Medidas; (b) Vista 3D .....                                    | 29 |
| Ilustración 11: Esquema fuerza de roce entre el dispositivo y el pilote .....                      | 33 |
| Ilustración 12: Esquema ilustrativo test de decaimiento .....                                      | 65 |

## GRÁFICOS

---

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1: Coeficiente de masa añadida $K_m$ .....  | 11 |
| Gráfico 2: Factor de magnificación para el movimiento vertical desacoplado .....                  | 12 |
| Gráfico 3: Decaimiento del movimiento del sistema después de una perturbación -<br>Quintero ..... | 30 |
| Gráfico 4: Curvas de movimiento - Flotador Circular N°1 -Quintero .....                           | 37 |
| Gráfico 5: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Circular N°1 .....                | 31 |
| Gráfico 6: Costo vs. potencia producida - Quintero .....  | 47 |
| Gráfico 7: Costo vs. potencia producida – Valparaíso .....  | 48 |
| Gráfico 8: Comparación perturbaciones a distintas razones de amortiguamiento .....                | 68 |
| Gráfico 9: Curvas de movimiento - Flotador Circular N°2 .....                                     | 69 |
| Gráfico 10: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Circular N°2 .....               | 69 |
| Gráfico 11: Curvas de movimiento - Flotador Circular N°3 .....                                    | 70 |
| Gráfico 12: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Circular N°3 .....               | 70 |
| Gráfico 13: Curvas de movimiento - Flotador Rectangular N°4 .....                                 | 70 |
| Gráfico 14: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Rectangular N°4 .....            | 71 |

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 15: Curvas de movimiento - Flotador Rectangular N°5 .....                      | 71 |
| Gráfico 16: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Rectangular N°5 ..... | 71 |
| Gráfico 17: Curvas de movimiento - Flotador Rectangular N°6 .....                      | 72 |
| Gráfico 18: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Rectangular N°6 ..... | 72 |
| Gráfico 19: Curvas de movimiento - Flotador Circular N°2 .....                         | 73 |
| Gráfico 20: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Circular N°2 .....    | 73 |
| Gráfico 21: Curvas de movimiento - Flotador Circular N°3 .....                         | 74 |
| Gráfico 22: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Circular N°3 .....    | 74 |
| Gráfico 23: Curvas de movimiento - Flotador Rectangular N°4 .....                      | 74 |
| Gráfico 24: Movimiento respecto a la onda superficial - Flotador Rectangular N°4 ..... | 75 |
| Gráfico 25: Curvas de movimiento - Flotador Rectangular N°5 .....                      | 75 |

## TABLAS

---

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Resumen teoría lineal de oleaje .....  | 6  |
| Tabla 2: Parámetros de diseño - Quintero .....  | 24 |
| Tabla 3: Geometría preliminar alternativas de diseño Quintero .....                       | 26 |
| Tabla 4: Propiedades preliminares de alternativas de diseño Quintero .....                | 27 |
| Tabla 5: Masa añadida y nuevo calado de alternativas de diseño Quintero .....             | 28 |
| Tabla 6: Geometría y características embolo alternativas de diseño Quintero .....         | 29 |
| Tabla 7: Frecuencia natural para cada diseño Quintero .....                               | 30 |
| Tabla 8: Velocidad, aceleración y energía total de cada alternativa de diseño Quintero .. | 32 |
| Tabla 9: Energía de la ola [N-m] Quintero .....   | 32 |
| Tabla 10: Eficiencia energética de cada dispositivo Quintero .....                        | 32 |
| Tabla 11: Fuerza inducida por la ola [N] para cada dispositivo Quintero .....             | 33 |
| Tabla 12: Cálculos fuerza de arrastre y de roce. Quintero .....                           | 34 |
| Tabla 13: Fuerza total vertical. Quintero .....   | 34 |
| Tabla 14: Potencia mecánica promedio [Watt] para cada dispositivo Quintero .....          | 34 |
| Tabla 15: Parámetros de diseño - Valparaíso .....   | 35 |
| Tabla 16: Geometría preliminar alternativas de diseño Valparaíso .....                    | 36 |
| Tabla 17: Propiedades preliminares de alternativas de diseño Valparaíso .....             | 37 |
| Tabla 18: Masa añadida y nuevo calado de alternativas de diseño Valparaíso .....          | 37 |
| Tabla 19: Geometría y características embolo alternativas de diseño Valparaíso .....      | 38 |
| Tabla 20: Frecuencia natural para cada diseño Valparaíso .....                            | 38 |
| Tabla 21: Velocidad, aceleración y energía total de cada alternativa Valparaíso .....     | 39 |
| Tabla 22: Energía de la ola [N-m] Valparaíso .....  | 39 |
| Tabla 23: Eficiencia energética de cada dispositivo Valparaíso .....                      | 39 |
| Tabla 24: Fuerza inducida por la ola [N] para cada dispositivo Valparaíso .....           | 40 |
| Tabla 25: Cálculos fuerza de arrastre y de roce Valparaíso .....                          | 40 |
| Tabla 26: Fuerza total vertical Valparaíso .....  | 41 |
| Tabla 27: Potencia mecánica promedio [Watt] para cada dispositivo Valparaíso .....        | 41 |
| Tabla 28: Calculo parámetros energía neumática - Quintero .....                           | 42 |
| Tabla 29: Eficiencia sistema de toma de fuerza neumático - Quintero .....                 | 43 |
| Tabla 30: Potencia promedio sobre un ciclo por inductancia lineal - Quintero .....        | 43 |
| Tabla 31: Eficiencia sistema de toma de fuerza por inductancia lineal – Quintero .....    | 44 |
| Tabla 32: Calculo parámetros energía neumática - Valparaíso .....                         | 45 |



|   |    |
|---|----|
| Tabla 33: Eficiencia sistema de toma de fuerza neumático - Valparaíso.....                          | 45 |
| Tabla 34: Potencia promedio sobre un ciclo por inductancia lineal .....                             | 46 |
| Tabla 35: Eficiencia sistema de toma de fuerza por inductancia lineal.....                          | 46 |
| Tabla 36: Tabla de frecuencias $H_{m0}$ y $T_m$ [%]- Quintero.....                                  | 48 |
| Tabla 37: Matriz de potencia promedio del dispositivo sobre un periodo de ola - Quintero.<br>.....  | 49 |
| Tabla 38: Tabla de frecuencias $H_{m0}$ y $T_m$ [%]- Valparaíso.....                                | 49 |
| Tabla 39: Matriz de potencia promedio del dispositivo sobre un periodo de ola -<br>Valparaíso. .... | 49 |
| Tabla 40: Diferentes expresiones para Factor de amortiguamiento .....                               | 66 |
| Tabla 41: Factor de amortiguamiento $b$ [Kg/s] - Quintero.....                                      | 66 |
| Tabla 42: Factor de amortiguamiento $b$ [Kg/s] - Valparaíso.....                                    | 67 |
| Tabla 43: Razón de amortiguamiento - Quintero.....  | 67 |
| Tabla 44: Razón de amortiguamiento – Valparaíso .....   | 67 |

## RESUMEN

---

En el presente trabajo, se analiza la implementación de un nuevo tipo de diseño de convertidor de energía de oleaje (WEC) de tipo absorbedor puntual para estructuras apoyadas sobre pilotes. Se evalúa este diseño en las costas de la V Región, particularmente en las localidades de Quintero y Valparaíso. Se proponen varios tipos de geometrías, se calculan las fuerzas y la potencia entregada por medio de la solución estacionaria de la ecuación de movimiento y se evalúan con distintos tipos de sistemas de toma de poder (PTO). Para la evaluación de la mejor alternativa se realiza un análisis de costo/potencia, donde los costos representan solo el material utilizado y la potencia es la potencia promedio entregada por el dispositivo con el sistema PTO más favorable. Los resultados muestran que la mayor potencia generada corresponde a los flotadores de sección rectangular, obteniendo en Quintero y Valparaíso, 65 kW y 1,7 kW de potencia respectivamente. Donde las eficiencias energéticas son de un 22,4% y un 7,8% para Quintero y Valparaíso respectivamente.