



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA BOYA DESALINIZADORA EN LA COMUNA DE ALGARROBO, CHILE.

Fernando Catalán Tobar

Diciembre 2024

APROBACIÓN

Análisis de factibilidad para la implementación de una boya desalinizadora en la comuna de Algarrobo, Chile.

Fernando Catalán Tobar

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Roberto Prado F.

DECLARACIÓN

Este trabajo, considerado tanto en su totalidad como alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, ni institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal; ya sea 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.

AGRADECIMIENTOS

En esta instancia quisiera agradecer a cada persona que a lo largo de estos años de gran esfuerzo me brindaron su incondicional apoyo. Dentro del mundo de la universidad, solo me queda agradecer a cada profesor que me brindó conocimiento para lo que será la vida al terminar esta maravillosa etapa. Quisiera mencionar al profesor Roberto Prado, quien a lo largo de este proceso de elaboración de memoria de título siempre fue alguien que estuvo presente y motivando con sus palabras para cumplir este objetivo, es algo destacable que marca la diferencia.

Dentro de mi incondicional grupo de amigos quisiera agradecer a quienes siempre me apoyaron y pasamos buenos momentos que siempre estarán presentes en la memoria. Pablo, Nicolás y Martín, amigos que deja esta etapa y que perdurarán por toda la vida, ya que titularse junto a ellos es un sentimiento especial, lograr este objetivo que juntos perseguimos durante 6 o 7 años es una experiencia impagable.

Agradecer a mi familia, mi padre Ramón y mi madre Ana, quienes siempre han querido lo mejor para mí y siempre se han preocupado de que jamás me falte nada. A mis hermanas Tamara y Daniela, quienes son de las mujeres más importante en mi vida. A mi pareja Verónica que en este proceso me ha brindado su apoyo, que muchas veces me sacó de la nube negra o bajones que ocurren normalmente en periodos de estrés. Todos mis logros siempre serán por todos ellos y siempre lucharé con todas mis fuerzas por lograr lo mejor para ellos y para mí.

Agradecer a mis compañeros de trabajo y amigos, Williams, David y Álvaro que, sin su apoyo en la realización del proyecto, habría sido muy complejo de ejecutar.

CONTENIDOS

RESUMEN	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. ALCANCES Y LIMITACIONES	4
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1. DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR	5
4.2. BOYA DESALINIZADORA.....	7
4.3. OLEAJE	9
4.3.1. CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE	9
4.3.2. ANÁLISIS DEL OLEAJE	10
4.4. ENERGÍA DEL OLEAJE	11
4.5. MODELO ECONÓMICO	12
4.6. ASPECTOS LEGALES Y REGULATORIOS.....	13
5. METODOLOGÍA	15
5.1. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	17
5.2. CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERATIVIDAD	20
5.2.1. Sistema de Anclaje	20
5.3. PROCEDIMIENTO ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL	21
5.4. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS ECONÓMICO	22
5.4.1. Identificar costos iniciales	22
5.4.2. Identificación de costos operativos y de mantenimiento.....	22
6. RESULTADOS	23
6.1. Factibilidad técnica	23
6.1.1. Ajuste de datos.....	24
6.1.2. Clima medio.....	28
6.1.3. Clima extremo	31
6.1.4. Consideraciones de diseño.....	33
6.2. Factibilidad Medioambiental	41
6.2.1. Identificación de impactos ambientales.....	42
6.2.2. Áreas protegidas y restringidas en el océano	43

6.2.3.	Aplicación a la normativa vigente y permisos necesarios para la instalación	45
6.3.	Factibilidad Económica.....	51
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
7.1.	Factibilidad técnica	56
7.2.	Factibilidad medioambiental	57
7.3.	Factibilidad económica	59
8.	CONCLUSIONES	62
9.	REFERENCIAS	64
10.	ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Imagen satelital comuna de Algarrobo. Fuente: (Rulamahue, 2023)	2
Figura 4.2:	Esquema de osmosis, equilibrio osmótico y osmosis inversa. Fuente: (Qasim <i>et al.</i> 2019).....	7
Figura 4.3:	Convertidor de energía del oleaje de estilo “Heaving”. Fuente: (Jennifer Leijon, 2017)	7
Figura 4.4:	Sistema hidráulico de la boya desalinizadora P1. Fuente: (Matt Folley, 2008) .	8
Figura 4.5:	Oleajes de tipo “Sea”, oleaje local A) y B) “Swell”, oleaje distante. Fuente: (Silva,2005)	9
Figura 5.1:	Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el desarrollo de la memoria. Fuente: Elaboración Propia.....	16
Figura 6.1:	Ubicación nodo ERA 5 y boya SPOTTER. Fuente: Google Earth	23
Figura 6.2:	Propuesta de ubicación. Fuente: Google Earth	24
Figura 6.3:	Ajuste de datos de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 6.4:	Ajuste de datos del periodo medio. Fuente: Elaboración propia	26
Figura 6.5:	Ajuste de datos de la dirección medio. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 6.6:	Tabla de incidencia entre altura de ola significativa y dirección media. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 6.7:	Rosa de oleaje con altura de oleaje significativa y su dirección media. Fuente: Elaboración propia	30

Figura 6.8: Tabla de incidencia entre altura de ola significativa y periodo medio. Fuente: Elaboración propia	31
Figura 6.9: Plano mareal para sector de interés. Fuente: Elaboración propia	34
Figura 6.10: Ubicación proyecto de boya desalinizadora en la bahía de Algarrobo. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 6.11: Vista de perfil del sistema de anclaje para la operación de la boya desalinizadora. Fuente: Elaboración propia	41
Figura 6.12: Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos en la bahía de Algarrobo. Fuente: Editada de (Subpesca, 2024)	43
Figura 6.13: Ubicación de áreas protegidas cercanas al sector de emplazamiento del proyecto. Fuente: Editado de (SIMBIO, 2016)	44
Figura 6.14: Visualización gráfica de longitudes necesarias para alcanzar salinidad aceptable. Fuente: (Meyer-Steele, 2023).....	46
Figura 6.15: Ejemplificación de lo que sería el impacto visual de la boya desalinizadora. Fuente: Elaboración propia	47
Figura 6.16: Diagrama con el procedimiento de otorgamiento concesión marítima. Fuente: (Ministerio de Defensa Nacional, s.f.)	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1: Capacidad de desalinización actual y futura. Fuente: (Vicuña et al., 2022).....	6
Tabla 5.1: Distribuciones de probabilidad linealizadas con su respectiva función de proteo. Fuente: Liu & Frigaard (2001)	19
Tabla 6.1: Máximos anuales de la data de 20 años, ordenados de mayor a menor Hs. Fuente: Elaboración propia	32
Tabla 6.2: Alturas de ola significativa para periodos de retorno de interés. Fuente: Elaboración propia.....	33
Tabla 6.3: Costos de instalación y desinstalación de la boya desalinizadora para el sector de ubicación del proyecto. Fuente: Elaboración propia	52
Tabla 6.4: Costos de operación boya desalinizadora junto con total anual y total de vida útil del proyecto. Fuente: Elaboración propia	53

Tabla 6.5: Costos de mantención para la boya desalinizadora durante la operación. Fuente: Elaboración propia	54
Tabla 10.1: Costos de instalación para boya ICEBERG con riesgo admisible del 20% (opción menos conservadora). Fuente: Elaboración propia	68
Tabla 10.2: Costos de instalación para boya ICEBERG con riesgo admisible del 5% (opción conservadora). Fuente: Elaboración propia	68
Tabla 10.3: Cálculo de VAN y TIR para caso menos conservador (20% de riesgo). Fuente: Elaboración propia	69
Tabla 10.4: Cálculo de VAN y TIR para caso conservador (5% de riesgo). Fuente: Elaboración propia	69
Tabla 10.5: Cálculo de VAN y TIR para caso menos conservador boya ICEBERG (20% de riesgo). Fuente: Elaboración propia	70
Tabla 10.6: Cálculo de VAN y TIR para caso menos conservador boya ICEBERG (5% de riesgo). Fuente: Elaboración propia	70

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 4.1: Cálculo de coste anualizado. Fuente: “The cost of water from an autonomous wave-powered desalination plant” (Matt Folley, 2008).....	12
Ecuación 5.1: Relación periodo de retorno con riesgo y vida útil. Fuente: Liu & Frigaard (2001)	20

RESUMEN

El presente trabajo aborda el diseño, implementación y evaluación de una boya desalinizadora undimotriz en Algarrobo, Chile, como una solución innovadora para la generación de agua potable a partir de energía renovable. Se realizaron análisis técnicos del oleaje y viento utilizando datos de ERA5 validados con una serie de datos acotada medidos en el lugar de interés, con la finalidad de establecer condiciones de operatividad y diseño, donde se establece que un 74,8% de las alturas de ola significativa superan el umbral de operatividad ($>1\text{m}$), lo que indica que la boya funcionará en condiciones óptimas la mayor parte del tiempo. Paralelamente, se evaluaron los impactos ambientales directos e indirectos del proyecto, considerando factores como la descarga de salmuera, las alteraciones del hábitat marino y la interferencia con actividades humanas. Los resultados de la factibilidad medioambiental indican que la descarga de salmuera está por debajo de los estándares internacionales utilizados para proyectos de desalinización en Chile. Por último, si bien se obtienen VAN y TIR desfavorables debido al reducido volumen de producción de agua ($5\text{ m}^3/\text{día}$) unido a los altos costos del presente proyecto piloto, se logra plenamente la validación de la tecnología, permitiendo proyectar una producción rentable con boyas similares de clase ICEBERG, capaces de producir 50 m^3 por día.

Aunque en Chile existen desafíos asociados a los proyectos de desalinización, incluyendo la falta de una normativa específica para la descarga de salmuera, este estudio representa un aporte relevante al desarrollo de la desalinización utilizando energías renovables en el país.