



**Facultad de Ingeniería**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**Estudio de Factibilidad Técnica para la Extracción de  
Energía Mareomotriz de las Corrientes de Marea en el  
Golfo de Corcovado, Golfo de Ancud y Puerto Montt.**

**Nicolás Yanko Bogdanic Hernández**

Junio 2018

# **Estudio de Factibilidad Técnica para la Extracción de Energía Mareomotriz de las Corrientes de Marea en el Golfo de Corcovado, Golfo de Ancud y Puerto Montt.**

Nicolás Yanko Bogdanic Hernández

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
NOMBRE REVISOR 1	_____	_____
NOMBRE REVISOR 2	_____	_____
NOMBRE REVISOR 3	_____	_____

## DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados 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 éste 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.

Profesor Guía

Autor

---

Jaime Leyton Espoz

---

Nicolás Yanko Bogdanic Hernández

## **Agradecimientos**

Agradezco enormemente a mi padre, Yanko Nicolas Bogdanic Castro, y a mi madre, Eleanor Ruth Hernández Molina, que me apoyaron en este largo camino, si bien muchas veces no era evidente, siempre creyeron en mí, y, espero, siempre crean en mí.

También agradezco a los compañeros que tuve y me ayudaron en cada paso por este sendero, y al equipo de Balonmano de la Universidad de Valparaíso, donde encontré gente que no muchas veces se portaban bien, siempre estuvieron ahí, en las buenas y en las malas, como una segunda familia. A mis compañeros Danky Hernández Urbano y a Hector Honores Pulgar, que siempre estuvieron ahí también y me motivaron a seguir adelante y no bajar los brazos.

A Constanza Hernández Urbano, que me ayudo aunque no debía, que se enojó conmigo porque a veces hacia las cosas como buen chileno, a última hora., y a su madre y padre, que sin tener la obligación de hacerlo me abrieron las puertas de su casa muchas veces en Rapel, y no me portaba muy bien.

A la profesora y amiga Carla Tureo, que me respondía dudas por WhatsApp a altas horas de la noche sin retarme. A Carmen Castro por soportar esos días que no me era posible ir a trabajar por terminar trabajos atrasados.

Y a todas las personas que me rodearon y me soportaron.

# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
3	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	3
3.1	ALCANCES.....	3
3.2	LIMITACIONES.....	3
4	MARCO TEÓRICO Y REVISION BIBLIOGRÁFICA.....	4
4.1	LAS MAREAS Y SUS FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	4
4.1.1	Tipos de mareas.....	12
4.1.2	Factores no astronómicos que afectan las mareas.....	13
4.1.2.1	Propagación de la onda de marea (onda larga) en aguas someras.....	14
4.1.2.2	Hidrografía.....	14
4.1.2.3	Efectos meteorológicos.....	15
4.2	ENERGÍA MAREOMOTRIZ.....	16
4.2.1	Energía Potencial de las Mareas.....	17
4.2.2	Energía Cinética de las Mareas.....	21
4.2.3	Modos de Operación de una Central Mareomotriz de barrera.....	21
4.2.4	Turbinas.....	26
4.2.4.1	Avances destacados: Turbinas de ultra-bajo salto.....	32
4.2.5	Obra Civil: Barrera.....	35
4.2.6	Estado del Arte: Proyectos Alrededor del Mundo.....	36
4.2.6.1	Central Mareomotriz La Rance (Bretaña, Francia).....	37
4.2.6.2	Planta Mareomotriz Sihwa (Ansan, Corea del Sur).....	39
4.2.6.3	Planta Mareomotriz Jiangxia (Zhejiang, China).....	41
4.2.6.4	Planta Mareomotriz Kislaya Guba (Mar de Barents, Rusia).....	41
4.2.6.5	Central Mareomotriz de la Bahía de Fundy.....	43
5	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE INTERÉS.....	45
5.1	ZONIFICACIÓN REGIONAL.....	46
5.2	ABASTECIMIENTO Y DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LA REGIÓN.....	47
6	POTENCIAL MAREOMOTRIZ MEDIANTE EMBALSES EN LA X REGIÓN.....	51
6.1.1	Condiciones naturales Apropriadas para la Generación.....	51
6.1.2	Condicionantes sobre externalidades positivas/negativas.....	53
6.2	ANTESEDENTES Y DATOS DEL ENTORNO NATURAL.....	54
6.3	APLICACIÓN DE CRITERIOS EN LA REGIÓN DE ESTUDIO.....	58
6.3.1	resumen de los embalses considerados preliminarmente.....	68
6.3.2	Rangos de marea en embalses.....	68
6.3.2.1	Niveles característicos de marea para Embalse “Puerto Montt”.....	69
6.3.2.2	Niveles característicos de marea para Embalse “Castro”.....	70
6.3.3	Energía proporcionada por embalse.....	71
6.3.3.1	Embalse “Puerto Montt”.....	71
6.3.3.2	Embalse “Castro”.....	72
7	CONCLUSIÓN.....	73
8	REFERENCIAS.....	74
9	ANEXO A.....	75
	ANEXO A-2.....	95

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 Representación de fuerzas sobre la Tierra de un cuerpo atractor.</i>	5
<i>Ilustración 2 Representación de fuerzas sobre la Tierra de un cuerpo atractor.</i>	8
<i>Ilustración 3 Representación de fuerzas sobre la Tierra de un cuerpo atractor. (Fuente: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a>)</i>	8
<i>Ilustración 4 Campo de distribución fuerzas de marea. (Fuente: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a>)</i>	10
<i>Ilustración 5 Tipos de régimen de marea en el mundo. (Fuente: <a href="http://www.hurricanescience.org/science/basic/tides/">http://www.hurricanescience.org/science/basic/tides/</a>)</i>	13
<i>Ilustración 6 Amplitud de mareas en el mundo debido a la constituyente lunar M2. (Fuente: Stanford University, 2010)</i>	15
<i>Ilustración 7 Storm Surges. (Fuente: National Geographic, 2012)</i>	16
<i>Ilustración 8 Funcionamiento Central Mareomotriz. (Fuente: <a href="http://www.soz-etc.com/energien-erneuerbar/">http://www.soz-etc.com/energien-erneuerbar/</a>)</i>	18
<i>Ilustración 9 Generación en operación simple modo reflujo.</i>	24
<i>Ilustración 10 Períodos de generación eléctrica. (Fuente: Elements of Tidal-Electric Engineering)</i>	25
<i>Ilustración 11 Generación en una central de doble embalse. (Fuente: Elements of Tidal-Electric Engineering, 2007).</i>	26
<i>Ilustración 12 Partes de una turbina Bulbo. (Fuente: Biblioteca sobre Ingeniería Energética, 2018)</i>	27
<i>Ilustración 13 Bulbo vs Kaplan (Fuente: Biblioteca sobre Ingeniería Energética, 2018).</i>	29
<i>Ilustración 14 Comparación turbina Bulbo vs Straflo (Fuente: Elements of Tidal-Electric Engineering, 2007).</i>	30
<i>Ilustración 15 Relación del diámetro del rotor de distintos turbogeneradores. (Fuente: Elements of Tidal-Electric Engineering, 2007)</i>	31
<i>Ilustración 16 Esquema de Turbina Bulbo con sifón. (Fuente: Mavel Technology, 2015)</i>	32
<i>Ilustración 17 Relación Descarga vs Salto turbinas Bulbo con Sifón. (Fuente: Mini-Hydraulics Laboratory, 2010)</i>	32
<i>Ilustración 18 Comparación del tamaño para un mismo salto y caudal neto. (Fuente: <a href="http://www.saltosdelpirineo.com">http://www.saltosdelpirineo.com</a>)</i>	33
<i>Ilustración 19 Relación entre Volumen de hormigón y altura de saltos. (Fuente: <a href="http://www.saltosdelpirineo.com">http://www.saltosdelpirineo.com</a>)</i>	34
<i>Ilustración 20 Instalación de una VLH en Millau (Francia). (Fuente: <a href="http://www.saltosdelpirineo.com/equipos">http://www.saltosdelpirineo.com/equipos</a>)</i>	34
<i>Ilustración 21 Vista costado central La Rance. (Fuente: <a href="http://www.energystorageexchange.org">http://www.energystorageexchange.org</a>)</i>	37
<i>Ilustración 22 Bosquejo interior de la barrera. (Fuente: <a href="http://www.energystorageexchange.org">http://www.energystorageexchange.org</a>)</i>	38
<i>Ilustración 23 Embalse central La Rance a 15 km de altura. (Fuente: Google Earth)</i>	39
<i>Ilustración 24 Planta Mareomotriz Sihwa. (Fuente: Google Earth)</i>	39
<i>Ilustración 25 Central Mareomotriz Sihwa (Costado). (Fuente: <a href="http://mysave.in/v1">http://mysave.in/v1</a>)</i>	40
<i>Ilustración 26 Vista frontal de la central Mareomotriz Jiangxia. (Fuente: <a href="https://tethys.pnnl.gov">https://tethys.pnnl.gov</a>)</i>	41
<i>Ilustración 27 Vista frontal de la central Kislaya Guba. (Fuente: <a href="https://priliv.nethouse.ru">https://priliv.nethouse.ru</a>)</i>	42
<i>Ilustración 28 Vista frontal Central Mareomotriz de Annapolis. (Fuente: <a href="http://www.marinas.com">www.marinas.com</a>)</i>	43
<i>Ilustración 29 X Región de Chile. (Fuente: Google Earth)</i>	45
<i>Ilustración 30 Zonificación Estratégica de Desarrollo. (Fuente: Elaboración Propia)</i>	47
<i>Ilustración 31 División Sistemas Interconectados Chile. (Fuente: Consejo Nacional de Energía)</i>	48
<i>Ilustración 32 Distribución de líneas y subestaciones. (Fuente: <a href="https://sic.coordinador.cl">https://sic.coordinador.cl</a>)</i>	49

<i>Ilustración 33 Porcentajes de fuentes energéticas. (Fuente: Aquatera, 2014)</i>	50
<i>Ilustración 34 Izq: ubicación estación Puerto Montt. Der: ubicación estación Castro.</i>	55
<i>Ilustración 35 Serie de tiempo original con falta de datos.</i>	56
<i>Ilustración 36 Embalse Palidad/San Miguel. (Fuente: Google Earth)</i>	58
<i>Ilustración 37 Embalse Asasao. (Fuente: Google Earth)</i>	58
<i>Ilustración 38 Embalse "El Dao". (Fuente: Google Earth)</i>	59
<i>Ilustración 39 Batimetría embalse "El Dao". (Fuente: Elaboración Propia)</i>	59
<i>Ilustración 40 Embalse "Castro". (Fuente: Google Earth)</i>	61
<i>Ilustración 41 Batimetría embalse "Castro". (Fuente: Elaboración Propia)</i>	61
<i>Ilustración 42 Embalse "San Rafael". (Fuente: Google Earth)</i>	62
<i>Ilustración 43 Batimetría embalse "San Rafael". (Mejorar) (Fuente: Elaboración Propia)</i>	63
<i>Ilustración 44 Embalse "Calcuco". (Fuente: Google Earth)</i>	64
<i>Ilustración 45 Batimetría embalse "Calcuco". (Fuente: Elaboración Propia)</i>	64
<i>Ilustración 46 Embalse "Puerto Montt". (Fuente: Google Earth)</i>	65
<i>Ilustración 47 Batimetría embalse "Puerto Montt". (Fuente: Elaboración Propia)</i>	66
<i>Ilustración 48 Embalse "Auchac". (Fuente: Google Earth)</i>	67

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 4.1 Principales constituyentes armónicos.</i>	11
<i>Tabla 4.2 Central Mareomotriz La Rance.</i>	23
<i>Tabla 5.1 Consumo energético Región de Los Lagos.</i>	50
<i>Tabla 5.2 Capacidad Instalada Centrales Termoeléctricas X Región.</i>	51
<i>Tabla 6.1 Características naturales del sector a intervenir.</i>	53
<i>Tabla 6.2 externalidades de consideración para selección de sitios.</i>	54
<i>Tabla 6.3 Cartas náuticas utilizadas para representar batimetría.</i>	57
<i>Tabla 6.4 Resumen de embalses a considerar.</i>	68
<i>Tabla 6.5 Niveles característicos del Embalse "Puerto Montt".</i>	69
<i>Tabla 6.6 Rangos de marea Embalse "Castro".</i>	70
<i>Tabla 6.7 Producción 3 meses embalse "Puerto Montt".</i>	71
<i>Tabla 6.8 Producción anual embalse "Puerto Montt".</i>	71
<i>Tabla 6.9 Producción 3 meses embalse "Castro".</i>	72
<i>Tabla 6.10 Producción estimada mínima anual embalse "Castro".</i>	72

## RESUMEN

El continuo desarrollo de las ciudades y el aumento de su economía regional y/o país van de la mano con los requerimientos tecnológicos que los procesos de sus microindustrias requieren. Este desarrollo, cada vez más vertiginoso, demanda un desarrollo energético acorde con las necesidades de los tiempos que se viven hoy en día.

En localidades más apartadas de las zonas de las grandes industrias el desarrollo de sus empresas, si bien a una escala menor, crece cada vez más rápido. Por lo que se hace necesario contar con fuentes energéticas que no requieran de un traslado de electricidad, encareciendo el recurso.

El inconveniente del desarrollo de la micro y mediana industria cuando se basa en aprovechar recursos naturales sensibles a cambios dentro del ecosistema es que requieren suministros energéticos, como toda industria, pero éstos deben ser lo menos influyente posible dentro del ecosistema mismo. Por lo que la extracción del recurso eléctrico debe ser lo más acorde posible con las actividades que se desarrollan en su entorno. Así lo entienden los gobiernos regionales en su afán por promover la investigación y la implementación de iniciativas que busquen el desarrollo de Energía Renovable No Convencionales (ERNC).

El presente trabajo se centra en la búsqueda y selección de posibles sitios en la X Región del país que cuenten con las características necesarias para la implementación de una Central Mareomotriz de embalse. Esto se logró estudiando las características naturales de diferentes sectores de la Isla Grande de Chiloé y la zona aledaña a Puerto Montt considerando criterios que en él se describen para su selección. Esto con la finalidad de cuantificar el mínimo de producción anual que puede generarse en los sitios seleccionados.