



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO
EÓLICO MARINO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN LA BAHÍA DE TONGOY EN BASE AL
MODELO NUMÉRICO WRF**

Erick Wladimir Soto Román

Octubre 2024

**EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO EÓLICO MARINO
PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA BAHÍA DE
TONGOY EN BASE AL MODELO NUMÉRICO WRF**

Erick Wladimir Soto Román

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
DR. MATÍAS QUEZADA Profesor guía	_____	_____
DRA. CATALINA AGUIRRE GALAZ Revisor	_____	_____
DIEGO BECERRA GODOY Revisor	_____	_____

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 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.

Memorista
Erick Soto Román

Profesor guía
Matías Quezada Labra

AGRADECIMIENTOS

Mediante estas líneas quiero comenzar agradeciendo a mi familia, siempre estuvieron apoyándome en los momentos que más lo necesité a lo largo de toda mi carrera universitaria. Infinitas gracias a José y Ana, mis padres, los cuales sin ellos no sería lo que soy hoy en día; a Eloa y Vicente, mis hermanos, gracias por cada risa, discusión, y conversación que tuvimos; a mi abuela Vilma y a mi abuelo Hugo por enseñarme el cariño por los números y la ingeniería, siempre les estaré infinitamente agradecido.

Mis amigos, que hubiera sido mi etapa universitaria sin ustedes. Sin duda alguna que agradezco a cada persona, compañero con el que compartí y me topé dentro de la U, pero en especial le agradezco al Nico, al Chino y al Hans por siempre apoyarme en los buenos y peores momentos, agradezco a esas bebidas por haberlos conocido. A Natalia, Keitell y Constanza por esas tardes de estudio, cafecitos, chelitas, buena conversa y compañía. A todos aquellos con los que compartí y jugué una pichanguita, esas tardes/noches de fútbol y buena compañía son recuerdos que guardaré por siempre; así como también cada una de las risas, rabias, tristezas y alegrías que viví dentro de mi período universitario, sin duda que todas estas experiencias me permitieron ser la persona que soy hoy en día.

Quiero agradecer profundamente a todos los profesores que me hicieron clases, sin duda alguna que todos me dejaron de alguna u otra forma distintos aprendizajes en mi vida personal y profesional. En particular, agradecer a mi profesor guía Matías Quezada Labra por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de título junto a él y entregarme las herramientas y conocimientos necesarios para lograr este importante objetivo. Además, quiero agradecer a Ariel González por enseñarme a utilizar un programa desde cero, como fue el caso del modelo WRF, y a orientar mi trabajo de título para obtener los mejores resultados. Infinitas gracias a ambos. Por último, agradecer a todo el equipo docente y universitario de la carrera por tener siempre una buena disposición en solucionar los problemas.

Este trabajo va dedicado a Jacqueline, gracias por darme la vida y acompañarme en cada paso que doy, siempre serás la estrella más brillante del firmamento.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 GENERAL	3
2.2 ESPECÍFICOS	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1 MERCADO ELÉCTRICO EN CHILE	4
3.1.1 ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES	5
3.1.2 MATRIZ ENERGÉTICA	6
3.2 RECURSOS ENERGÉTICOS	9
3.2.1 RECURSO EÓLICO MARINO	10
3.2.2 POTENCIAL EÓLICO MARINO.....	13
3.3 VIENTOS	15
3.3.1 LEY EXPONENCIAL DE HELLMANN	19
3.4 CARACTERÍSTICAS BATIMÉTRICAS DEL LECHO MARINO EN EL NORTE DE CHILE Y EN LA BAHÍA DE TONGOY	20
3.5 ASPECTOS AMBIENTALES GENERALES DE UN PROYECTO DE ENERGÍA EÓLICA MARINA	23
3.6 MODELO NUMÉRICO	26
3.6.1 WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL (WRF)	26
4. METODOLOGÍA.....	31
4.1 ZONA DE ESTUDIO.....	31
4.2 MATERIALES.....	32
4.2.1 FUENTE DE DATOS OBSERVACIONALES (<i>IN-SITU</i>).....	32
4.2.2 INFORMACIÓN SATELITAL	34
4.2.3 MODELO NUMÉRICO WRF.....	35
4.2.4 AEROGENERADORES.....	35
4.3 MÉTODOS	37
4.3.1 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO EÓLICO MARINO.....	37
4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	40

4.4.1	SESGO (BIAS)	40
4.4.2	ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE)	40
4.4.3	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	40
4.5	CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO WRF	41
4.5.1	DOMINIOS	41
4.5.2	FORZANTE DEL MODELO WRF	43
4.5.3	PARAMETRIZACIONES FÍSICAS	44
4.5.4	ARCHIVO <i>NAMelist.INPUT</i>	44
4.5.5	SIMULACIONES NUMÉRICAS REALIZADAS	44
5.	RESULTADOS	46
5.1	VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO WRF	46
5.1.1	VALIDACIÓN DEL MODELO WRF CON INFORMACIÓN SATELITAL	46
5.1.2	VALIDACIÓN DEL MODELO WRF CON INFORMACIÓN <i>IN-SITU</i>	52
5.2	ESTIMACIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE	57
5.3	ESTIMACIÓN PUNTUAL DEL POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE	60
5.4	ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE EN BASE A DOS AEROGENERADORES	65
6.	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	71
6.1	COMPARACIÓN CON PARQUE EÓLICO EN TIERRA	71
6.2	CONSUMO ENERGÉTICO DE TONGOY	73
7.	CONCLUSIONES	74
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
9.	ANEXOS	81
9.1	ARCHIVOS <i>NAMelist.INPUT</i>	81
9.1.1	SIMULACIÓN 1	81
9.1.2	SIMULACIÓN 2	84
9.1.3	SIMULACIÓN 3	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: Clasificación de las energías potenciales y cinéticas	9
Tabla 3.2: Fuentes de energías renovables	10
Tabla 3.3: Direcciones de vientos globales	19
Tabla 3.4: Valores estimados del exponente de Hellmann según el tipo de suelo	20
Tabla 4.1: Especificaciones técnicas del sensor de viento RM Young	33
Tabla 4.2: Propiedades de los aerogeneradores Siemens y Vestas	36
Tabla 4.3: Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo WRF	44
Tabla 4.4: Simulaciones numéricas realizadas en el modelo WRF	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Distribución capacidad instalada energía total. (A) diciembre, 2020. (B) abril, 2023	7
Figura 3.2: Matriz energética primaria de Chile, en Tera calorías. (A) año 2012. (B) año 2020. (C) 2021	8
Figura 3.3: Matriz energética secundaria de Chile a través de los años, en Tera calorías.	8
Figura 3.4: Funcionamiento de un parque eólico offshore	11
Figura 3.5: Parque eólico offshore Hornsea Two, Reino Unido	12
Figura 3.6: Promedio anual de capacidad nominal de turbinas eólicas marinas instaladas	13
Figura 3.7: Curva de potencia del aerogenerador Siemens SWT-3.6-120	14
Figura 3.8: Transporte neto de energía en la atmósfera	16
Figura 3.9: Variación de presión en relación con la altura	17
Figura 3.10: Celda de Hadley primitiva expuesta por George Hadley	17
Figura 3.11: Circulación general de la atmósfera	18
Figura 3.12: Morfología general desde Arica hasta Valparaíso	22
Figura 3.13: Batimetría de la bahía de Tongoy	23
Figura 3.14: Trayectos de vuelo de las aves en la fase inicial de Operación del Parque eólico marino Nysted, Dinamarca.	25
Figura 3.15: Variables de entrada del modelo WRF	29
Figura 3.16: Flujo de datos y componentes del programa WPS y cómo los datos llegan finalmente al WRF	30
Figura 4.1: Zona de estudio del proyecto	31
Figura 4.2: Ubicación de la balsa de Tongoy	33
Figura 4.3: Curvas de potencia de los aerogeneradores Siemens y Vestas	36
Figura 4.4: Esquema metodológico para evaluar la disponibilidad de recurso eólico marino	37

Figura 4.5: Dominios realizados en el programa WRF con sus respectivas resoluciones horizontales	42
Figura 5.1: Campo de viento promedio anual 2019 a 10 metros, del modelo WRF (arriba) y del Satélite (abajo).....	47
Figura 5.2: Campos de viento promedio mensual 2019 a 10 metros, del modelo WRF (arriba) y del Satélite (abajo).....	48
Figura 5.3: Campos de viento promedio estacional 2019 a 10 metros, del modelo WRF (arriba) y del Satélite (abajo).....	49
Figura 5.4: Gráficos con estadísticos anuales (BIAS, RMSE y R^2).....	50
Figura 5.5: Gráficos de dispersión anual pasadas ascendentes (izquierda) y descendentes (derecha) entre el modelo WRF y la información satelital en todo el dominio 01	51
Figura 5.6: Ubicación desde donde se extrae la información del modelo WRF para la validación de este, donde el asterisco azul representa la balsa de Tongoy y la equis negra representa el punto donde se obtiene la información del WRF	52
Figura 5.7: Series de tiempo anual 2019 del modelo WRF, Balsa Tongoy y comparación entre ambas datas, respectivamente.	53
Figura 5.8: Gráfico de dispersión (izquierda) y cuantil-cuantil (derecha) más línea de tendencia (color rojo) entre la data del WRF y de la balsa Tongoy - CEAZA	53
Figura 5.9: Ubicación de estaciones en tierra	54
Figura 5.10: Series de tiempo de velocidad de viento para el mes de enero de 2019 comparando WRF con balsa, estación La Serena y estación Pan de Azúcar	55
Figura 5.11: Gráficos de dispersión de velocidad del viento para el mes de enero de 2019 comparando WRF con la balsa, estación La Serena y estación Pan de Azúcar.....	56
Figura 5.12: Campo anual de potencia eólica offshore para el año 2019	57
Figura 5.13: Campos mensuales de potencia eólica offshore para el año 2019.....	58
Figura 5.14: Campos estacionales de potencia eólica offshore para el año 2019	59
Figura 5.15: Veriles en la bahía de Tongoy y punto de grilla del WRF desde donde se extrae información de la potencia eólica	60
Figura 5.16: Serie de tiempo anual para el año 2019 de potencia eólica offshore.....	61
Figura 5.17: Series de tiempo mensual para el año 2019 de potencia eólica offshore	62
Figura 5.18: Series de tiempo estacional para el año 2019 de potencia eólica offshore.....	63
Figura 5.19: Rosa de vientos anual del 2019 simulado con WRF	64
Figura 5.20: Campo de promedio anual de potencia eólica a 80 metros utilizando el aerogenerador Vestas (izquierda) y campo de promedio anual de potencia eólica a 90 metros utilizando el aerogenerador Siemens (derecha)	65
Figura 5.21: Campos de promedio mensual de potencia eólica a 80 metros utilizando el aerogenerador Vestas (arriba) y campo de promedio mensual de potencia eólica a 90 metros utilizando el aerogenerador Siemens (abajo)	66

Figura 5.22: Campos de promedio estacionales de potencia eólica a 80 metros utilizando el aerogenerador Vestas (izquierda) y campos de promedio estacionales de potencia eólica a 90 metros utilizando el aerogenerador Siemens (derecha).....	67
Figura 5.23: Serie de tiempo anual para el año 2019 de potencia eólica offshore en base a los 2 tipos de aerogeneradores	68
Figura 5.24: Series de tiempo mensual para el año 2019 de potencia eólica offshore en base a los 2 tipos de aerogeneradores	69
Figura 5.25: Series de tiempo estacional para el año 2019 de potencia eólica offshore en base a los 2 aerogeneradores.....	70
Figura 6.1: Ubicación del Parque Eólico Punta Sierra.....	72

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula para obtener la potencia eólica.....	15
Ecuación 2: Fórmula de la Ley exponencial de Hellmann.....	19
Ecuación 3: Componente u del viento	27
Ecuación 4: Componente v del viento	27
Ecuación 5: Componente w del viento.....	27
Ecuación 6: Perturbación temperatura potencial	27
Ecuación 7: Establece el flujo masico de las variables	27
Ecuación 8: Perturbación geopotencial.....	28
Ecuación 9: Relación de mezcla de humedad	28
Ecuación 10: Establece el flujo masico de las variables	28
Ecuación 11: Componentes de la velocidad del viento	28
Ecuación 12: Temperatura potencial	28
Ecuación 13: Relación de mezcla de humedad	29
Ecuación 14: Fórmula para obtener el sesgo	40
Ecuación 15: Fórmula para obtener el error cuadrático medio.....	40
Ecuación 16: Fórmula para obtener el coeficiente de determinación	40
Ecuación 17: Fórmula de magnitud del viento	46

RESUMEN

En esta memoria de título se realiza una evaluación de la disponibilidad del recurso eólico marino para la generación de energía eléctrica en la bahía de Tongoy en base a modelaciones realizadas con el modelo numérico WRF para todo el año 2019. El modelo numérico fue calibrado con información satelital, específicamente con datos del satélite MetOp-A, que proporciona vientos superficiales sobre el océano pacífico, y con información puntual, particularmente con datos registrados por el anemómetro de la balsa de Tongoy, ubicada dentro de la bahía del mismo nombre. Para conseguir el objetivo principal expuesto en este proyecto de título, se evalúa el recurso eólico marino con dos aerogeneradores, uno marca SIEMENS-GAMESA y el otro marca Vestas, cuyas potencias nominales son de 8 y 9,5 MW; respectivamente. Con la primera turbina se obtiene un mejor aprovechamiento de este recurso con valores anuales entre 25 y 30 MW , en el caso de los campos espaciales de energía; y de 24,68 MW como media anual, en el caso de la evaluación puntual de energía, donde además se destaca el mes de invierno como la temporada con mayores intensidades en el campo de potencia, y la primavera en el caso de la evaluación puntual. Finalmente, se comparan estos resultados con el Parque eólico Punta Sierra, cercano a la zona de estudio, y con el consumo energético de aquel año de la ciudad de Tongoy, quedando demostrado el alto potencial para la generación de energía eléctrica en esta localidad de Chile.