



**UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO**



ESCUELA DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA**

**Optimización numérica de un generador de acción
directa para conversión de energía por olas oceánicas**

TESIS

**PRESENTADA PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN
EN ENERGÍA**

AUTOR:

MSc. Pedro Demetrio Reyes Tassara

ASESOR:

Dr. Juan José Uchuya López

Lambayeque, 2023

**Optimización numérica de un generador de acción directa para
conversión de energía por olas oceánicas**

PRESENTADA POR:



MSc. Pedro Demetrio Reyes Tassara
AUTOR



Dr. Juan José Uchuya López
ASESOR

Presentada a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo para optar el Grado Académico de: DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA.

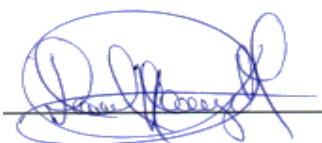
APROBADA POR:



Dr. Luis Jaime Collantes Santisteban
PRESIDENTE



Dr. Segundo Abelardo Horna Torres
SECRETARIO



Dr. Daniel Carranza Montenegro
VOCAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

021

Siendo las 16 00 horas del día 01 de DICIEMBRE del año Dos Mil
Veinte y tres

en la Sala de Sustentación de la Escuela de Posgrado de la
 Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, se reunieron los miembros del Jurado
 designados mediante Resolución N° 850-2023-UP de fecha 11/09/2023, conformado por

Dr. Luis Jaime Collantes Vautsteban	PRESIDENTE (A)
Dr. Segundo Abrón Herrera Torres	SECRETARIO (A)
Dr. Daniel Canauza Huertanazo	VOCAL
Dr. Juan Uchuya Lopez	ASESOR (A)

Con la finalidad de evaluar la tesis titulada "OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA DE UN
 GENERADOR DE ACCIÓN DIRECTA POR CONVERSIÓN
 DE ENERGÍA POR OLAS OCEÁNICAS"

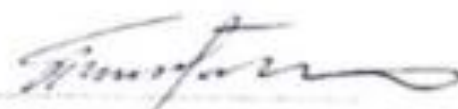
presentado por el (la) Tesisista PEDRO DEHETRIO REYES TASSARA
 sustentación que es autorizada mediante Resolución N° 1063-2023-UP de fecha
23/11/2023

El Presidente del jurado autorizó del acto académico y después de la sustentación, los señores
 miembros del jurado formularon las observaciones y preguntas correspondientes, las mismas que
 fueron absueltas por el (la) sustentante, quien obtuvo 18 puntos que equivale al
 calificativo de MUY BUENO

En consecuencia el (la) sustentante queda apto (a) para obtener el Grado Académico de
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
 MECÁNICA Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN ENERGÍA

Siendo las 17 15 horas del mismo día, se da por concluido el acto académico, firmando la
 presente acta.


 PRESIDENTE


 SECRETARIO


 VOCAL


 ASESOR

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mi padre Pedro Jesús Reyes Carrasco, mi madre Lilians Tassara García, mis tres hermanos Rosa María, María Luisa y Jorge Luis Reyes Tassara e hijos Pedro Jorge Manuel y Natalia Lilians Reyes Sánchez, por el inmenso amor, la confianza, dedicación y paciencia para que culmine con éxito el doctorado, sin su amor y apoyo no lo hubiera logrado.

Agradecimiento

Quiero agradecer a mi asesor, el Dr. Juan José Uchuya López, por su paciencia y apoyo en el desarrollo y culminación de mi tesis; así también, agradezco a la coordinación y profesores del excelente programa de doctorado en ciencias de la ingeniería mecánica y eléctrica con mención en energía de la prestigiosa casa de estudios, la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, ha sido una experiencia gratificante. Al Instituto para el Desarrollo e Investigación de Ingeniería Naval de la Facultad de Ingeniería Mecánica (IDIINFIM) de la Universidad Nacional de Ingeniería por disponer su laboratorio de cómputo y grupo de investigación para dar soporte al trabajo de tesis con el acceso al Ansys Academic en la Biblioteca Central de la UNI. Por último, la asistencia de los tesisistas de pregrado, Aguirre y Torres, a quien he asesorado en el año 2023 los cuales han participado en la redacción de la tesis. Quedo muy agradecido.

Índice General

Acta de sustentación (copia).....	III
Dedicatoria.....	IV
Agradecimiento	V
Índice General.....	VI
Índice de Tablas.....	VIII
Índice de Figuras	IX
Resumen	X
Abstract.....	XI
Introducción.....	12
Capítulo I. Diseño Teórico	15
1.1 Antecedentes de la Investigación	15
1.2 Realidad Problemática.....	21
1.3 Objetivos	30
1.4 Hipótesis.....	31
1.5 Operacionalización de Variables.....	31
1.6 Justificación.....	32
1.7 Limitaciones de la investigación	35
Capítulo II. Marco Teórico.....	37
2.1 Energía de las olas oceánicas – <i>Oceanic Waves Energy</i> (OWE)	37
2.2 Equipos de energías de olas – <i>Wave Energy Device</i> (WED)	37
2.3 Estator Lineal – Stator Linear	39
2.4 “ <i>Stator lineal</i> ” de conector dividido – <i>Split Translator Supporting Stator Linear</i> (STSSLG)	39
2.5 Análisis computacional de campos electromagnéticos en ANSYS-MAXWELL 40	
2.6 Definiciones Conceptual	41

Capítulo III. Metodología	52
3.1 Diseño Metodológico	52
3.2 Dimensiones del modelo propuesto	56
3.3 Materiales y propiedades electromagnéticas	58
3.4 Simulación numérica de campo magnético transiente	60
3.5 Longitud de elementos de malla.....	61
Capítulo IV. Optimización numérica del generador de acción directa	62
4.1 Estudios de casos.....	62
4.2 Modelo numérico	63
4.3 Resultados de la simulación	67
4.4 Aporte.....	72
Conclusiones.....	75
Recomendaciones	77
Referencias Bibliográficas.....	79

Índice de Tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	31
Tabla 2. Propiedades mecánicas y electromagnéticas	59
Tabla 3. Parámetros del modelo planar	65

Índice de Figuras

Figura 1. Mapamundi del índice de viabilidad para la energía mareomotriz, (Weiss et al., 2018).....	25
Figura 2. Mapamundi del rango de probabilidad de implementación de energía mareomotriz, (Weiss et al., 2018).....	26
Figura 3. Diagrama de barras de los países con producción de energía mareomotriz en TWh/mes, (Weiss et al., 2018)	27
Figura 4. Matriz de H_s (altura de ola) vs T_s (periodo de ola) indicando la producción de energía E , (López et al., 2015).....	29
Figura 5. Rosa Náutica de las alturas de ola según su dirección, (López et al., 2015).....	29
Figura 6. Promedio de flujo de energía oceánica, (López et al., 2015)	30
Figura 7. Categorización de las tecnologías de energía marina según la Agencia Internacional de Energía, (Pecher & Kofoed, 2017)	39
Figura 8. Principio de trabajo de un Generador tipo STSSLG, (O. Farrok et al., 2017)	40
Figura 9. Dimensiones del Generador Axisimétrico	57
Figura 10. Detalles de los dientes del translator	58
Figura 11. Detalles del material según la geometría del modelo.....	59
Figura 12. Ejemplo de refinamiento de malla para simulación FEM.....	60
Figura 13. Malla para elementos finitos del modelo propuesto	61
Figura 14. Esquema de los generadores Lineales, conventional y split	63
Figura 17. Curva de densidad magnética vs intensidad magnética	66
Figura 18. Malla	67
Figura 19. Potencia generada por translators con diferentes pasos	68
Figura 20. Potencia generada para translator con diferentes depth tooth	69
Figura 21. Potencia por unidad de masa.....	70
Figura 23. Intensidad de campo magnético	72
Figura 24. densidad de campo magnético	72

Resumen

La presente tesis explora los principios y la dinámica de las olas y su potencial de generación de energía a través la conversión de energía por generadores de acción directa. Los generadores de acción directa tienen un comportamiento de los campos electromagnéticos definidos por el estator y Translator, que, para fines de optimizar numéricamente la generación de energía, se realiza una discretización de la geometría en elementos finitos y se caracterización de materiales, voltaje y velocidad de rotación. Los resultados se relacionan en el peso del translator que geométricamente es el óptimo, y la generación de mayor potencia del generador. Se analizan el paso y ancho de diente del translator para demostrar el aumento de la generación de energía por olas. El análisis computacional de campos electromagnéticos del generador es hecho en ANSYS- MAXWELL.

PALABRAS CLAVES: Electromagnéticos; Estator y Translator; Discretización; Computacional.

Abstract

This thesis explores the principles and dynamics of waves and their power generation potential through energy conversion by direct action generators. Direct action generators have a behavior of the electromagnetic fields defined by the Stator and Translator, which, to numerically optimize the power generation, a discretization of the geometry in finite elements and the characterization of materials, voltage and rotation speed are performed. The results are related to the weight of the Translator, which is geometrically the optimum, and the generation of the highest power of the generator. The translator tooth pitch and width are analyzed to demonstrate the increase in wave power generation. The computational analysis of electromagnetic fields of the generator is done in ANSYS-MAXWELL.

KEYWORDS: Electromagnetics; Stator and Translator; Discretization; Computational.

Introducción

El Perú debido al crecimiento poblacional e industrial y también a la inminente demanda de cambio de matriz energética, viene desarrollando nuevas políticas y marcos legislativos para el crecimiento en oferta de plantas de energía renovables, entre las más conocidas, estudiadas y ya implementadas en los recientes años se tienen plantas eólicas y de paneles solares, las cuales generan energía basado en el viento y sol respectivamente. En este sentido, para diversificar la posibilidad de oferta energética se abre la posibilidad de la extracción de energía mareomotriz, la cual se basa en el principio de extracción de energía de la cantidad de movimiento de una ola, la cual por su propio movimiento genera un movimiento cíclico al cual cualquier objeto flotante se ve sujeto a seguir.

Al ser el Perú un país con una línea costera mayor a 3,000 Km surge la necesidad de considerar la energía mareomotriz como una fuente más de energía renovable, es así como gracias a estudios de caracterización de mar espectral se logra evidenciar la potencia que tienen las costas como fuente de energía mediante mecanismos marinos.

La conversión de energía a partir de las olas oceánicas se ha convertido en un campo de investigación de vital importancia en el contexto de la creciente demanda de fuentes de energía renovable y sostenible. El vasto potencial energético de los océanos, impulsado por la energía cinética de las olas generadas por la interacción del viento con la superficie del mar, ha atraído la atención de científicos, ingenieros y legisladores de todo el mundo. Esta fuente de energía renovable promete un suministro inagotable de electricidad con un impacto ambiental significativamente menor en comparación con las fuentes de energía convencionales.

Uno de los enfoques más prometedores para aprovechar esta energía es a través de los generadores de acción directa (GAD) que convierten directamente la energía mecánica de

las olas en energía eléctrica. Estos sistemas, a diferencia de otros métodos de generación de energía de las olas que utilizan sistemas hidráulicos o neumáticos intermedios, ofrecen ventajas notables en términos de eficiencia y simplicidad. Sin embargo, el diseño y optimización de estos GAD plantean desafíos significativos debido a la complejidad inherente de las olas oceánicas y las condiciones cambiantes del mar.

La optimización numérica de un generador de acción directa para la conversión de energía de olas oceánicas se ha convertido en un tema de investigación crucial en este campo. La optimización busca mejorar la eficiencia, confiabilidad y durabilidad de los GAD, maximizando su rendimiento en diversas condiciones de operación. Esto implica la necesidad de abordar una serie de cuestiones multidisciplinarias que involucran la hidrodinámica, la mecánica de materiales, la electrónica de potencia y el control de sistemas. En la tesis se explorará en detalle los desafíos inherentes a la optimización numérica de los generadores de acción directa para la conversión de energía de olas oceánicas. Además, se examinará las metodologías y técnicas clave utilizadas en este proceso, destacando la importancia de la simulación numérica, la optimización de diseño y el desarrollo de algoritmos de control avanzados. Además, se considerarán la tecnología en constante evolución, así como su contribución potencial a la matriz energética global.

A medida que se avance en este análisis, se volverá evidente que la optimización numérica desempeña un papel fundamental en el desarrollo exitoso de los generadores de acción directa para la conversión de energía de olas oceánicas, y que su impacto puede tener implicaciones significativas en la lucha contra el cambio climático y la búsqueda de fuentes de energía sostenible.

Para resumir, en este trabajo de investigación se propone la optimización de un generador del tipo de traductor split ya que se ha evidenciado tener una eficiencia relativamente alta respecto a otros modelos. Además de ello marcar un primer hito para la prospectiva de este

tipo de máquinas las cuales pueden ser fácilmente implementadas en los próximos años en el litoral peruano para conversión de energía.

Capítulo I. Diseño Teórico

1.1 Antecedentes de la Investigación

En Krishna et al. (2013) se realiza el modelo dinámico de un generador de olas de mar, donde se determina la posición y movimiento del conector basado en la salida de la tensión del generador, con ello se logra el modelo matemático para la representación del espectro de potencia, el cual es contrastado con pruebas experimentales, basándose en modelos previos para el efecto de saturación y obteniendo buenos resultados de correlación, siendo considerado la base para estudios teóricos futuros.

En Farrok et al. (2016) se observa la posibilidad de buscar la optimización morfológica basada en la búsqueda de la mayor eficiencia con el menor costo y peso del generador lineal, todo ello utilizando Algoritmos Genéticos (GA). Sin embargo, al ser de gran costo de procesamiento se propone tener una optimización supervisada para así acortar el tiempo de optimización. Para la determinación de la potencia entregada del generador lineal se utilizó el software comercial ANSYS el cual puede integrar los diferentes entes multifísicos que intervienen en ese estudio.

Para evaluar desde un enfoque integral se ve que en Zhang et al. (2014) se hace un estudio comparativo entre un generador lineal monofásico y un generador magnetizado radialmente, donde en el generador lineal monofásico evaluó las características geométricas y el orden que tienen las matrices de Hallbach. A partir de esta comparación se tiene el modelo matemático necesario para la optimización de un generador lineal, el cual al final se compara con ensayos experimentales de conversión de energía de olas concluyendo con una convergencia en los nuevos diseños basados en estudios teóricos y experimentales.

Por otro lado, se ve un contraste en Jing et al. (2017) donde se propone un generador del tipo lineal de alta temperatura para un superconductor (HTS-LG), esta propuesta desarrolla un método para diseñar la fuga y pérdida del calor basada en simulaciones de la geometría de forma tridimensional para un generador tipo HTSLG. El resultado de esta optimización es comparado con el performance de un generador lineal de imán permanente (PM) logrando encontrar una mejoría en comparación de este último en términos de peso, eficiencia y volumen. Como predecesor de una optimización geométrica se ve que en Farrok et al. (2017) se reduce el peso al dividir el conector en dos partes, reduciendo así el peso de este en un 20 % al menos, esto por ende tiene dos efectos principales, uno de ellos es la mejor percepción de la dinámica de la boya respecto al oscilamiento de las olas marinas, y el otro es que en esta división se generaría un nuevo estator dentro del conector para poder así dividir el campo de flujo magnético durante el movimiento. Para evaluar este nuevo modelo propuesto se utilizarán las herramientas de elementos finitos de ANSYS para la comparación entre este modelo y los convencionales, el resultado encontrado es que los dos modelos pueden generar la misma cantidad de electricidad a pesar de que uno es de la mitad del tamaño que el otro. Además, de lo mencionado anteriormente, se ve innovaciones en Sun et al. (2020) donde se propone un nuevo diseño de generador lineal de imanes móviles de placa (PMMLG), donde se analizara los circuitos magnéticos para el modelo propuesto, el prototipo dimensionado será de 2KW y una carrera máxima de 40mm, con una fuerza electromagnética máxima de 800N, se analizara mediante modelos de elementos finitos para campos magnéticos, para describir el comportamiento del flujo en este modelo se realizara un estudio comparativo para dos modelos presentados respecto a sus características electromagnéticas. Este estudio analiza si las condiciones de refrigeración son suficientes para mantener el imán sin desmagnetización. Se concluye que el generador lineal tiene baja tasa de movimiento, baja fuerza de arrastre, y alta velocidad de respuesta.

También, se encuentra en Azhari et al. (2021) las ventajas de un generador lineal en contraste con generadores rotacionales, en términos de eficiencia, simplicidad y ratio peso-fuerza. Por tal motivo se estudió un prototipo (LPMGs) en condiciones reales de mar con olas unidireccionales a diferentes alturas de ola y frecuencias. El estudio se llevó a cabo con la metodología de JONSWAP para obtener el espectro de energía y la interacción de la respuesta dinámica del cuerpo mediante MSS por SIMULINK. Luego de ello mediante este modelo obtenido de la respuesta real se simuló por elementos finitos magnéticos (FEMM) el flujo magnético originado. Determinando la potencia de salida debido a este movimiento en condiciones experimentales. Al final se correlacionan las alturas de ola y las frecuencias con la potencia de salida, hallando una predominancia de la altura de ola para los dos modelos estudiados.

Hasta ahora, se ha examinado una amplia gama de recolectores de energía oceánica, y gran parte de esta diversidad se encuentra en la obra de Ali et al. (2021). El artículo proporciona una descripción detallada de los generadores lineales de imán permanente que utilizan diversas geometrías. Entre estas geometrías, se destacan ejemplos como las configuraciones tubulares, octogonales, de reluctancia cambiante y de generadores de flujo cambiante. Cada una de estas geometrías ofrece enfoques únicos para la conversión de la energía de las olas en energía eléctrica. También se adentra en la optimización de estas geometrías mediante el uso de algoritmos genéticos y curvas Biezer. Este enfoque permite ajustar y refinar los diseños de los generadores para maximizar su eficiencia y rendimiento. La optimización es esencial en el desarrollo de tecnologías de energía de olas, ya que la eficiencia y la capacidad de generación de energía son factores críticos para su viabilidad económica. Además de revisar las geometrías existentes y sus métodos de optimización, el artículo presenta nuevos modelos de generadores. Uno de los ejemplos notables es el generador lineal de superconductor del modelo (MFSPMLG). Este generador utiliza materiales

superconductores en su construcción, lo que plantea un cambio significativo en la forma en que se genera y se maneja la energía. La investigación incluye un análisis detallado de este generador y los problemas emergentes utilizando FEM magnético en ANSYS. Una de las áreas clave de interés es la comparación del rendimiento entre el generador de superconductor y el generador tradicional de cobre utilizado para el estator. Este tipo de comparación es esencial para evaluar si los generadores de superconductores ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia y rendimiento que justifiquen el uso de materiales superconductores, que a menudo son costosos y requieren condiciones de operación especiales. (Aguirre y Torres, 2023)

En una de las investigaciones más recientes sobre convertidores de energía, el estudio llevado a cabo por Fang et al. (2019) se centra en un generador innovador que incorpora engranajes magnéticos integrados. En este enfoque, se combina un diseño de rotor que utiliza un engranaje magnético de magnetización tipo Halbach para el rotor exterior, junto con una magnetización radial para el rotor interior. Además, se implementa un generador síncrono de imanes permanentes con una estructura de polos excéntricos en el rotor. Para analizar este modelo y comprender mejor su funcionamiento, se utilizó la simulación de elementos finitos (FEMM) para examinar el comportamiento de su campo de flujo magnético. Este enfoque permitió una evaluación detallada de cómo la excentricidad de los polos magnéticos afecta el campo de flujo en el espacio entre los rotores, arrojando resultados significativos que destacan las ventajas de este diseño innovador. En primer lugar, se observó que el generador con engranajes magnéticos integrados tiene la capacidad de mantener una estructura más compacta en comparación con enfoques convencionales. Esto es de gran relevancia, ya que la compactidad es un factor importante en aplicaciones donde el espacio es limitado o se busca reducir el tamaño del generador. En segundo lugar, el análisis reveló que este generador presenta un bajo par de arrastre, lo que significa que es eficiente en la conversión

de la energía mecánica en energía eléctrica sin generar una resistencia excesiva. La eficiencia en la conversión de energía es un aspecto crítico en la generación de energía, ya que influye en la cantidad de energía aprovechable. En tercer lugar, se destacó en este estudio es la alta fiabilidad del generador. Esto es fundamental en aplicaciones donde la confiabilidad y la operación continua son esenciales, como en sistemas de generación de energía a largo plazo o en entornos en los que el mantenimiento puede ser complicado o costoso. (Aguirre y Torres, 2023)

No obstante, la optimización del modelo geométrico de estos convertidores exige la consideración de múltiples factores adicionales. Tal como los considerados en la investigación de Fang et al. (2018), en que se exploran variables adicionales, como el ángulo de incidencia de las olas y el número de olas incidentes, para lograr una optimización integral. En este estudio, se implementa un algoritmo de evolución diferencial (Differential Evolution - DE) que se caracteriza por su simplicidad y robustez en la búsqueda de soluciones óptimas. Para mejorar aún más la eficacia de este algoritmo, se propone la inclusión de un operador de mutación, lo cual tiene un impacto significativo en la capacidad del algoritmo DE para converger rápidamente hacia soluciones precisas. En el contexto de los casos de estudio, se examina el comportamiento de diversos Conversores de Energía de Olas (WEC, por sus siglas en inglés) de tipo flotante, junto con su interacción y la necesidad de optimización en términos de su ubicación. Este análisis exhaustivo arroja importantes conclusiones. Se observa que la generación de energía experimenta un incremento notorio cuando se aumenta el número de Conversores de Energía, lo que subraya la importancia de la expansión de estas instalaciones para maximizar el rendimiento energético. Además, el estudio demuestra que la disposición no lineal de estos conversores al ser instalados puede tener un impacto significativo en la generación de energía. La optimización no solo implica aumentar la cantidad de dispositivos, sino también considerar su disposición espacial de

manera estratégica. Esta conclusión sugiere que la eficiencia y la capacidad de generación de energía de los convertidores pueden mejorarse mediante un enfoque más holístico que considera factores adicionales, como la orientación y la ubicación precisa. (Aguirre y Torres, 2023)

Dentro de las innovaciones más notables en el ámbito de los dispositivos de conversión de energía, es destacable el trabajo presentado por Molla et al. (2020). Su investigación se enfoca en la mejora de la potencia eléctrica generada por un generador lineal oceánico mediante la implementación de una optimización denominada "Winding". Para llevar a cabo este proceso, se desarrolla un generador lineal específicamente diseñado para este propósito y se somete a una evaluación exhaustiva utilizando el software MAXWELL en ANSYS. Los resultados obtenidos a través de esta optimización tipo "Winding" son sumamente prometedores. En particular, se logra una reducción significativa del peso del generador, lo que tiene un impacto positivo en su rendimiento. Esta optimización se basa en la modulación del grosor del conductor, lo que conduce a la identificación de un punto óptimo de funcionamiento. La reducción de peso es un factor clave, ya que contribuye a la eficiencia del generador, al tiempo que optimiza su operación. Además, el modelo propuesto incluye una característica notable: un sistema de enfriamiento que se encarga de mantener las temperaturas del mecanismo en niveles óptimos. Este enfoque de refrigeración resulta crucial, ya que permite mejorar la recolección de energía eléctrica en un impresionante 42%. El control de la temperatura es un aspecto fundamental en la generación de energía, y esta solución de enfriamiento eficaz marca una diferencia sustancial en la eficiencia del generador. Finalmente, la investigación va más allá de los estudios teóricos al incluir la construcción de un prototipo a escala. Este enfoque experimental es esencial para validar los resultados teóricos y demostrar la viabilidad práctica de las mejoras propuestas. A través de la comparación de los resultados teóricos y las mediciones del prototipo, se obtiene una

comprensión más completa de cómo estas innovaciones se traducen en la realidad. (Aguirre y Torres, 2023)

Desde una perspectiva global, el estudio de Liu (2021) proporciona una visión general completa de las diversas tecnologías documentadas en ese momento para la conversión de energía a partir de fuentes marinas. La investigación lleva a cabo una evaluación exhaustiva de las ventajas y desventajas de estas tecnologías, lo que resulta en un valioso análisis comparativo. Una característica distintiva de este análisis es su enfoque en los conversores de energía marina de tipo directo, conocidos como Direct-Drive wave power take off (DDPTO). Estos dispositivos se centran en el uso de generadores de imanes lineales permanentes (PMLG) para la conversión de energía, y el estudio de Liu se dedica a explorar las problemáticas asociadas con estas tecnologías en sus diversas presentaciones. En particular, el artículo realiza un resumen detallado de las empresas y universidades que han desarrollado dispositivos basados en esta tecnología. Esta recopilación proporciona una instantánea de la actividad industrial y académica en el campo de la conversión de energía marina basada en generadores de imanes lineales permanentes. Un aspecto destacado de la investigación es la comparación entre el desarrollo industrial y el progreso en el laboratorio hasta el momento. Esta evaluación contrasta la implementación práctica de estas tecnologías con su estado en la investigación y desarrollo. El análisis de esta brecha puede arrojar luz sobre los desafíos y oportunidades que se presentan en el camino hacia la implementación a gran escala de las tecnologías de conversión de energía marina. (Aguirre y Torres, 2023)

1.2 Realidad Problemática

El avance tecnológico reciente ha generado diversas oportunidades en el ámbito de la generación de energía, y una de las más destacadas es la explotación de la energía marina proveniente de las olas. No obstante, la complejidad inherente de esta fuente de energía exige

un enfoque holístico que abarque aspectos clave, como la dinámica de fluidos computacional, la evaluación del comportamiento estructural y la optimización geométrica de los dispositivos de conversión de energía que incorporan componentes magnéticos. (Aguirre y Torres, 2023)

Cada uno de estos desafíos representa un obstáculo significativo que debe superarse para garantizar el aprovechamiento eficiente de la energía de las olas. Por ejemplo, la dinámica de fluidos computacional se encarga de modelar y simular cómo las olas interactúan con los dispositivos de conversión de energía. Esta comprensión es crucial para el diseño de convertidores eficaces que puedan resistir las fuerzas variables y las presiones ambientales en el entorno marino.

La evaluación del comportamiento estructural implica analizar la resistencia de los dispositivos a las fuerzas mecánicas y tensiones a las que están expuestos en el medio marino. Esto incluye la consideración de la durabilidad de los materiales utilizados y la capacidad de los convertidores para mantener su integridad en condiciones desafiantes.

La optimización geométrica se refiere al diseño de los dispositivos de conversión de energía de manera que se maximice su eficiencia en la recolección de energía. Esto implica considerar factores como la forma, el tamaño y la disposición de los componentes del convertidor. La optimización geométrica es esencial para asegurar que estos dispositivos aprovechen al máximo el potencial energético de las olas marinas.

Afortunadamente, el avance tecnológico también ha proporcionado soluciones en forma de herramientas computacionales más avanzadas y robustas. Estas herramientas permiten abordar estos desafíos de manera más efectiva al modelar con precisión la dinámica de fluidos, simular el comportamiento estructural y optimizar la geometría de los convertidores. A medida que estas herramientas se vuelven más sofisticadas, se supera la complejidad de

estos temas, allanando el camino para el aprovechamiento exitoso de la energía de las olas marinas.

IRENA (International Renewable Energy Agency) en su informe del año 2018 destaca que, en ese período, Perú presentó dos fuentes de energía de gran relevancia para su red eléctrica. Estas fuentes incluyeron los combustibles sólidos y la energía hidroeléctrica, siendo esta última responsable del 41% de la oferta energética total del país. No obstante, se ha observado un crecimiento significativo en la diversificación de las fuentes de energía renovable que se integran a la red eléctrica nacional.

Entre estas fuentes de energía renovable se destacan la generación de energía a partir de fuentes solares y eólicas, que representaron aproximadamente el 3% de la capacidad máxima de generación en el año 2018. Este aumento en la participación de energía solar y eólica en la matriz energética del país refleja un cambio positivo hacia una mayor diversificación y sostenibilidad en el suministro de energía. A medida que Perú continúa incorporando estas fuentes de energía renovable, se abre la posibilidad de reducir su dependencia de las fuentes de energía convencionales y fomentar un sistema energético más limpio y sostenible.

Además, según aporte de Aguirre y Torres (2023), es importante destacar que en la actualidad existe una brecha significativa entre la oferta y la demanda de energía, que se estima en alrededor de 10,000 TJ (Tera Joules), considerando las pérdidas asociadas a la transformación energética. Esta brecha ha ido en aumento y presenta un crecimiento anual del consumo eléctrico de aproximadamente un 7%, según el informe de López et al. (2015). Por otro lado, es evidente que la expansión de la oferta de energía a partir de fuentes renovables ha experimentado un crecimiento considerable. En el año 2019, se registró un aumento del 77% en la capacidad total de generación en comparación con el año anterior, con un énfasis significativo en la producción de energía solar. La capacidad de generación total de energía renovable alcanzó los 72 GW (Giga Watts), lo que indica una tendencia

positiva hacia la adopción y expansión de fuentes de energía más limpias y sostenibles. Este aumento en la generación de energía renovable es un paso importante hacia la reducción de la brecha entre la oferta y la demanda energética y contribuye a un suministro de energía más eficiente y amigable con el medio ambiente.

Weiss et al. (2018) llevaron a cabo una serie de estudios en relación a las tecnologías renovables que se aplican en el contexto peruano. Entre las diversas alternativas analizadas, se destacan las tecnologías offshore, que han adquirido una creciente atracción debido a los avances tecnológicos que las han vuelto más viables como fuentes de energía. A pesar de que la implementación de parques eólicos marinos en aguas abiertas parece prometedora, la energía mareomotriz ha ganado protagonismo significativo en este escenario. La energía mareomotriz se destaca por su constancia y previsibilidad en comparación con fuentes como la energía eólica o undimotriz, que dependen en mayor medida de las condiciones climáticas y las variaciones de temperatura. Esta constancia y predictibilidad hacen que la energía mareomotriz sea una alternativa atractiva para la generación de energía verde, ya que no está sujeta a las fluctuaciones climáticas y puede mantener un suministro constante de electricidad.

Los avances tecnológicos han contribuido a hacer que la generación de energía mareomotriz sea cada vez más factible y eficiente. Además, el potencial de energía mareomotriz en Perú se deriva de la variación periódica del nivel del mar, que es un fenómeno predecible. La implementación exitosa de esta tecnología podría contribuir de manera significativa a la diversificación de la matriz energética peruana y a la reducción de su dependencia de fuentes de energía convencionales.

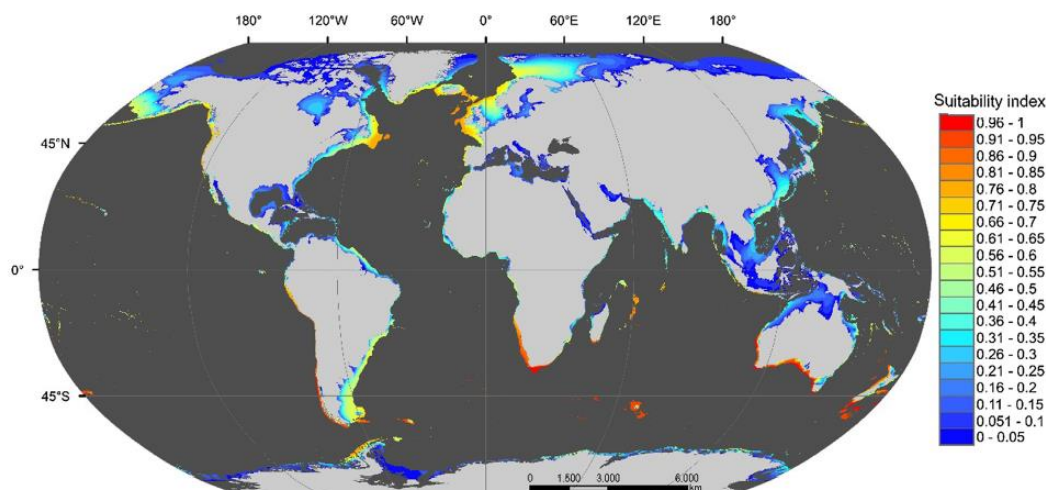


Figura 1. Mapamundi del índice de viabilidad para la energía mareomotriz, (Weiss et al., 2018)

La Figura 1 proporciona una representación gráfica del índice de viabilidad global para la explotación de la energía mareomotriz. Este índice de viabilidad es un indicador que supera el 0.7 en el caso de las costas peruanas, lo que lo posiciona por encima de gran parte de las áreas costeras del Caribe, Asia Central y la costa oriental de América. Esta evaluación señala claramente una ventaja competitiva considerable para la implementación de la tecnología de energía mareomotriz en Perú, donde se encuentra un potencial sin explotar en términos industriales.

Un factor adicional de considerable importancia es el análisis de los riesgos asociados. En contraste con el Océano Atlántico, que enfrenta una variedad de amenazas naturales que van desde tormentas hasta huracanes de alto impacto, el Océano Pacífico presenta condiciones climáticas más predecibles y un riesgo menor de desastres naturales. Esta distinción tiene un impacto significativo en la seguridad y confiabilidad de las operaciones de generación de energía marina. En consecuencia, la decisión de aprovechar la energía mareomotriz en las costas peruanas es respaldada tanto por un índice de viabilidad sólido como por un entorno marino más seguro en comparación con otras regiones afectadas por condiciones climáticas

más volátiles. Estas condiciones favorables sugieren un sólido potencial de desarrollo en el campo de la energía mareomotriz en Perú, lo que representa una oportunidad única para aprovechar un recurso sostenible y contribuir a la diversificación de la matriz energética del país. (Aguirre y Torres, 2023)

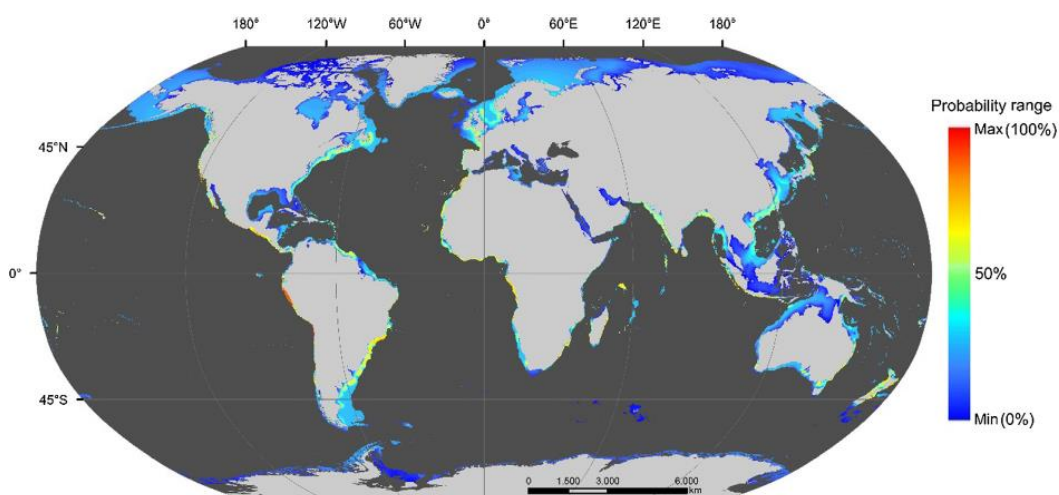


Figura 2. Mapamundi del rango de probabilidad de implementación de energía mareomotriz, (Weiss et al., 2018)

La Figura 2 ofrece una representación gráfica del rango de probabilidad relacionado con la implementación de la energía mareomotriz. Al examinar esta figura, se pueden identificar las oportunidades que existen para introducir y aprovechar este tipo de generación de energía en el contexto de Perú. Lo que destaca de manera significativa es que las perspectivas para la implementación de la energía mareomotriz en Perú son más favorables en comparación con muchas otras regiones del mundo.

Esta conclusión se fundamenta en una evaluación exhaustiva que considera diversos factores clave, como el potencial inherente de la energía mareomotriz como recurso, su idoneidad en términos de condiciones locales, los aspectos logísticos asociados con su implementación y la distancia entre las áreas de generación y el lugar de uso de la energía producida por esta tecnología. Estos elementos, cuando se ponderan y se evalúan en conjunto, dan como

resultado una probabilidad más alta y favorable para el éxito de la energía mareomotriz en Perú en comparación con otras ubicaciones geográficas. Este análisis apunta a la viabilidad y el potencial de desarrollo de la energía mareomotriz en Perú, lo que ofrece una perspectiva prometedora para el país en su búsqueda de fuentes de energía sostenibles y eficientes. La combinación de factores favorables respalda la idea de que Perú está bien posicionado para capitalizar esta forma de generación de energía y aprovechar al máximo su potencial.

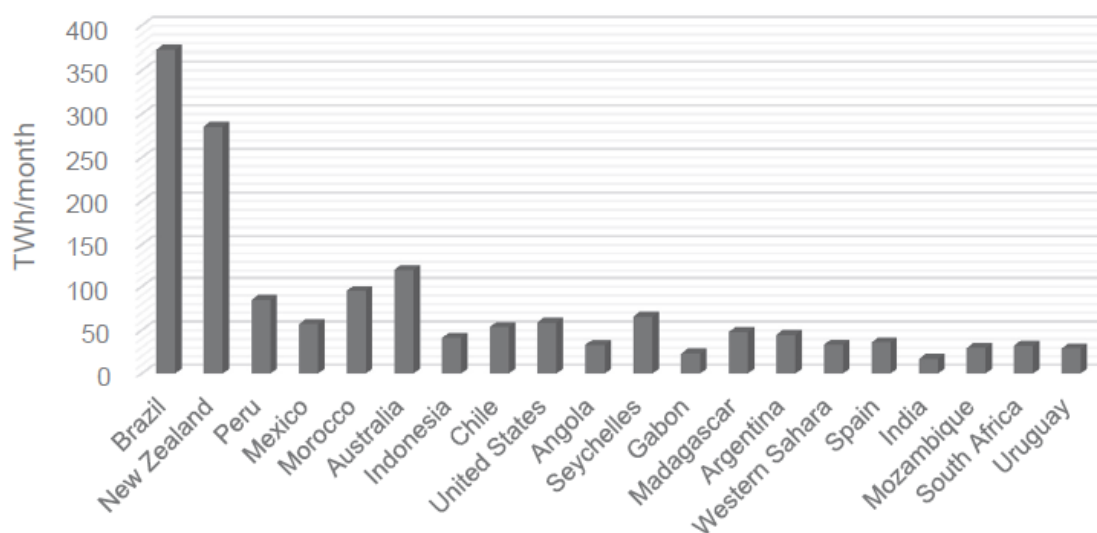


Figura 3. Diagrama de barras de los países con producción de energía mareomotriz en TWh/mes, (Weiss et al., 2018)

La Figura 3, representa gráficamente la cantidad de energía que podría ser potencialmente generada a través de la energía mareomotriz en varios países. Perú figura en esta figura como uno de los veinte países con un alto potencial para aprovechar esta tecnología. Además, se proporciona una estimación en TWh/mes (teravatios-hora por mes) de la energía que podría ser extraída del mar mediante la energía mareomotriz, y para Perú, esta cifra se sitúa en aproximadamente 75 TWh/mes.

Este diagrama de barras ofrece una valiosa perspectiva sobre el potencial de la energía mareomotriz en Perú en comparación con otros países en todo el mundo. Al situarse entre los veinte países con mayores posibilidades de implementación de esta tecnología, Perú se

destaca como una ubicación estratégica para la generación de energía a partir de las mareas oceánicas. La estimación de 75 TWh/mes subraya la capacidad significativa que tiene el país para aprovechar este recurso, lo que representa una oportunidad valiosa para contribuir a su suministro de energía y avanzar hacia fuentes más sostenibles y limpias.

En conjunto, la Figura 3 resalta la posición ventajosa de Perú en el ámbito de la energía mareomotriz y subraya su capacidad para convertirse en un actor importante en la generación de energía a partir de esta fuente. Esta información proporciona una base sólida para considerar y promover el desarrollo de proyectos de energía mareomotriz en Perú, lo que puede tener un impacto positivo en su capacidad para satisfacer la demanda energética y avanzar hacia una matriz energética más sostenible.

López et al. (2015), describe con gran precisión el comportamiento del mar peruano evaluando la caracterización de la matriz de altura de ola versus el periodo de onda de la ola en función de la potencia extraíble. A partir de este estudio se puede determinar cuáles son los casos óptimos y los más probables para el mar peruano, ver Figura 4.

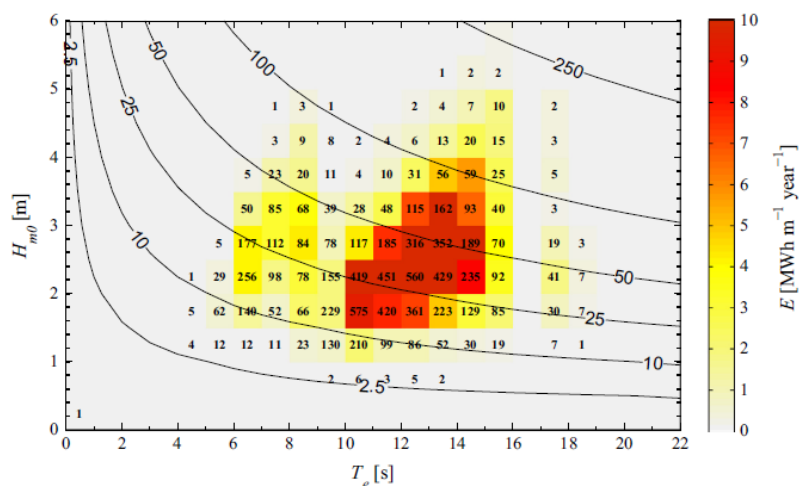


Figura 4. Matriz de H_s (altura de ola) vs T_s (periodo de ola) indicando la producción de energía E , (López et al., 2015)

Complementariamente, se observa que basado en la data estadística de las boyas de muestreo se pudo determinar un diagrama polar (Figura 5) entre las olas y la altura de ola respecto a la dirección de dónde vienen estas olas, esta información es determinante para la optimización de la orientación del modelo de recolección de energía propuesto.

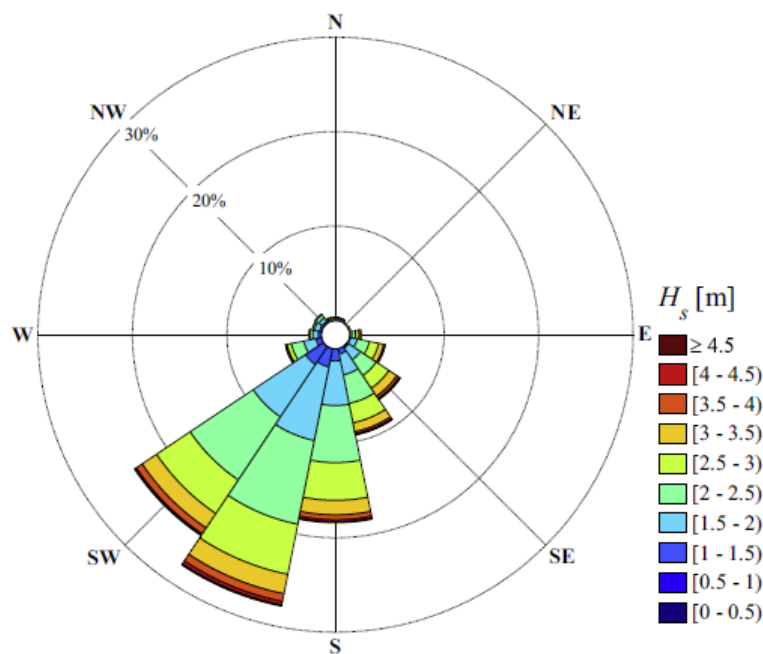


Figura 5. Rosa Náutica de las alturas de ola según su dirección, (López et al., 2015)

Esta tesis establece que existe un recurso renovable que podría ser muy bien aprovechado en la parte energética, como lo es la generación de energía por olas, la cual demanda una gran complejidad, pero a la vez genera grandes oportunidades tecnológicas de desarrollo. Además, se menciona que actualmente este recurso no está siendo aprovechado, como lo es en país como Brasil, Chile y Argentina, donde existe una tendencia de explotar este recurso que ofrece su respectivo mar territorial. En el caso del Perú, se observa que según muestra la Figura 6, el mapa de calor promedio de flujo de energía mareomotriz por metro, para el

litoral peruano, exhibe una uniformidad de la cantidad de energía que puede ser extraído por recolectores tipo offshore (generación de energía por olas).

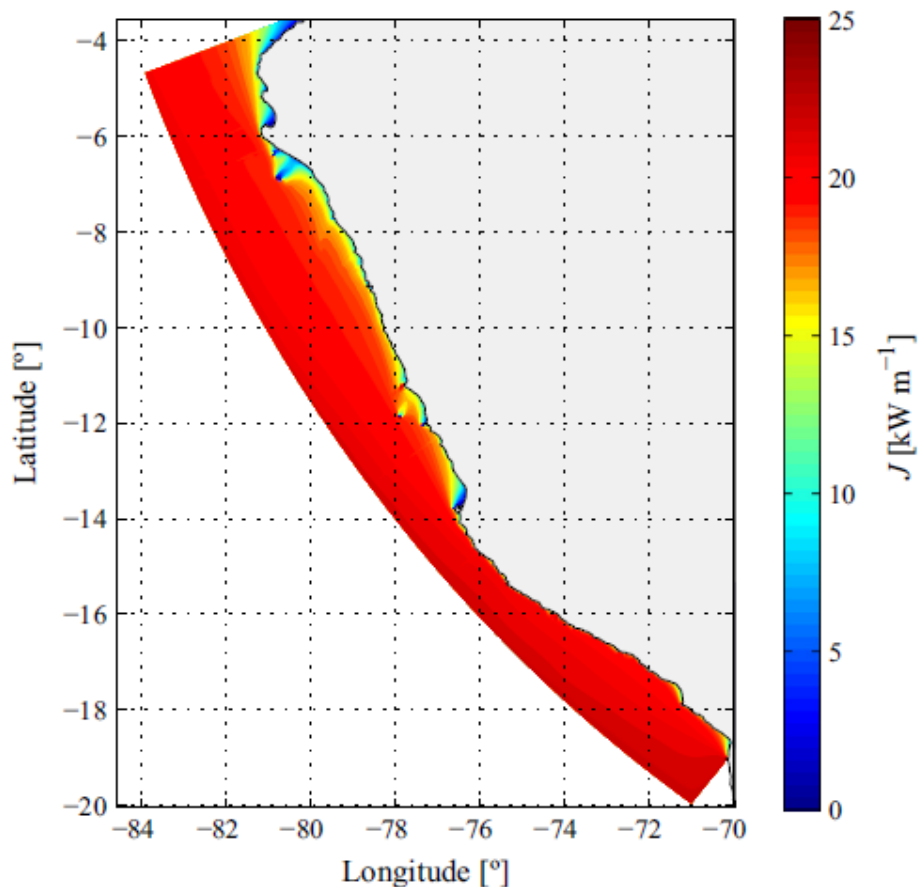


Figura 6. Promedio de flujo de energía oceánica, (López et al., 2015)

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Optimizar numéricamente un generador de acción directa para conversión de energía eléctrica provenientes de las olas oceánicas.

1.3.2. Objetivos específicos

A continuación, se mencionan los objetivos específicos.

- Optimizar geométricamente el diseño del generador de acción directa para el aumento de la generación de energía eléctrica proveniente de la conversión de olas.
- Evaluar al generador de acción directa para aumentar la eficiencia en la generación de energía eléctrica proveniente de la conversión de olas.
- Evaluar al generador de acción directa para aumentar el flujo magnético para la generación de energía eléctrica proveniente de la conversión de olas.

1.4 Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El generador de acción directa aumenta la generación de energía eléctrica proveniente de la conversión de olas, mediante un estudio paramétrico del estator y translator.

1.4.2. Hipótesis específicas

A continuación, se mencionan las hipótesis específicas.

- La optimización geométrica del generador de acción directa aumenta la generación de energía eléctrica proveniente de la conversión de olas, mediante la verificación numérica de modelos de generadores de acción directa mediante BENCHMARKS.
- El generador de acción directa aumenta la eficiencia en la generación de energía eléctrica proveniente de la conversión de olas en el rango de 400-600 MW.H/m
- El generador de acción directa aumenta el flujo magnético en la generación de energía eléctrica proveniente de la conversión de olas.

1.5 Operacionalización de Variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Definición de la Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento de análisis
-----------	---------------------------	-----------	-------------	-------------------------

Generador de acción directa	Convertidores de energía mecánica en energía eléctrica usando un movimiento oscilatorio	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización geométrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensión del “estator” • Dimensión del “translator” 	Simulación numérica
Generación de energía por olas	Energía generada debido a la acción de las olas oceánicas	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia • Flujo magnético 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso/masa • Posición del estator 	

1.6 Justificación

En la actualidad, se observa un creciente interés en la búsqueda de diversas fuentes de energía, especialmente en la dirección de las energías renovables. Esto se basa en la preocupación por reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático, como se destaca en un estudio realizado por Ghaffour et al. (2015). Dentro de este panorama, la energía de las mareas, también conocida como energía por olas, se posiciona como una alternativa atractiva para la generación de energía sostenible. La energía de las mareas aprovecha la energía cinética generada por el movimiento de las mareas oceánicas y utiliza una variedad de convertidores para capturar y transformar esta energía en electricidad. Estos convertidores pueden tomar diferentes formas, como columnas oscilantes, cuerpos activados por las olas y dispositivos de sobrepaso, como se menciona en el estudio de Kovaltchouk et al. (2015). La diversidad de enfoques en la conversión de energía mareomotriz ha suscitado un gran interés en la comunidad científica e investigadora. La relevancia de la investigación y desarrollo en este campo radica en la necesidad de avanzar hacia una matriz energética más sostenible y menos perjudicial para el medio ambiente. Las fuentes de energía renovable, como la energía de las mareas, ofrecen la posibilidad de generar electricidad de manera constante y predecible, lo que es esencial para

abordar las demandas energéticas en constante crecimiento. Además, la energía de las mareas presenta ventajas adicionales, como la menor dependencia de las condiciones climáticas en comparación con la energía eólica o solar, lo que la hace particularmente atractiva. La investigación en este campo busca optimizar la eficiencia de los convertidores y superar los desafíos técnicos para llevar a cabo una obtención de energía renovable más efectiva y económica.

La tendencia actual de adoptar tecnologías de generación de energía a partir de fuentes renovables de las olas se observa en varios países de América del Sur, como Brasil, Chile y Argentina. Estos países han estado llevando a cabo investigaciones significativas en esta área, con financiamiento no solo del gobierno, sino también con la colaboración del sector privado. Esta asociación entre el sector público y privado desempeña un papel crucial en el impulso del desarrollo sostenible en estas naciones. Sin embargo, en el caso de Perú, la implementación de esta tecnología está en una etapa inicial y se percibe un menor interés. Esto se debe, en parte, a la complejidad inherente de este tipo de tecnología y a las considerables dificultades que presenta. Una de las complejidades más destacadas se relaciona con la elección y diseño del convertidor de energía utilizado en la generación de energía a partir de las olas. La optimización geométrica de estos convertidores es de vital importancia, ya que influye directamente en la eficiencia del proceso de conversión de energía.

Un caso que ilustra la importancia de la optimización de los convertidores es el proyecto de Majes, como se menciona en el informe de Energy (2015). En este proyecto, las pérdidas en el sistema de generación de energía a partir de las olas fueron significativas, lo que resultó en una viabilidad económica cuestionable y limitó la rentabilidad de su implementación en otras ubicaciones costeras en Brasil. La lección que se puede extraer de este caso es que la optimización geométrica de los convertidores es un factor crítico que influye en la eficiencia

y la rentabilidad de la generación de energía a partir de las olas. Por lo tanto, la investigación y el desarrollo en esta área son de vital importancia para superar los desafíos técnicos y garantizar que esta fuente de energía renovable se convierta en una opción viable y económicamente atractiva para Perú y otros países de la región. (Aguirre y Torres, 2023)

Resumiendo, la justificación de este estudio radica en la necesidad de implementar una metodología de evaluación de convertidores de energía de olas, un componente crítico en el proceso de conversión de energía, con el propósito de contribuir de manera sustancial al desarrollo de esta área de investigación que está emergiendo en Perú. Este trabajo se centra en la introducción de una metodología específica que se detallará en el desarrollo de la tesis, y destaca su contribución mediante el uso de simulaciones numéricas para optimizar los convertidores de energía de olas.

La importancia de esta investigación es multifacética. En primer lugar, responde a la necesidad de avanzar en la comprensión y mejora de la eficiencia de los convertidores de energía de olas, un componente fundamental en la conversión de energía a partir de fuentes marinas. La implementación de una metodología sólida y la realización de simulaciones numéricas permitirán evaluar y perfeccionar el rendimiento de estos convertidores, lo que a su vez tiene el potencial de aumentar la eficiencia general de la generación de energía a partir de las olas. Además, este estudio contribuye al crecimiento de la investigación en energía de olas en el contexto peruano. A medida que el país busca diversificar su matriz energética y aprovechar fuentes de energía más limpias y sostenibles, el desarrollo de esta área de investigación es fundamental. Al proporcionar una metodología específica y resultados de simulaciones numéricas, se fomenta el avance de la ciencia y la tecnología en este campo emergente, lo que puede tener un impacto positivo en el desarrollo de proyectos de generación de energía de olas en Perú.

1.7 Limitaciones de la investigación

El enfoque principal de este trabajo se centra en llevar a cabo una optimización numérica de un convertidor de acción directa diseñado para la generación de energía a partir de las olas marinas. Se ha realizado una evaluación exhaustiva del flujo magnético que atraviesa el conversor mediante el uso de simulaciones numéricas, con el propósito de analizar cómo las variaciones en su configuración geométrica pueden influir en su rendimiento.

Es relevante destacar que el convertidor en cuestión está diseñado específicamente para operar en aguas poco profundas, que comúnmente se conocen como "aguas rasas". Sin embargo, este estudio se encuentra limitado en su alcance ya que no aborda la dinámica del sistema completo que involucra el movimiento combinado del cuerpo oscilante y el convertidor. En lugar de ello, la investigación se enfoca únicamente en el movimiento oscilante del componente denominado "translator", que forma parte integral del convertidor. Esta limitación conlleva a que el análisis se centre en aspectos específicos del convertidor y su interacción con el flujo magnético, sin considerar el comportamiento dinámico completo del sistema. En otras palabras, no se examina cómo el movimiento oscilante del convertidor se relaciona con el movimiento del cuerpo oscilante en su conjunto.

Si bien esta investigación ofrece valiosos conocimientos sobre la optimización del convertidor de acción directa en términos de su geometría y flujo magnético, es importante reconocer que existen aspectos más amplios y complejos en el funcionamiento del sistema completo que quedan fuera del alcance de este estudio. Esta limitación destaca la necesidad de futuras investigaciones que puedan abordar de manera integral la dinámica de estos sistemas en su conjunto, considerando tanto el convertidor como el cuerpo oscilante y su interacción en aguas rasas, lo que proporcionaría una comprensión más completa y precisa de su funcionamiento.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Energía de las olas oceánicas – *Oceanic Waves Energy (OWE)*

El mar es una fuente de energía renovable, la cual se basa en el principio de la transmisión de la cantidad de movimiento, siendo esta energía transmitida de forma periódica y con una amplitud oscilante en el océano. Para simplificar este comportamiento periódico, se asume que el mar se mueve de manera sinusoidal. La Ecuación 1 y 2 muestran el comportamiento tipo $Z_s(t)$ que tendrá el movimiento de las olas oceánicas.

$$Z_s(t) = \frac{H_w}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - K_w t\right) \quad (1)$$

$$K_w = \sqrt{gk \tanh(kD_{sb})} \quad (2)$$

Donde H_w es la diferencia entre el pico y el valle en una ola, λ es el largo de la ola, x es la distancia de la propagación de la ola, g es la aceleración gravitacional, k es el número de ola y D_{sb} es la profundidad del océano a partir de la superficie hasta el lecho marino.

2.2 Equipos de energías de olas – *Wave Energy Device (WED)*

Existe variedad en tipos de dispositivos para absorción de energía oceánica, de todos ellos se estudiarán los dispositivos de movimiento lineal para alimentar al generador lineal, el cual transforma el movimiento oscilatorio del océano mediante una boya flotante.

La oscilación de la boya verticalmente es transmitida a través de un eje de conexión vertical, este eje es el que está conectado fijamente a la boya y mueve los imanes en el estator, generando un cambio de flujo. Para describir este movimiento se basaría en el movimiento de la boya que influencia a las olas a su vez, este modelo es observado en la Ecuación 3 y 4.

$$a_b(t) = \frac{K_f[d_b(t) - d_s(t)] + R_{eq}[v_b(t) - v_s(t)]}{M_f + M_w} \quad (3)$$

$$K_f = \rho_s g \pi r^2 \quad (4)$$

Donde, ρ_s es la densidad de masa del agua de mar, g es la aceleración de la gravitacional, r es el radio del cilindro, R_{eq} es la combinación de la resistencia de radiación y viscosidad del agua de mar basado en un análisis hidrodinámico, M_f es la masa del flotador, M_w es la masa adicional debido al agua de mar. Las dos masas de la boya y del conector influyen en el valor de M_f .

Entre los dispositivos para la recolección de energía oceánica se encontra de tres tipos según IEA – Sistemas de energía Oceánica (*Ocean Energy Systems*)., el cual describe los mecanismos y sus variantes según su funcionalidad, ver Figura 7.

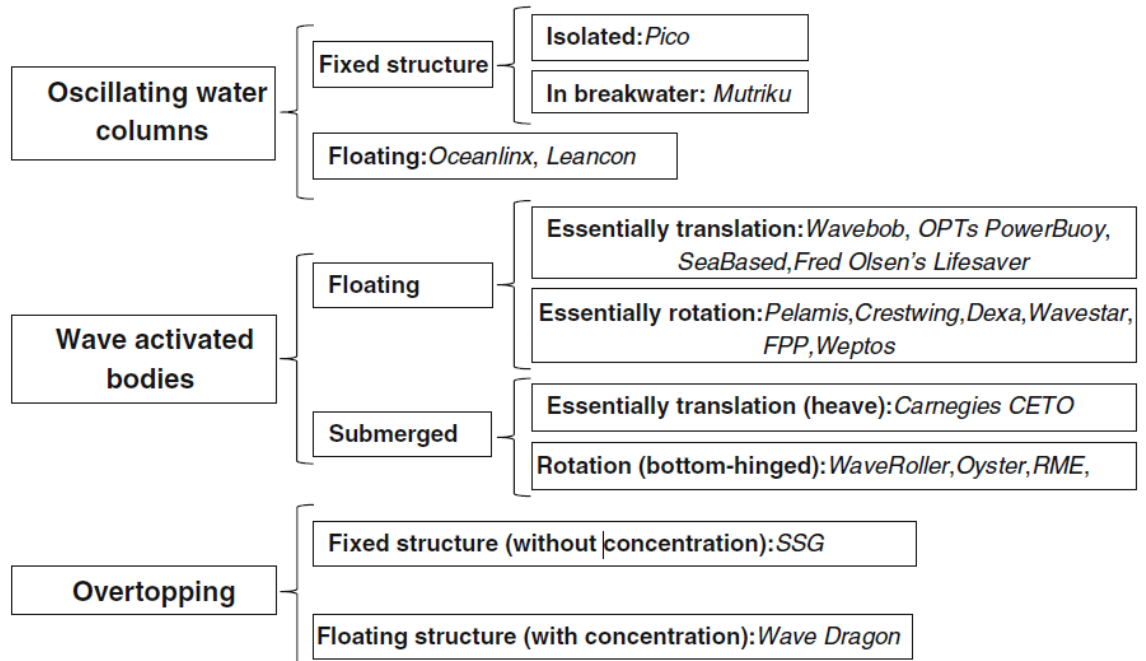


Figura 7. Categorización de las tecnologías de energía marina según la Agencia Internacional de Energía, (Pecher & Kofoed, 2017)

A partir de la Figura 7, se observa que los tipos de convertidores pueden dividirse por columnas oscilantes, cuerpos activados por las olas (boyas) o de sobrepaso. Para el caso de estudio se centrará en cuerpos activados por olas con un mecanismo flotante, esto debido a que es uno de los tipos de menor costo de instalación y no requiere de una estructura robusta para su implementación.

2.3 Estator Lineal – Stator Linear

Para definir el funcionamiento del estator lineal se describe la base matemática a partir del flujo de energía generado por el movimiento de un campo se determina proporcionalmente el tipo de imán usado para generar la corriente eléctrica inducida. Para este caso se trabaja de la siguiente manera según la Ecuación 5.

$$e = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (5)$$

Donde φ es el flujo magnético inducido y puede ser calculado en coordenadas del sistema “R-Z” a partir de la Ecuación 6.

$$\varphi = \int B_z ds = \int B_z d(\pi^2 R) = \pi^2 \int B_z dR \quad (6)$$

Donde B_z es la densidad magnética del flujo en el eje coordenado Z.

2.4 “Stator lineal” de conector dividido – *Split Translator Supporting Stator Linear* (STSSLG)

La propuesta para este modelo es de dividir el flujo generado en dos caminos, debido a la existencia de un estator secundario dentro del eje del conector, esta inducción secundaria genera una mejoría al modelo FSPMLG ya existente, ver Figura 8.

Para este modelo se puede definir la energía recolectada según la Ecuación 7 y 8.

$$E_g = K_m \cos\left(\frac{d_b}{\tau_p} \pi\right) v_b(t) \quad (7)$$

$$K_m = B_g N_\phi v_{avg} W_{se} \quad (8)$$

Donde, B_g , N_ϕ , v_{avg} , W_{se} y τ_p es la densidad de flujo del aire, numero de vueltas, velocidad promedio del conector, ancho efectivo del estator, paso del poste conector, respectivamente.

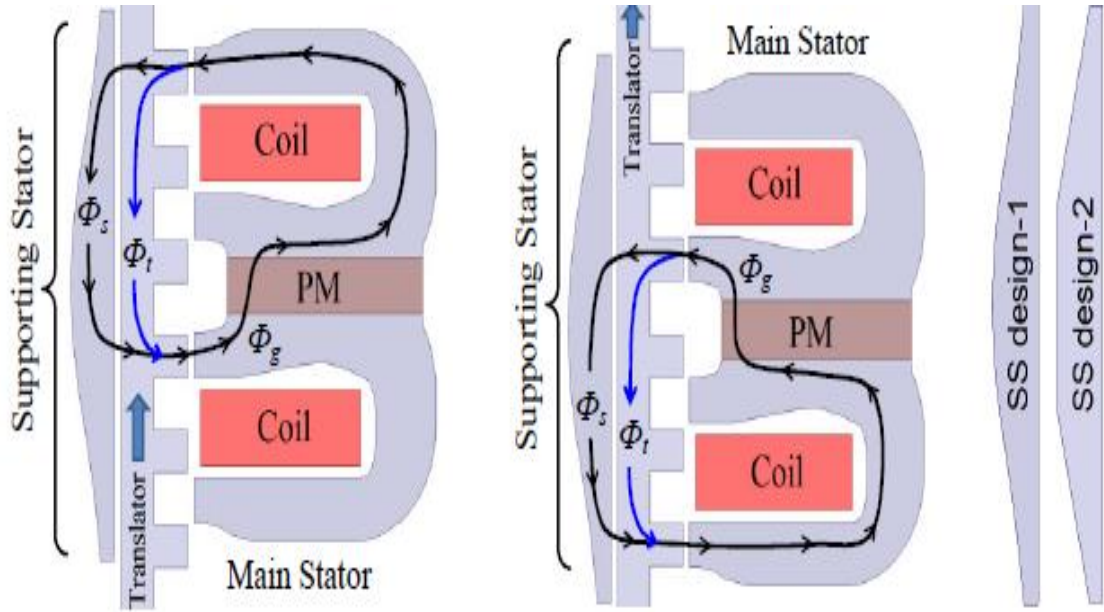


Figura 8. Principio de trabajo de un Generador tipo STSSLG, (O. Farrok et al., 2017)

2.5 Análisis computacional de campos electromagnéticos en ANSYS-MAXWELL

Para el estudio propuesto se dispone a trabajar con ANSYS MAXWELL, el cual describe el comportamiento de los campos electromagnéticos, basado en una discretización por elementos finitos de la geometría y de la caracterización de los materiales, voltaje y velocidad de rotación del cuerpo de estudio. Basado en esto se trabajarán las ecuaciones de Maxwell, la cual es descrita en la Ecuación 9.

$$\Phi = \int B \cdot dS \quad (9)$$

Donde:

Φ = Flujo Magnético, según Ansys $9.8 \cdot 10^{-3}$ Weber (Wb) y para el aire $9.7 \cdot 10^{-3}$ Wb.

B = Inducción del Campo Magnético (T)

S = Area de la superficie (m^2)

Además, para relacionar el flujo, la forma, el campo magnético debido al material y la corriente inducida, se utilizará la Ecuación 10.

$$I = \oint H dl \quad (10)$$

Donde:

I = Corriente inducida (A)

H =fuerza del campo magnético (A/m)

l =Longitud de la integral de línea (m)

En el caso del torque generado para un movimiento rotacional, se definirá la relaciona entre el torque y la corriente inicial respecto al resbalamiento magnético, como se puede ver en la Ecuación 11 y12.

$$M = f(S) \quad (11)$$

$$I = f(S) \quad (12)$$

Donde, S o SLIP puede ser definido según la velocidad de rotación del sistema, ver Ecuación 13. También, a partir de estas ecuaciones es establecida la densidad de corriente, ver Ecuación 14

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (13)$$

$$j = \frac{I}{S} \quad (14)$$

2.6 Definiciones Conceptual

Las definiciones son extraídas y ampliadas de Gómez (2010).

2.6.1. Máquinas Eléctricas

Las máquinas eléctricas son dispositivos cruciales en la ingeniería eléctrica que desempeñan un papel fundamental en la sociedad moderna. Estos dispositivos son convertidores de energía que permiten la conversión entre energía eléctrica y energía mecánica, lo que los hace esenciales en una amplia variedad de aplicaciones, desde motores en automóviles hasta generadores en plantas de energía eléctrica.

Las máquinas eléctricas se pueden clasificar en dos categorías principales: motores eléctricos y generadores eléctricos, cada uno con funciones y aplicaciones específicas. Los motores eléctricos, por un lado, son dispositivos diseñados para transformar la energía eléctrica en energía mecánica, que se utiliza para realizar diversos tipos de trabajos. Estos motores constan de dos componentes fundamentales: el rotor, que es la parte móvil, y el estator, que es la parte fija del sistema. Cuando una corriente eléctrica fluye a través del rotor, se crea un campo magnético alrededor de esta parte en movimiento. Este campo magnético interactúa con el campo magnético presente en el estator, lo que da como resultado la generación de un par de torsión que impulsa el movimiento del rotor y, a su vez, realiza trabajo mecánico. Los motores eléctricos desempeñan un papel esencial en una amplia variedad de aplicaciones cotidianas, abarcando desde electrodomésticos hasta sistemas de transporte avanzados, como automóviles eléctricos y trenes, contribuyendo de manera significativa a la eficiencia y la funcionalidad de numerosos dispositivos y sistemas. Su capacidad para convertir la energía eléctrica en trabajo mecánico es fundamental para impulsar la maquinaria y los equipos utilizados en diversas industrias y sectores.

Los generadores eléctricos, por otro lado, representan dispositivos cuya función principal radica en transformar la energía mecánica en energía eléctrica. En un generador, se observa la presencia de un rotor mecánico que experimenta un movimiento rotativo debido a la influencia de una fuente externa de energía, como una turbina que puede ser impulsada por

vapor, agua o la fuerza del viento. Este movimiento del rotor genera un efecto de inducción electromagnética en un conjunto de bobinas presentes en el estator, un proceso basado en el principio formulado por Michael Faraday. Los generadores eléctricos juegan un papel de vital importancia en la producción de electricidad en diversos tipos de instalaciones de generación, incluyendo centrales hidroeléctricas y plantas nucleares, donde la energía mecánica se obtiene de diferentes fuentes. Además, estos generadores desempeñan un rol crucial en el proceso de distribución de energía eléctrica en la red eléctrica, al convertir la energía mecánica generada en las plantas en electricidad que puede ser transmitida y utilizada en hogares, empresas e industrias en todo el mundo. Su contribución es esencial para la provisión de electricidad confiable y efectiva en una variedad de aplicaciones y sectores.

La eficiencia y el rendimiento son aspectos críticos en el diseño y la operación de las máquinas eléctricas. Los ingenieros se esfuerzan por optimizar estas máquinas para lograr la máxima eficiencia energética y un funcionamiento confiable en diversas condiciones. Esto implica la selección adecuada de materiales, la geometría de los devanados, la implementación de sistemas de refrigeración y el control de las máquinas eléctricas. La eficiencia es de particular relevancia en la actualidad, ya que existe una creciente preocupación por la sostenibilidad y la reducción de las pérdidas de energía en los sistemas eléctricos.

2.6.2. Estator

El estator es un componente fundamental en diversas máquinas eléctricas, especialmente en motores y generadores. En esencia, el estator es la parte estacionaria de la máquina eléctrica, y su función principal es generar un campo magnético que interactúa con el rotor (la parte giratoria) para que la máquina realice su trabajo específico.

El estator se encuentra en el corazón de muchas máquinas eléctricas, desde motores que impulsan vehículos hasta generadores en plantas de energía eléctrica. Su función principal es crear un campo magnético estacionario que interactúa con el rotor, ya sea para generar movimiento en el caso de los motores o para inducir corriente eléctrica en los generadores. El diseño del estator es crítico para el funcionamiento y la eficiencia de la máquina eléctrica en la que se encuentra.

El estator suele estar compuesto por una serie de núcleos de hierro laminado que están diseñados para minimizar las pérdidas de energía y concentrar el flujo magnético. Alrededor de estos núcleos, se enrollan bobinas de alambre que llevan la corriente eléctrica necesaria para crear el campo magnético. La disposición de estas bobinas y el diseño de los núcleos pueden variar significativamente según la aplicación específica de la máquina eléctrica.

En el contexto de los motores eléctricos, el estator es esencial para la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Cuando se aplica una corriente eléctrica al estator, se genera un campo magnético que permanece estacionario. Este campo interactúa con el rotor, que también tiene imanes o bobinas, generando un par de torsión que hace girar el rotor y, en consecuencia, proporciona movimiento mecánico. Este principio es fundamental para una amplia gama de aplicaciones, desde ventiladores y bombas hasta vehículos eléctricos.

En contraste, en el contexto de los generadores eléctricos, el estator desempeña un papel inverso. El estator es la parte en la que se induce corriente eléctrica mediante la rotación del rotor. Cuando el rotor gira debido a una fuente de energía externa, como una turbina, corta las líneas de flujo magnético del estator, lo que induce una corriente eléctrica en las bobinas del estator. Esta corriente eléctrica generada es la base de la producción de energía eléctrica en las plantas de energía y otras aplicaciones generadoras de electricidad.

La eficiencia del estator es crucial para el rendimiento global de la máquina eléctrica. Los ingenieros trabajan en el diseño de estatores para maximizar la eficiencia energética y

minimizar las pérdidas de energía. Esto implica la selección cuidadosa de materiales para los núcleos y las bobinas, así como la optimización de la geometría del estator y el control de la corriente eléctrica aplicada. La eficiencia energética es una preocupación cada vez más importante en un mundo que busca reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono.

2.6.3. Energía Mareomotriz

La energía mareomotriz es una forma de energía renovable que aprovecha las mareas oceánicas para generar electricidad. Este tipo de energía se deriva de la energía cinética de las mareas, que son causadas por las fuerzas gravitatorias de la Luna y el Sol sobre la Tierra. La energía mareomotriz ha estado en uso durante siglos, pero ha experimentado un resurgimiento en interés debido a su potencial como fuente de energía limpia y sostenible. El principio fundamental detrás de la energía mareomotriz radica en la variación de las mareas. A medida que la Tierra gira, las masas de agua en los océanos suben y bajan debido a la influencia gravitatoria de la Luna y el Sol. Este movimiento de mareas crea una fluctuación en el nivel del agua, que se traduce en una corriente de marea. Las corrientes de marea son especialmente notables en áreas costeras y en la desembocadura de ríos, donde el flujo y reflujo de la marea es más pronunciado.

La captura de energía mareomotriz implica el uso de estructuras llamadas "mareomolinos" o "mareoturbinas". Estas máquinas se instalan en áreas con corrientes de marea significativas y utilizan el flujo de agua para hacer girar las palas de la turbina. A medida que las mareas suben y bajan, las palas giran y activan un generador eléctrico, convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica.

Una de las ventajas clave de la energía mareomotriz es su previsibilidad. A diferencia de fuentes de energía intermitentes como la solar o la eólica, las mareas son altamente predecibles y siguen un patrón regular basado en la posición de la Luna y el Sol. Esto permite

una generación constante de energía mareomotriz, lo que la hace más confiable y menos sujeta a fluctuaciones impredecibles.

Otra ventaja es que la energía mareomotriz es una fuente de energía limpia y renovable. No emite gases de efecto invernadero ni contamina el medio ambiente, lo que la convierte en una opción atractiva en la lucha contra el cambio climático y la transición hacia una matriz energética más sostenible.

Sin embargo, la energía mareomotriz también enfrenta desafíos significativos. La infraestructura requerida para capturar la energía mareomotriz puede ser costosa de construir y mantener. Además, esta forma de energía es geográficamente limitada a regiones costeras con corrientes de marea adecuadas, lo que limita su aplicabilidad en áreas sin acceso al océano. Además, la instalación de mareomolinos puede tener un impacto ambiental en los ecosistemas marinos y costeros, y se requiere un cuidadoso monitoreo y regulación.

A pesar de estos desafíos, la energía mareomotriz sigue siendo una fuente de energía prometedora con un gran potencial no explotado. Varias plantas de energía mareomotriz están en funcionamiento en todo el mundo, como la planta de la Bahía de Fundy en Canadá o la planta de Rance en Francia, y la investigación continua busca formas de mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales.

2.6.4. Generador Eléctrico Lineal

Los generadores eléctricos lineales (GEL) son dispositivos que convierten la energía mecánica directamente en energía eléctrica mediante un movimiento lineal en lugar de un giro rotativo, como se hace en los generadores tradicionales. Estos dispositivos son utilizados en una variedad de aplicaciones, desde la generación de energía en plantas de energía de olas o marinas hasta sistemas de propulsión ferroviaria de alta velocidad.

El funcionamiento básico de un generador eléctrico lineal se basa en los principios de la inducción electromagnética, formulados por Michael Faraday en el siglo XIX. Un GEL

consta de una serie de bobinas eléctricas dispuestas en una trayectoria lineal, a menudo en forma de riel, y un imán o conjunto magnético que se mueve a lo largo de esa trayectoria. Cuando el imán se mueve a través de las bobinas, corta las líneas de flujo magnético, lo que induce una corriente eléctrica en las bobinas. Esta corriente eléctrica generada puede ser capturada y utilizada para alimentar cargas eléctricas.

La ventaja clave de los generadores eléctricos lineales radica en su capacidad para convertir energía mecánica en energía eléctrica de manera eficiente y directa. A diferencia de los generadores rotativos tradicionales, no es necesario un mecanismo de conversión adicional, como una caja de cambios, lo que puede resultar en una mayor eficiencia y menos pérdida de energía. Además, los GEL son altamente modulares, lo que permite diseñar sistemas a medida para aplicaciones específicas.

Los generadores eléctricos lineales encuentran aplicación en diversas industrias y tecnologías. En el ámbito del transporte, se utilizan en trenes de levitación magnética (maglev) para la propulsión. En lugar de ruedas, estos trenes utilizan imanes que interactúan con rieles electrificados, generando un movimiento lineal que impulsa el tren. Además, los GEL se emplean en la generación de energía a partir de fuentes renovables, como la energía de las olas y las mareas. En estas aplicaciones, las oscilaciones del agua o el movimiento de las olas se utilizan para mover imanes a lo largo de bobinas, generando electricidad. Esto ofrece la ventaja de aprovechar una fuente de energía natural constante y predecible.

A pesar de sus ventajas, los generadores eléctricos lineales también presentan desafíos. La generación de energía lineal puede ser menos eficiente en aplicaciones de baja velocidad, ya que la velocidad de movimiento del imán es un factor crítico para la generación de electricidad. Además, la construcción y el mantenimiento de sistemas lineales puede ser costoso y requiere un diseño especializado.

En resumen, el concepto subyacente del generador eléctrico lineal se basa en la eliminación total de todas las etapas intermedias que suelen estar presentes en el proceso completo de generación de energía, con el objetivo de reducir pérdidas y aumentar la eficiencia de la conversión. Al igual que su contraparte rotativa, el generador eléctrico lineal consta de dos componentes principales: el estator, que representa la parte estacionaria del sistema, y el rotor lineal, que es la parte móvil de la máquina. En la literatura anglosajona, esta parte móvil se denomina comúnmente "*translator*", aunque en el contexto de este estudio, se utilizará el término "*rotor lineal*".

La innovación clave de un generador eléctrico lineal radica en su capacidad para generar electricidad sin la necesidad de una rotación continua, como ocurre en los generadores rotativos convencionales. En su lugar, el movimiento lineal del rotor lineal se traduce directamente en energía eléctrica a medida que interactúa con el estator. Esta eliminación de partes móviles rotativas proporciona ventajas potenciales en términos de eficiencia y durabilidad, ya que se reducen las pérdidas mecánicas y se simplifica el diseño del generador. Estos generadores lineales encuentran aplicaciones en una variedad de campos, desde la generación de energía en centrales eléctricas hasta sistemas de propulsión en transportes eléctricos, lo que destaca su versatilidad y su potencial para contribuir a un futuro más eficiente en términos de energía.

2.6.5. Imanes Permanentes

Los imanes permanentes son objetos que tienen la propiedad de generar un campo magnético constante y sostenido, sin la necesidad de una fuente externa de energía para mantener esta característica. Estos imanes han sido utilizados a lo largo de la historia en diversas aplicaciones, desde brújulas hasta motores eléctricos, y juegan un papel esencial en la vida cotidiana.

La característica más distintiva de los imanes permanentes es su capacidad para generar un campo magnético constante, lo que significa que tienen un polo norte y un polo sur que no cambian con el tiempo. Estos polos opuestos atraen o repelen otros materiales magnéticos, como el hierro, y esta propiedad es fundamental para su funcionalidad. Los imanes permanentes se crean a partir de materiales ferromagnéticos, que son sustancias que tienen átomos con espines magnéticos alineados en una dirección predominante.

Uno de los imanes permanentes más conocidos es la brújula. Las brújulas utilizan un pequeño imán permanente que puede moverse libremente en respuesta al campo magnético de la Tierra. El polo norte del imán de la brújula apunta hacia el polo norte geográfico de la Tierra, lo que permite la orientación y la navegación.

Además de las brújulas, los imanes permanentes se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones tecnológicas. Uno de los usos más notables es en motores eléctricos. En los motores eléctricos, los imanes permanentes crean un campo magnético que interactúa con una corriente eléctrica, lo que genera movimiento. Esta aplicación es común en dispositivos que van desde electrodomésticos hasta vehículos eléctricos, donde la eficiencia y la confiabilidad son esenciales.

Los imanes permanentes también se emplean en generadores eléctricos. En estos dispositivos, un campo magnético constante se utiliza para inducir una corriente eléctrica en bobinas de alambre, generando electricidad. Esto es esencial en la generación de energía eléctrica en plantas de energía y parques eólicos.

Además de su uso en motores y generadores, los imanes permanentes son fundamentales en la industria de la electrónica. Se utilizan en altavoces, micrófonos, discos duros y otros dispositivos que requieren la conversión entre energía eléctrica y movimiento mecánico.

La investigación y el desarrollo continúan en el campo de los imanes permanentes, con un enfoque en la búsqueda de materiales más eficientes y sostenibles. Además, se investiga la

posibilidad de crear imanes permanentes con propiedades mejoradas, como una mayor resistencia a la desmagnetización o una mayor densidad de energía. Estos avances son importantes en la búsqueda de soluciones energéticas más eficientes y sostenibles.

En síntesis, el aprovechamiento de la energía de las olas como fuente principal de generación de electricidad plantea desafíos debido a las bajas velocidades verticales del oleaje. Estas condiciones requieren la aplicación de fuerzas electromagnéticas significativas para lograr una conversión eficiente. Para abordar este primer requisito, se considera que la inducción electromagnética utilizando imanes permanentes es la estrategia más recomendable. Estos imanes generan dos tipos de fuerzas electromagnéticas: fuerzas tangenciales y fuerzas normales. Las fuerzas tangenciales son responsables de la generación de electricidad y se alinean con el movimiento del rotor. Por otro lado, las fuerzas normales, que actúan de manera perpendicular al desplazamiento del rotor, representan un efecto no deseado y parasitario en el proceso.

2.6.6. Boya

Una boya es un dispositivo flotante utilizado en cuerpos de agua como océanos, lagos, ríos y embalses con diversas finalidades, desde la navegación y la delimitación de áreas hasta la recolección de datos ambientales y meteorológicos. Estas estructuras flotantes han sido esenciales en la historia de la navegación y la investigación marina, y desempeñan un papel fundamental en diversas aplicaciones en la actualidad.

Las boyas se utilizan comúnmente en la navegación marítima y fluvial para marcar rutas de navegación seguras, áreas de peligro, canales de entrada a puertos y fondeaderos, así como para proporcionar orientación a los navegantes. Las boyas de navegación suelen estar equipadas con luces, reflectores y señales sonoras para garantizar su visibilidad en condiciones de baja visibilidad, como niebla o condiciones nocturnas. Además, pueden estar ancladas o mantenerse en su lugar mediante sistemas de posicionamiento, lo como las boyas

meteorológicas, que se utilizan para recopilar datos climáticos y oceanográficos. Estas boyas están equipadas con sensores que miden variables como la temperatura del agua, la velocidad y dirección del viento, la salinidad y la altura de las olas. Los datos recopilados por estas boyas son fundamentales para comprender el clima, el comportamiento oceánico y los fenómenos meteorológicos, lo que es crucial para la navegación segura y la predicción del tiempo.

Otro uso importante de las boyas es la investigación científica. En oceanografía, las boyas oceanográficas, también conocidas como boyas derivantes, se utilizan para seguir el movimiento y la temperatura del agua en el océano. Estas boyas son lanzadas en el agua y equipadas con sensores que envían datos a través de satélites sobre las condiciones oceánicas, lo que ayuda a los científicos a rastrear patrones climáticos, corrientes oceánicas y otros fenómenos importantes. Además, las boyas también se emplean en la investigación en áreas como la biología marina y la geología submarina para la recopilación de datos e investigaciones de campo.

Las boyas también se han convertido en una parte esencial de la gestión de los recursos marinos. Las boyas de seguimiento y monitoreo se utilizan para supervisar la ubicación y el movimiento de animales marinos, como ballenas o tiburones, lo que ayuda en la investigación y la conservación de estas especies. Además, las boyas de acuicultura se utilizan para el cultivo de mariscos y peces, permitiendo un control preciso de las condiciones del agua para el crecimiento de las especies.

Las boyas pueden variar en tamaño y forma, desde las pequeñas boyas de amarre utilizadas en puertos y muelles hasta las grandes boyas oceanográficas que pueden soportar una amplia variedad de instrumentos y sensores. Algunas boyas pueden ser ancladas al fondo del mar, mientras que otras pueden estar diseñadas para flotar y derivar con las corrientes oceánicas.

Capítulo III. Metodología

3.1 Diseño Metodológico

3.1.1. Tipo de Investigación

(Hernández et al., 2014) define que la investigación explicativa, “va más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables”. El presente trabajo desarrolla un tipo de investigación explicativa por explicar cómo la optimización del generador de acción directa afecta la conversión de energía por olas oceánicas.

3.1.2. Método de Investigación

Para especificar el método de investigación realizado en este trabajo, enuncia lo definido por Hernández et al. (2014), que el diseño no experimental “podría definirse como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables, es decir, se trata de estudios en los que no se hace variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables. Lo que se hace en la investigación no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para analizarlos”.

Así, este trabajo desarrolla un diseño no experimental del tipo transeccional, por medirse las variables en un periodo de tiempo definido.

3.1.3. Diseño de Contrastación

En este estudio, se ha desarrollado una metodología específica para la optimización numérica de un generador de acción directa utilizado en el proceso de conversión de energía a partir de las olas oceánicas. Para lograr esto, se ha implementado un enfoque de diseño basado en

la comparación y validación externa, similar a la técnica de referencia conocida como "benchmarks" (Hernández et al., 2014).

En términos más simples, el trabajo se ha centrado en la creación de una metodología que permite optimizar el rendimiento del generador de acción directa en el contexto de la generación de energía a partir de las olas. Este enfoque implica una evaluación detallada y comparativa, que se basa en estándares externos o puntos de referencia previamente establecidos (benchmarks). A través de este proceso, se busca garantizar que el generador de acción directa funcione de manera óptima y eficiente en la conversión de la energía de las olas en energía eléctrica.

La metodología desarrollada en este trabajo es esencial para mejorar la eficacia de estos generadores y, en última instancia, contribuir al avance de la tecnología de conversión de energía a partir de las olas oceánicas. Al basarse en estándares establecidos, se busca garantizar que el generador cumpla con los requisitos de rendimiento deseados y sea capaz de operar de manera efectiva en el entorno de generación de energía marina.

3.1.4. Población, Muestra y Muestreo

La población de convertidores se limitará a un rango de eficiencia que oscila entre 400 y 600 megavatios por metro de altura de ola (MW/H/m). En términos sencillos, estos dispositivos se diseñarán y evaluarán para operar dentro de esta franja específica de rendimiento en relación con la altura de las olas.

Para llevar a cabo el estudio, la muestra seleccionada consistirá en las variaciones observadas en la altura de las olas a lo largo de las costas peruanas. Los datos de estas variaciones se obtendrán tomando como base la investigación realizada por López et al. (2015). Esta muestra de datos servirá como punto de partida para analizar y optimizar el funcionamiento de los convertidores de energía en el contexto de las condiciones reales de las olas en las costas peruanas.

3.1.5. Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales de Recolección de Datos

La evaluación del comportamiento electromagnético del generador representa un aspecto crítico en la investigación. Para llevar a cabo este proceso, se recurrirá a un enfoque innovador y altamente especializado: las simulaciones numéricas mediante el uso de software de ingeniería diseñado específicamente para este fin. Este software ha sido cuidadosamente confeccionado para abordar fenómenos electromagnéticos con un alto grado de precisión. Lo que ofrece es un conjunto integral de herramientas y capacidades que resultan fundamentales en el análisis y caracterización detallada del generador.

Una de las facetas cruciales de estas simulaciones consiste en la capacidad de este software para modelar con precisión los movimientos del generador, tomando como base sólidos principios matemáticos. Esta capacidad de modelado permite simular las variaciones en el movimiento y desplazamiento del generador en respuesta a las condiciones variables del entorno, en particular, la altura de las olas en las costas peruanas. Estas simulaciones proporcionarán un panorama completo del comportamiento electromagnético del generador y permitirán la evaluación de múltiples escenarios en tiempo real.

El propósito principal de estas simulaciones es la obtención de un modelo óptimo del generador. Para lograr este objetivo, se considerarán de manera exhaustiva las propiedades geométricas del generador, así como las condiciones específicas relacionadas con la altura de las olas en las costas del Perú. La finalidad de este enfoque es alcanzar un entendimiento profundo del generador, su comportamiento en un entorno de oleaje variable y, en última instancia, la determinación de la configuración geométrica ideal que maximice su eficiencia en la captación de energía.

Estas simulaciones proporcionarán resultados esenciales, incluyendo información detallada sobre la forma óptima del generador, así como valores teóricos críticos que permitirán una optimización precisa de la recolección de energía. La importancia de estos datos radica en

su capacidad para maximizar la eficiencia de la conversión de energía derivada de las olas del mar peruano.

Para la adquisición de información relevante, se procederá a obtener datos precisos de fuentes altamente confiables proporcionados por entidades de carácter nacional. Estos datos se encuentran a disposición en las páginas web institucionales, concretamente en los sitios del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú. Estas instituciones se encargan de recopilar y mantener registros detallados de información pertinente relacionada con la altura de las olas a lo largo de las costas peruanas. Estos datos desempeñarán un rol fundamental al servir como la base primordial para llevar a cabo el análisis y la verificación de los resultados generados a través de las simulaciones numéricas.

3.1.6. Procesamiento y Análisis de Datos

Se llevará a cabo un estudio paramétrico que aborda diversos parámetros geométricos relacionados con el estator y el translator del generador de acción directa. Esta información paramétrica se someterá a un análisis detallado mediante la construcción de una superficie de respuesta, la cual se ajustará utilizando software de ingeniería especializado. El procedimiento se desglosa en los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se llevará a cabo una verificación numérica de los modelos de generadores de acción directa a través de comparaciones con estándares establecidos, conocidos como "benchmarks". Esta fase es fundamental para garantizar la precisión y confiabilidad de los modelos de generadores utilizados en la investigación.
2. En segundo lugar, se propondrá un diseño de generador de acción directa que esté diseñado para operar dentro de un rango de eficiencia específico, que abarca entre 400 y 600 megavatios por metro de altura de ola (MW/H/m). Esta propuesta busca optimizar el rendimiento del generador en condiciones realistas.

3. En tercer lugar, se llevará a cabo la optimización numérica del generador de acción directa mediante simulaciones detalladas. Este proceso implica la variación de la geometría del estator y el translator con el objetivo de lograr un rendimiento óptimo en términos de eficiencia en la generación de energía a partir de las olas oceánicas.
4. Por último, se obtendrán relaciones geométricas clave para el generador de acción directa optimizado. Estas relaciones incluyen la relación peso/masa del generador, así como la determinación del flujo magnético y la eficiencia en el proceso de generación de energía a partir de las olas.

El análisis de datos se llevará a cabo a partir de la optimización numérica de la geometría del generador de acción directa. Específicamente, se parametrizará la geometría del estator y el translator, lo que permitirá obtener una variedad de valores que son críticos para el proceso de optimización. Entre estos valores se incluyen el flujo magnético, la relación peso/masa y otros parámetros fundamentales que desempeñan un papel clave en la mejora del rendimiento del generador. (Aguirre y Torres, 2023)

Es importante destacar que este análisis implica la consideración de fenómenos electromagnéticos complejos que están directamente relacionados con el funcionamiento del generador de acción directa. Por lo tanto, se hace necesario emplear el método de elementos finitos magnéticos (FEMM) como parte integral de la metodología de análisis. Este método es esencial para abordar y comprender el comportamiento electromagnético del generador en el proceso de conversión de energía a partir de las olas oceánicas.

3.2 Dimensiones del modelo propuesto

El diseño propuesto para el modelo se compone principalmente de dos bobinas de cobre dispuestas en un estator que cuenta con un núcleo ferroso. Estas bobinas están posicionadas de manera que se encuentran en contacto con un imán permanente orientado axialmente, lo

que significa que su orientación es paralela al eje del conector. Este imán permanente es responsable de generar el campo magnético necesario para el proceso de generación de energía. El movimiento del generador se basa en el movimiento vertical de una boya que se encuentra en la superficie del agua.

El generador en su conjunto se divide en tres grupos modulares, cada uno de los cuales contiene una configuración similar de estatores y bobinas de cobre. Cada grupo modular se compone de dos estatores primarios que rodean las bobinas de cobre, y estos estatores primarios están separados por un imán permanente. Este diseño modular se repite en tres ocasiones para abarcar todo el generador, lo que garantiza una mayor eficiencia y facilita el mantenimiento y la sustitución de componentes individuales si es necesario.

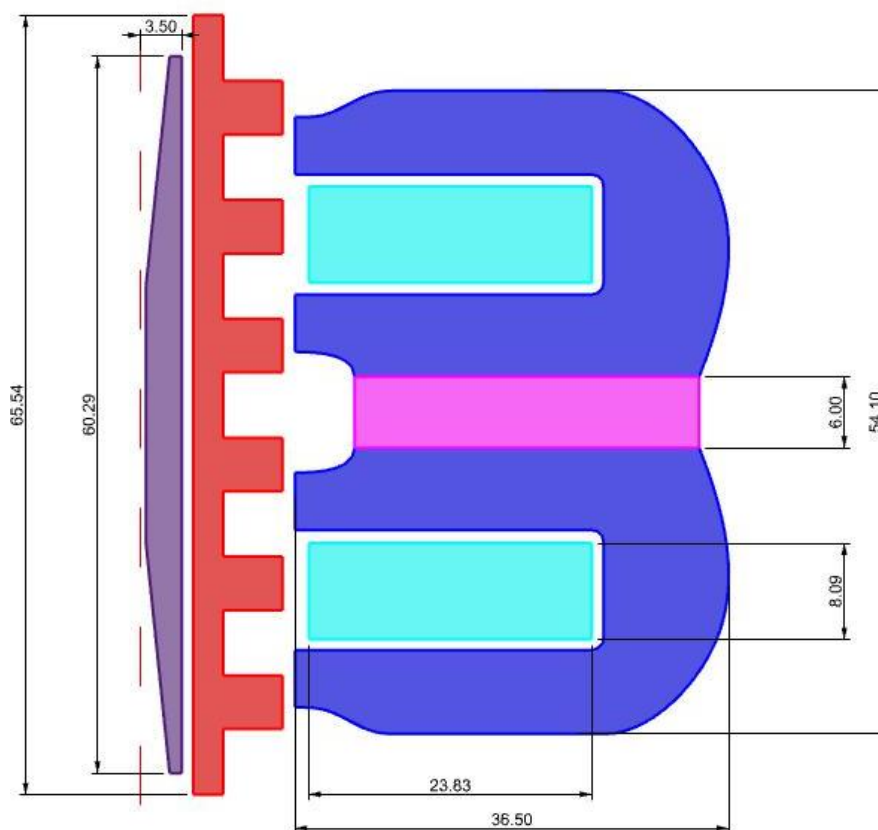


Figura 9. Dimensiones del Generador Axisimétrico

Este diseño se presenta de manera gráfica en la figura 9, y muestra claramente la disposición de las bobinas de cobre, los estatores, y los imanes permanentes en el generador propuesto.

El movimiento vertical de la boya en la superficie del agua impulsa el movimiento de estos componentes, lo que a su vez genera energía eléctrica a través de la interacción entre el campo magnético y las bobinas de cobre. Este diseño modular y la disposición cuidadosamente planificada de los elementos del generador son esenciales para asegurar un funcionamiento eficiente y confiable en la conversión de la energía de las olas oceánicas en electricidad.

El detalle de los dientes del "translator" se ve a continuación con sus dimensiones respectivas en mm. Además, la geometría del estator primario se ve conceptualizada en la figura siguiente, donde se logra apreciar la conexión con el imán permanente, además se trabajará con un estator secundario axisimétrico que se encontrará dentro del translator el cual se puede ver con las siguientes dimensiones.

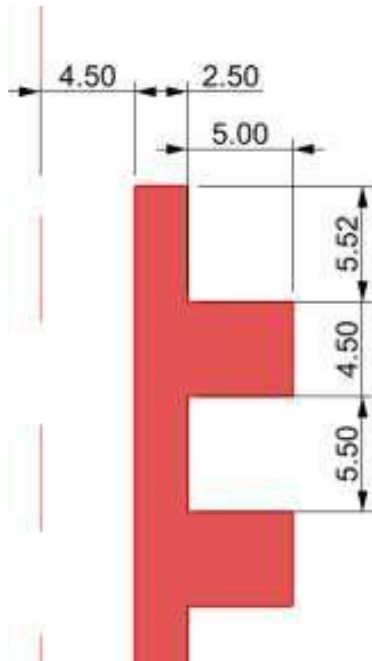


Figura 10. Detalles de los dientes del translator

3.3 Materiales y propiedades electromagnéticas

Basados en los componentes antes ya mencionados se detallará el tipo de material y sus características electromagnéticas, las cuales se definirán basado en la funcionalidad en el

equipo, en este sentido las características del material para este sistema propuesto serán inmutables. Se muestra en la figura 11 el modelo axisimétrico señalando los materiales según su locación.

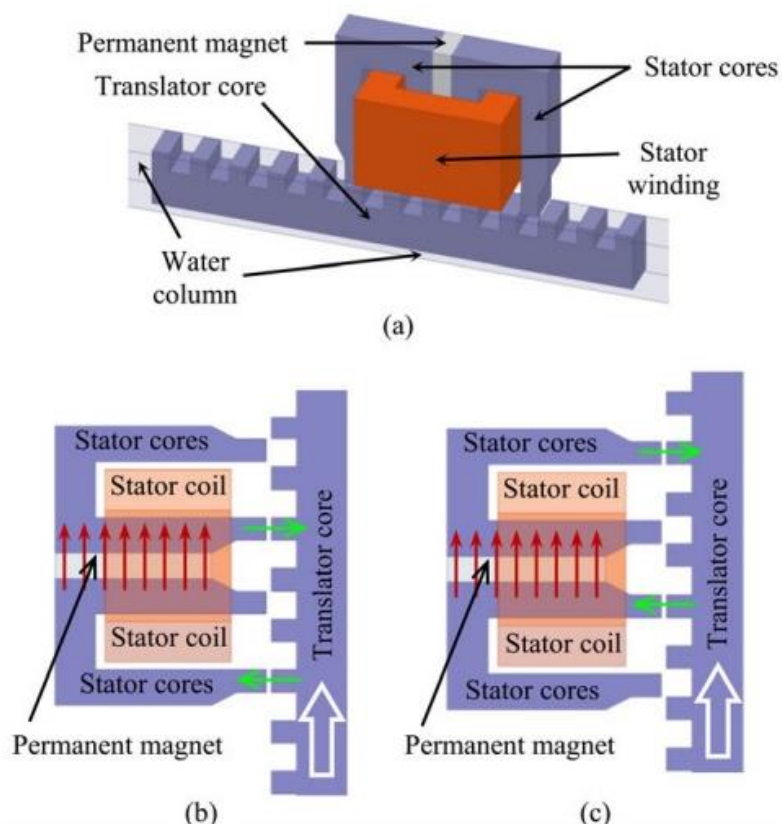


Figura 11. Detalles del material según la geometría del modelo

Se detallará las propiedades mecánicas y electromagnéticas de cada material en la tabla.

Tabla 2. Propiedades mecánicas y electromagnéticas

N°	Nombre	Material
1	Estator Primario	Acero
2	Bobinas	Cobre
3	Iman Permanente	Neodimiun
4	Translator	Acero
5	Estator secundario	Acero

3.4 Simulación numérica de campo magnético transiente

La simulación se realizará utilizando la teoría de elementos finitos, la cual consiste en dividir un elemento 2D o 3D en elementos pequeños o también llamados elementos finitos, estos elementos estarán compuestos por nodos que serán los vértices de estos mismos, la generación de estos elementos viene dada por algoritmos de discretización espacial, estos dan como resultado una "malla" la cual estará discretizando los elementos de la geometría. En la Figura 12 se visualiza un ejemplo de cómo estos algoritmos permiten mallar una geometría, y de ser necesario refinar esta misma para lograr una mejor obtención de datos y representación del fenómeno físico de manera computacional.

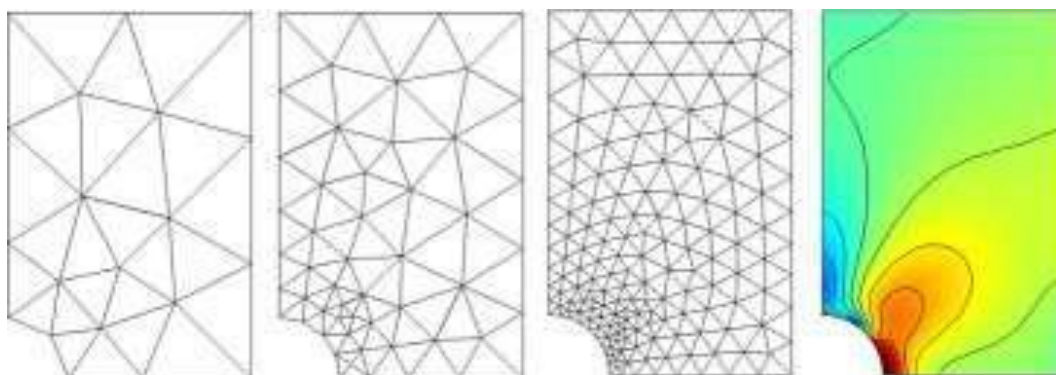


Figura 12. Ejemplo de refinamiento de malla para simulación FEM

Dentro de estos elementos se resolverán ecuaciones diferenciales las cuales, basados en las condiciones de frontera del fenómeno físico, son las características necesarias para representar el fenómeno en estudio; se resolverán para determinar sus propiedades físicas en ese contexto. En este fenómeno también se puede encontrar definido según condiciones cambiantes en el tiempo, a este tipo de condiciones se les denomina transiente. Para el caso, al ser el translator un elemento con movimiento traslacional vertical se genera la necesidad de usar este tipo de simulación.

Las ecuaciones diferenciales por resolver mediante este método serán las ya antes mencionadas en el capítulo 2 o mejor conocidas como ecuaciones de Maxwell (ecuaciones 9 y 10)

3.5 Longitud de elementos de malla

Para lograr una correcta simulación del fenómeno físico se debe de ponderar entre la cantidad de elementos a evaluar según las convergencias de estas respuestas. En tal sentido se considera un tamaño igual al 5 % del tamaño del elemento máximo de la simulación, el cual dará a cambio una discretización como la que se ve a continuación.

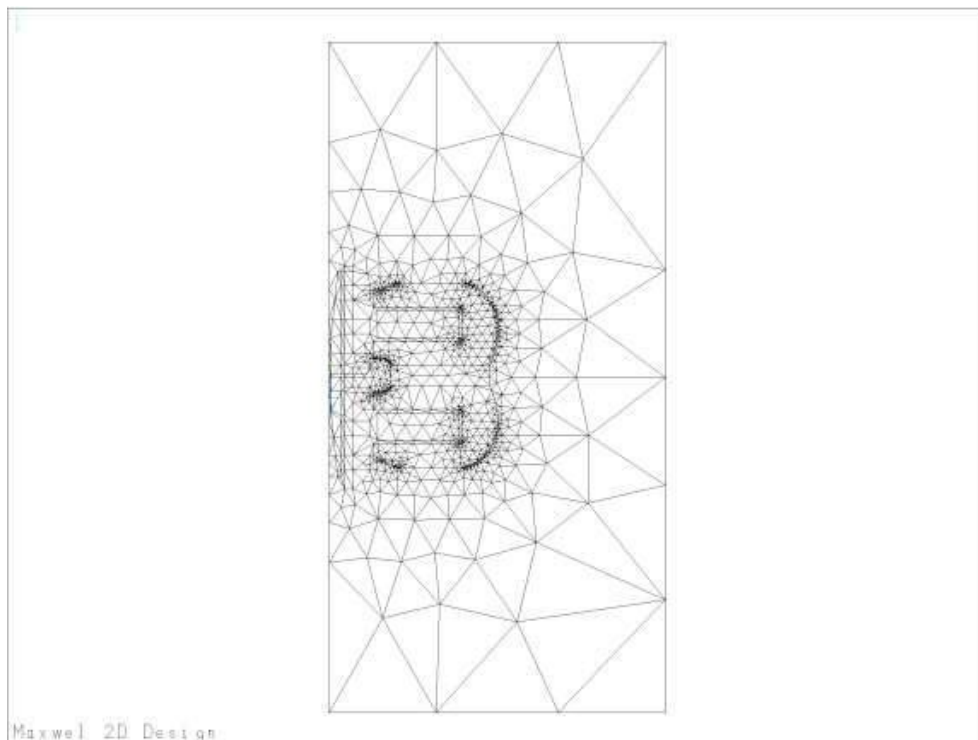


Figura 13. Malla para elementos finitos del modelo propuesto

Donde se observa que el modelo está encerrado en un área, la cual para efectos del fenómeno es el dominio, dentro del simulador será definido como "balloon" determinando la región de contorno total. Las condiciones de frontera que se debe de especificar serán las descritas en una tabla en el siguiente capítulo.

Capítulo IV. Optimización numérica del generador de acción directa

4.1 Estudios de casos

Las fuentes de energía tradicional con las cuales se produce energía eléctrica son finitas, esto implica que tiene una fecha de término y que cuando estas se van escaseando se encarecen. En el caso del petróleo cada vez se van encontrando en lugares más inaccesibles mientras se van agotando, implicando aumento de los costos de extracción. Debido a los cambios climáticos los nevados se están reduciendo, disminuyendo caudales de los ríos que generan la energía hidráulica.

Estos hechos han llevado a algunos gobiernos en las últimas décadas a invertir en la investigación de la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable (FER). El Uso de la energía generada por olas oceánicas son una de las más populares, así como la energía eólica y la solar. Estas FER pueden mitigar los problemas futuros de la escasez de energía.

El dispositivo más efectivo para absorber la energía mareomotriz es el wave energy device (WED). Ese dispositivo absorbe el movimiento lineal de una boya movida por las olas, como se observa en la Figura 14. La parte móvil del dispositivo debe ser lo más ligero posible para disminuir la energía utilizada para moverlo. Menor velocidad vertical implica menor generación de energía eléctrica.

El presente informe tiene como objetivo realizar una simulación numérica de la generación de energía eléctrica inducida por un movimiento vertical, para un determinado modelo geométrico del generador.

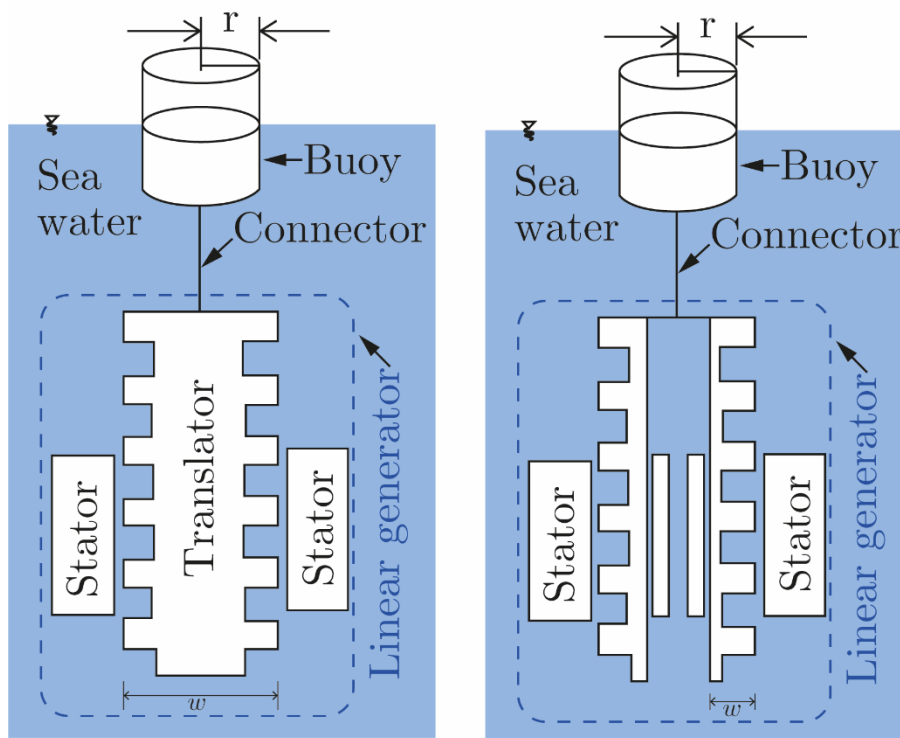


Figura 14. Esquema de los generadores Lineales, conventional y split

4.2 Modelo numérico

Se considera un modelo planar, con una profundidad de 0.25m. El modelo está compuesto por el estator, las bobinas y por una parte móvil que se conoce como traductor. La polaridad de la bobina es mostrada en la Figura 15, siendo negativa cuando está entrando a la bobina y positiva cuando estás saliendo de la bobina. El número de conductores o espiras de la bobina es de 130. La geometría en 3 dimensiones es mostrada la Figura 15.

Las curvas de la geometría fueron creadas utilizando ecuaciones. Las ecuaciones utilizadas son B-Spline, combinadas linealmente con los puntos de control. Los puntos de control son ajustados con los parámetros mostrados en la Figura 16. La Tabla 3 contiene los valores de los parámetros. Donde f_i son fracciones de las longitudes de las cotas precedente, con esos parámetros se controla la curvatura donde se desvía el flujo.

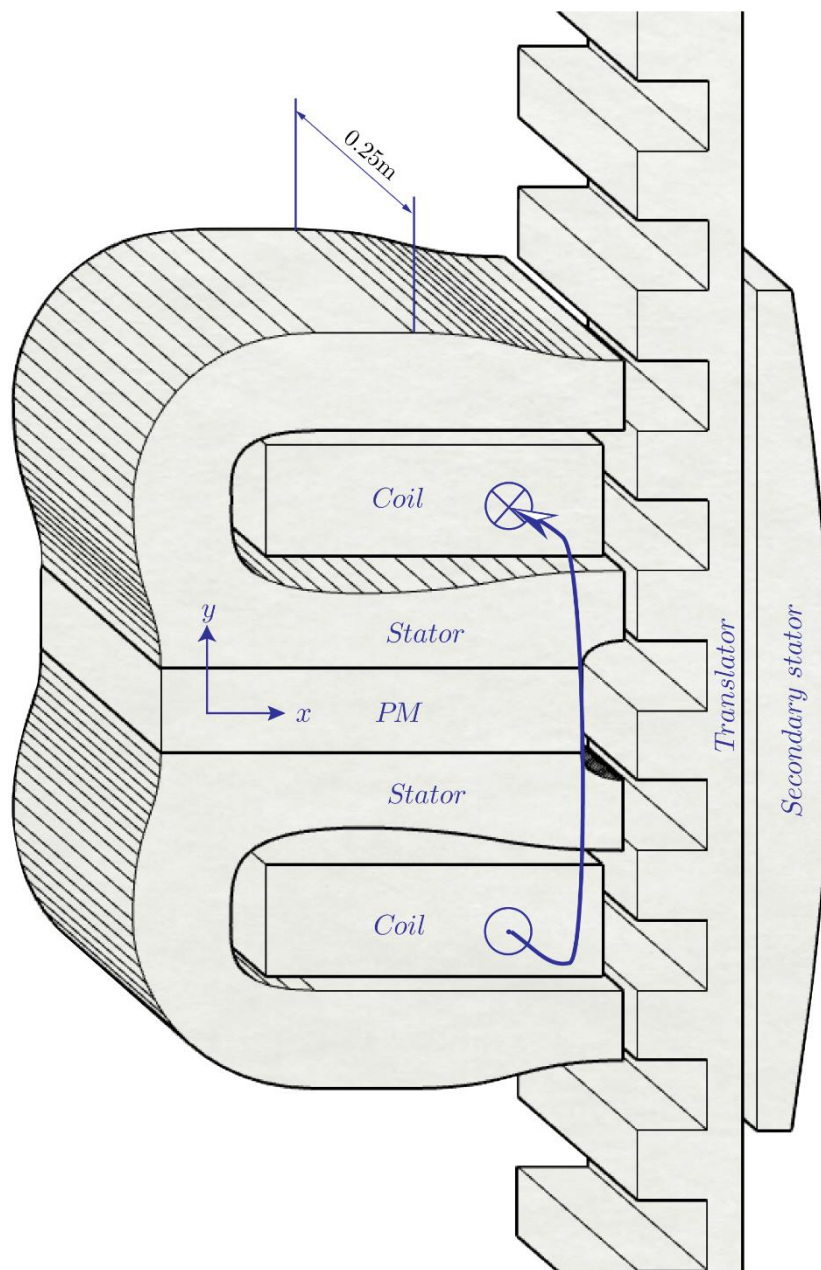


Figura 15. Geometría en 3D del generador Lineal

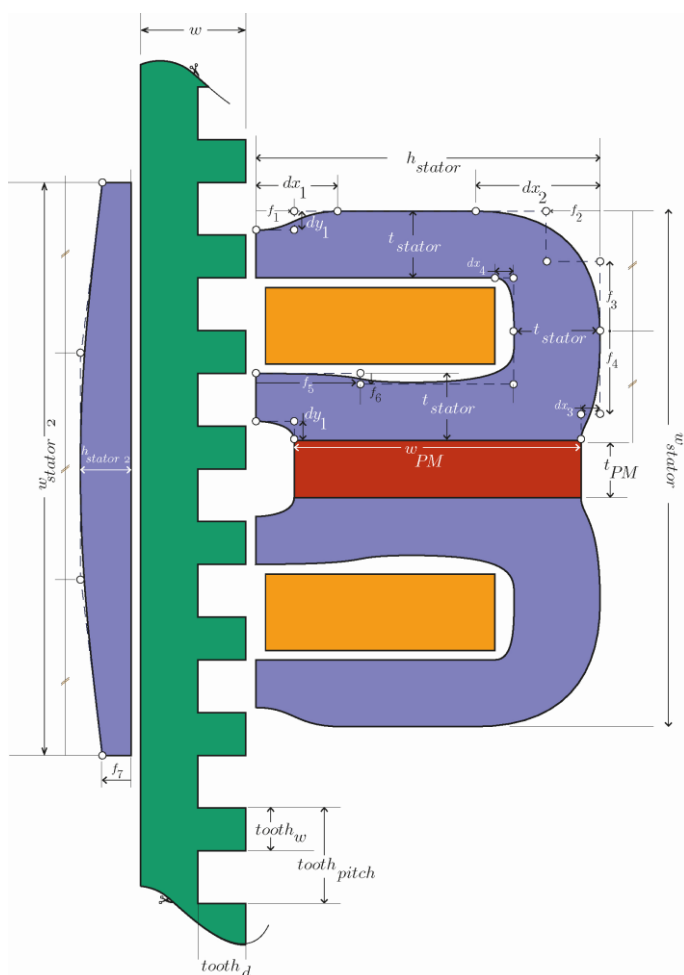


Figura 16. Parámetros de la geometría plana

Tabla 3. Parámetros del modelo planar

Parámetros	valor
w	7.5mm
tooth_d	5mm
n_tooth	22
tooth_pitch	10mm
tooth_w	5mm
air_gap	1mm
w_stator	54mm
t_PM	6mm
d_LG	0.25meter
dx1	15mm
dy1	2mm
f1	0.5
t_stator	7mm
h_stator	35mm
dx2	13mm
f2	0.3

El espacio entre los componentes del generador se conoce como gap, esta tiene una longitud de 1mm.

4.2.1. Materiales

El material de la bobina es cobre, con permeabilidad magnética de 1. El material del estator y del translator es de acero 1008, con una permeabilidad relativa no lineal mostrado en la Figura 17.

El material del imán permanente es neodimio, hierro boro (NdFe) con una coercitividad magnética de $H_c=838$ Ka/m y remanencia de $B_{rem}=1.13$ T. La dirección del flujo del imán permanente es en la dirección del movimiento del translator.

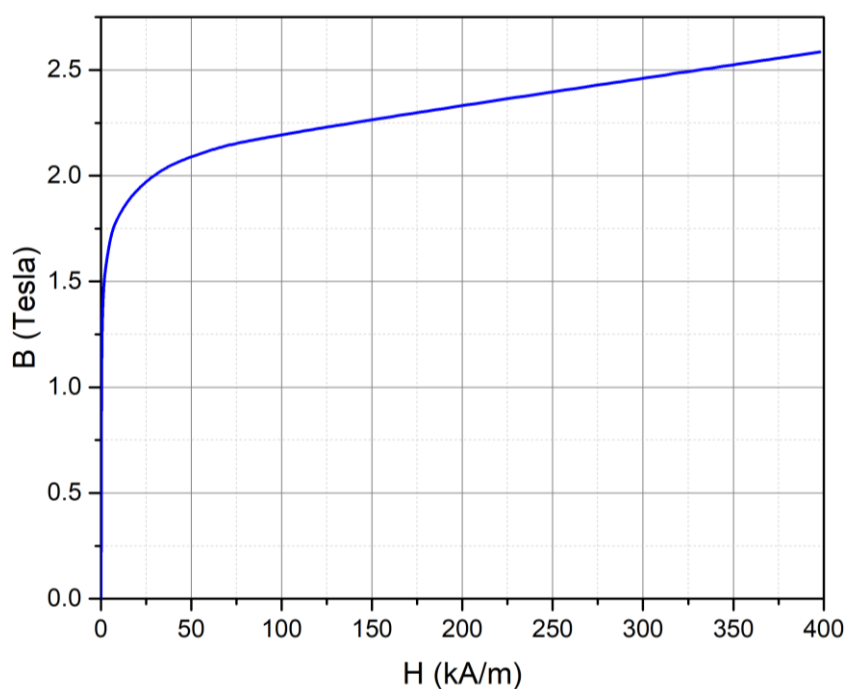


Figura 17. Curva de densidad magnética vs intensidad magnética

4.2.2. Bobinado

El movimiento va a inducir una corriente eléctrica en la bobina. Se considera que la corriente pasa de manera uniforme por la sección de cada filamento, y por lo tanto el bobinado es definido por el número de espiras que pasa por cada sección de la bobina. El número de espiras del modelo es de 130.

4.2.3. Modelo de movimiento

Como primer análisis se hace mover el translator con una velocidad constante de 1m/s.

Luego se le dará movimientos que simulen el movimiento generado por las olas.

4.2.4. Malla

El mallado es triangular, donde se restringe el número de elementos por región. Donde la región coil tiene 141 elementos, la región PM 423 elementos, la región del estator 1183, y el translator 1222 elementos (Ver Figura 18).

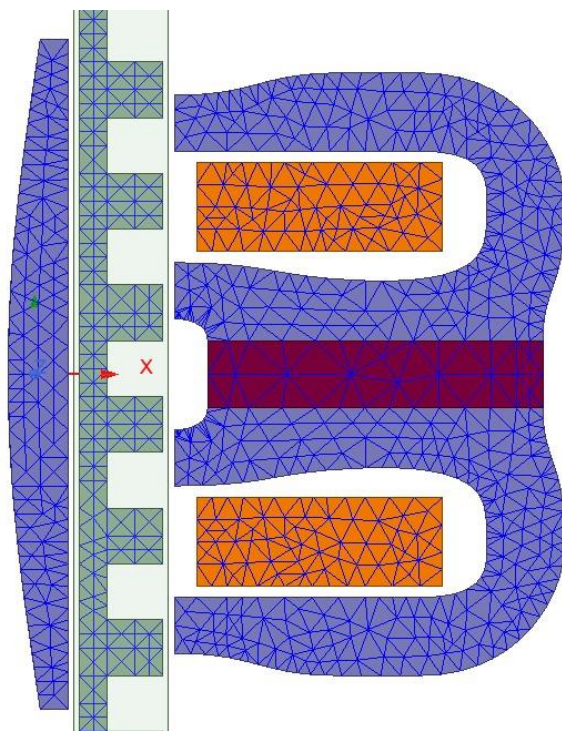


Figura 18. Malla

4.3 Resultados de la simulación

El objetivo del estudio es optimizar la generación de potencia eléctrica para ello se busque los parámetros óptimos para el translator. El translator óptimo será que el que sea más ligero y que genera una mayor potencia. Los parámetros analizados fue el paso y el ancho del diente. Los resultados de la influencia del paso de los dientes son mostrados en la Figura 19, la longitud del paso se tomó alrededor de los 10mm, que es la longitud que produce que dos

de los cuatro bordes del estator se desconecte. La profundidad del diente es limitada por el ancho del translator, de 1mm a 5mm. Los resultados de la influencia de la profundidad del diente (Deep tooth) es mostrado en la Figura 20.

Para estos dos parámetros óptimos se muestra comparación de las potencias por unidad de masa, para un “Conventional translator” y para un “Split translator”. La unidad de masa de cada paso es (ver Figura 14) para el “Conventional translator”:

$$M_{unit} = ((w - 2tooth_d)tooth_{pitch} + 2tooth_dtooth_w) d_{LG} * \rho_{steel} = 3.7392 Kg$$

Y para el “Split translator”:

$$M_{unit} = ((w - tooth_d)tooth_{pitch} + tooth_dtooth_w) d_{LG} * \rho_{steel} * 2 = 1.968 Kg$$

Donde la densidad del acero es de 7872kg/m3.

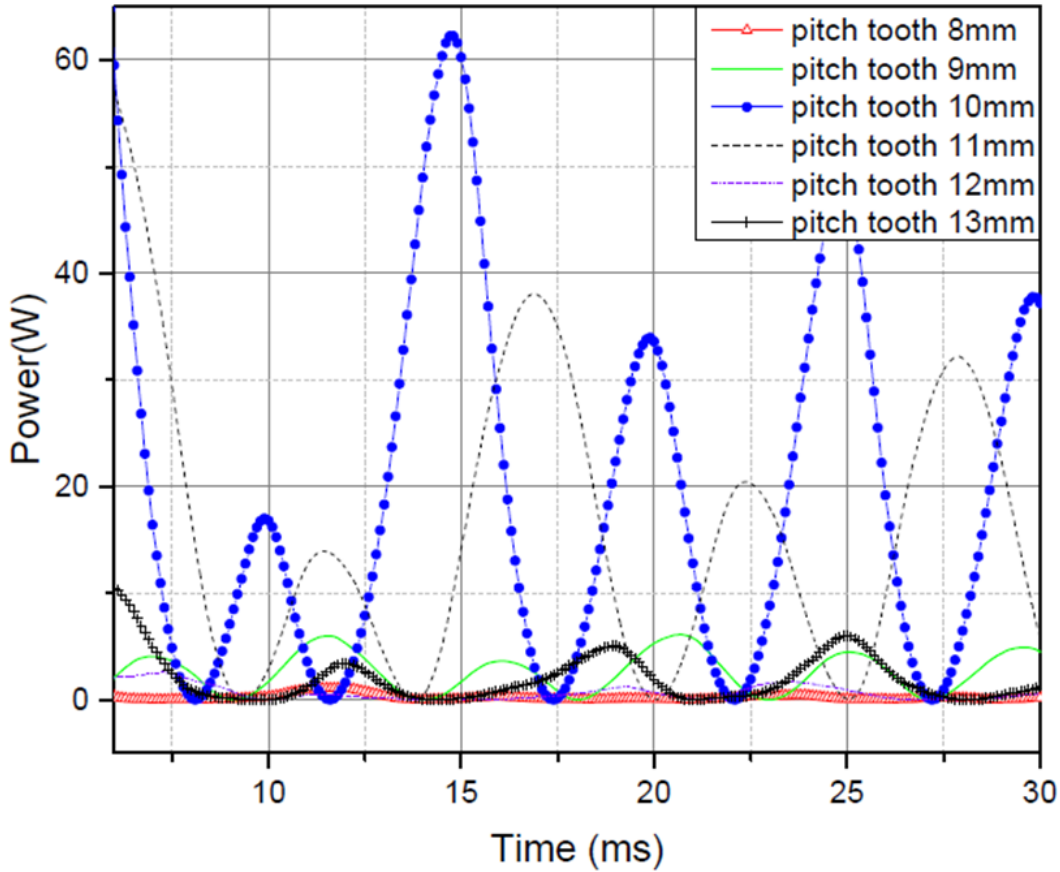


Figura 19. Potencia generada por translators con diferentes pasos

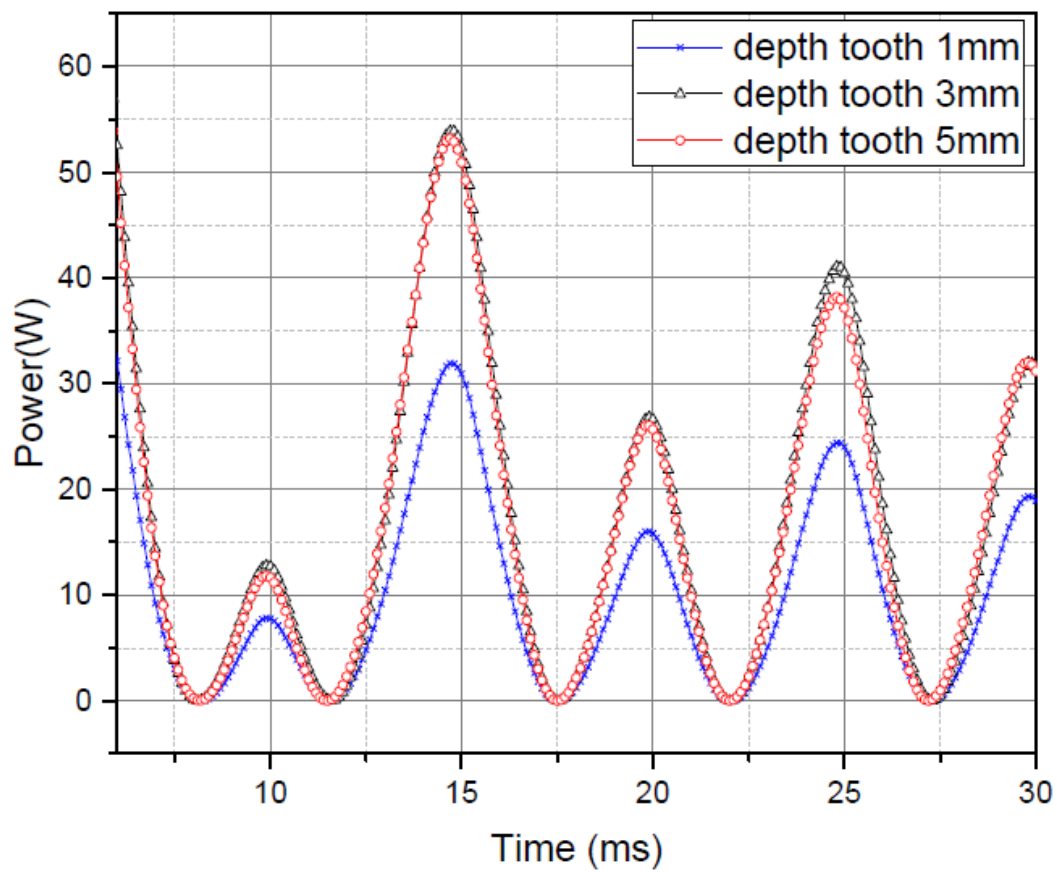


Figura 20. Potencia generada para translator con diferentes depth tooth

La potencia por unidad de masa es mostrada en la Figura 21. La generación de potencia por unidad es importante porque al tener menos masa el translator se va a necesitar menos energía mecánica para moverlo.

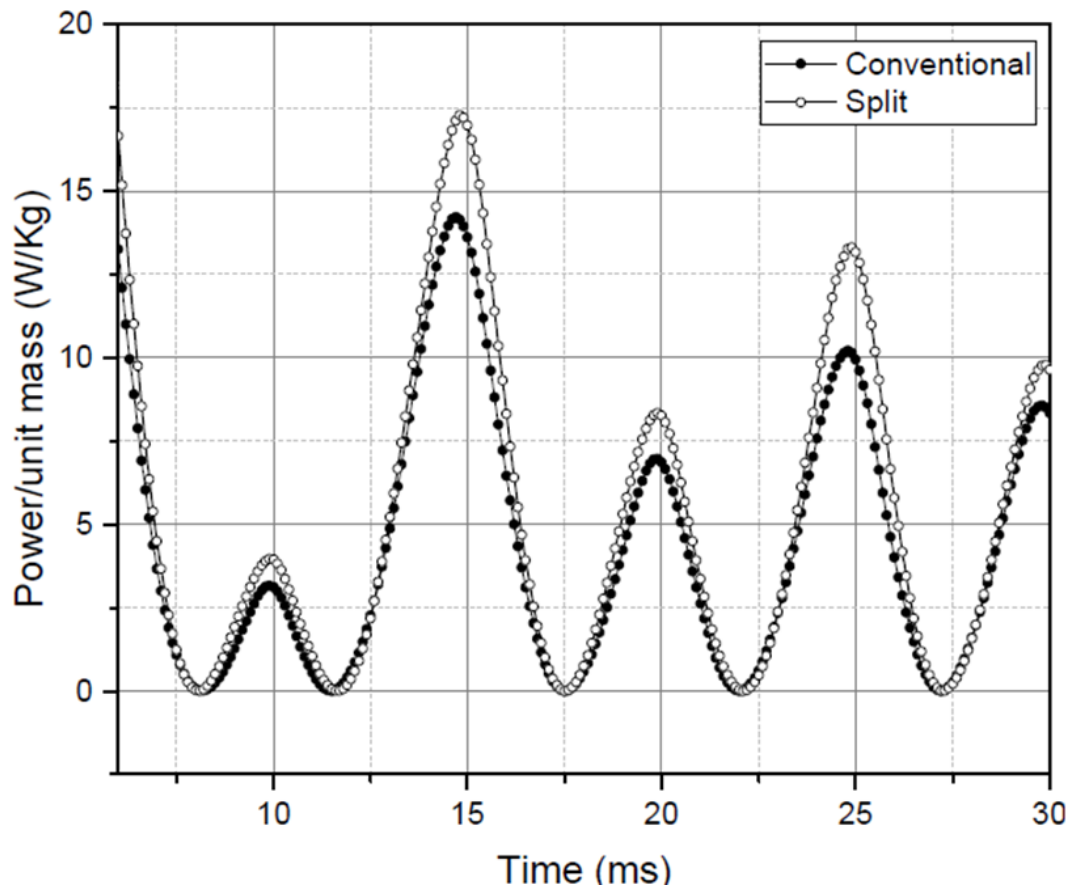


Figura 21. Potencia por unidad de masa

Los resultados del campo de las líneas de flujo para el modelo con pitch de 10 mm y deepth de 5mm, se muestra en la Figura 22. La intensidad del campo magnético es mostrada en la Figura 23 y la densidad de campo magnético en la Figura 24.

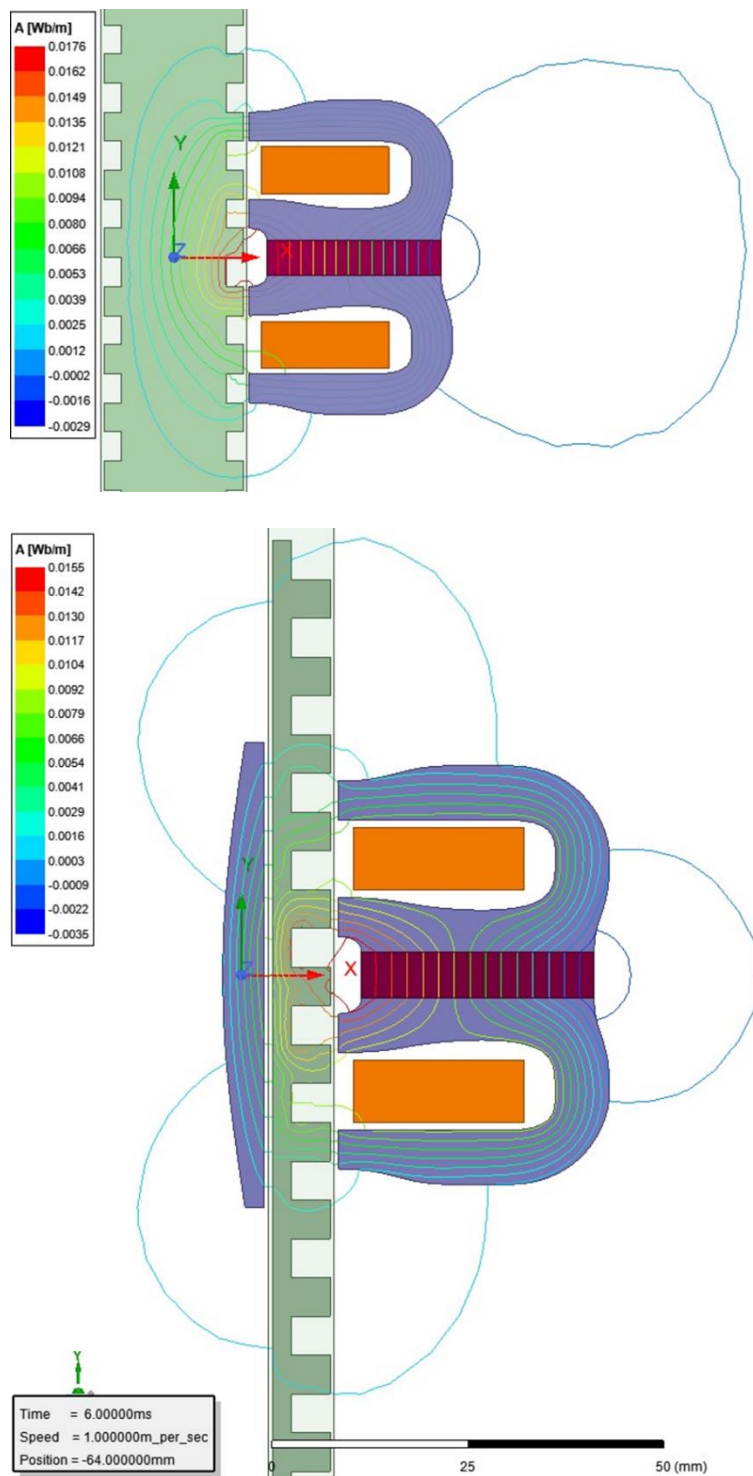


Figura 22. Líneas de flujo para el split y conventional translator de pitch 10mm y deepth tooth de 5mm

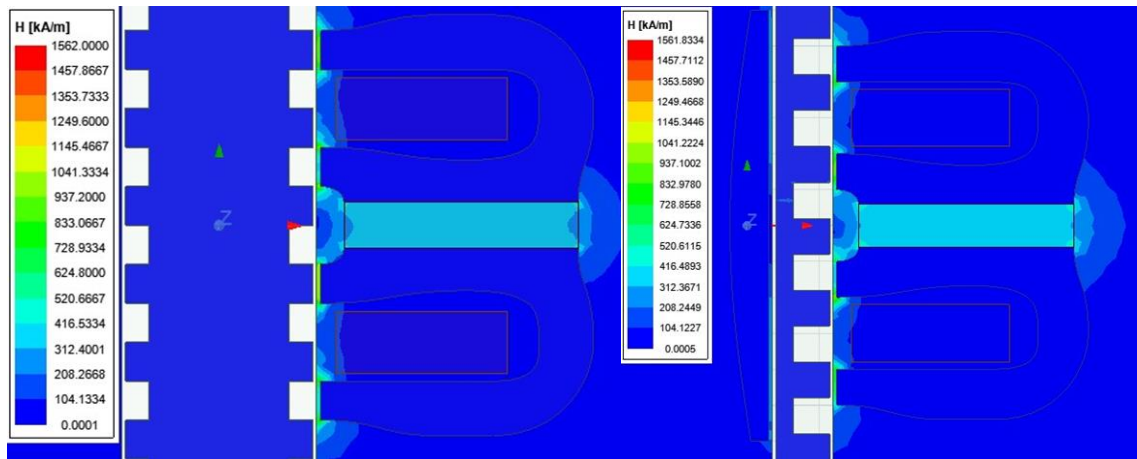


Figura 23. Intensidad de campo magnético

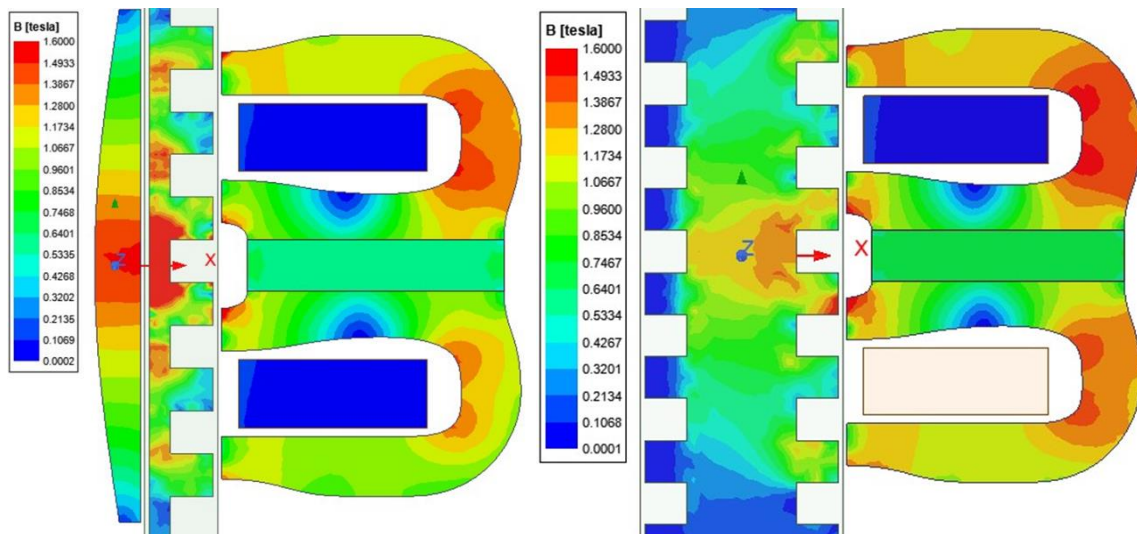


Figura 24. densidad de campo magnético

4.4 Aporte

La optimización numérica de un generador de acción directa para la conversión de energía de olas oceánicas es un campo de investigación crucial en el desarrollo de tecnologías de energía renovable y sostenible. Esta área se centra en mejorar el diseño y el rendimiento de los dispositivos que aprovechan la energía de las olas del océano para generar electricidad. La presente tesis de investigación aporta soluciones innovadoras y eficientes para abordar la creciente demanda de energía limpia y renovable, así como los desafíos ambientales.

Aquí hay algunos aportes y consideraciones clave en este tema:

1. **Eficiencia Energética:** La optimización numérica permite diseñar generadores de acción directa altamente eficientes que aprovechan al máximo la energía de las olas. La maximización de la eficiencia es esencial para hacer que la energía de las olas sea competitiva con otras fuentes de energía.
2. **Diseño Personalizado:** La optimización numérica permite el diseño personalizado de generadores para adaptarse a las condiciones específicas del sitio, lo que es fundamental debido a las variaciones en la intensidad de las olas y la profundidad del agua en diferentes ubicaciones.
3. **Reducción de Costos:** Al optimizar el diseño de los generadores de acción directa, se pueden reducir los costos de fabricación y mantenimiento. Esto es esencial para que la energía de las olas sea económicamente viable a gran escala.
4. **Modelos de Simulación:** La optimización numérica utiliza modelos de simulación computacional para predecir el comportamiento de los generadores en diversas condiciones de oleaje. Estos modelos permiten evaluar múltiples diseños y estrategias antes de la construcción física, lo que ahorra tiempo y recursos.
5. **Integración con la Red Eléctrica:** La optimización numérica no solo se enfoca en el generador en sí, sino también en su integración con la red eléctrica. Esto incluye la sincronización, el control y la gestión de la energía generada para garantizar un suministro estable y confiable.
6. **Monitorización y Mantenimiento Predictivo:** La optimización numérica también se aplica al monitoreo en tiempo real y al mantenimiento predictivo de los generadores de acción directa. Esto ayuda a detectar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas costosas.

7. Impacto Ambiental: La optimización numérica no solo busca maximizar la eficiencia, sino también minimizar el impacto ambiental. Esto incluye consideraciones sobre la vida marina y la sostenibilidad a largo plazo.
8. Colaboración Interdisciplinaria: Este campo fomenta la colaboración entre ingenieros, oceanógrafos, científicos ambientales y otros expertos para abordar los desafíos complejos de la conversión de energía de olas de manera integral.
9. Desarrollo de Nuevas Tecnologías: La investigación en optimización numérica impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías y enfoques innovadores para la conversión de energía de olas, lo que contribuye al avance de la industria de energía renovable.
10. Potencial de Energía Inagotable: Aprovechar la energía de las olas ofrece un potencial prácticamente inagotable, ya que los océanos cubren una gran parte de la superficie terrestre. La optimización numérica contribuye a hacer que este recurso sea más accesible y eficiente.

Conclusiones

El logro de las hipótesis planteadas en la optimización numérica de un generador de acción directa para la conversión de energía de olas oceánicas ha traído consigo una serie de conclusiones positivas y prometedoras, siendo la principal que en la generación de acción directa para la generación de energía por olas, el Split translator es más ligero y a la vez aumenta la generación de energía eléctrica por unidad de peso del translator. La longitud del paso de los dientes y la profundidad del diente del translator óptimos en la generación de energía eléctrica es de 10 mm y 5mm, respectivamente. El paso de los dientes es limitado por las conexiones del estator, de tal manera que la posición del translator y las funciones como puentes de flujo, que en un momento está cerrado o abierto, tienen el fin de generar mayor variación de flujo. Y la profundidad debe ser la mayor posible para poder cortar el flujo en un sentido o en el otro. Por tanto, la optimización ha demostrado como un camino viable y efectivo hacia el aprovechamiento de esta fuente de energía renovable. El trabajo conjunto en la mejora de la tecnología y la eficiencia de estos generadores representa un paso significativo en la dirección de una matriz energética más sostenible.

Respecto a las conclusiones específicas, se tiene que:

1. La optimización de la geometría del generador ha demostrado que es posible aumentar significativamente la generación de energía por olas. La adaptación de la forma y el tamaño de los componentes del generador ha llevado a una mayor eficiencia en la conversión de energía de las olas en energía eléctrica, lo que es una conclusión muy positiva para la viabilidad de esta tecnología.
2. La evaluación y mejora de la eficiencia del generador de acción directa ha llevado a avances notables en la capacidad de estos dispositivos para convertir la energía de

las olas en electricidad de manera más efectiva. Esto es crucial en el contexto de la energía renovable, donde la eficiencia es un factor clave para la competitividad.

3. La evaluación del flujo magnético en la generación de energía por olas ha demostrado ser un área prometedora. El aumento del flujo magnético es un avance significativo que contribuye a una mayor producción de energía y, por lo tanto, a una mayor rentabilidad de la tecnología.

Recomendaciones

Las recomendaciones del presente trabajo son:

1. Se recomienda continuar la investigación y la experimentación para mejorar aún más la eficiencia de los generadores de acción directa y explorar nuevas vías de innovación. Esto podría incluir la exploración de nuevos materiales, geometrías y tecnologías.
2. Fomentar la colaboración entre ingenieros, oceanógrafos, científicos ambientales y otras disciplinas es esencial para abordar los desafíos complejos de la conversión de energía de olas de manera integral. La sinergia entre diferentes campos de conocimiento puede llevar a avances significativos.
3. Además de optimizar los generadores de acción directa, es importante centrarse en la optimización de sistemas más amplios que incluyan la recolección, almacenamiento y distribución de energía generada por olas. Esto garantizará un enfoque holístico en la eficiencia de todo el sistema.
4. A medida que se avanza en la optimización, es crucial seguir evaluando y minimizar el impacto ambiental de esta tecnología. La sostenibilidad y la consideración de la vida marina deben seguir siendo una prioridad.
5. A medida que se perfeccionan los generadores de acción directa, se debe considerar la escalabilidad y el despliegue comercial. Esto implica la creación de infraestructura adecuada y la colaboración con la industria y las autoridades para llevar esta tecnología al mercado de manera efectiva.
6. La investigación en materiales avanzados es esencial para el desarrollo continuo de generadores de acción directa más eficientes y resistentes. La búsqueda de materiales

que sean duraderos, resistentes a la corrosión y económicamente viables es fundamental.

7. Promover la educación y la concienciación pública sobre la energía de olas y su potencial es importante. Esto puede incluir programas educativos y campañas de divulgación para aumentar la comprensión y el apoyo a esta fuente de energía renovable.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre Ruiz, J. A., and Torres Guevara, M. (2023). *Tendencias del desarrollo del hidrógeno verde para la optimización de la matriz energética peruana*. Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/123526>
- Ali, M. S., Tuhin, R. A., Khan, M. S. H., and Hasanuzzaman, M. (2021). *Development of power generation from oceanic waves*. *Advances in Clean Energy Technologies*, (October):319–346.
- Azhari, B., Wijaya, F. D., and Yazid, E. (2021). *Performance of linear generator designs for direct drive wave energy converter under unidirectional long-crested random waves*. *Energies*, 14(16).
- Energy, S. H. (2015). *Wave Energy Converters*. <http://www.seahorseenergy.com.br/>
- Fang, H. W., Feng, Y. Z., and Li, G. P. (2018). *Optimization of wave energy converter arrays by an improved differential evolution algorithm*. *Energies*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/en11123522>
- Fang, H., Wang, Y., and Cai, X. (2019). *Design of Magnetic Gear Integrated Generator with Mixed Magnetization and Eccentric Pole Method for Wave Energy Conversion*. 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2019, (51577124):1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922424>
- Farrok, O., Islam, M. R., Sheikh, M. R. I., and Xu, W. (2016). *A new optimization methodology of the linear generator for wave energy conversion systems*. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2016-May(March):1412– 1417. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2016.7474965>
- Farrok, O., Islam, M. R., Sheikh, M. R., Guo, Y. G., and Zhu, J. G. (2017). *Design and Analysis of a Novel Lightweight Translator Permanent Magnet Linear Generator for*

- Oceanic Wave Energy Conversion*. IEEE Transactions on Magnetics, 53(11).
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2713770>
- Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., and Goosen, M. F. (2015). *Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems*. Desalination, 356:94–114.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.024>
- Gómez, D. (2010). *Análisis de los Generadores de Accionamiento Directo en Tecnología Undimotriz* [Proyecto Final de Carrera]. Universidad de Sevilla.
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4994/fichero/Archivo+Índice.pdf>
- IRENA (2018). *Renewable Energy Balances by Country*.
- Jing, H., Maki, N., Ida, T., and Izumi, M. (2017). *Design Study of Large-Scale HTS Linear Generators for Wave Energy Conversion*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 27(4):3–8. <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2669584>
- Kovaltchouk, T., Multon, B., Ben Ahmed, H., Aubry, J., and Venet, P. (2015). *Enhanced Aging Model for Supercapacitors Taking into Account Power Cycling: Application to the Sizing of an Energy Storage System in a Direct Wave Energy Converter*. IEEE Transactions on Industry Applications, 51(3):2405–2414.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369817>
- Krishna, R., Svensson, O., Rahm, M., Kottayil, S. K., Waters, R., and Leijon, M. (2013). *Analysis of linear wave power generator model with real sea experimental results*. IET Renewable Power Generation, 7(5):574–581. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2012.0117>

- Liu, C. (2021). *Current Research Status and Challenge for Direct-Drive Wave Energy Conversions*. IETE Journal of Research. <https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1942248>
- López, M., Veigas, M., and Iglesias, G. (2015). *On the wave energy resource of Peru*. Energy Conversion and Management, 90:34–40. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.012>
- Molla, S., Farrok, O., Rahman, A., Samiul Bashir, M. D., Rabiul Islam, M. D., Kouzani, A. Z., and Parvez Mahmud, M. A. (2020). *Increase in volumetric electrical power density of a linear generator by winding optimization for wave energy extraction*. IEEE Access, 8(October):181605–181618. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028283>
- Pecher, A. and Kofoed, J. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy- Wave-to-Wire Modelling of WECs*. <https://books.google.com/books?id=IuTxjwEACAAJ>
- Sun, Y., Xu, Z., Zhang, Q., and Liu, L. (2020). *A Plate Moving-Magnet Linear Generator Designed for Free-Piston Engines*. IEEE Access, 8:75135–75144. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988696>
- Weiss, C. V., Guanche, R., Ondiviela, B., Castellanos, O. F., and Juanes, J. (2018). *Marine renewable energy potential: A global perspective for offshore wind and wave exploitation*. Energy Conversion and Management, 177(September):43–54. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.059>
- Zhang, J., Yu, H., Chen, Q., Hu, M., Huang, L., and Liu, Q. (2014). *Design and Experimental Analysis of AC Linear Generator with Halbach PM Arrays for Direct- Drive Wave Energy Conversion*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24(3):3–6. <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2292640>

CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

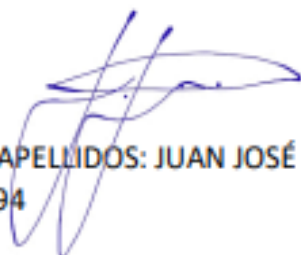
Yo, Juan José Uchuya López, usuario revisor del documento titulado: Optimización Numérica de un Generador de Acción Directa Para Conversión de Energía por Olas Oceánicas.

Cuyo autor es, Pedro Demetrio Reyes Tassara, identificada con documento de identidad 42354107, declaro que la evaluación realizada por el programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de 6 %, verificable en el resumen de reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizo dicho reporte y concluyo que cada uno de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido o constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque 30 de octubre de 2023



NOMBRES Y APELLIDOS: JUAN JOSÉ UCHUYA LÓPEZ
DNI: 41421094

Se adjunta:
Recibo Digital
Reporte de Similitud



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Pedro Reyes Tassara
Título del ejercicio:	TESIS FINAL - PEDRO REYES TASSARA
Título de la entrega:	Optimización numérica de un generador de acción directa p...
Nombre del archivo:	TESIS_FINAL_-_PEDRO_REYES_TASSARA_DNI42354107.pdf
Tamaño del archivo:	1.15M
Total páginas:	53
Total de palabras:	9,159
Total de caracteres:	51,969
Fecha de entrega:	19-oct.-2022 11:49a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre...	1929764533

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALEO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA



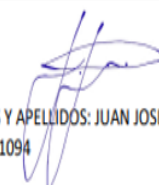
TESIS

"Optimización numérica de un generador de acción directa para
un sistema de energía por alta tensión"

Investigador:
Ing. Pedro Domínguez Reyes Tassara

Auxiliar:
Dr. Juan José Uchuiza López

Lima, Perú, 2022


NOMBRES Y APELLIDOS: JUAN JOSÉ UCHUIZA LÓPEZ
DNI: 41421094

Optimización numérica de un generador de acción directa para conversión de energía por olas oceánicas

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

docplayer.es

Fuente de Internet

1%

2

Submitted to Universidad Distrital FJDC

Trabajo del estudiante

1%

3

Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Trabajo del estudiante

1%

4

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.unprg.edu.pe:8080

Fuente de Internet

<1%

6

juandalmau.com

Fuente de Internet

<1%

7

hdl.handle.net

Fuente de Internet

<1%

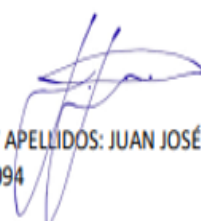
8

tesis.ipn.mx

Fuente de Internet

<1%

NOMBRES Y APELLIDOS: JUAN JOSÉ UCHUYA LÓPEZ
DNI: 41421094



9	repositorioinstitucional.uabc.mx Fuente de Internet	<1 %
10	www.dhn.mil.pe Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	www.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	docslide.us Fuente de Internet	<1 %
14	futur.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
15	www.kerwa.ucr.ac.cr:8080 Fuente de Internet	<1 %


Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo



NOMBRES Y APELLIDOS: JUAN JOSÉ UCHUYA LÓPEZ
DNI: 41421094