



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*“Estrategia de diseño de plantas de energía
undimotriz para generación distribuida”*

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
(Opción: Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTA:

Ing. Julián Andrés Gómez Gutiérrez

DIRECTORES:

Dr. Iván Abel Hernández Robles

Dra. Xiomara González Ramírez

Salamanca, Guanajuato

mayo de 2018

Salamanca, Gto., a 11 de mayo del 2018

M. en I. HERIBERTO GUTIERREZ MARTIN
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
PRESENTE.

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los tramites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno **Julián Andrés Gómez Gutiérrez** del Programa de **Maestría en ingeniería eléctrica** y cuyo numero de NUA es: **145749** del cual soy director. El titulo de la tesis es: **Estrategia de diseño de plantas de energía undimotriz para generación distribuida.**

Hago constar que ha revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE



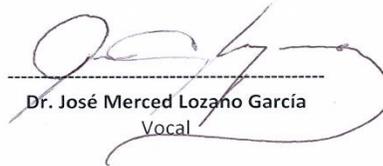
Dr. Iván Abel Hernández Robles
Director de tesis
Secretario



Dra. Xiomara Gonzáles Ramírez
Director de tesis



Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes
Presidente



Dr. José Merced Lozano García
Vocal

DEDICATORIA

A Dios por tantas bendiciones que ha derramado en mi vida, por la sabiduría, paciencia y fortaleza que me ha brindado para poder llevar a cabo este trabajo de tesis durante estos últimos años. Sin su presencia en mi vida esto no hubiera sido posible.

A toda mi familia, especialmente a mi madre Nubia, mi padre Julio, mis hermanas Diana y Juddy quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional y sus oraciones en todas las decisiones que he tomado en mi vida, ellos son mi motor para salir adelante.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecer a mis asesores, el Dr. Iván Abel Hernández Robles y la Dra. Xiomara González Ramírez, por brindarme la oportunidad de trabajar en este proyecto junto a ellos, por su paciencia y total disposición para orientarme en los momentos de duda que permitieron la culminación del proyecto de manera satisfactoria.

A mis amigos Ana, Diego, Ricardo y Lubin por todos los buenos momentos que compartimos, por las travesías estudiando o divirtiéndonos, por los viajes y por brindarme su amistad, deseándoles grandes éxitos en las etapas venideras para sus vidas.

A mis compañeros en general de las distintas nacionalidades por brindarme la oportunidad de conocer algo de su cultura y por los momentos compartidos a lo largo de esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Expreso mi más sincera gratitud hacia la Universidad de Guanajuato, especialmente a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca por la formación y el apoyo que he recibido. A todos los profesores mis agradecimientos por su duro trabajo durante estos dos años que me permitieron obtener el título de Maestro en Ingeniería.



Este trabajo fue realizado gracias al apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, CONACYT, bajo la beca otorgada en la convocatoria titulada "BECAS NACIONALES 2016 PRIMER PERIODO", con el número de becario 736849.



RESUMEN

El incremento de la demanda energética y el cambio climático a nivel mundial ha suscitado la búsqueda de fuentes alternativas que cubran esta necesidad y que sean amigables con el medio ambiente. La energía undimotriz, aquella que se obtiene mediante el movimiento de las olas es una alternativa emergente que se encuentra en etapa de desarrollo tecnológico y cuyo potencial energético puede ayudar a suplir el aumento de la demanda.

La propuesta de este trabajo es desarrollar una estrategia de diseño de una planta de energía undimotriz para la conversión del potencial energético de las olas en potencia eléctrica. En primera instancia se realiza una revisión del estado del arte para estudiar las características del oleaje y seleccionar los elementos fundamentales que componen una planta de generación undimotriz, principalmente para la etapa de captación y conversión de la energía. Los dispositivos usados para esas etapas corresponden a una boya de un solo grado de libertad y un Generador Eléctrico Lineal (GEL) respectivamente. Los modelos matemáticos de cada componente de la planta son analizados individualmente para su posterior acople.

Para el diseño de la planta de energía undimotriz se parte de la obtención de las características del oleaje y del perfil del oleaje para el dimensionamiento del sistema de captación, luego el análisis de la interacción de la ola incidente con el sistema de captación obtener la potencia mecánica, la misma que servirá para dimensionar el sistema de conversión (GEL). Este trabajo contribuye a fortalecer el conocimiento y desarrollo de micro redes por generación undimotriz.

ABSTRACT

The rapidly increase in energy demand and climate change all over the world has motivated the search for alternative sources that cover this necessity and be environmentally friendly. Wave energy, which is obtained by the movement of the waves, is an emerging alternative that is in the stage of technological development and whose energy potential can help to supply the demand.

The purpose of this work is to develop a design strategy of a power plant for the Wave Energy Conversion (WEC) into electrical power. In the first instance, a review of the state of the art it is realized to study the characteristics of the waves and select the fundamental elements that belong to a wave energy plant, mainly for the capture and conversion energy stage. The devices used for the stages correspond to a buoy with only one degree of freedom and a Linear Electric Generator (LEG) respectively. The mathematical models of each component of the plant are analyzed individually for its subsequent coupling.

The design of the wave energy plant begins with the obtention of the waves characteristics and the emulation of the wave profile to size the capture system, follow by the analysis of the wave and capture system interaction to obtain the mechanical power, which is used to size de conversion system (LEG). This work also contributes in advancing the WEC knowledge and development of distributed generation applications.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	3
1.5 REFERENCIAS.....	4
CAPITULO 2	5
ESTADO DEL ARTE	5
2.1 FORMACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE.....	5
2.1.1 Técnicas de observación.....	7
2.1.2 Altura y Periodo	7
2.1.3 Energía del oleaje	8
2.1.4 Potencia máxima absorbida.....	9
2.2 DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN	10
2.2.1 Atenuadores.....	10
2.2.2 Puntos de absorción.....	12
2.2.3 Terminadores.....	12
2.2.4 Columna oscilante de agua.....	13
2.2.5 Sumergido de Presión Diferencial.....	14
2.2.6 Conversor de onda oscilante	14
2.3 DISPOSITIVOS DE CONVERSIÓN	15
2.3.1 Turbinas.....	15
2.3.2 Unidades Hidráulicas	16
2.3.3 Generador Eléctrico Lineal	18
2.4 CONCLUSIONES	19
2.5 REFERENCIAS.....	20
CAPITULO 3	23
METODOLOGÍA.....	23
3.1 OBTENCIÓN DE LOS DATOS OCEANOGRÁFICOS.....	23
3.2 GENERACIÓN DEL PERFIL DEL OLEAJE	24
3.2.1 Espectro del oleaje	25

3.2.2	Perfil del oleaje irregular.....	27
3.3	ANÁLISIS DEL SISTEMA MECÁNICO	28
3.3.1	Fuerzas hidrodinámicas.....	29
3.3.2	Fuerzas mecánicas.....	31
3.4	ANÁLISIS DEL GENERADOR ELÉCTRICO LINEAL	32
3.4.1	Parámetros eléctricos del GEL.....	32
3.4.2	Parámetros físicos del GEL.....	33
3.4.3	Impedancia Interna Z_g	34
3.5	ACOPLE DEL SISTEMA A LA RED.....	34
3.5.1	Rectificación con capacitor como filtro	35
3.6	SIMULACIÓN DEL SISTEMA	37
3.6.1	Sistema Mecánico	37
3.6.2	Generador Eléctrico Lineal	39
3.7	CONCLUSIONES	41
3.8	REFERENCIAS.....	42
CAPITULO 4		44
CÁLCULO DE EFICIENCIAS Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA.....		44
4.1	EFICIENCIA DEL SISTEMA MECÁNICO	44
4.2	OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO	44
4.3	POTENCIA EN EL GENERADOR ELÉCTRICO LINEAL	47
4.4	CIRCUITO RESONANTE.....	48
4.5	CONCLUSIONES	51
4.6	REFERENCIAS.....	52
CAPITULO 5		53
RESULTADOS		53
5.1	NODOS MARÍTIMOS.....	53
5.2	SIMULACIÓN DEL PERFIL DEL OLAJE.....	54
5.3	POTENCIAL ENERGÉTICO UNDIMOTRIZ.....	54
5.4	COMPARACIÓN DE LA POTENCIA MECÁNICA CAPTURADA.....	57
5.5	GENERADOR CONECTADO A UNA CARGA RESISTIVA	58
5.6	GENERADOR A CONECTADO A CIRCUITO RESONANTE.....	59
5.7	GENERADOR CONECTADO AL RECTIFICADOR Y FILTRO.....	61
5.8	CONCLUSIONES	63
5.9	REFERENCIAS.....	64

CAPITULO 6	65
6.1 CONCLUSIONES	65
6.2 TRABAJOS FUTUROS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución global anual de la potencia media por frente de ola [kW/m]	2
Figura 2. Definición de una ola a partir de su perfil $\eta(t)$ con cruces descendientes de elevación cero (arriba) y ascendentes de elevación cero (abajo)	6
Figura 3. Frecuencias y periodos de los movimientos verticales de la superficie oceánica ..	6
Figura 4. Definición de altura y periodo en una ola	8
Figura 5. Grados de libertad de un cuerpo rígido	9
Figura 6. Dispositivo atenuador: <i>WaveNet</i> en sus diferentes escalas	11
Figura 7. Dispositivo atenuador: <i>Pelamis</i>	11
Figura 8. Punto de absorción: <i>CETO</i>	12
Figura 9. Terminador: <i>Salters's duck</i>	13
Figura 10. Esquemático de una columna oscilante de agua	13
Figura 11. Dispositivo Sumergido de Presión Diferencial.: <i>The Archimedes Wave Swing</i> ..	14
Figura 12. Conversor de onda oscilante: <i>bioWAVE</i>	15
Figura 13. Cadena de conversión	15
Figura 14. Esquema de la Turbina Wells usada en la <i>Planta de Generación Pico</i>	16
Figura 15. Esquema de un circuito de conversión de energía undimotriz hidráulico	17
Figura 16. Esquemático de un generador eléctrico lineal.....	19
Figura 17. Metodología para la estimación del potencial energético undimotriz.	23
Figura 18. Vertientes de la República Mexicana.....	24
Figura 19. Superposición de varios trenes de onda a diferentes alturas y periodos	25
Figura 20. Espectro del oleaje de Pierson- Moskowitz.	26
Figura 21. Espectro del oleaje de JONSWAP.	27
Figura 22. Perfil irregular del oleaje.....	28
Figura 23. Modelo del sistema de captación y conversión de energía	29
Figura 24. Coeficientes adimensionales de masa añadida y amortiguamiento contra el radio adimensional kr para una esfera semi-sumergida de radio r en agua profunda. Siendo $k = \omega^2 g^{-1}$	30
Figura 25. Diagrama Circuitual del Generador Eléctrico Lineal con una carga de acople	32
Figura 26. Etapa de acople a la red.....	35

Figura 27. Generador conectado a un puente rectificador y a un filtro.	35
Figura 28. Rectificación y filtrado.	36
Figura 29. Diagrama de Bloques del modelo en simulink.	37
Figura 30. (a) Desplazamiento de la ola irregular y la Boya, (b) Fuerza del PTO, (c) Potencia instantánea captada por el sistema con $C = 155\text{kNsm}$	38
Figura 31. Voltaje sin carga del GEL a diferentes frecuencias. (a): 2.2 Hz, (b): 4.4 Hz, (c): 6.6 Hz.	39
Figura 32. Generador Eléctrico Lineal conectado a una carga resistiva.	40
Figura 33. Curva de descarga de un capacitor de 9 F para diferentes resistencias de carga.	41
Figura 34. Variación de los parámetros óptimos en función del radio de la boya. a) C_{opt} y U_{opt} ; b) F_{opt} y P_{max}	46
Figura 35. Potencia capturada por una boya en función del coeficiente de amortiguamiento. Condiciones oceanográficas, $H_s = 0.72\text{ m}$, $T_z = 10.28\text{ s}$, $T_p = 14.39\text{ s}$	46
Figura 36. Máxima potencia capturada en función del coeficiente de amortiguamiento para dos estados de mar.	47
Figura 37. Generador eléctrico lineal conectado a una carga resistiva.	48
Figura 38. Generador eléctrico lineal conectado a un capacitor ejemplificando un circuito resonante.	49
Figura 39. Circuito resonante con una carga resistiva RL	50
Figura 40. Potencia para el circuito equivalente de un generador al variar su frecuencia a valores cercanos a la resonancia. (a) Potencia activa entregada una carga RL para el caso de referencia PL_{ref} y el caso de resonancia PL_{res} . (b). Potencia entregada por el generador PG_{ref} y PG_{res}	51
Figura 41. Ubicación geográfica de los nodos de estudio. Fuente Google Earth.	53
Figura 42. Altura de las olas contra tiempo para dos nodos de estudio.	55
Figura 43. Perfil del oleaje y posición de la boya correspondiente al nodo de San Mateo del Mar.	55
Figura 44. Potencia instantánea capturada, para el nodo de San Mateo del Mar. $C = 140\text{ (k N s/m)} = 0.9C_{opt}$	56
Figura 45. Potencia promedio capturada en el nodo de San Francisco (Nayarit).	56

Figura 46. Estimación del potencial energético Undimotriz empleando una boya de radio de 2 m, en los nodos de estudio.....	57
Figura 47. Voltaje y Corriente en una resistencia de carga de 20Ω conectada al GEL.....	58
Figura 48. (a) Potencia instantánea en la carga. (b) Velocidad del trasladador para el nodo de San Francisco de Nayarit.....	59
Figura 49. Potencia entregada por el GEL a una carga resistiva con y sin resonancia	60
Figura 50. Eficiencia para el Generador Eléctrico Lineal de 6.44 kW ubicado en el nodo de San Francisco. Caso Resistivo y Resonante.	60
Figura 51. Voltaje DC sobre una carga resistiva de 10Ω	62
Figura 52. (a) Voltaje AC en el generador(azul) y DC para una carga de 10Ω (rojo). (b) Corriente entregada por el generador.	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación del sistema cuando el periodo promedio de este varía.....	38
Tabla 2. Características eléctricas del Generador eléctrico lineal de acuerdo con el número de pares de polos p	39
Tabla 3. Condiciones Oceanográficas para los diferentes nodos de estudio.	54
Tabla 4. Potencia capturada para diferentes radios de la boya.	57
Tabla 5. Eficiencia para un generador ubicado en el nodo de San Francisco.	61
Tabla 6. Eficiencia para un generador ubicado en el nodo de San Mateo del Mar.	61

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El incremento en la dependencia de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades humanas básicas, tales como, alumbrado, movilidad, alimentación, calefacción, entre otras ha suscitado un incremento en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), cuyo efecto ha generado problemas ambientales a nivel global. Una solución a estos ha sido la búsqueda de fuentes alternativas de generación de energía eléctrica, surgiendo de allí los diferentes tipos de fuentes renovables tales como: solar, eólica, bioenergía, geotérmica, hidroeléctrica, oceánica, entre otras [1, 2].

La energía oceánica, aquella que se obtiene por medio de tecnologías que utilizan el recurso hídrico oceánico, cuenta con un potencial teórico de 2 EWh/año [1] capaz de dar sustento a las necesidades a nivel mundial. La energía oceánica se puede obtener mediante seis diferentes fuentes entre las cuales se tiene: energía undimotriz, energía mareomotriz, las corrientes de la marea, las corrientes oceánicas, la conversión de la energía térmica de los océanos y los gradientes de salinidad [1].

La energía undimotriz es aquella que se obtiene mediante la captación de la energía cinética y potencial producido por el oleaje y cuya distribución global anual de la densidad de potencia media estimada de las olas en kW/m es observado en la Figura 1 [3].

Frente a otros tipos de fuentes renovables la energía undimotriz tiene ventajas que hacen atractivo y prometedor la investigación en esta parte de las energías oceánicas. Algunas de las principales ventajas son:

- Ofrece la mayor densidad energética entre las distintas fuentes renovables de energía [4], la energía solar cuenta con una densidad de aproximadamente 0.3 kW/m^2 [1], la energía eólica tiene una densidad energética de 0.3 kW/m^2 [5] y la undimotriz entre $2 - 3 \text{ kW/m}^2$ [6].
- Las olas pueden viajar por largas distancias con poca pérdida de energía [7].
- Impacto ambiental negativo muy limitado cuando los dispositivos están en uso, particularmente aquellos que están lejos de las costas [8].
- En un determinado sitio los dispositivos pueden generar energía hasta en un 90% del tiempo en contraste con el 20-30% de dispositivos eólicos o solares [9].

Así como este tipo de energía tiene ventajas también encara desafíos en relación a los dispositivos que captan y convierten la energía undimotriz en eléctrica. Twidell y Weir en [5] describen algunos de ellos:

- Irregularidades en características de oleaje como amplitud, fase y dirección.

- Manejo de la baja frecuencias de las olas (aproximadamente 0.1 Hz) para que el generador sea capaz de producir una salida adecuada para el suministro de la red.
- Diseño de dispositivos robustos que sobrevivan a condiciones naturales extremas.
- Problemas de mantenimiento para dispositivos que se encuentran lejos de la costa que es donde el recurso es más abundante.
- Fiabilidad y amplios periodos de mantenimientos de los dispositivos conversores para que sean comercialmente viables.

De acuerdo a las características anteriormente mencionadas este trabajo de grado se enfocará en el estudio de la energía undimotriz.

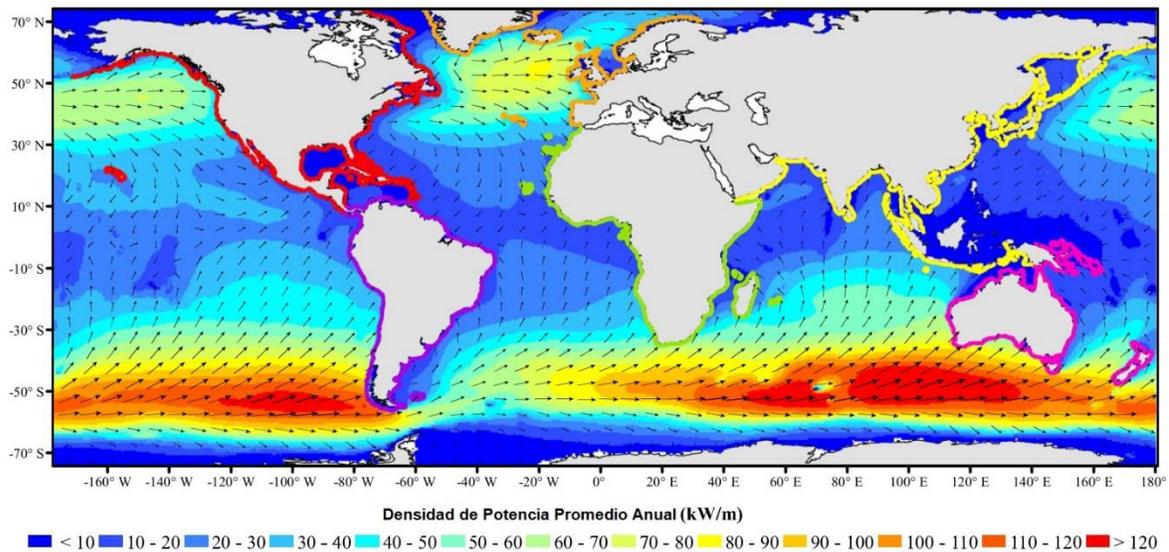


Figura 1. Distribución global anual de la potencia media por frente de ola [kW/m] [3].

1.1 OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar una estrategia para la evaluación de la potencia en la conversión de energía undimotriz, así como el diseño de su planta de generación distribuida, dimensionando y seleccionando todos los componentes eléctricos para transformar la energía de las olas en potencia eléctrica a través de un cuerpo flotante de un solo grado de libertad.

Objetivos Específicos

- Modelado de subsistemas para la conversión de energía undimotriz.
- Acoplar los modelos en un solo sistema.
- Calculo de las eficiencias y pérdidas de potencia en el sistema de conversión.
- Identificar los parámetros del sistema que permitan una conversión óptima de energía.
- Optimización del sistema.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El incremento significativo en los últimos años de la energía eléctrica ha impulsado la investigación en fuentes alternativas y sostenibles de energía para la generación distribuida, entre las cuales sobresalen por su avance tecnológico la energía eólica y solar. Estas últimas han sido explotadas satisfactoriamente y actualmente están siendo usadas para satisfacer parte de la demanda, sin embargo, es necesaria una constante búsqueda de nuevos recursos sostenibles entre los cuales se encuentra la energía undimotriz, tecnología emergente e incipiente, la cual ha ganado atención en los últimos años debido al potencial energético mundial, cuya cifra teórica está en los 32000 TWh/año [1, 2], en consecuencia, la investigación en esta área ha aumentado.

La energía undimotriz es una alternativa con gran potencial energético para suplir el aumento de la demanda. Actualmente esta energía alternativa cuenta con diferentes dispositivos en desarrollo que se pueden clasificar de acuerdo a su ubicación en el mar, maquinaria de conversión de energía y finalidad de uso de la energía [6], cuyo principal objetivo es captar y transformar la energía mecánica de las olas, de los cuales varios ya tienen una madurez tecnológica para hacer esto posible. La conversión de energía mecánica oscilatoria en eléctrica es realizada por un punto de extracción de energía o PTO (del inglés Power Take-Off) siendo este el núcleo en la conversión de energía undimotriz [10].

De acuerdo a lo anterior este trabajo de grado busca determinar una estrategia general que permita dimensionar una planta de energía undimotriz, así como determinar los parámetros óptimos para la conversión de energía. Este trabajo contribuye a fortalecer el conocimiento y desarrollo de micro redes por generación undimotriz.

1.3 ALCANCE

A partir del desarrollo de este trabajo de grado se espera determinar una estrategia para la optimización y evaluación de la potencia en la captación y conversión de la energía undimotriz, lo que se llevará a cabo dimensionando y seleccionando todos los componentes eléctricos para la transformación de la energía de las olas en potencia eléctrica a través de un cuerpo flotante de un solo grado de libertad.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El contenido de este trabajo de grado se encuentra organizado en seis capítulos, descritos a continuación:

- En el capítulo 2 se realiza una revisión al estado del arte con la información sobresaliente del área de generación de energía undimotriz, además de que se mencionarán trabajos publicados y desarrollados por otros investigadores de acuerdo al diseño de plantas de generación undimotriz.

- En el capítulo 3 se desarrollan los modelos matemáticos en estado estable de los principales componentes que constituyen una planta de generación undimotriz para después acoplar en un solo sistema los componentes previamente establecidos y así estimar el funcionamiento y capacidad de generación de una planta undimotriz.
- En el capítulo 4 se efectúan cálculos y optimización de la eficiencia del sistema global a través de la manipulación de los parámetros versátiles de cada uno de los componentes de la planta.
- En el capítulo 5 se presentan resultados obtenidos en este trabajo.
- En el capítulo 6 se muestran las conclusiones generales y trabajos futuros de este trabajo de grado.

1.5 REFERENCIAS

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático.,” 2011.
- [2] World Energy Council (WEC), “World Energy Resources 2016,” 2016.
- [3] K. Gunn and C. Stock-Williams, “Quantifying the global wave power resource,” *Renew. Energy*, vol. 44, pp. 296–304, 2012.
- [4] A. Ilyas, S. A. R. Kashif, M. A. Saqib, and M. M. Asad, “Wave electrical energy systems: Implementation, challenges and environmental issues,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 260–268, 2014.
- [5] J. Twidell and T. Weir, *Renewable Energy Resources*, Second edi., vol. 532, no. 1. 2006.
- [6] J. Falnes, “A review of wave-energy extraction,” *Mar. Struct.*, vol. 20, no. 4, pp. 185–201, 2007.
- [7] C. Cargo, “Design and Control of Hydraulic Power Take-Offs for Wave Energy Converters,” Ph.D. dissertation, University of Bath, UK, 2012.
- [8] B. Drew, A. . Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology,” *J. Power Energy*, vol. 223, pp. 887–902, 2009.
- [9] R. Pelc and R. M. Fujita, “Renewable energy from the ocean,” *Mar. Policy*, vol. 26, no. 6, pp. 471–479, 2002.
- [10] R. H. Hansen, T. O. Andersen, and H. C. Pedersen, “Model Based Design of Efficient Power Take-Off Systems for Wave Energy Converters,” *Proc. 12th Scand. Int. Conf. Fluis Power*, pp. 1–15, 2011.

CAPITULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hace una revisión del estado del arte de la energía undimotriz. Se presenta un análisis de la teoría del oleaje, definiendo características como altura significativa y periodo significativo que tendrán relevancia en este trabajo. Se muestran los diferentes dispositivos de captación de la energía del oleaje, mencionando sus principios de operación y destacando algunos de los trabajos que se han desarrollado a escala global. Finalmente, una cadena de conversión es mostrada para relacionar los diferentes dispositivos que se pueden acoplar a los captadores de energía para hacer la conversión de la energía mecánica en eléctrica, se destacan sus principios de operación y se relacionan algunos trabajos donde ya se han estudiado previamente.

2.1 FORMACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL OLAJE

Una “elevación de superficie” en términos del oleaje es una elevación de la superficie marina en un determinado instante de tiempo, partiendo de esto una ola se define como un perfil de elevación entre dos cruces descendentes o ascendentes de elevación de superficie cero (ver Figura 2) [1].

De acuerdo a Holthuijsen [1], es posible clasificar el oleaje en términos del periodo o frecuencia, como se puede observar en la Figura 3. Las olas más largas son las *trans-tidal*, generadas por las bajas frecuencias en las fluctuaciones de la corteza terrestre. *Surges* son elevaciones de la superficie marina a gran escala en una tormenta severa. Los *tsunamis* son olas generadas por terremotos difícilmente de predecir. Las olas de *infra-gravedad* son grupos de olas generadas por el viento como por ejemplo las olas que se presentan en la zona de surf en la playa, con periodos en escalas de minutos.

Para la energía undimotriz se capta la energía de las olas generadas por el viento. El periodo de este tipo de olas es menor a los 30 segundos y se pueden clasificar en: *i)* Olas tipo *Swell*, siendo estas aquellas que han salido de la zona donde fueron generadas y que en *aguas profundas* (en inglés *deep water*) tienen longitudes de onda de 100 a 500 m; *ii)* *Wind sea*, son olas que se generan debido al viento y que viajan en la dirección en que este sopla, en *aguas profundas* tienen longitudes de onda desde unos pocos metros hasta 500 m [2].

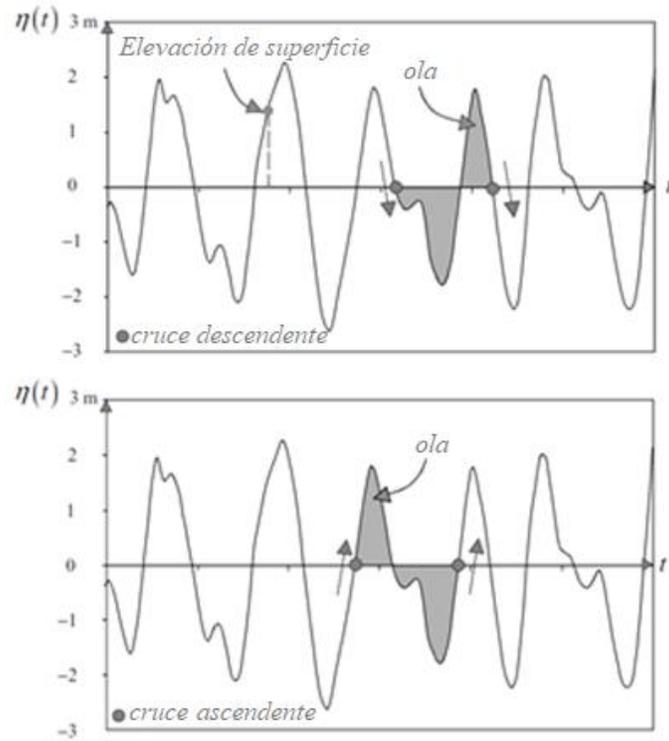


Figura 2. Definición de una ola a partir de su perfil $\eta(t)$ con cruces descendentes de elevación cero (arriba) y ascendentes de elevación cero (abajo) [1].

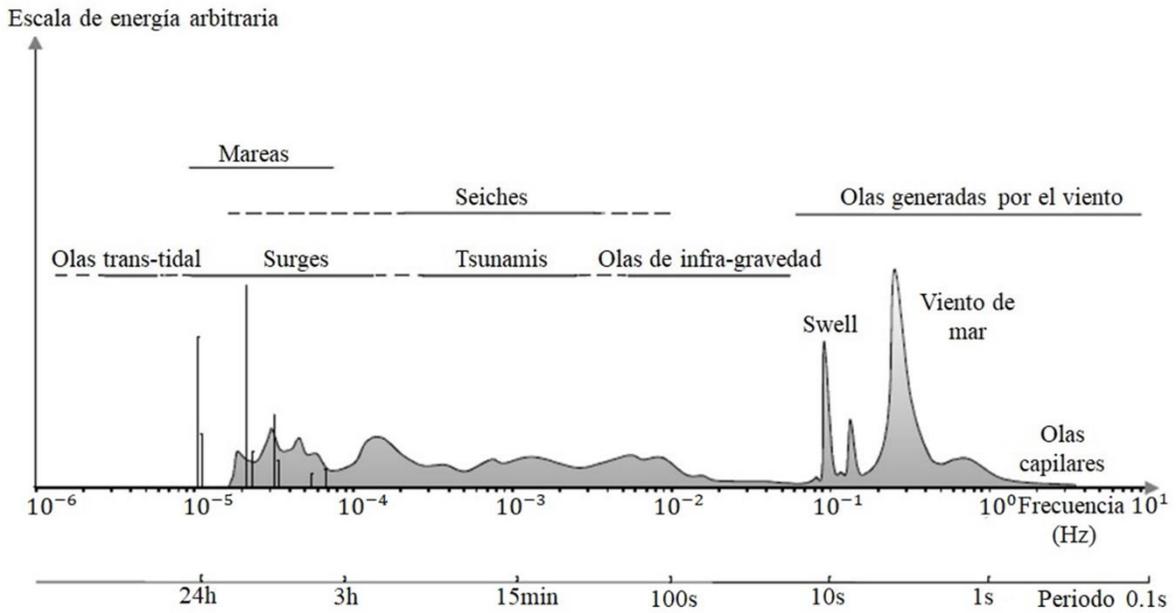


Figura 3. Frecuencias y periodos de los movimientos verticales de la superficie oceánica [1].

De acuerdo a la profundidad al lecho marino $h(m)$ y la longitud de onda de la ola $\lambda(m)$ se pueden identificar tres zonas:

- **Aguas profundas:** En este tipo de aguas el oleaje se propaga sin interacción con el fondo [3]. En este sentido varios autores han dado su concepto de aguas profundas. En [4] la definen como ‘decenas de metros’ o con profundidades de ‘más de 40 metros’, por otro lado en [2] la definen cuando $h > \frac{\lambda}{3}$, y en [3] cuando la profundidad al lecho marino supera un medio la longitud de onda de la ola, es decir, $h > \frac{\lambda}{2}$.
- **Aguas intermedias:** Del inglés *Mid waters*. En este punto la propagación del oleaje ya depende de la profundidad al lecho marino. En relación a la profundidad y longitud de onda las aguas intermedias se encuentran en un rango entre $\frac{\lambda}{25} < h < \frac{\lambda}{2}$ [3],[5].
- **Aguas someras:** Del inglés *shallow waters*. En estas aguas el oleaje tiene una alta interacción con el lecho marino por lo que las partículas de agua tienen una trayectoria horizontal. Algunos autores consideran este tipo de aguas cuando $h < \frac{\lambda}{25}$ [3],[5], por otro lado en [4] hacen referencia a estas aguas cuando $h < \frac{\lambda}{4}$.

2.1.1 Técnicas de observación

Diferentes técnicas de observación buscan estimar parámetros del oleaje como la altura y periodo, en [1] las clasifican en: *Técnicas en sitio* empleando instrumentos que pueden ser ubicados sobre o por debajo de la superficie, cuyo objetivo es adquirir información del movimiento vertical de la superficie; *Técnicas de sensado remoto*, caracterizadas por ubicar instrumentos sobre plataformas fijas o móviles que captan la luz visible o infrarroja reflejada por la superficie marina. Para caracterizar el comportamiento del oleaje estos métodos necesitan promediar la información obtenida de acuerdo a la cantidad de muestras tomadas.

2.1.2 Altura y Periodo

De acuerdo a las técnicas de observación las dos características que permiten estimar el comportamiento del oleaje son su altura y periodo. La altura se puede definir como la distancia entre el punto más alto y el más bajo de una elevación de superficie (Figura 4). Hay varios parámetros en términos de la altura que se pueden obtener a partir de un muestreo de datos: la altura promedio, la décima más alta ($H_{1/10}$) y el tercio más alto ($H_{1/3}$), este último parámetro también es conocido como la altura significativa (H_s) definido por la ecuación (2.1), y que representa el promedio de un tercio de las alturas tomadas en orden descendiente desde la altura máxima alcanzada hasta un tercio del número total de olas, siendo N el número total de datos de altura tomados y H_j el valor de cada una de las alturas tomadas [1], [2].

$$H_{1/3} = H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2.1)$$

En la Figura 4 se puede observar el perfil $\eta(t)$ de una ola, mostrando el comportamiento de esta en todo instante de tiempo, de lo anterior el periodo de una ola se define como el intervalo de tiempo entre el inicio y final de una ola, es decir, el intervalo en que hay dos cruces descendientes o ascendentes de elevación cero. Entorno a los datos de medición también son obtenidos diferentes tipos de periodos definidos como: Periodo promedio (T_z), periodo pico (T_p) y periodo de energía (T_e) definidos por [1], [6]:

$$T_z = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \quad (2.2)$$

$$T_p = \max(T_j) \quad (2.3)$$

$$T_e = 1.2T_z = 0.86T_p \quad (2.4)$$

Donde, N es equivalente al número total valores de periodo tomados y T_j el valor de cada uno de los periodos tomados.

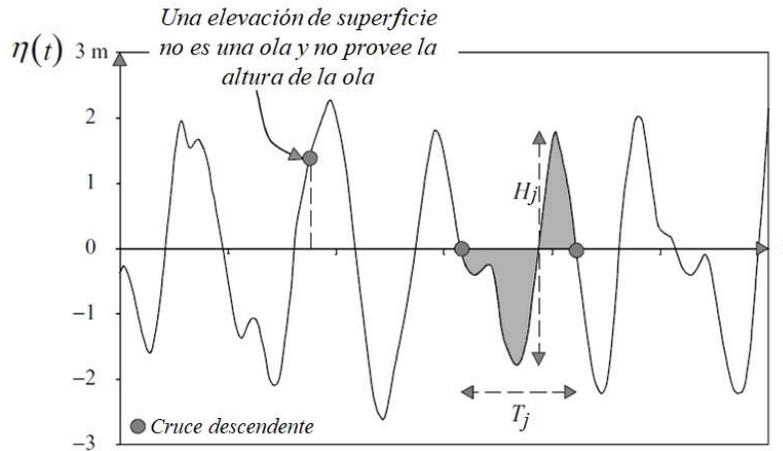


Figura 4. Definición de altura y periodo en una ola [1].

2.1.3 Energía del oleaje

La energía de una ola consta de dos componentes, una cinética que se debe al movimiento del agua y una potencial debido al trabajo que se realiza cuando la superficie plana del agua se deforma en una superficie ondulada, es decir el levantamiento del agua en contra de la gravedad. Por otro lado, el espectro $S(f, \alpha)$ del oleaje también permite cuantificar la energía de la ola en términos de la frecuencia f y la dirección o ángulo de incidencia α . La ecuación (2.5) muestra para ciertas condiciones oceanográficas la densidad promedio de energía por unidad de área de superficie marina. Donde E es la densidad de energía promedio por unidad de área (J/m^2), ρ es la densidad del agua de mar (1025 kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2) y H_s es la altura significativa de la ola (m). La parte del integrando corresponde al espectro $S(f)$ (m^2/Hz) que describe cuantitativamente como las diferentes frecuencias f contribuyen a la energía de la ola [2].

$$E = \rho g H_s^2 / 16 = \rho g \int_0^\infty S(f) df \quad (2.5)$$

Para una ola sinusoidal de periodo T , la energía es transportada con una velocidad equivalente a la velocidad de grupo c_g , de acuerdo a esto el nivel de potencia de la ola se define como el transporte de la energía por unidad de longitud del frente de onda progresivo representado en la ecuación (2.6), siendo H la altura de la ola [2].

$$J = c_g E = \rho g H^2 / 8 \quad (2.6)$$

2.1.4 Potencia máxima absorbida

El movimiento de un cuerpo rígido se caracteriza por seis componentes que corresponden a seis grados de libertad o modos de movimiento (Figura 5), tres traslacionales y tres rotacionales denominados por sus siglas en inglés [7]:

1. *Surge*: Movimiento longitudinal a lo largo del eje x .
2. *Sway*: Movimiento longitudinal a lo largo del eje y .
3. *Heave*: Movimiento vertical a lo largo del eje z .
4. *Roll*: Movimiento angular alrededor del eje x .
5. *Pitch*: Movimiento angular alrededor del eje y .
6. *Yaw*: Movimiento angular alrededor del eje z .

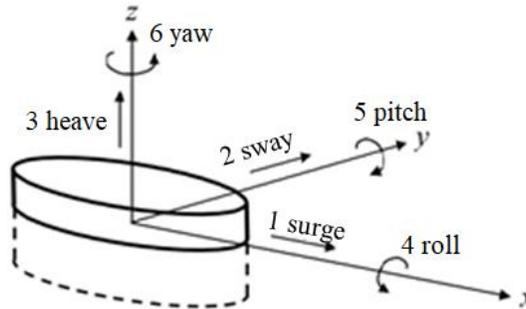


Figura 5. Grados de libertad de un cuerpo rígido [7].

Si una ola sinusoidal incide con una densidad de potencia $J = c_g E$ sobre un cuerpo rígido, de acuerdo a sus grados de libertad este podrá absorber un máximo de potencia de [8]:

- Para un movimiento vertical, un solo grado de libertad.

$$P_{max} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) J \quad (2.7)$$

- Para dos grados de libertad.

$$P_{max} = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) J \quad (2.8)$$

- Para tres grados de libertad

$$P_{max} = \left(\frac{3\lambda}{2\pi}\right) J \quad (2.9)$$

De acuerdo a la profundidad al lecho marino h la longitud de onda λ está dada por [9]:

- En aguas profundas:

$$\lambda = \left(\frac{g}{2\pi}\right) T^2 \quad (2.10)$$

- En aguas someras:

$$\lambda = T\sqrt{gh} \quad (2.11)$$

El nivel de potencia en términos del espectro $S(f)$ para una ola marina real es expresada en Watt/m dado por [2]:

$$J = \rho g \int_0^\infty c_g(f) S(f) df = \rho g^2 T_e H_s^2 / 64\pi \quad (2.12)$$

Donde la velocidad de grupo de olas c_g (m/s) es [5]:

- En aguas profundas

$$c_g = gT/4\pi \quad (2.13)$$

- En aguas someras

$$c_g = \sqrt{gh} \quad (2.14)$$

2.2 DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN

Actualmente hay una gran cantidad de dispositivos de captación de energía undimotriz que tienen diferentes principios de funcionamiento permitiendo así que sean clasificados de diferentes maneras. Esto representa una utilidad para establecer diferencias y similitudes entre ellos. Estos pueden ser categorizados de acuerdo a su ubicación: sobre la costa (*onshore*), cerca de la costa (*nearshore*) o fuera de la costa (*offshore*), y la manera en que estos capturan la energía de las olas. A continuación, se presentan algunos de los dispositivos captadores más representativos.

2.2.1 Atenuadores

Son dispositivos flotantes posicionados paralelamente con la onda incidente y que básicamente montan las olas [4], [10]–[12]. Un ejemplo de este tipo de dispositivo es el *WaveNET*, desarrollado por *Albatern ltd* desde el 2007 [12], [13], cuya estructura es formada por la interconexión de varias unidades generadoras denominadas SQUID (Tubo cilíndrico ascendente vacío conectado a tres boyas flotantes mediante brazos) que cuenta con la capacidad de capturar la energía del mar sin importar la dirección de la ola y orientación de la estructura. Series-6, el primer desarrollo de *WaveNET* fue diseñado para operar en una profundidad mínima de 20 m en olas con alturas entre los 0.3 y 0.6 m de altura y con capacidad de generación de aproximadamente 7.5 kW [13]; De acuerdo a la cantidad de SQUIDS interconectados la generación puede aumentar. Actualmente el Series-6 se encuentra en etapa de prueba en aguas escocesas para bajos requerimientos de energía,

esperando a futuro la implementación del Series-12 y Series-24, dispositivos con mayor capacidad de generación (Figura 6) [13].

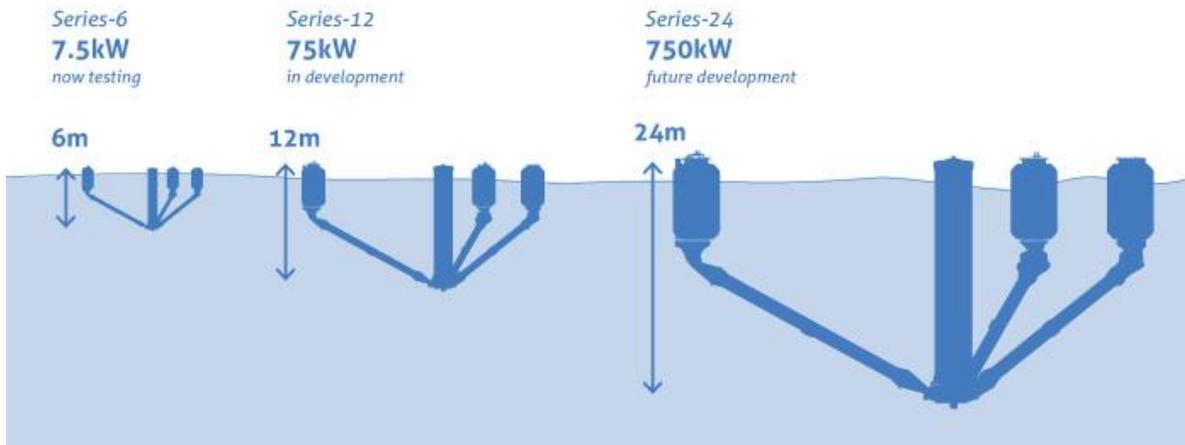


Figura 6. Dispositivo atenuador: *WaveNet* en sus diferentes escalas [13].

Pelamis es otro dispositivo atenuador muy conocido cuyo desarrollo inició en 1998 [14], compuesto de secciones cilíndricas semi-sumergidas, con un punto de extracción de energía o PTO hidráulico adecuado para trabajar en profundidades sobre los 20 m [15]. El primer prototipo a full escala del *Pelamis* denominado P1 fue probado en el 2004 en Billia Croo, Escocia, siendo este el primer dispositivo conversor *offshore* en generar electricidad a la red nacional. Este dispositivo cuenta con 120 m de longitud, 3.5 m de diámetro y está compuesto por cuatro secciones tubulares [14]. En 2009 y 2014 surge una segunda generación del *Pelamis* el P2-001 y P2-002, ambos con capacidades de generación de 750 kW [15], [16]. La Figura 7 muestra una representación gráfica de una granja de *Pelamis*.



Figura 7. Dispositivo atenuador: *Pelamis* [4].

2.2.2 Puntos de absorción

Un punto de absorción es una estructura flotante que absorbe energía de todas las direcciones a través de sus movimientos en la superficie, teniendo en cuenta que muy raramente este tipo de dispositivos se encuentran sumergidos, estos dispositivos cuentan con una dimensión relativamente pequeña en comparación con la longitud de onda incidente [4], [10]–[12]. Hay numerosos ejemplos de puntos de absorción, uno de ellos es la tecnología CETO (Figura 8) de *Carnegie Clean Energy Limited*, empresa de origen australiano. Dicho dispositivo cuenta con capacidades de generación de 1 MW, un impacto ambiental mínimo, y una flexibilidad para operar a diferentes profundidades [17]. Actualmente este dispositivo se está implementando en Cornwall, al sur este de Inglaterra en un proyecto denominado *The CETO 6 Hub Project*, que busca poner en marcha una matriz de CETOS para producir 15 MW [18].

2.2.3 Terminadores

Este tipo de dispositivo se caracteriza por posicionarse perpendicularmente a la onda incidente y básicamente interceptan la ola [4], [10]–[12]. Un ejemplo de este tipo de dispositivo es llamado *Salter's Duck*, desarrollado en 1974 por la Universidad de Edinburg (Figura 9).

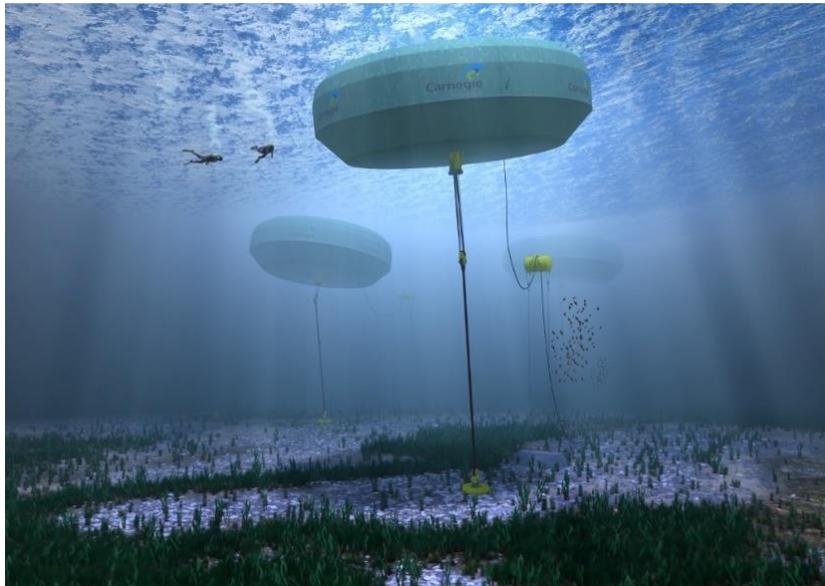


Figura 8. Punto de absorción: *CETO*[17].

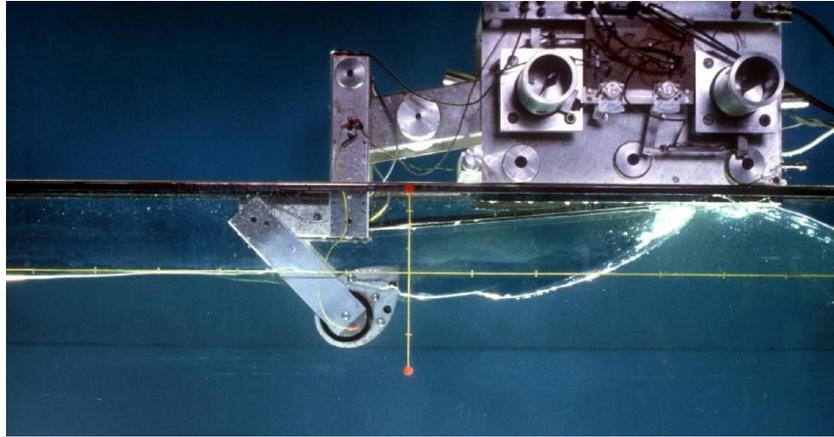


Figura 9. Terminador: *Salter's duck* [19].

2.2.4 Columna oscilante de agua

La columna oscilante de agua es un dispositivo parcialmente sumergido y abierto bajo el agua, en la Figura 10 se observa que este dispositivo deja atrapada una columna de aire (3) sobre una de agua (2). El movimiento oscilatorio del agua en la columna producido por las olas incidentes (1), hace que el aire atrapado en el interior se comprima y expanda a través de una turbina (7) que está conectada a un generador eléctrico (8), para asegurar que no haya una sobre presión existe una válvula de seguridad (4) para poder regularla de acuerdo al estado del mar, (5) y (6) son las válvulas de aislamiento y de maniobra [20], [12], [21]. *La Planta de Generación Pico* ubicada en una isla del archipiélago de Azores en Portugal, es una de las pocas plantas *full* escala a nivel mundial conectadas a la red de generación, cuyo principio de funcionamiento es basado en la columna oscilante de agua [21]. Un panorama más amplio de la *Planta de Generación Pico* es ofrecido por [22].

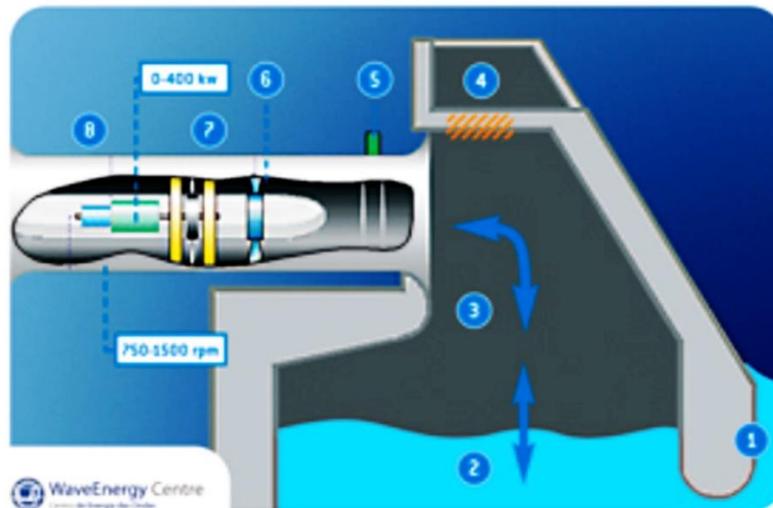


Figura 10. Esquemático de una columna oscilante de agua [22].

2.2.5 Sumergido de Presión Diferencial

Caracterizados por estar ubicados cerca a la costa, fijos al fondo marino y completamente sumergidos. Usa la diferencia de presión que hay sobre el dispositivo consecuente de las crestas y valles de la ola. Estando sumergido tiene la ventaja de reducir el impacto visual, y la probabilidad de daño por tormenta, sin embargo, los costos de instalación y mantenimiento se incrementan [4], [10], [12]. Un ejemplo de este tipo es *The Archimedes Wave Swing* de AWS OCEAN ENERGY.

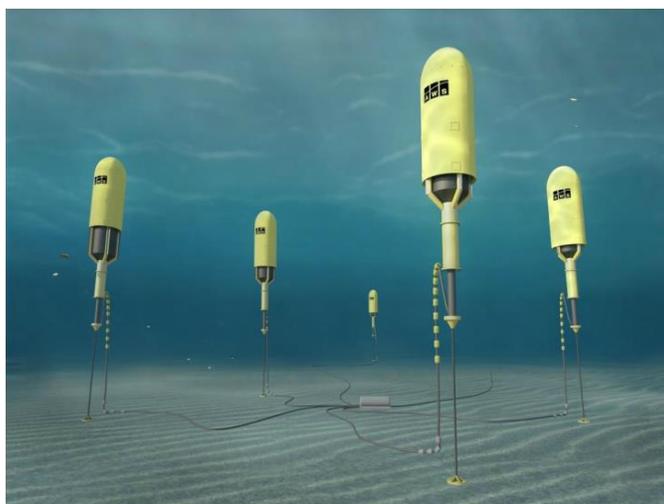


Figura 11. Dispositivo Sumergido de Presión Diferencial.: *The Archimedes Wave Swing* [23].

2.2.6 Conversor de onda oscilante

Este tipo de dispositivos son una clase de terminador ubicado cerca a la costa, caracterizado por extraer la energía de la componente horizontal de las olas [10], [12]. Un ejemplo de este tipo de dispositivo es el *bioWAVE*, desarrollado por BioPower Systems (BPS), empresa de origen australiano que actualmente está completando un proyecto para la implementación a full escala del *bioWAVE*, cuyas capacidades de generación están por encima de los 250 kW, lo que alcanzaría para 200 viviendas en promedio [24]. Este dispositivo cuenta con un eje fijo al fondo marino, tres estructuras cilíndricas que se balancean como un péndulo de acuerdo a las olas pasantes, dos cilindros hidráulicos que presurizan un fluido, que es llevado al dispositivo de que convierte esa presión en energía eléctrica [24].

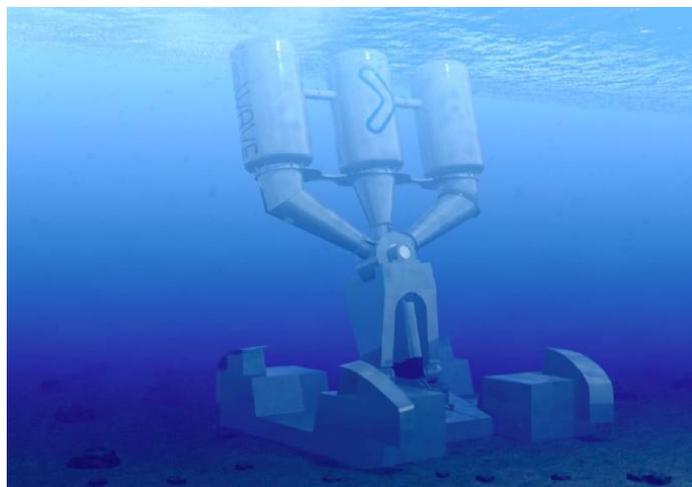


Figura 12. Conversor de onda oscilante: *bioWAVE* [24].

2.3 DISPOSITIVOS DE CONVERSIÓN

De acuerdo a los antecedentes hay diferentes dispositivos para la captación de la energía undimotriz, sin embargo, todos ellos necesitan un punto de extracción de energía o PTO para convertir la energía mecánica del dispositivo de captación en energía eléctrica. La Figura 13 muestra una cadena de conversión de energía undimotriz de acuerdo al tipo de PTO [4].

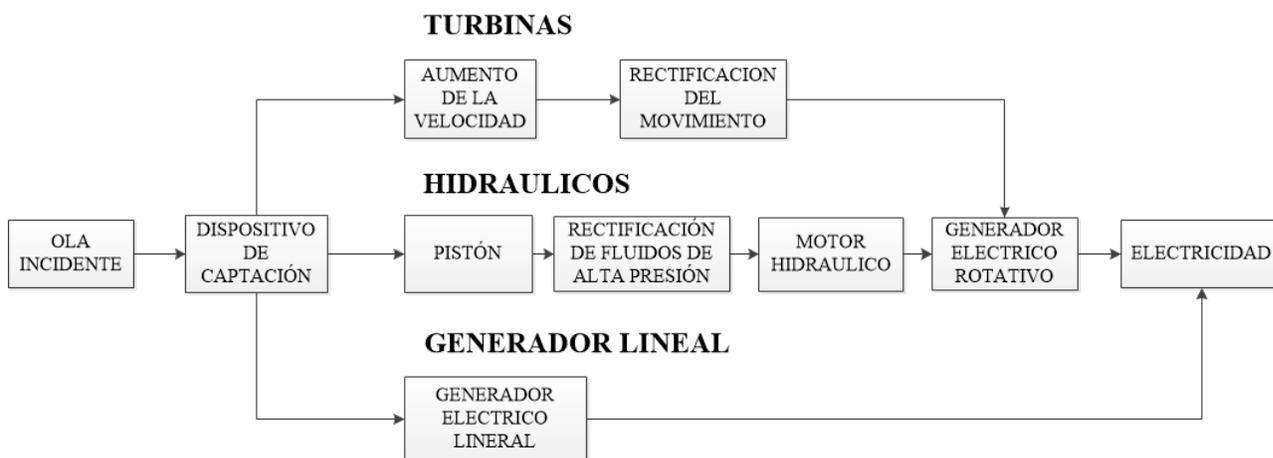


Figura 13. Cadena de conversión [4].

2.3.1 Turbinas

Una turbina es un dispositivo acoplado a un generador, el cual aprovecha la energía de un fluido (ya sea aire o agua) que pasa a través de sus aspas para producir un movimiento de rotación que mueve directamente un generador eléctrico que transforma la energía mecánica en eléctrica. O’Sullivan y Lewis en [25] y [26] consideran el uso de generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG, por sus siglas en inglés, *Double Fed Induction Generator*),

generadores de inducción de jaula de ardilla, generadores síncronos de imanes permanentes y generadores síncronos de campo, para ser acoplados con turbinas, discutiendo allí las ventajas y desventajas de su uso en las columnas oscilantes de agua en términos ambientales, eléctricos y económicos.

En la energía undimotriz el uso más común de las turbinas se ve aplicado en las columnas oscilantes de agua [4]. En casos donde el agua es usada como fluido impulsor hay leve impacto a nivel ambiental en caso de una fuga, sin embargo, el agua es un fluido complejo y problemas de cavitación se pueden presentar. Por otro lado si se usa aire como fluido impulsor aumenta la tasa de flujo de aire, sin embargo las bajas eficiencias, entre el 60% y 65% [27] y alto ruido están presentes [4]. La turbina de aire más popular es la turbina *Wells* usada en la *Planta de Generación Pico* cuya principal ventaja es la rectificación de su movimiento independientemente de la dirección del flujo del aire (Figura 14) [4],[22].

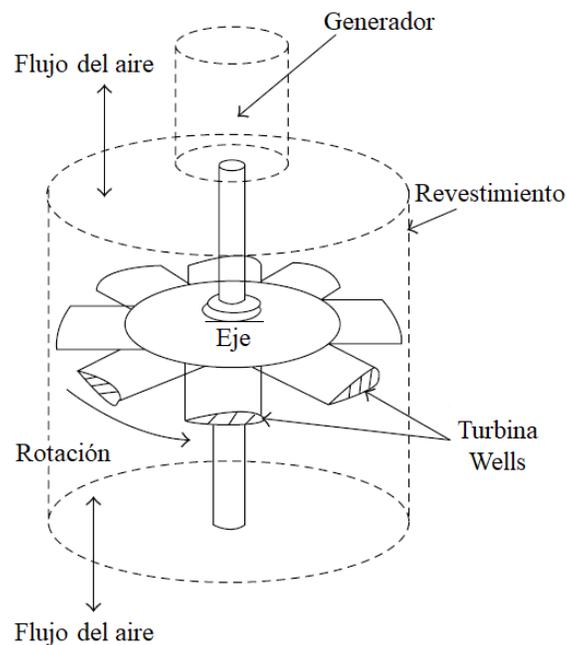


Figura 14. Esquema de la Turbina Wells usada en la *Planta de Generación Pico* [28].

2.3.2 Unidades Hidráulicas

Los PTO hidráulicos son las unidades de conversión de uso más común. Estos transforman el movimiento lento y altas fuerzas del dispositivo de captación en altas velocidades rotativas para producir energía eléctrica, usando pistones, motores hidráulicos y generadores eléctricos. En la Figura 15 se puede observar un esquema de conversión hidráulico. En este sistema el movimiento del dispositivo captador mueve un pistón de dos tiempos que impulsa un fluido que será rectificado por un puente de válvulas para que fluya en una sola dirección hacia la parte de alta presión del sistema. Un acumulador de alta presión atenúa este flujo buscando que sea constante para que pase por el motor hidráulico de tal manera que la energía hidráulica del fluido se convierta en energía rotacional para impulsar un generador [29]. El

acumulador de baja presión provee un pequeño incremento de presión para evitar el fenómeno de cavitación en el lado de baja presión del sistema [4]. El *pelamis* es un ejemplo de dispositivos que usan PTO hidráulicos [15], cuyo diseño sigue el circuito hidráulico de la Figura 15.

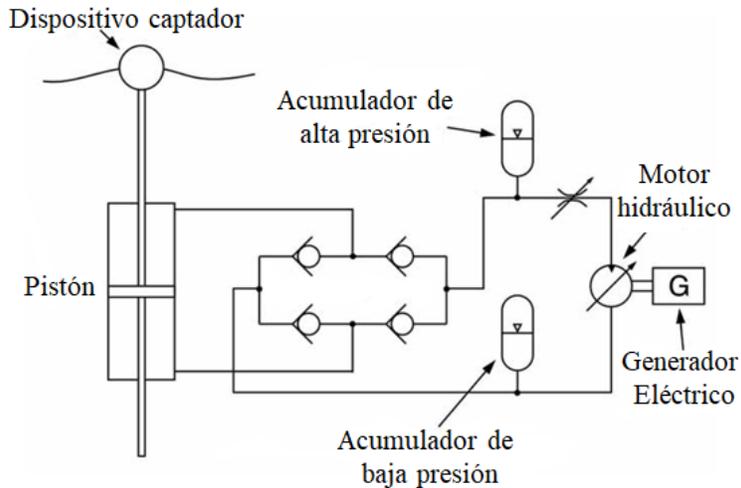


Figura 15. Esquema de un circuito de conversión de energía undimotriz hidráulico [4].

Los aspectos a tener en cuenta al momento de trabajar con PTO hidráulicos son [4], [10]:

- **Fluido contenido:** Este aspecto resalta la importancia del tipo de fluido con que el circuito hidráulico trabajará, buscando evitar problemas internos en los componentes en términos de fugas, temperatura, presión, crecimiento biológico, corrosión, entre otros.
- **Eficiencia:** En un PTO la eficiencia es la capacidad de transformar la energía que se captura del mar en electricidad para ser distribuida a la red. Los sistemas hidráulicos en condiciones ideales de operación alcanzan eficiencias del 60%, en otro caso esta disminuye debido a pérdidas asociadas a fugas, fricción y compresibilidad. Por esto es importante determinar el ciclo útil del sistema para establecer lo cual dará un panorama general de la eficiencia del sistema en lugar de su valor nominal
- **Mantenimiento:** El mantenimiento en un ambiente marítimo demanda una gran cantidad de tiempo, dinero e implica riesgos, por lo cual debe ser realizado por personal altamente calificado. Dado que un sistema hidráulico consta de varias etapas y cada una de ellas consta de partes móviles, es requerido un mantenimiento constante (menos de un año). De igual manera problemas de corrosión y erosión debido al contacto del agua de mar con componentes deben ser tenidos en cuenta. Proporcionar recubrimientos cerámicos a las superficies metálicas de los componentes es una manera de mitigar estos efectos.

2.3.3 Generador Eléctrico Lineal

A diferencia de las unidades hidráulicas y las turbinas que cuentan con dos o más etapas en el proceso de conversión, el Generador Eléctrico Lineal (GEL) realiza una conversión directa de la energía ya que entre la captación y conversión de energía del oleaje en eléctrica hay una sola etapa como se puede observar en la cadena de conversión de la Figura 13. De acuerdo a la Figura 16, el GEL cuenta con un traslador que va acoplado directamente a la boya y sobre él van montados imanes con polaridad alternativa, además, tiene un estator donde van contenidos los devanados. Entre el traslador y el estator hay físicamente un espacio, el entrehierro. Un voltaje es inducido en el embobinado en la medida que el flujo magnético va cambiando de acuerdo al movimiento del traslador [11]. Todo este arreglo va montado en una estructura estacionaria relativamente fija (Plato de arrastre o fijo al fondo marino) [4], [10].

La velocidad de la parte móvil del GEL, el traslador, estará determinado por la velocidad vertical de la superficie marítima, la cual puede alcanzar los 2 m/s, dependiendo del estado del mar, sin embargo, las velocidades rondan entre 0.5 y 1 m/s [11],[30]. Debido a las bajas velocidades (15 a 50 veces menor que la de un generador síncrono rotativo) para lograr una salida equivalente a la de los generadores rotativos, el GEL debe ser diseñado más grande en comparación a los generadores convencionales de alta velocidad. En [31] y [32] describen el diseño de un GEL para una planta piloto del sistema *The Archimedes Wave Swing* cuyas características basadas en resultados son:

- Longitud del flotador de 9 m.
- Longitud de la carrera de 7 m.
- Fuerza máxima 1 MN.
- Velocidad máxima de 2.2 m/s.
- Masa total 400000 kg.
- Potencia promedio de 200 kW.

La gran mayoría de los GELs son conectados a la red por medio de un dispositivo de adecuación que convierte la señal de baja frecuencia a una que sea adecuada para la red [4],[33], [34]. Este tipo de configuración en general alcanza eficiencias de hasta un 80%, por otro lado sus grandes dimensiones demandan costos mayores de fabricación [33]. Comercialmente *The Archimedes Wave Swing* de AWS OCEAN ENERGY es un dispositivo que trabaja con un principio de conversión de energía undimotriz directa, y que puede ofrecer entre 25 kW y 250 kW, de acuerdo a las necesidades del cliente [23].

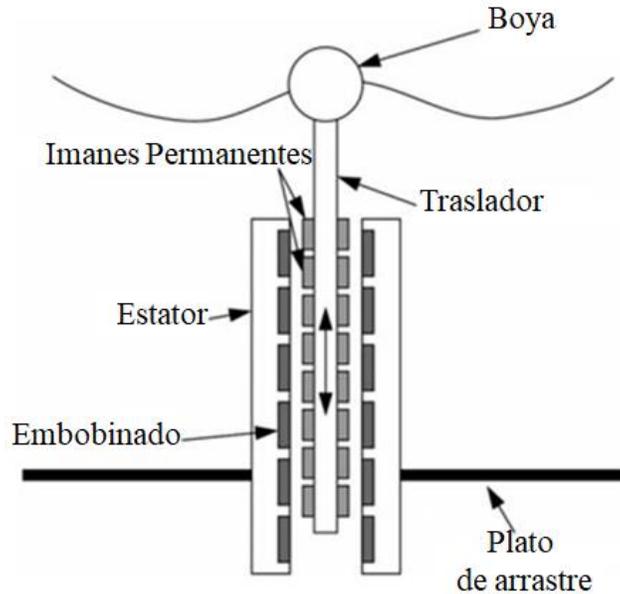


Figura 16. Esquemático de un generador eléctrico lineal [4].

2.4 CONCLUSIONES

De las principales características del oleaje es posible dar una primera estimación de la máxima potencia que un cuerpo puede absorber de acuerdo a sus grados de libertad para todo tiempo, bajo ciertas condiciones del oleaje, y sin considerar las dimensiones del dispositivo. De acuerdo a los diferentes tipos dispositivos de captación y conversión descritos, este trabajo contempla el uso de un GEL como PTO, cuya principal ventaja es la conversión directa de la energía, por consiguiente, como elemento captador se empleará un punto de absorción dada la manera en que este captura la energía de la ola y por el movimiento que requiere el PTO para realizar la conversión de energía. Sin embargo, para estimar la eficiencia y viabilidad de estos dispositivos, es necesario estudiar su funcionamiento cuando son acoplados entre ellos. Por esto para analizar el comportamiento del sistema se considerarán los siguientes aspectos:

- 1) Obtención de las características oceanográficas para un nodo de análisis.
- 2) Reproducción del perfil del oleaje.
- 3) Modelo de las hidrodinámicas del punto de absorción.
- 4) La conversión de la energía mecánica en eléctrica por medio de un GEL.
- 5) Estabilización de la señal de voltaje.

Lo anterior permitirá establecer una perspectiva de las variables influyentes en el rendimiento del sistema para la conversión de la energía de las olas en potencia eléctrica.

2.5 REFERENCIAS

- [1] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, First. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] J. Falnes, “A review of wave-energy extraction,” *Mar. Struct.*, vol. 20, no. 4, pp. 185–201, 2007.
- [3] B. Cavia del Olmo, “Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
- [4] B. Drew, A. . Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology,” *J. Power Energy*, vol. 223, pp. 887–902, 2009.
- [5] R. Castillo Palazón, “Evaluación de recursos energéticos renovables en el Mar Catalán : vientos , olas y corrientes .,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [6] R. Alonso Hauser, “Evaluación del potencial undimotriz de Uruguay,” Tesis de Maestría, Universidad de la República, 2012.
- [7] A. Falcao, “Modelling of Wave Energy Conversion,” *Inst. Super. Técnico, Univ. Técnica Lisboa*, p. 130, 2014.
- [8] J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems: linear interactions including wave-energy extraction*. Cambridge University Press, 2002.
- [9] X. González-ramírez, H. Barrios-piña, and I. A. Hernandez-robles, “Wave Energy Conversion Assessment at Mexican Seaside Points,” *IEEE PES T&D-LA*, pp. 1–6, 2016.
- [10] C. Cargo, “Design and Control of Hydraulic Power Take-Offs for Wave Energy Converters,” Ph.D. dissertation, University of Bath, UK, 2012.
- [11] J. Cruz, *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*. United Kingdom: Springer, 2008.
- [12] “Wave devices : EMEC: European Marine Energy Centre.” [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>. [Accessed: 05-May-2017].
- [13] “WaveNET - Albatern.” [Online]. Available: <http://albatern.co.uk/wavenet/>. [Accessed: 11-May-2018].
- [14] “Pelamis Wave Power : EMEC: European Marine Energy Centre.” [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>. [Accessed: 10-May-2018].
- [15] R. W. Yemm, R. M. Henderson, and C. A. E. Taylor, “The OPD pelamis WEC: Current status and onward programme (2002),” *Int. J. Ambient Energy*, no. January 2003, pp. 104–109, 2003.
- [16] “European Marine Energy Centre (EMEC) Ltd website,” 2017. [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>. [Accessed: 10-May-2018].
- [17] “What is CETO | Carnegie Clean Energy.” [Online]. Available: <https://www.carnegiece.com/wave/what-is-ceto/>. [Accessed: 11-May-2018].

- [18] “CETO 6 Wave Hub (UK),Carnegie Clean Energy Ltd.” [Online]. Available: <https://www.carnegiece.com/project/ceto-6-wave-hub-uk/>. [Accessed: 11-May-2018].
- [19] “Offshore Renewable Energy | School of Engineering.” [Online]. Available: <https://www.eng.ed.ac.uk/research/themes/offshore-renewable-energy>. [Accessed: 11-May-2018].
- [20] A. F. de O. Falcao, “Wave energy utilization: A review of the technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, 2010.
- [21] M. Vieira, K. Monk, A. Sarmiento, and L. Reis, “The Pico Power Plant as an Infrastructure for Development, Research and Graduation,” no. May 2017, 2013.
- [22] “OWC PICO Power Plant.” [Online]. Available: <http://www.pico-owc.net/>. [Accessed: 11-May-2018].
- [23] “Archimedes Waveswing - AWS Ocean Energy - clean renewable marine energy - sub-sea wave power - power converter for remote communities - autonomous power generator - award-winning design - the future of wave power - Archimedes Waveswing.” [Online]. Available: <http://www.awsocan.com/archimedes-waveswing.html>. [Accessed: 11-May-2018].
- [24] “bioWAVE | BioPower Systems (BPS) | Ocean Energy.” [Online]. Available: <http://bps.energy/biowave>. [Accessed: 11-May-2018].
- [25] D. L. O’Sullivan and A. W. Lewis, “Generator selection for offshore oscillating water column wave energy converters,” *2008 13th Int. Power Electron. Motion Control Conf. EPE-PEMC 2008*, pp. 1790–1797, 2008.
- [26] D. O’Sullivan, J. Griffiths, M. G. Egan, and A. W. Lewis, “Development of an electrical power take off system for a sea-test scaled offshore wave energy device,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 1236–1244, 2011.
- [27] M. Torresi, S. M. Camporeale, P. D. Strippoli, and G. Pascazio, “Accurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 735–747, 2008.
- [28] M. Takao and T. Setoguchi, “Air turbines for wave energy conversion,” *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2012, 2012.
- [29] R. So, S. Casey, S. Kanner, A. Simmons, and T. K. A. Brekken, “PTO-Sim: Development of a Power Take Off Modeling Tool for Ocean Wave Energy Conversion,” *Ieee*, p. 5, 2015.
- [30] C. A. Oprea, C. S. Martis, F. N. Jurca, D. Fodorean, and L. Szabó, “Permanent magnet linear generator for renewable energy applications: Tubular vs. four-sided structures,” *3rd Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2011*, pp. 588–592, 2011.
- [31] H. Polinder, M. E. C. Damen, and F. Gardner, “Linear PM generator system for wave energy conversion in the AWS,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 583–589, 2004.
- [32] H. Polinder, M. E. C. Damen, and F. Gardner, “Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator,” *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 15, no. 3, pp. 245–256, 2005.

- [33] J. Bard, P. Kracht, and Fraunhofer IWES, “Linear generator systems for wave energy conversion,” Dinamarca, 2013.
- [34] L. Szabó, C. Oprea, I. A. Viorel, and K. Á. Biró, “Novel permanent magnet tubular linear generator for wave energy converters,” *Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2007*, vol. 2, pp. 983–987, 2007.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el proceso para la captación, conversión y estimación del potencial energético undimotriz (Figura 17). Inicialmente se establecen las consideraciones de selección de los nodos marítimos para después extraer las condiciones oceanográficas que permitirán en un siguiente paso modelar el movimiento de la ola a partir del espectro en frecuencia del oleaje considerando parámetros de altura significativa H_s y periodo pico T_p . También se presenta el modelo matemático de las dinámicas del sistema boya-GEL para evaluar la potencia mecánica captada por el sistema al interactuar con la ola incidente. Seguido a esto se modela el Generador Eléctrico Lineal a partir de la Ley de *Faraday* para calcular sus dimensiones físicas, además a partir de su modelo eléctrico se obtendrán sus parámetros internos que permitan estimar la eficiencia de este. Finalmente, un dispositivo regulador será empleado para acoplar la señal de baja frecuencia que será entregada a la red.

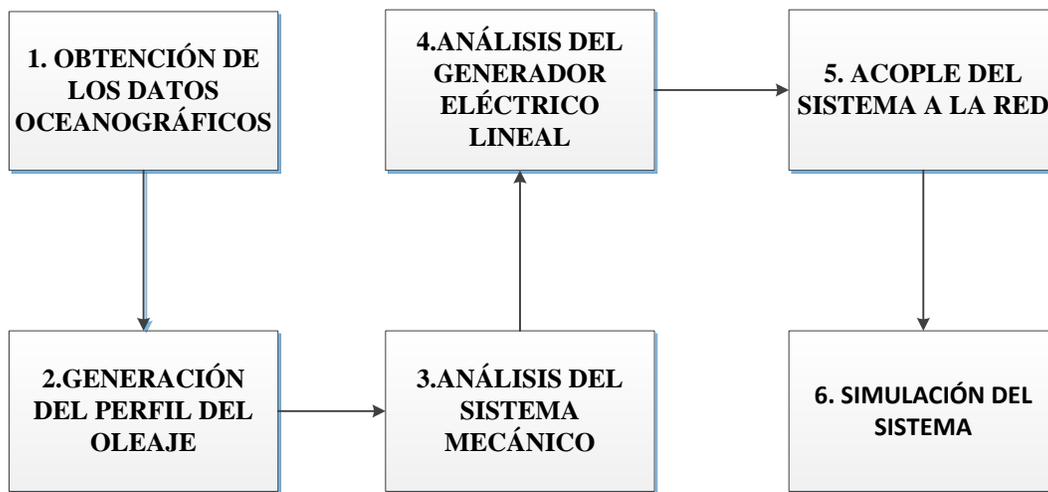


Figura 17. Metodología para la estimación del potencial energético undimotriz.

3.1 OBTENCIÓN DE LOS DATOS OCEANOGRÁFICOS

La República Mexicana cuenta con 11.122 km de costa que limitan con cuatro vertientes: Golfo de México y Mar Caribe, Pacífico Tropical, Golfo de California y Costa Occidental (Figura 18), que por la ubicación geográfica del país tienen características oceanográficas muy diferentes [1]. Estas últimas son el fundamento para la estimación del potencial energético undimotriz y dependiendo de la zona de interés las características del oleaje van a cambiar. De acuerdo a lo anterior se plantean algunos criterios a tener en cuenta para la selección de nodos marítimos en la República Mexicana.

1. Identificación de los estados mexicanos que limiten con las costas de acuerdo vertientes observadas en la Figura 18.
2. Análisis del índice de *No Disponibilidad Energética* (NO Dis), el cual representa el porcentaje de viviendas por estado que carecen de energía eléctrica, de acuerdo con [1]. Por medio de este índice se establecerán cuáles serán los nodos de interés para la estimación del potencial energético undimotriz.
3. Obtención de las condiciones oceanográficas a partir de dos servidores de datos, uno de ellos provisto por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) [2], cuya información es tomada por boyas ubicadas en puntos estratégicos; y el segundo por la Universidad de Hawaii, el ERDDAP (*Environmental Research Division's Data Access Program*) [3]. Esta última base de datos emplea un modelo de escala global a través del WaveWatch III (WW3) con un pronóstico de 5 días cada hora y con una resolución de aproximadamente 50 km o 0.5 grados.
4. Dado que a este punto ya son conocidos los nodos de interés y sus características oceanográficas, es posible determinar el potencial energético undimotriz de acuerdo al modelo del transporte de la energía de la ola que se estableció en el Capítulo 2 en las ecuaciones (2.5) -(2.14). De aquí se calculará la máxima potencia que puede capturar un cuerpo de un solo grado de libertad acorde a la ecuación (2.7).

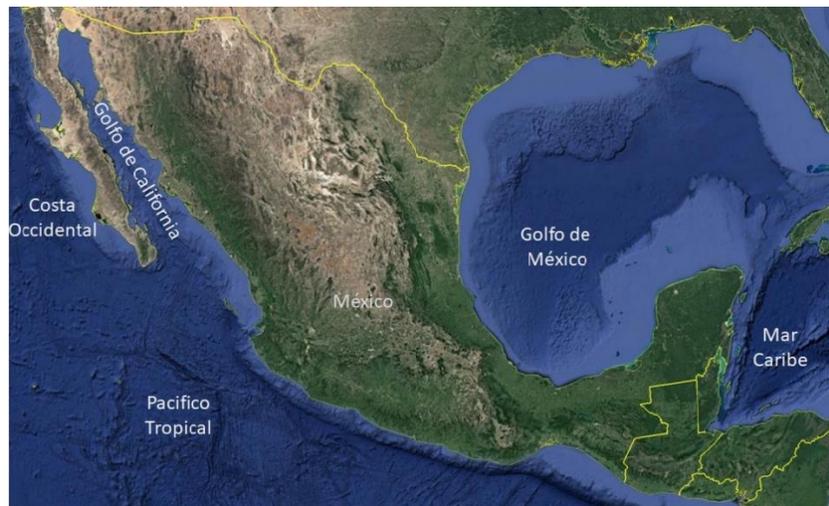


Figura 18. Vertientes de la República Mexicana.

3.2 GENERACIÓN DEL PERFIL DEL OLAJE

Los valores de potencia obtenidos usando el modelo de transporte de energía [4],[5] arrojan un valor constante de potencia promedio para todo tiempo, sin embargo en la realidad, la potencia varía debido al movimiento irregular de las olas. Se puede entender una ola regular como una función senoidal con una altura y periodo fijo, sin embargo en la realidad la naturaleza del oleaje es irregular y se entiende como la superposición de varios trenes de olas o varias olas regulares con diferentes valores de periodo y altura (Figura 19) [6],[7]. Por lo tanto, el perfil del oleaje da una perspectiva de la potencia capturada por un cuerpo cuando

este interactúa con una ola incidente. El modelo del perfil del oleaje, comúnmente aplicado, es obtenido a partir del espectro en frecuencia del oleaje.

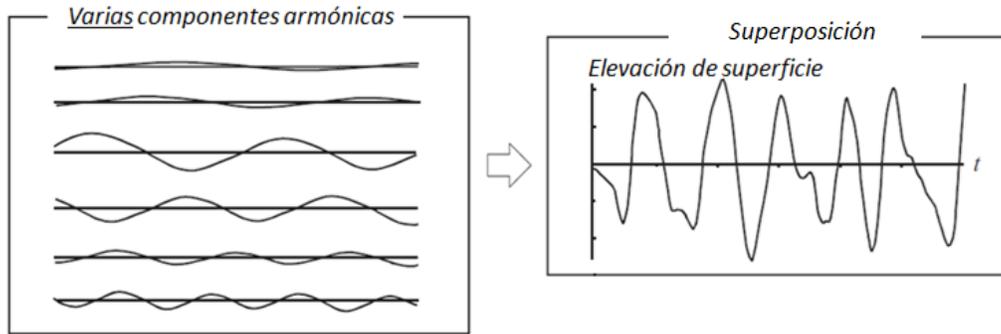


Figura 19. Superposición de varios trenes de onda a diferentes alturas y periodos [8].

3.2.1 Espectro del oleaje

Para describir un estado de mar real (oleaje irregular), es posible hacer uso de una función de densidad espectral $S_A(f)$ que permite cuantificar como las diferentes frecuencias contribuyen a la ola energéticamente [5]. Estos espectros se obtienen a partir de la altura significativa H_s y periodo pico T_p , características definidas en el capítulo anterior. Algunos otros parámetros físicos como la velocidad, duración del viento, *fetch* (distancia sin obstrucciones sobre la cual el viento sopla a través de la superficie del agua) y profundidad sobre la cual se propaga el oleaje también se tienen en cuenta para obtener dichos espectros [9]. Las formas de estos espectros varían de acuerdo a las características anteriormente mencionadas. A continuación, se describen algunos de los espectros de uso común.

- **Espectro de Pierson – Moskowitz**

Pierson- Moskowitz desarrollaron este espectro estudiando el oleaje del atlántico norte representando estados de mar que no dependen del *fetch*, sino únicamente del viento, es decir, se considera que el viento ha soplado de manera constante implicando un oleaje completamente desarrollado. La expresión propuesta para generar este espectro está dada por [4], [5], [6]:

$$S_A(f) = \frac{A}{f^5} e^{-\frac{B}{f^4}} \quad (3.1)$$

Donde $A = BH_s^2/4$ (m^2Hz^4), $B = 5f_p^4/4$ (Hz^4), f (Hz) es el rango de frecuencias donde será evaluado el espectro, y $f_p = 1/T_p$ (Hz) es la frecuencia pico a la cual S_A (m^2s), tiene su máximo [4],[5]. La Figura 20 muestra el espectro de Pierson- Moskowitz para tres estados de mar diferentes, se observa que gran parte de la energía se concentra en la frecuencia pico f_p y en un rango amplio de las frecuencias cercanas a esta, de igual manera, se puede observar que una mayor altura significativa H_s implica que el aporte energético se hace más significativo en la frecuencia pico de la ola.

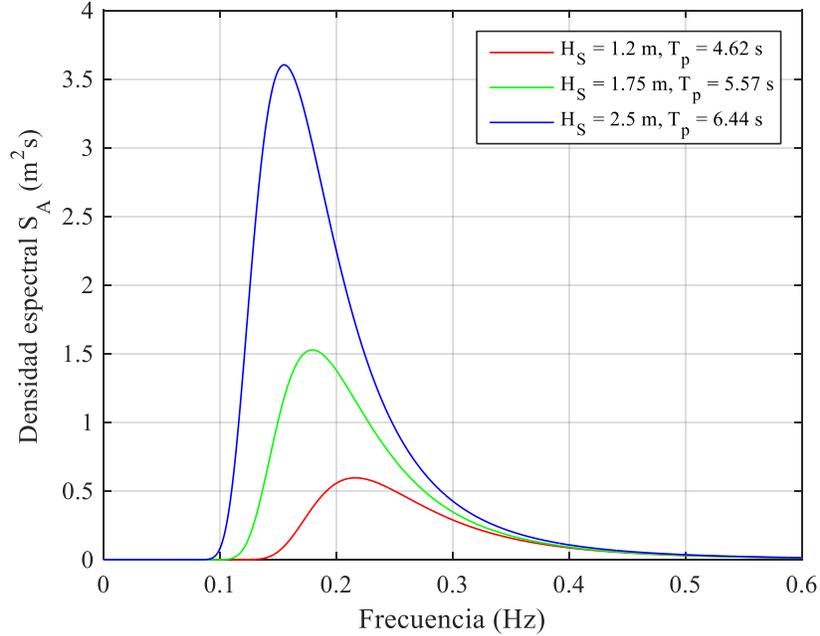


Figura 20. Espectro del oleaje de Pierson- Moskowitz.

- **Espectro JONSWAP**

Propuesto por Goda en 1988. Este espectro se generó a partir de datos tomados a finales de los setenta por un proyecto de medición del oleaje conocido como JONSWAP (por sus siglas en inglés *Joint North Sea Wave Project*) [10]. Este espectro representa estados de mar con un *fetch* limitado en aguas profundas y cuya energía se concentra en la frecuencia pico [5]. La expresión propuesta para generar este espectro es [11],[12]:

$$S_{AJ}(f) = \frac{aH_s^2 f_p^4}{f^5} e^{-1.25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4} \gamma e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{f-f_p}{\sigma f_p}\right)^2\right]} \quad (3.2)$$

Donde

$$a = \frac{0.0624}{0.23+0.0336\gamma-\frac{0.185}{1.9+\gamma}} \quad (3.3)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{para } f \leq f_p \\ 0.09 & \text{para } f > f_p \end{cases} \quad (3.4)$$

Los valores de los parámetros empleados para generar este espectro son: γ factor de forma de pico del espectro el cual normalmente tiene un valor de 3, y σ representa el ancho de la base del espectro antes y después de la frecuencia pico [11]. En la Figura 21 se puede observar el espectro JONSWAP para tres estados de mar diferentes (Igual que en la Figura 20), destacando que debido al poco *fetch* gran parte de la energía se concentra en la frecuencia pico f_p , reduciendo el aporte de otras frecuencias en comparación con el espectro de Pierson-Moskowitz. De igual manera que en el espectro de Pierson- Moskowitz, se nota que a una

mayor altura significativa H_s el aporte energético se hace más significativo en la frecuencia pico de la ola.

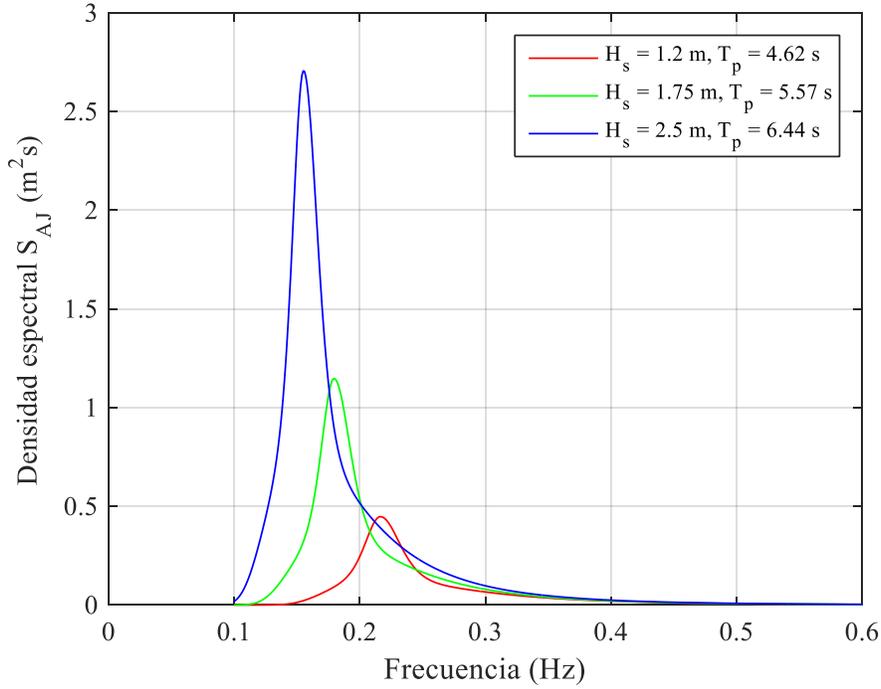


Figura 21. Espectro del oleaje de JONSWAP.

3.2.2 Perfil del oleaje irregular

El espectro del oleaje puede ser empleado para reproducir perfiles irregulares de las olas, donde cada una de las componentes $\eta_i(t)$ que conforman el perfil irregular del oleaje pueden ser obtenidas a partir de [10], [13]:

$$\eta_i(t) = \sqrt{2S_A(f_i)\Delta f} \sin(2\pi f_i t) \quad (3.5)$$

Por otro lado la serie de tiempo del perfil irregular $\eta(t)$ se genera a partir de la suma de cada una de las componentes $n_i(t)$, cuya ecuación queda expresada como [10], [13]:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_A(f_i)\Delta f} \sin(2\pi f_i t + \varphi_{aleatoria,i}) \quad (3.6)$$

Esta última ecuación emula el movimiento de una ola real donde f_i es el valor de cada componente de frecuencia, $S_A(f_i)$ el valor del espectro para cada componente de frecuencia, Δf el ancho de los pasos en Hertz, n el número máximo de componentes calculado de acuerdo a [10] y $\varphi_{aleatoria,i}$ representa la fase aleatoria de cada componente del perfil irregular [13].

$$\Delta f = \frac{f_{max}}{n} \quad (3.7)$$

La Figura 22 muestra el perfil de una ola irregular para un estado de mar con altura significativa H_s de 1.32 m, y un periodo promedio T_z de 8.83 s.

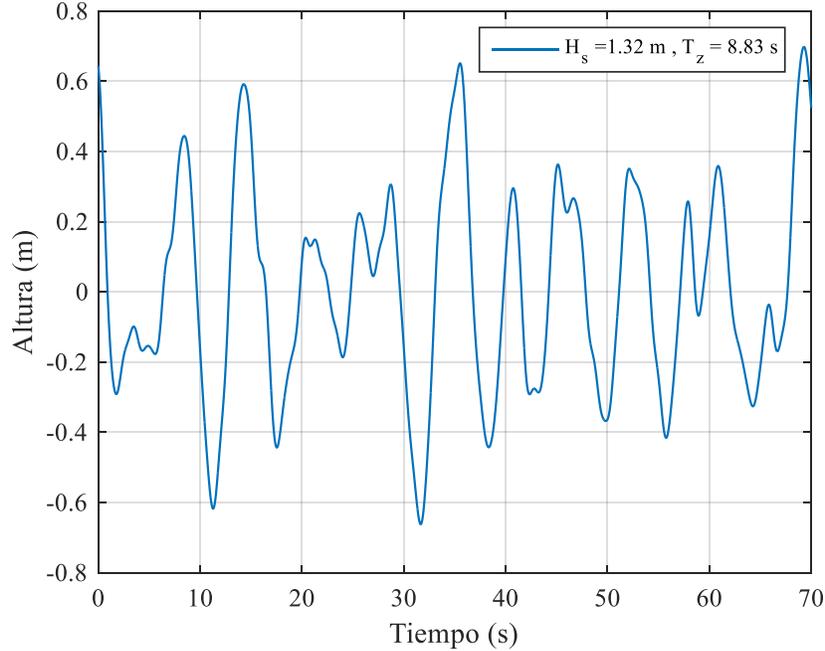


Figura 22. Perfil irregular del oleaje.

3.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA MECÁNICO

En este punto se estudia el sistema mecánico de conversión de energía undimotriz o WEC (por sus siglas en inglés *Wave Energy Conversion*) formado por la boya y el Generador Eléctrico Lineal (GEL) cuando éste interactúa con una ola incidente $\eta(t)$. Así mismo, es posible evaluar la influencia del tamaño de la boya en la estimación del potencial undimotriz. En principio el análisis del sistema se realiza teniendo en cuenta olas regulares, esto con el objetivo de establecer una perspectiva de los valores numéricos de los parámetros que se deben establecer cuando el sistema interactúa con una ola irregular. El sistema considera como elemento captador una boya esférica con un solo grado de libertad y como elemento de conversión o PTO un GEL. La ecuación que gobierna el movimiento del sistema WEC obedeciendo la segunda Ley de Newton está dada por [14]:

$$m\ddot{x} = f_{hyd} + f_{mec} \quad (3.8)$$

Donde m es la masa de la boya, \ddot{x} es la aceleración del sistema, f_{hyd} son las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la boya y f_{mec} es la fuerza mecánica que ejerce el PTO como se puede observar en la Figura 23.

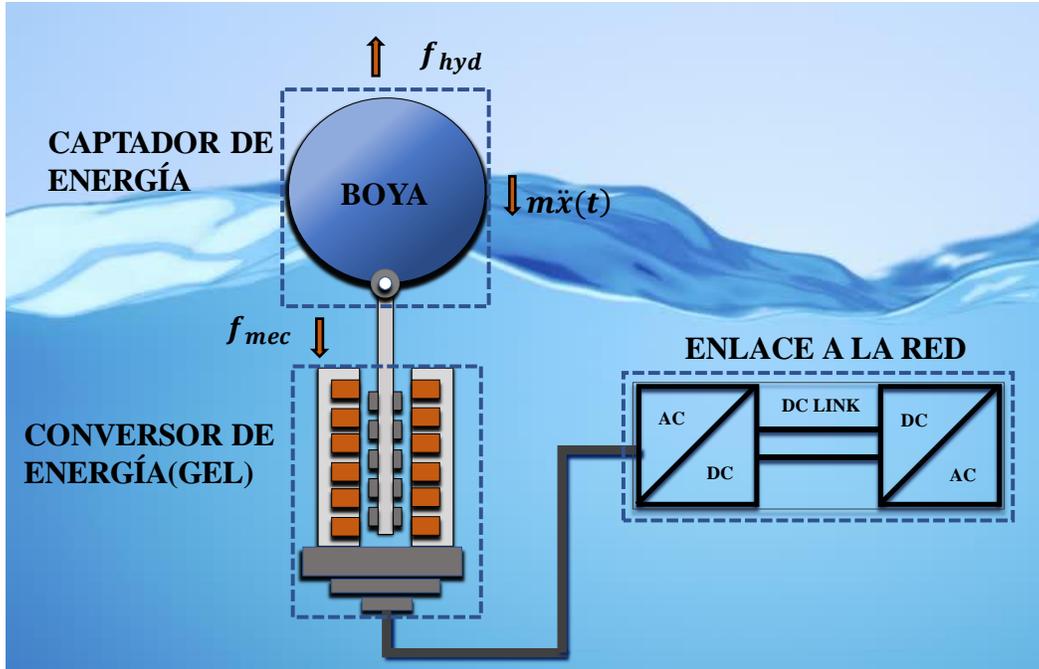


Figura 23. Modelo del sistema de captación y conversión de energía

3.3.1 Fuerzas hidrodinámicas

Las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la boya están definidas de acuerdo a la siguiente expresión [14],[15]:

$$f_{hyd}(t) = f_{hs}(t) + f_r(t) + f_e(t) \quad (3.9)$$

$f_{hs}(t)$ es la fuerza hidrostática, es decir aquella que se ejerce en el fluido, siendo proporcional al desplazamiento del cuerpo desde el equilibrio [14]:

$$f_{hs}(t) = \rho g A_s x(t) \quad (3.10)$$

Siendo ρ (kg/m³) es la densidad del fluido, g (m/s²) es la aceleración de la gravedad, A_s (m²) es el área transversal del cuerpo y $x(t)$ (m) es el desplazamiento vertical del cuerpo. Además, $f_r(t)$ es la fuerza de radiación la cual es producida por un cuerpo oscilante. Este genera olas alrededor del cuerpo y está representada por la siguiente expresión [14],[15]:

$$f_r(t) = A_m(\omega)\ddot{x}(t) + B_c(\omega)\dot{x}(t) \quad (3.11)$$

Donde $A_m = \rho V \mu$ (kg) es la masa añadida y $B_c = \omega \rho V \epsilon$ (N·s/m) el coeficiente de amortiguamiento de la boya [16], ω (rad/s) corresponde a la frecuencia angular, V (m³) corresponde al volumen sumergido o volumen desplazado, ϵ y μ son los *coeficientes adimensionales de Havelock's* para el amortiguamiento y la masa añadida respectivamente, para una esfera semisumergida de radio r en agua profunda (Figura 24) [4]. Los coeficientes A_m y B_c dependen de la geometría del cuerpo y de la frecuencia de la ola incidente.

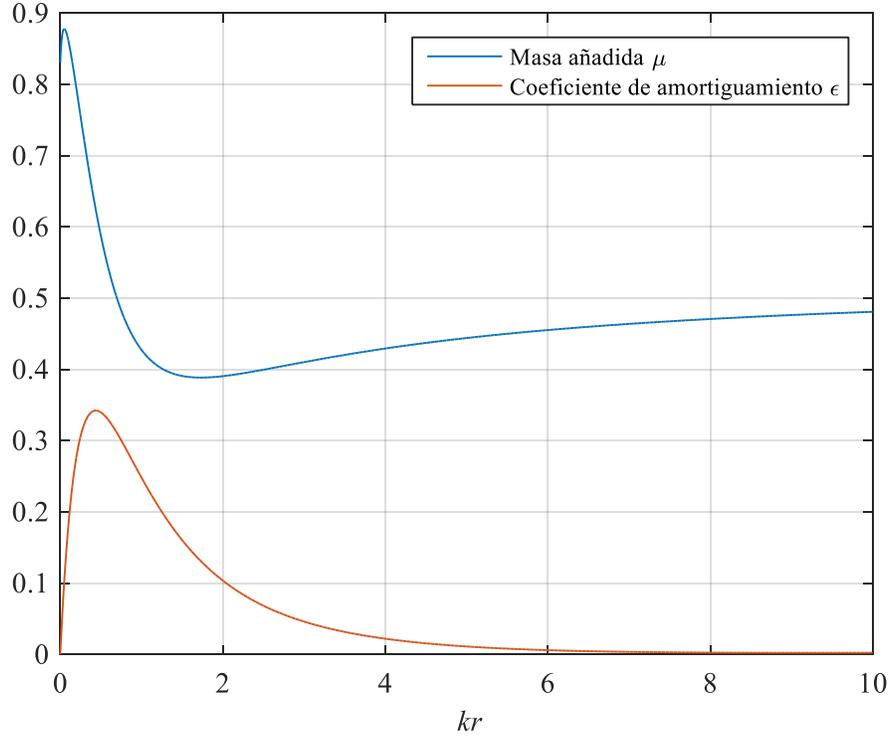


Figura 24. Coeficientes adimensionales de masa añadida y amortiguamiento contra el radio adimensional kr para una esfera semi-sumergida de radio r en agua profunda. Siendo $k = \omega^2 g^{-1}$ [4].

Las ecuaciones (3.12) y (3.13) describen los coeficientes adimensionales de *Havelock* en función de una escala de longitud adimensional kr . Los coeficientes se obtuvieron mediante un ajuste de curvas en MATLAB cuyos valores numéricos para llevar a cabo este ajuste se obtuvieron de [17].

$$\mu = \frac{a_1(kr)^3 + a_2(kr)^2 + a_3(kr) + a_4}{(kr)^3 + b_1(kr)^2 + b_2(kr) + b_3} \quad (3.12)$$

$$\epsilon = \frac{p_1(kr)^3 + p_2(kr)^2 + p_3(kr) + p_4}{(kr)^3 + q_1(kr)^2 + q_2(kr) + q_3} \quad (3.13)$$

Donde r (m) equivale al radio de la boya, y los valores de los coeficientes obtenidos mediante el ajuste de curvas que acompañan estas funciones están dados por:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.5272 & b_1 &= 0.2476 \\ a_2 &= -0.3793 & b_2 &= 0.6909 \\ a_3 &= 0.6672 & b_3 &= 0.03226 \\ a_4 &= 0.0268 & & \\ p_1 &= 0.01972 & q_1 &= 1.442 \\ p_2 &= -0.3208 & q_2 &= 1.723 \\ p_3 &= 0.0063 & q_3 &= 0.61 \\ p_4 &= -0.0003112 & & \end{aligned}$$

$f_e(t)$ es la fuerza de excitación del oleaje que incide sobre la boya flotante. Para una ola regular está definida en la ecuación (3.14), y para una ola irregular en la ecuación (3.15), donde $\Gamma(\omega)$ es la componente de amplitud de la fuerza a una frecuencia dada y $\varphi_{rand,i}$ representa la fase aleatoria de cada componente de la ola irregular.

$$f_e(t) = \Gamma(\omega) \frac{H_s}{2} \sin \omega t \quad (3.14)$$

$$f_e(t) = \sum_{i=1}^n \Gamma(\omega_i) \sqrt{2S_A(\omega_i) \Delta f} \sin(\omega_i t + \varphi_{rand,i}) \quad (3.15)$$

$$\Gamma(\omega) = \left(\frac{2g^3 \rho B(\omega)}{\omega^3} \right)^{0.5} \quad (3.16)$$

Es de notar que las ecuaciones (3.14) y (3.15) proveen realizaciones de la fuerza de excitación que pueden ser usadas en simulaciones. Tales realizaciones no suponen reproducir una situación real. Eligiendo diferentes conjuntos de la fase aleatoria $\varphi_{rand,i}$, o eligiendo un intervalo de frecuencia Δf , se obtienen diferentes realizaciones [17].

3.3.2 Fuerzas mecánicas

La fuerza mecánica $f_{mec}(t)$ del sistema se refiere aquella fuerza aplicada en la boya por el PTO de acuerdo con la ecuación 3.17, siendo C (N·s/m) equivalente al coeficiente de amortiguamiento del PTO y $\dot{x}(t)$ la velocidad del sistema [10]. En la realidad el tamaño de C depende de la cantidad de energía que el generador puede entregar a la red [15].

$$f_{mec}(t) = f_{PTO}(t) = C \dot{x}(t) \quad (3.17)$$

Al sustituir de la ecuación (3.9) a la (3.17) en la ecuación (3.8), es posible obtener una ecuación general del sistema como se muestra a continuación, cuya solución permite obtener el movimiento, velocidad y aceleración del sistema:

$$(m + A_m) \ddot{x}(t) + (B_c + C) \dot{x}(t) + \rho g A_s x(t) = f_e(t) \quad (3.18)$$

Al realizar la transformada de Laplace del sistema descrito en la ecuación (3.18) es posible obtener la ecuación del movimiento del sistema en este dominio descrito como:

$$X(s) = \frac{F_e(s)}{(m + A_m) s^2 + (B_c + C) s + \rho g A_s} \quad (3.19)$$

Transformando al dominio de la frecuencia:

$$X(j\omega) = \frac{F_e(j\omega)}{-(m + A_m) \omega^2 + (B_c + C) j\omega + \rho g A_s} \quad (3.20)$$

La velocidad del sistema en el dominio de la frecuencia viene descrita por:

$$U(j\omega) = \frac{j\omega F_e(j\omega)}{-(m + A_m) \omega^2 + (B_c + C) j\omega + \rho g A_s} \quad (3.21)$$

La potencia mecánica instantánea capturada por la boya en *Watts* viene dada por:

$$P_{cap}(t) = f_{PTO}(t)\dot{x}(t) = C\dot{x}(t)^2 \quad (3.22)$$

Así mismo la potencia media capturada PTO ($\overline{P_{cap}}$) está dada por:

$$\overline{P_{cap}} = \frac{1}{2} C |U(j\omega)|^2 \quad (3.23)$$

Substituyendo la magnitud de (3.21) en (3.23) se tiene que:

$$\overline{P_{cap}} = \frac{1}{2} C \frac{|F_e(j\omega)|^2}{(B_c + C)^2 + \left(\omega(m + A_m) - \frac{\rho g A_s}{\omega}\right)^2} \quad (3.24)$$

3.4 ANÁLISIS DEL GENERADOR ELÉCTRICO LINEAL

Eléctricamente un GEL puede ser modelado por un diagrama circuital como el que se muestra en la Figura 25. Una fase del generador es modelada por una fuerza electromotriz fem o también llamado *voltaje de no carga*, una impedancia interna Z_g compuesta por una resistencia interna R_g y una reactancia inductiva X_g , debidas a los devanados del GEL, además de una carga Z_L que puede ser puramente resistiva o tener alguna componente reactiva [18].

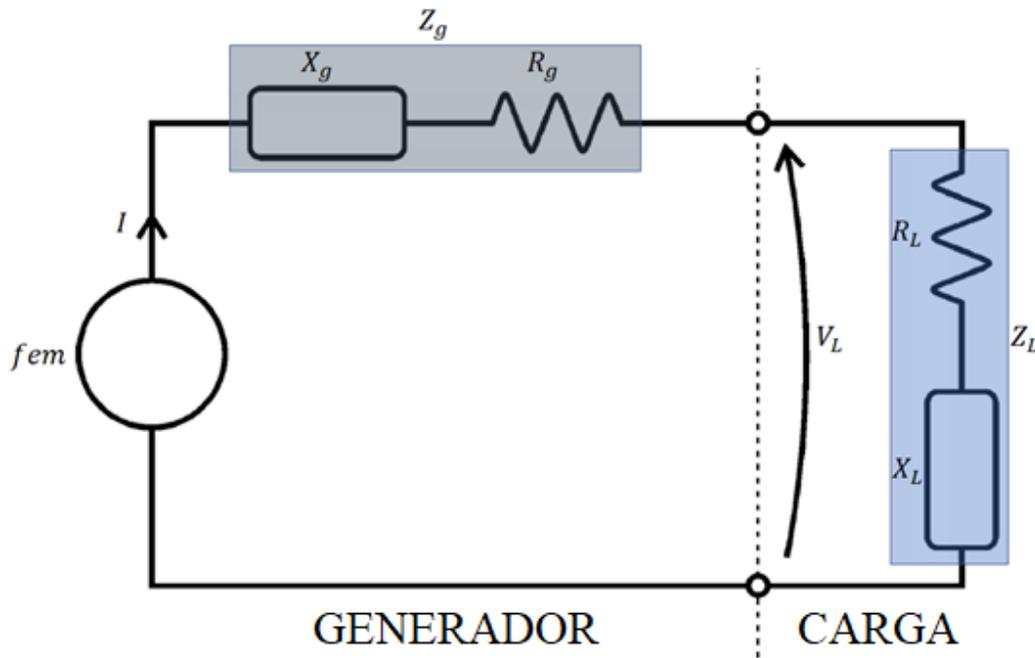


Figura 25. Diagrama Circuital del Generador Eléctrico Lineal con una carga de acople [18]

3.4.1 Parámetros eléctricos del GEL

- **Fuerza electromotriz fem**

Los imanes permanentes montados en el traslador crean un flujo magnético con dirección alternante. Cuando el traslador se mueve, la onda de flujo magnético lo sigue en su trayectoria

lineal. Por ley de Faraday se induce un voltaje en las terminales del generador descrita por la siguiente ecuación [18]:

$$e(t) = fem = -N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3.25)$$

Donde N es el número de vueltas del devanado y ϕ es el flujo magnético presente en los devanados. El flujo magnético debido a los imanes puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$\phi(t) = \phi \text{sen} \left(\frac{\pi x(t)}{w_p} \right) \quad (3.26)$$

Siendo $\phi = B_g A_g$ (Wb) el flujo magnético máximo, B_g (T) es la densidad de flujo magnético a través del estator y A_g (m²) el área superficial del estator. El movimiento del trasladador representado por $x(t)$ es equivalente al de la boya y $w_p = l_s/2p$ (m) es la distancia que hay entre polos, siendo $l_s = H_s$ (m) la longitud del estator y trasladador, y p el número de pares de polos [19]. De las ecuaciones (3.25) y (3.26) se obtiene que el voltaje inducido en las terminales de los devanados es:

$$e(t) = - \frac{N\pi\phi\dot{x}(t)}{w_p} \cos \left(\frac{\pi x(t)}{w_p} \right) \quad (3.27)$$

La frecuencia f_e (Hz) de la fem inducida puede representarse en función de la velocidad lineal del trasladador mediante la siguiente ecuación:

$$f_e(t) = \frac{\dot{x}(t)}{w_p} \quad (3.28)$$

Entonces, la fuerza electromotriz puede escribirse de la siguiente manera:

$$e(t) = -N\pi\phi f_e(t) \cos \left(\frac{\pi x(t)}{w_p} \right) \quad (3.29)$$

3.4.2 Parámetros físicos del GEL

Para determinar los parámetros eléctricos del GEL es pertinente conocer las dimensiones físicas de este mismo. Considerando un generador eléctrico lineal en forma tubular (cilíndrico) de una sola fase formado por una serie de conductores enrollados helicoidalmente, sus dimensiones físicas se pueden obtener como se describe a continuación [20].

1. Establecer las *variables de entrada*: Potencia deseada, voltaje de salida, longitud del generador, velocidad y aceleración promedio del trasladador.
2. Establecer las *dimensiones de la parte estática*, que se pueden obtener de acuerdo a [20]:

$$A_g = \frac{\sqrt{2} w_p P_{in}}{\pi l_s B_g H_g v_m} \quad (3.30)$$

Siendo $A_g = \pi d_g l_s$ (m²) el área longitudinal del estator, P_{in} (W) la potencia deseada del generador, parámetro de entrada equivalente a la cantidad de potencia mecánica eficaz captada por el sistema descrito en el apartado 3.3., v_m (m/s) es la velocidad media del sistema y $H_g = \frac{NP_{in}}{l_s e_{rms}}$ (A/m) es la intensidad de campo magnético, siendo e_{rms} (V) el voltaje eficaz deseado del generador.

3. Dimensionar el *embobinado del estator*, el número de vueltas requeridas para obtener el voltaje eficaz e_{rms} está determinado por:

$$N = \frac{\sqrt{2} w_p e_{rms}}{\pi B_g A_g v_m} \quad (3.31)$$

3.4.3 Impedancia Interna Z_g

La impedancia interna Z_g es posible obtenerla a partir de las dimensiones físicas del GEL. Estos parámetros se modelan como una resistencia y una inductancia que se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$R_g = \rho_g \frac{N\pi d_g}{A_c} \quad (3.32)$$

$$L_g = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 \pi r_g^2}{l_s} \quad (3.33)$$

Donde, ρ_g (Ω m) es la resistividad del material conductor, d_g (m) el diámetro medio del generador, A_c (m²) el área de la sección transversal del conductor, μ_0 (Wb/Am) la permeabilidad en el vacío, μ_r permeabilidad en el medio y $r_g = \frac{d_g}{2}$ (m) el radio medio del GEL.

3.5 ACOUPLE DEL SISTEMA A LA RED

Dada la naturaleza del oleaje, el elemento conversor de energía (GEL) generará una señal de voltaje de baja frecuencia y con amplitud variable como será visto más adelante, esto implica el uso de convertidores de potencia para regularizar la frecuencia y el voltaje que se entregará a la red. Por lo general un conversor de alterna (AC) a continua (DC) y nuevamente alterna (AC) o AC-DC-AC (por sus siglas en inglés *alternating current* y *direct current*) como el que se observa en la Figura 26 es el empleado para suplir este requerimiento. Este convertidor cuenta con dos etapas: La primera de *rectificación* donde se convierte la señal de AC a DC empleando un puente rectificador y capacitor como filtro y la segunda de *inversión*,

convirtiendo la señal de DC AC, en este trabajo solamente se considera la primera etapa buscando estabilizar la señal de voltaje del generador de AC a DC.

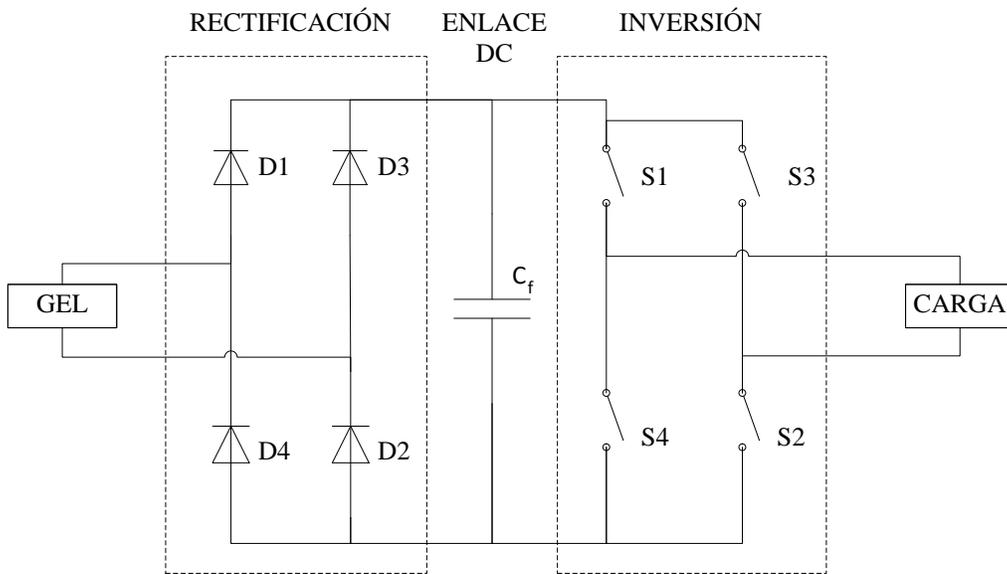


Figura 26. Etapa de acople a la red.

3.5.1 Rectificación con capacitor como filtro

El esquema de la Figura 27 muestra el diagrama circuital del GEL conectado a un puente rectificador y a un capacitor como filtro. En esta etapa la señal proveniente del GEL será rectificada por medio de un puente de diodos, para posteriormente ser filtrada y así obtener un voltaje de continua (cc).

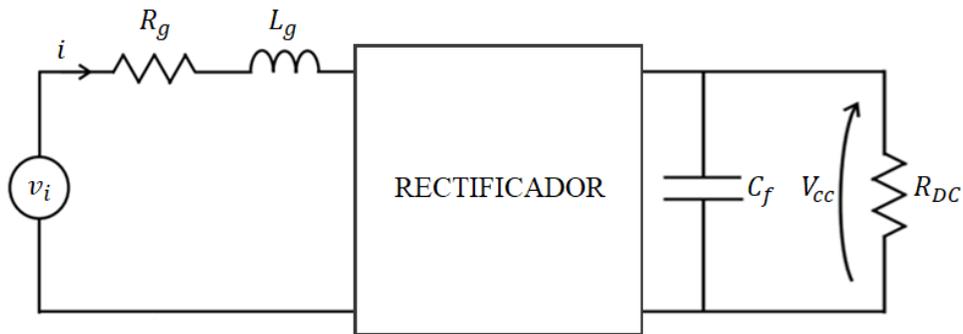


Figura 27. Generador conectado a un puente rectificador y a un filtro.

Cuando en un semi-ciclo los diodos están conduciendo y aplicando leyes de *Kirchhoff* al circuito rectificador se tienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{cc}(t) = v_i(t) - i(t)R_g - L_g \frac{di(t)}{dt} - 2v_D \quad (3.34)$$

$$i(t) = C_f \frac{dV_{cc}(t)}{dt} + \frac{V_{cc}(t)}{R_{DC}} \quad (3.35)$$

Donde v_D es la caída de voltaje en los diodos. Si ahora se considera que los diodos están en estado de corte, la corriente $i(t) = 0$ y el voltaje $V_{cc}(t)$ viene dado por:

$$\frac{dV_{cc}(t)}{dt} = -\frac{1}{C_f R_{DC}} V_{cc}(t) \quad (3.36)$$

Dando solución a la ecuación 3.33 se tiene:

$$V_{cc}(t_1) = V_{cc}(t_0) e^{-\frac{t_1 - t_0}{C_f R_{DC}}} \quad (3.37)$$

Siendo t_0 el tiempo en que los diodos dejan de conducir, t_1 el tiempo en que estos vuelven a conducir y la diferencia $t_1 - t_0$ es el tiempo que el capacitor se encuentra en descarga. En la Figura 28 se puede observar como sucede la rectificación (línea punteada) y filtrado (línea roja) de una señal senoidal, donde de un tiempo $t = 0$ a $T/2$ los diodos entran en estado de conducción y el condensador comienza a cargarse coincidiendo su tensión con la tensión rectificadora. A partir de $T/2$ los diodos continúan en estado de conducción y entrarán en corte cuando el voltaje de la señal rectificadora sea menor al voltaje del condensador; en este instante de tiempo el condensador comienza a descargarse. A partir de T , la señal rectificadora aumenta hasta coincidir con la del condensador, repitiéndose el proceso de carga y descarga del condensador, teniendo en cuenta que esta última forma de onda es en esencia un voltaje de *continua* con algo de rizado. De acuerdo con lo anterior entre mayor sea $C_f R_{DC}$ con respecto a $t_1 - t_0$ el voltaje de rizado V_r será menor y por lo tanto la señal será más continua.

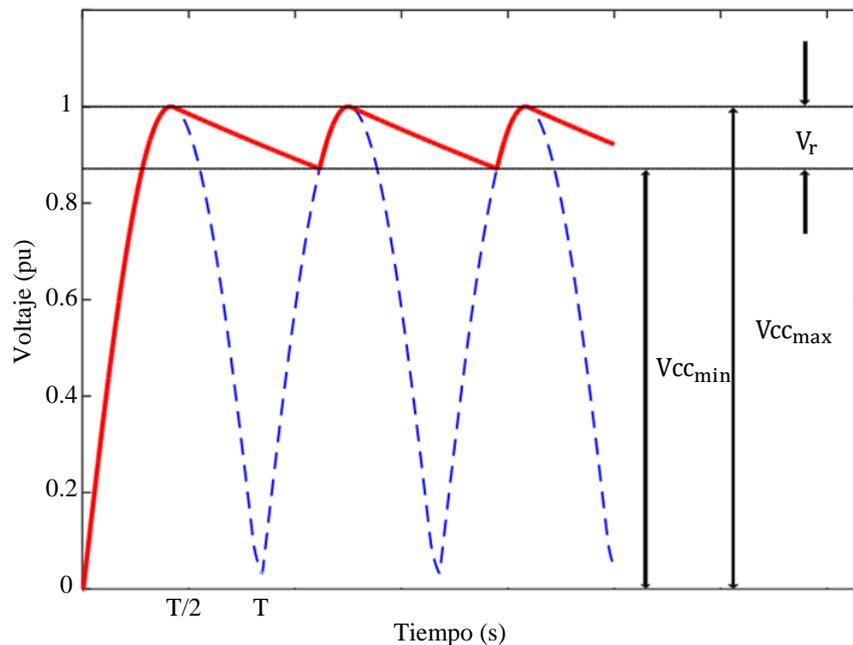


Figura 28. Rectificación y filtrado.

Para obtener el valor del capacitor que mantendrá un voltaje DC estable puede ser calculado despejando la ecuación 3.37

$$C_f = -\frac{t_1 - t_0}{\ln \frac{V_{ccmin}}{V_{ccmax}} R_{DC}} \quad (3.38)$$

En este caso $t_1 - t_0$ será elegido el tiempo en que el capacitor se estará descargando y que sea lo suficiente para que el voltaje no disminuya demasiado, así mismo la relación V_{ccmin}/V_{ccmax} determinará el porcentaje de rizado, por ejemplo, si se deseara un porcentaje de rizado del 10% la relación $V_{ccmin}/V_{ccmax} = 0.9$.

De otra manera se podría escribir la ecuación 3.38 en función del porcentaje de rizado $P_r(\%)$ deseado quedando de la siguiente manera.

$$C_f = \frac{100\Delta t}{P_r(\%)R_{DC}} \quad (3.39)$$

Donde, $\Delta t = (t_1 - t_0)$.

3.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Descritos los modelos matemáticos de los componentes que conforman la planta de generación por undimotriz, se realizó la simulación de la parte mecánica y eléctrica en simulink de acuerdo con el diagrama de bloques de la Figura 29.

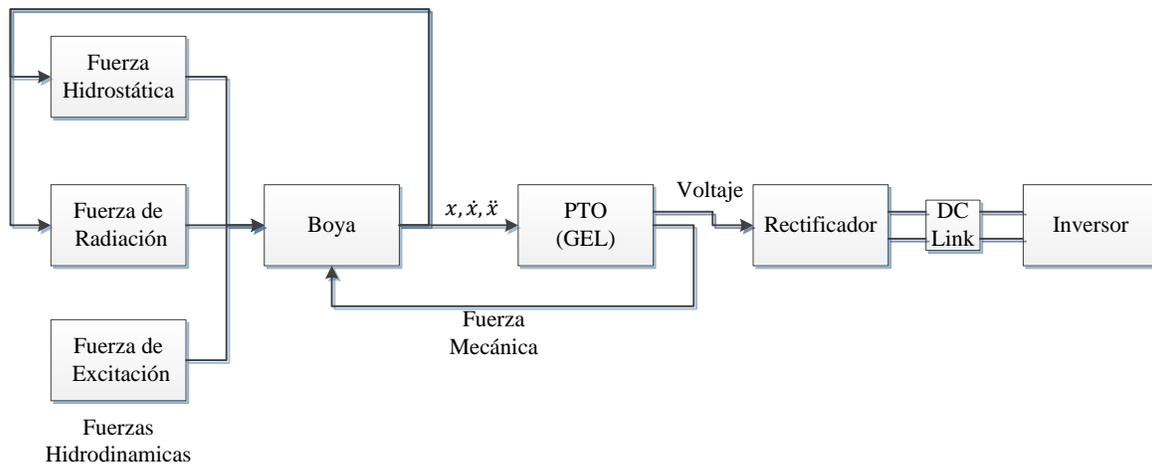


Figura 29. Diagrama de Bloques del modelo en simulink.

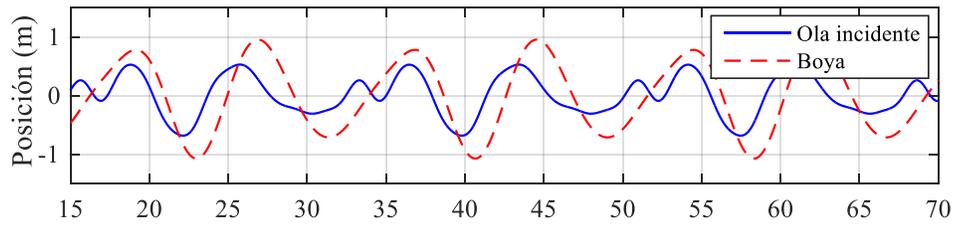
3.6.1 Sistema Mecánico

Para evaluar el comportamiento del sistema este fue evaluado para una ola irregular con altura significativa $H_s = 1.3215$ m, periodo promedio $T_z = 8.83$ s y periodo pico $T_p = 12.36$ s. En la Tabla 1 se puede observar una comparación de los valores de potencia media captada $P_{prom}(kW)$ por el sistema y velocidad lineal media del sistema $V_{prom}(m/s)$, cuando el periodo promedio T_z del oleaje varía, y parámetros como H_s , C y la fuerza de excitación del sistema f_e dada en su valor eficaz se mantienen. Es posible observar que en la medida

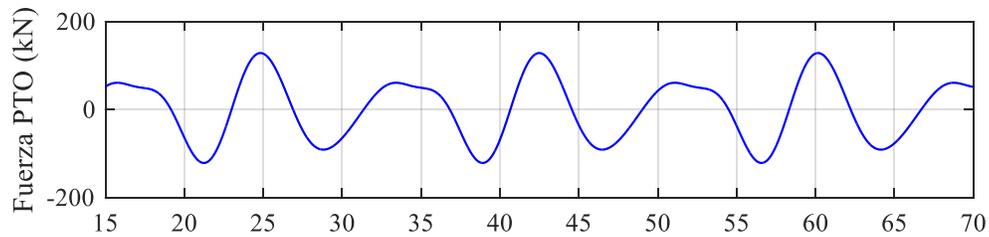
que el periodo T_z de la ola incidente es menor la velocidad del sistema aumenta y por lo tanto la potencia captada por el sistema también. La Figura 30 muestra el comportamiento del sistema para una ola irregular incidente, observando que el movimiento de la boya está retrasado con respecto al de la ola, debido a la resistencia que el PTO impone sobre el sistema. La fuerza del PTO y potencia captada por el sistema, muestran una naturaleza irregular dada las características de la ola incidente.

Tabla 1. Comparación del sistema cuando el periodo promedio de este varía.

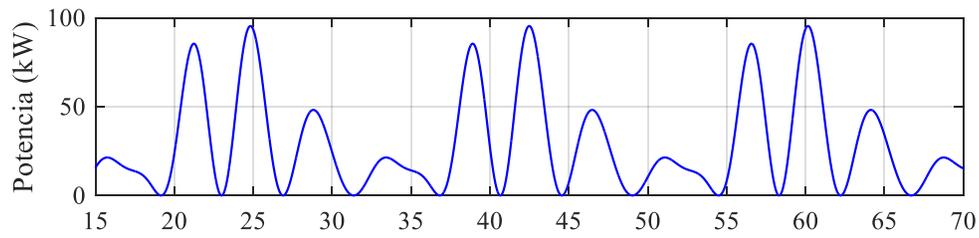
$H_s(m)$	$C(kNs/m)$	$f_e(kN)$	$T_z(s)$	$P_{prom}(kW)$	$V_{prom}(m/s)$
1.32215	155	113.5	8.83	58.15	0.5244
			6.18	77.75	0.6166



(a)



(b)



(c)

Tiempo(s)

Figura 30. (a) Desplazamiento de la ola irregular y la Boya, (b) Fuerza del PTO, (c) Potencia instantánea captada por el sistema con $C = 155$ kNs/m.

3.6.2 Generador Eléctrico Lineal

El GEL se diseña de acuerdo a la potencia captada mecánicamente por el sistema y a un voltaje eficaz dado. De acuerdo con lo anterior, el GEL puede ser diseñado para operar a diferentes frecuencias ya sea variando la cantidad de pares de polos que contenga el traslador o por la velocidad con la que este se mueva, esta última dependerá de las características de la ola. En la Tabla 2 se puede observar las características eléctricas del GEL para una velocidad media v_m de 0.48 m/s. En la Figura 31 se observa la señal de voltaje del GEL sin carga para las frecuencias descritas en la Tabla 2; notando que al incrementar la cantidad de pares de polos p manteniendo una velocidad media constante la frecuencia de operación del generador del generador aumenta.

Tabla 2. Características eléctricas del Generador eléctrico lineal de acuerdo con el número de pares de polos p .

Potencia (kW)	Voltaje (Vrms)	Pares de polos	Frecuencia (Hz)	Rg (Ω)	Lg (mH)
58	480	3	2.2	0.054	1.67
		6	4.4	0.027	0.425
		9	6.6	0.018	0.18

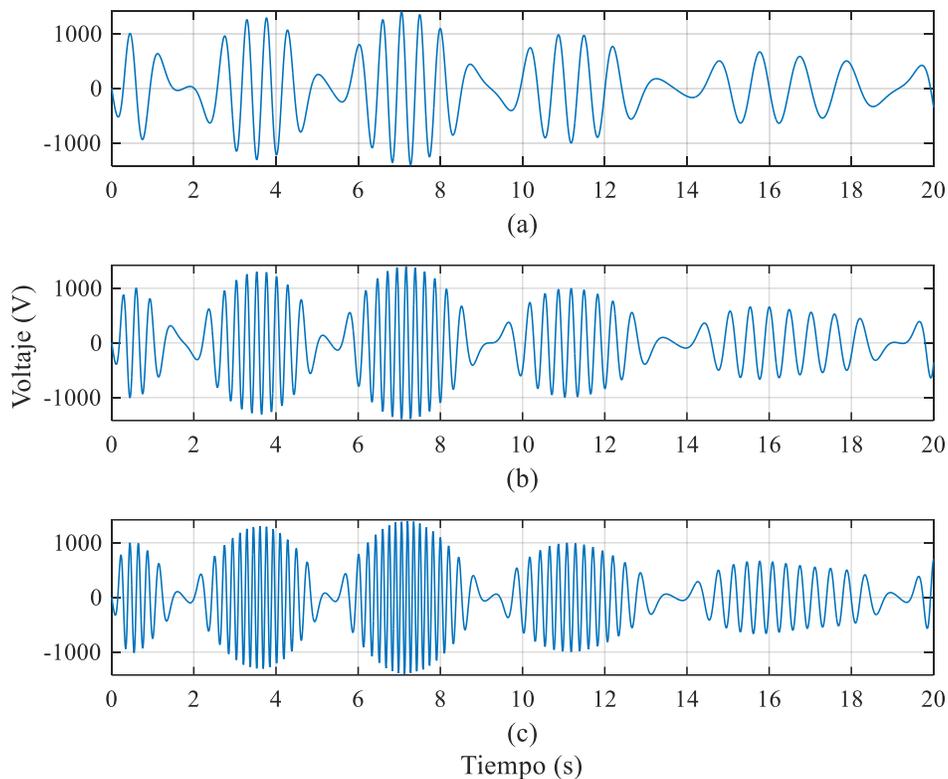


Figura 31. Voltaje sin carga del GEL a diferentes frecuencias. (a): 2.2 Hz, (b): 4.4 Hz, (c): 6.6 Hz.

- **Filtrado de la señal de voltaje**

En la Figura 32 se puede observar el voltaje de una carga resistiva conectada al GEL, se puede notar que hay fluctuaciones en la señal de voltaje tanto en amplitud como frecuencia, esto debido a la naturaleza de la ola incidente, a la configuración de los imanes montados sobre el trasladador y la velocidad de ese mismo. En los intervalos de tiempo **A**, **B** y **C** prácticamente no hay voltaje inducido por el generador debido a que la velocidad del trasladador en estos puntos es cero o cercana a cero. Por otro lado, en el intervalo de tiempo **TD** se observa una variación más larga en amplitud debido a las características de la ola incidente. Las fluctuaciones mencionadas anteriormente implican el uso de un capacitor con *alta capacitancia* para poder realizar el filtrado y estabilización de esta. De acuerdo con lo anterior se puede hacer uso de *ultracapacitores*, elementos que son usados en vehículos eléctricos, híbridos y de celda de combustible [21] y que igualmente son usados para filtrado en la conversión de energía undimotriz [22],[23].

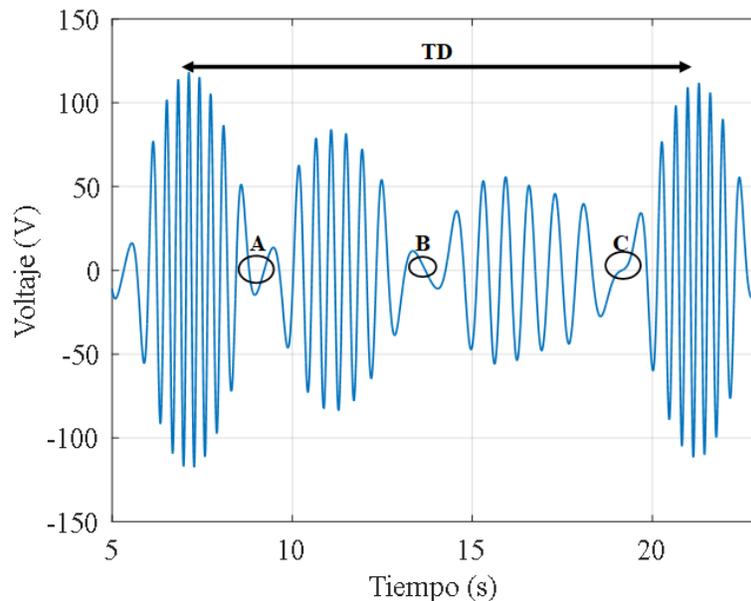


Figura 32. Generador Eléctrico Lineal conectado a una carga resistiva.

De la ecuación (3.39) para obtener el valor del capacitor que permita filtrar y estabilizar la señal de voltaje del GEL se tomó un valor para Δt de 9 s equivalente al periodo promedio de la ola incidente, como porcentaje de rizado $P_r(\%)$ se establece a un 10%, esto quiere decir que $V_{ccmin}/V_{ccmax} = 0.9$, y como resistencia R_{DC} de carga se estableció a un valor 10Ω . A partir de lo anterior se obtuvo un valor de capacitancia de 9 F. En la Figura 33 se puede observar la curva de descarga del capacitor para distintos valores de resistencia de carga partiendo del voltaje máximo del generador como condición inicial. De lo anterior se puede observar que naturalmente en la medida que la resistencia de carga aumenta el tiempo de descarga disminuye; un tiempo de descarga lento ayudaría a mantener el voltaje constante dada las variaciones de voltaje en el generador.

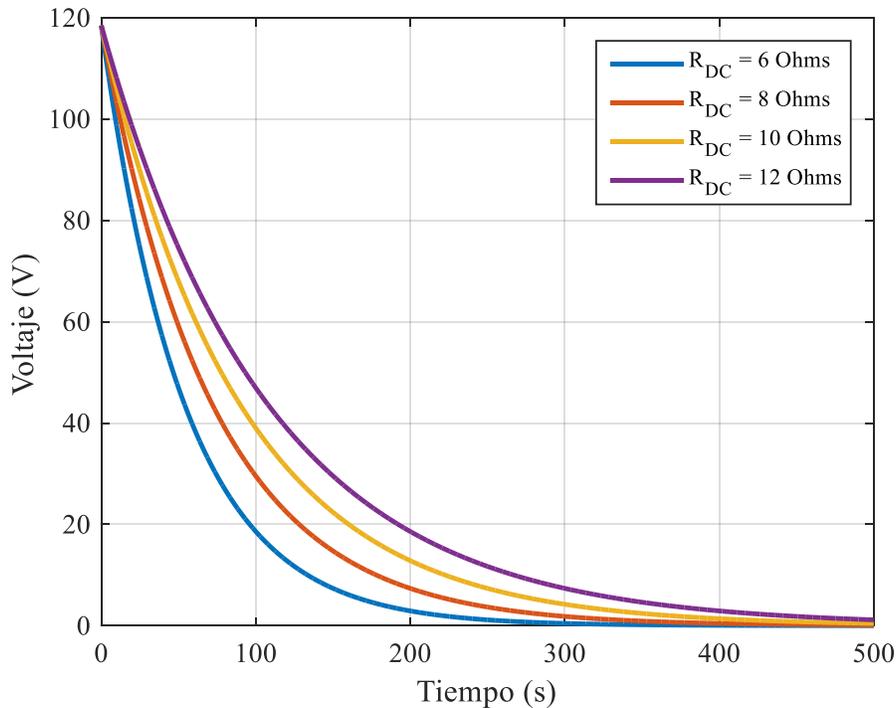


Figura 33. Curva de descarga de un capacitor de 9 F para diferentes resistencias de carga.

3.7 CONCLUSIONES

En este capítulo se planteó una metodología para el proceso de captación y conversión de energía undimotriz, desarrollando los modelos que componen una planta de generación undimotriz. En una primera etapa se modelaron las dinámicas del elemento captador de energía, determinando las fuerzas hidrodinámicas y mecánicas que actúan sobre él, evaluando el movimiento, velocidad, la potencia media e instantánea captada por el sistema cuando interactúa con olas incidentes cuyos periodos promedios son diferentes. Posteriormente se plantea el principio de funcionamiento de un generador eléctrico lineal, determinando sus dimensiones físicas y las características eléctricas internas, de aquí se determinó el comportamiento del voltaje sin carga a diferentes frecuencias de un GEL determinando la influencia que tiene los imanes acoplados y la velocidad del trasladador en la frecuencia, además de las características de la ola incidente en la forma de onda del voltaje. Como método de estabilización de la señal de voltaje del GEL para acoplarla a la red se emplean *ultracapacitores* como elementos de filtrado que permiten una conversión de alterna a continua y posteriormente realizar la inversión a alterna a una frecuencia de 60 Hz. Finalmente queda por evaluar que parámetros se pueden manipular de tal manera que sea posible una maximización de la potencia captada por la boya y la potencia generada por el Generador Eléctrico Lineal.

3.8 REFERENCIAS

- [1] X. González-Ramírez, I. A. Hernández-Robles, and H. Barrios-Piña, “Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México Parte 1: estimación energética,” *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. VIII, no. 6, pp. 05–22, 2017.
- [2] NOAA, “Bathymetry and Global Relief.” [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/relief.html>.
- [3] ERDDAP, “Easier access to scientific data.” [Online]. Available: <http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/index.html>. [Accessed: 24-Oct-2017].
- [4] J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems: linear interactions including wave-energy extraction*. Cambridge University Press, 2002.
- [5] J. Falnes, “A review of wave-energy extraction,” *Mar. Struct.*, vol. 20, no. 4, pp. 185–201, 2007.
- [6] R. Castillo Palazón, “Evaluación de recursos energéticos renovables en el Mar Catalán : vientos , olas y corrientes .,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [7] B. Cavia del Olmo, “Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
- [8] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, First. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [9] A. Espejo Hermosa, “Variabilidad espacial y temporal del recurso surf: metodología y resultados,” Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, 2011.
- [10] C. Cargo, “Design and Control of Hydraulic Power Take-Offs for Wave Energy Converters,” Ph.D. dissertation, University of Bath, UK, 2012.
- [11] A. I. Pérez Peña, “Estimación del clima marítimo y la energía de oleaje disponible en las costas mexicanas,” Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [12] R. Alonso Hauser, “Evaluación del potencial undimotriz de Uruguay,” Tesis de Maestría, Universidad de la República, 2012.
- [13] R. H. Hansen, T. O. Andersen, and H. C. Pedersen, “Model Based Design of Efficient Power Take-Off Systems for Wave Energy Converters,” *Proc. 12th Scand. Int. Conf. Fluis Power*, pp. 1–15, 2011.
- [14] A. M. Esedig, “Modelling of Buoyancy and Motion of a Submerged Body,” Blekinge Institute of Technology, 2009.
- [15] M. Eriksson, J. Isberg, and M. Leijon, “Hydrodynamic modelling of a direct drive wave energy converter,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 43, no. 17–18, pp. 1377–1387, 2005.
- [16] A. Kurniawan, “Computations of heave added mass and damping coefficients of some rigid bodies using WAMIT,” *Figshare*, pp. 1–12, 2014.
- [17] A. Falcao, “Modelling of Wave Energy Conversion,” *Inst. Super. Técnico, Univ. Técnica Lisboa*, p. 130, 2014.
- [18] J. Cruz, *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*. United Kingdom: Springer, 2008.
- [19] D. E. A. Montoya Andrade and A. de la Villa Jaén, “Modelado Y Control de Centrales Undimotrices con Accionamiento Directo Mediante Generador Lineal Ante Oleaje Irregular,” Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2014.
- [20] I. Hernandez, J. Segundo, X. Gonzalez, D. Luna, and Z. Juarez, “Performance and

- power quality assessment of a linear electric generator focused on microgeneration applications,” no. May 2016, pp. 1–12, 2017.
- [21] A. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles,” *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 806–820, 2007.
- [22] C. Boström, E. Lejerskog, M. Stålberg, K. Thorburn, and M. Leijon, “Experimental results of rectification and filtration from an offshore wave energy system,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 1381–1387, 2009.
- [23] C. Bostrom, “Electrical Systems for Wave Energy Conversion,” Ph.D. dissertation, Uppsala University, 2011.

CAPITULO 4

CÁLCULO DE EFICIENCIAS Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se identifican los parámetros necesarios para calcular la eficiencia de la parte mecánica y eléctrica del sistema planteados en el capítulo anterior. Así mismo para mejorar la conversión de energía se determinarán aquellos parámetros que permitan un incremento en la eficiencia energética del sistema.

4.1 EFICIENCIA DEL SISTEMA MECÁNICO

Para evaluar el porcentaje de potencia de la ola incidente que es capturada por la boya o también llamada relación de ancho de captura (CWR por sus siglas en inglés *Capture Width Ratio*) está dada por la siguiente expresión [1],[2]:

$$CWR = \frac{\overline{P_{cap}}}{DJ} \quad (4.1)$$

Donde J (Watt/m) es el nivel de potencia por frente de ola que se puede calcular a partir de los datos oceanográficos, $\overline{P_{cap}}$ es la potencia capturada por el sistema, y D (m) es la dimensión característica de la boya dada por:

$$D = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \quad (4.2)$$

Siendo, A_s el área de la sección transversal del elemento captador. En este caso se empleó una boya esférica, donde $A_s = \pi r^2$ (m²) y $D = 2r$ (m) equivale al diámetro de esta misma.

4.2 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

Para maximizar la captación de potencia del subsistema mecánico, a partir de la ecuación (3.24) hay una condición de maximización de la potencia media capturada $\overline{P_{cap}}$ como se plantea en la ecuación (4.3), a partir de aquí es posible obtener el coeficiente de amortiguamiento óptimo del generador (C_{opt}) que maximiza la potencia capturada por la boya de acuerdo a la ecuación (4.4) [3]:

$$\frac{\partial \overline{P_{cap}}}{\partial C} = 0 \quad (4.3)$$

$$C_{opt} = \sqrt{(B_c)^2 + \left(\omega(m + A_m) - \frac{\rho g A_s}{\omega} \right)^2} \quad (4.4)$$

De la ecuación anterior se puede observar que C_{opt} no depende de la altura significativa H_s , sin embargo, si depende de la frecuencia de la ola incidente ω , esto significa que el coeficiente de amortiguamiento C_{opt} del PTO puede ser obtenido conociendo la frecuencia ω de la ola incidente. También, es posible reescribir (3.21) y(3.24), para obtener velocidad óptima, la fuerza del PTO óptima y la máxima potencia capturada P_{max} , donde $\Gamma(\omega)$ es la componente de amplitud de la fuerza a una frecuencia dada descrita en la ecuación (316):

$$U_{opt} = \frac{\Gamma(\omega) \frac{H_s}{2}}{(B_c + C_{opt})^2 + \left(\omega(m + A_m) - \frac{\rho g A_s}{\omega}\right)^2} \quad (4.5)$$

$$F_{opt} = C_{opt} U_{opt} \quad (4.6)$$

$$P_{max} = \frac{(\Gamma(\omega) \frac{H_s}{2})^2}{4(B_c + C_{opt})} \quad (4.7)$$

La Figura 34 muestra como el aumento en las dimensiones del elemento captador disminuye la velocidad del sistema U_{opt} y aumenta la potencia capturada P_{max} . El coeficiente de amortiguamiento C_{opt} se incrementa en la medida que el radio del sistema también lo hace. Por el contrario, la velocidad del sistema disminuye en la medida que las dimensiones del sistema aumentan, esto debido a que un aumento en las dimensiones del sistema supone un incremento en su masa, consecuente a esto su movimiento se ve limitado y por ende su velocidad. La fuerza del PTO F_{opt} y la máxima potencia capturada P_{max} se incrementan de manera no lineal en la medida que las dimensiones de la boya aumentan.

En la Figura 35 se puede observar la relación entre la potencia capturada y el coeficiente de amortiguamiento C para boyas con diferentes radios. En este ejemplo se calculó la potencia capturada por una boya para una ola incidente con una altura significativa $H_s = 0.72$ m, periodo promedio $T_z = 10.28$ s, periodo pico $T_p = 14.39$ s y una fuerza de excitación $f_{rms} = 133$ kN. El valor de referencia P_{ref} se tomó de acuerdo al valor máximo de potencia que puede capturar una boya de radio de 1.5 m cuyo coeficiente de amortiguamiento óptimo es $C_{opt} = 108$ kNs/m. De lo anterior es posible observar que en la medida que aumenta el radio de la boya aumenta también el valor de C_{opt} y por ende la potencia capturada. Independiente del radio de la boya hay una tendencia en la potencia capturada por la boya; cuando el valor del coeficiente de amortiguamiento se incrementa hasta alcanzar su valor óptimo, es decir cuando $C/C_{opt} < 1$, la potencia capturada se incrementa rápidamente hasta alcanzar su valor maximo, cuando $C = C_{opt}$. Por otro lado cuando el coeficiente de amortiguamiento se incrementa y es mayor que el de su valor óptimo, es decir cuando $C/C_{opt} > 1$, la potencia captada por el sistema tiende a disminuir debido a que la velocidad del sistema tiende a cero en la medida que C incrementa su valor.

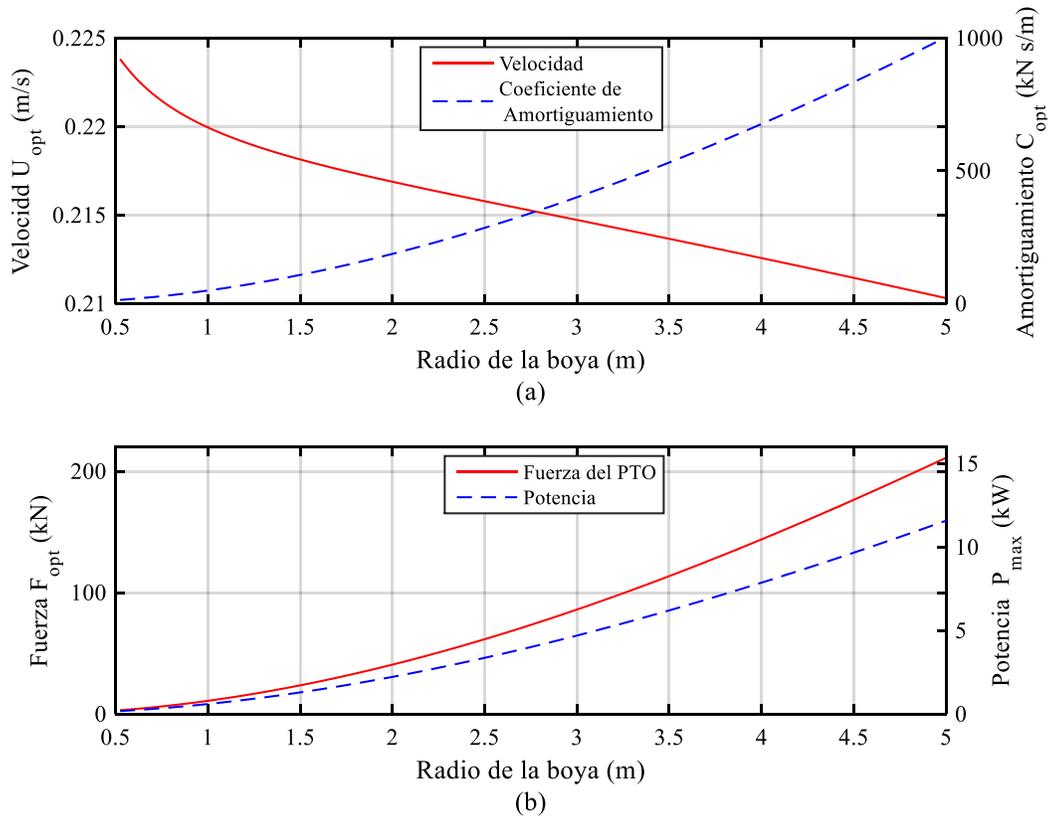


Figura 34. Variación de los parámetros óptimos en función del radio de la boya. a) C_{opt} y U_{opt} ; b) F_{opt} y P_{max}

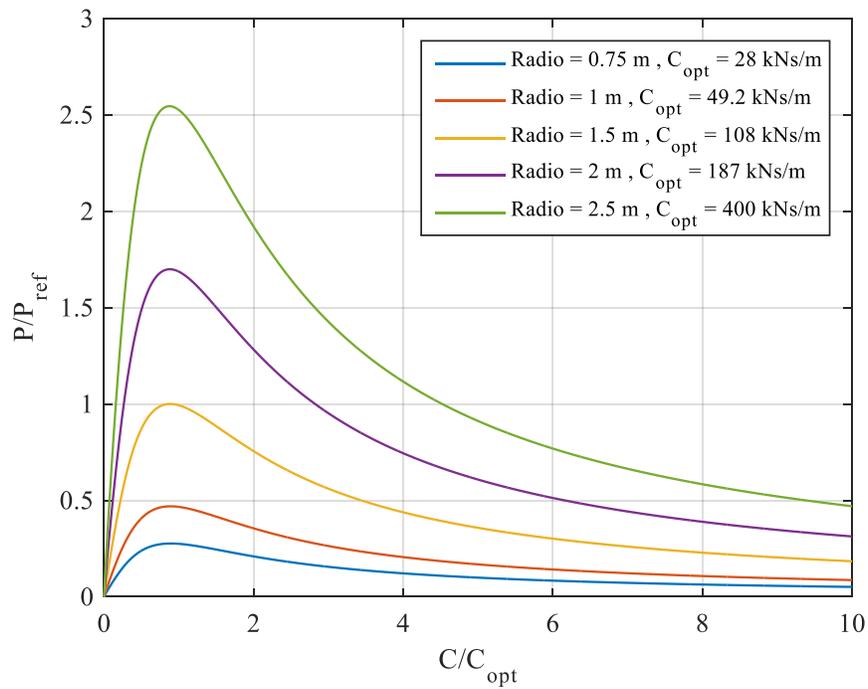


Figura 35. Potencia capturada por una boya en función del coeficiente de amortiguamiento. Condiciones oceanográficas, $H_s = 0.72$ m, $T_z = 10.28$ s, $T_p = 14.39$ s.

Un acercamiento donde las relaciones de potencia son máximas (P/P_{ref}), Figura 36, se observa que el máximo valor de potencia no es alcanzado cuando $C = C_{opt}$, es decir, cuando $C/C_{opt} = 1$, sino cuando este equivale al 90% del valor de C_{opt} ($C/C_{opt} = 0.9$), debido a que la optimización de este coeficiente de amortiguamiento se realizó contemplando un oleaje regular, y se aplica para oleaje irregular. Se ejemplifican dos casos con condiciones oceanograficas distintas, de acuerdo a esto es posible observar algunas diferencias en algunos puntos con la excepción del punto de máxima captación de potencia, lo anterior deja claro que el valor C permitirá que exista una máxima captación de potencia cuando este corresponda a $0.9 C_{opt}$.

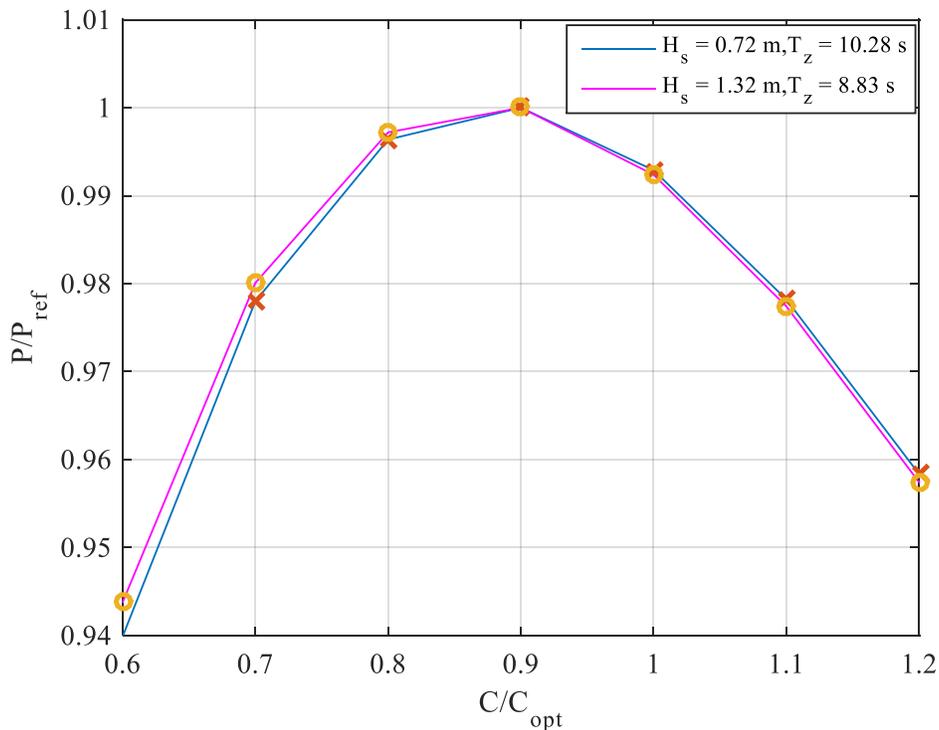


Figura 36. Máxima potencia capturada en función del coeficiente de amortiguamiento para dos estados de mar.

4.3 POTENCIA EN EL GENERADOR ELÉCTRICO LINEAL

Un generador puede ser representado por un circuito eléctrico como el que se muestra en la Figura 37. En este caso el Generador eléctrico lineal es conectado a una carga netamente resistiva, tomando este caso como referencia para posteriores análisis.

Aplicando leyes de *Kirchhoff*, se obtienen las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema, el voltaje $v_L(t)$ sobre la carga resistiva $R_L(\Omega)$, está expresado en función de la corriente del circuito $i(t)$ de acuerdo con la siguiente expresión:

$$v_L(t) = v_i(t) + i(t)R_g + L_g \frac{di}{dt} \quad (4.8)$$

Por otro lado, la corriente viene dada por la siguiente ecuación:

$$i(t) = \frac{v_L(t)}{R_L} \quad (4.9)$$

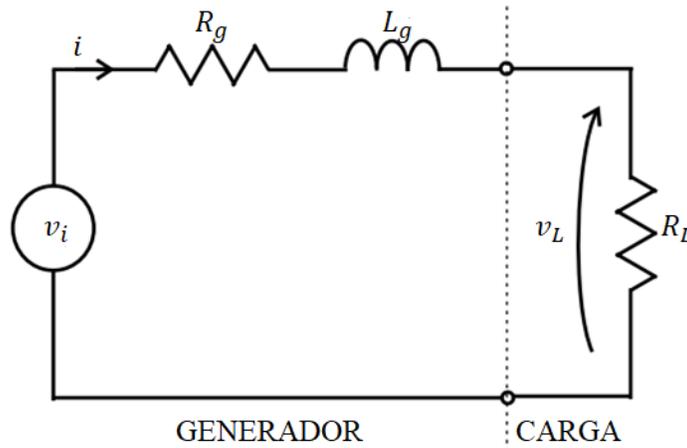


Figura 37. Generador eléctrico lineal conectado a una carga resistiva.

La potencia P_L (W) entregada a la carga del circuito de referencia se observa en la ecuación (4.10) [4]. Dependiendo así del voltaje del generador v_i , los parámetros internos del generador, la resistencia R_g (Ω), y la inductancia L_g (H) y la frecuencia de operación del generador ω .

$$P_L = v_i^2 \left(\frac{R_L}{(R_L + R_g)^2 + (\omega L_g)^2} \right) \quad (4.10)$$

A partir de lo anterior, la eficiencia del sistema puede ser calculada de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n\% = \frac{P_L}{P_{cu} + P_L} \times 100 \quad (4.11)$$

Siendo P_{cu} las pérdidas en el cobre, es decir las pérdidas en la resistencia interna R_g del generador.

4.4 CIRCUITO RESONANTE

La resonancia es un fenómeno que se presenta en circuitos eléctricos cuando la reactancia del sistema es cero, es decir, la reactancia capacitiva es igual a la reactancia inductiva. En un circuito netamente inductivo la manera de alcanzar la resonancia es añadiendo un capacitor C_r (F) tal y como se puede observar en la Figura 38. Los circuitos resonantes pueden ser empleados para construir filtros, pues sus funciones de transferencia pueden ser altamente

selectivas en frecuencia. Algunas de las aplicaciones de este tipo de circuitos se aplican en comunicaciones para seleccionar las estaciones deseadas en los receptores de radio y de televisión [5].

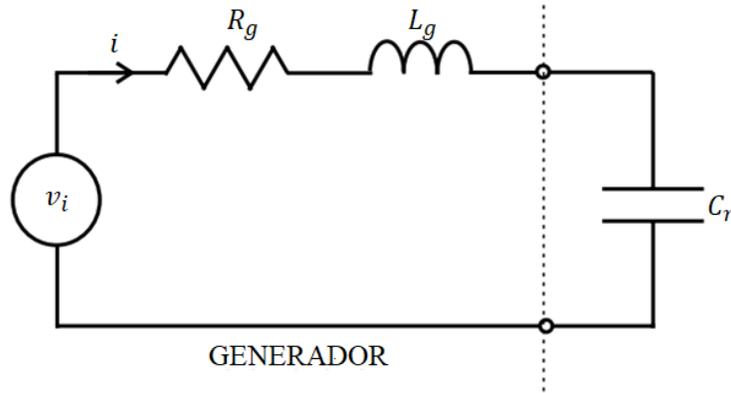


Figura 38. Generador eléctrico lineal conectado a un capacitor ejemplificando un circuito resonante.

Aplicando leyes de *Kirchhoff* el comportamiento del circuito puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$v_i = i(t)R_g + L_g \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_r} \int i(t) dt \quad (4.12)$$

A partir de la anterior ecuación y aplicando la transformada de *Laplace*, la función de transferencia del sistema viene dada por:

$$\frac{I(s)}{V_i(s)} = \frac{s/L_g}{s^2 + \frac{R_g}{L_g}s + \frac{1}{L_g C_r}} \quad (4.13)$$

Resolviendo las raíces del polinomio característico se obtiene:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{(\alpha)^2 - (\omega_o)^2} \quad (4.14)$$

Las raíces de este polinomio característico son las frecuencias naturales del sistema ya que están asociadas con la respuesta natural del circuito; ω_o (rads/s) es la frecuencia de resonancia del sistema o también la frecuencia natural no amortiguada descrita en la ecuación (4.15) y α es el factor de amortiguamiento descrito por la ecuación (4.16) [5].

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_g C}} \quad (4.15)$$

$$\alpha = \frac{R_g}{2L_g} \quad (4.16)$$

De acuerdo con los dos parámetros descritos anteriormente se puede establecer el comportamiento del circuito:

- Si, $\alpha < \omega_o$ el circuito tendrá una respuesta subamortiguada.

- Si, $\alpha = \omega_o$ el sistema será críticamente amortiguado.
- Si, $\alpha > \omega_o$ el sistema será sobreamortiguado.

Cuando el sistema alcanza su estado estable la impedancia equivalente del sistema está descrita por la ecuación (4.17). De aquí si ω es igual a ω_o el circuito alcanzará la resonancia y la impedancia equivalente será puramente resistiva, lo que acarrea altas corrientes y voltajes si la resistencia es pequeña [6]. Sin embargo en algunas aplicaciones particulares son requeridos circuitos resonantes, como en el caso de la trasmisión de energía vía inalámbrica [7], [8] y en caso de los convertidores resonantes [9], [10].

$$Z_{equi} = R_g + j\omega L_g + \frac{1}{j\omega C} \quad (4.17)$$

Una variación del circuito de la Figura 38 se observa en la Figura 39, al cual se le añade una carga resistiva paralela al capacitor C_r . Para análisis posteriores se considerará este circuito como el caso resonante.

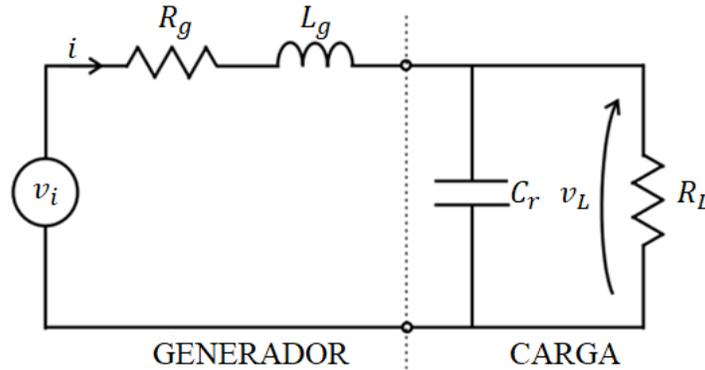


Figura 39. Circuito resonante con una carga resistiva R_L

En la Figura 40 se muestra un ejemplo de un generador que cuenta con los siguientes parámetros:

- Voltaje de entrada constante $v_i = 240 \text{ V}$
- Frecuencia de operación del generador $f_o = 10 \text{ Hz}$
- Resistencia interna del generador $R_g = 1 \Omega$
- Inductancia interna del generador $L_g = 25 \text{ mH}$
- Resistencia de carga $R_L = 10 \Omega$
- Capacitor añadido para el caso resonante $C_r = 10.132 \text{ mF}$

De acuerdo con la Figura 40 (a) P_{Lref} y P_{Lres} son las potencias en la carga para el caso de referencia y resonancia. Es posible observar que cuando la frecuencia es menor que la frecuencia de resonancia, $\omega/\omega_o < 1$, la reactancia capacitiva es mayor comparada con la reactancia inductiva, por lo tanto, el voltaje sobre la carga y la potencia activa entregada a la carga es mayor. Por otro lado, para frecuencias mayores a la frecuencia de resonancia, $\omega/\omega_o > 1$, la reactancia inductiva empieza a incrementar y ser dominante con respecto a la

capacitiva, conllevando un incremento en el voltaje del inductor. El voltaje y la potencia activa entregada a la carga disminuye dado que la corriente del capacitor se incrementa. De la Figura 40 (b) P_{Gref} y P_{Gres} equivalentes a la potencia entregada por el generador para el caso de referencia y de resonancia, se observa que la potencia generada en el caso de resonancia es mayor respecto al caso de referencia.

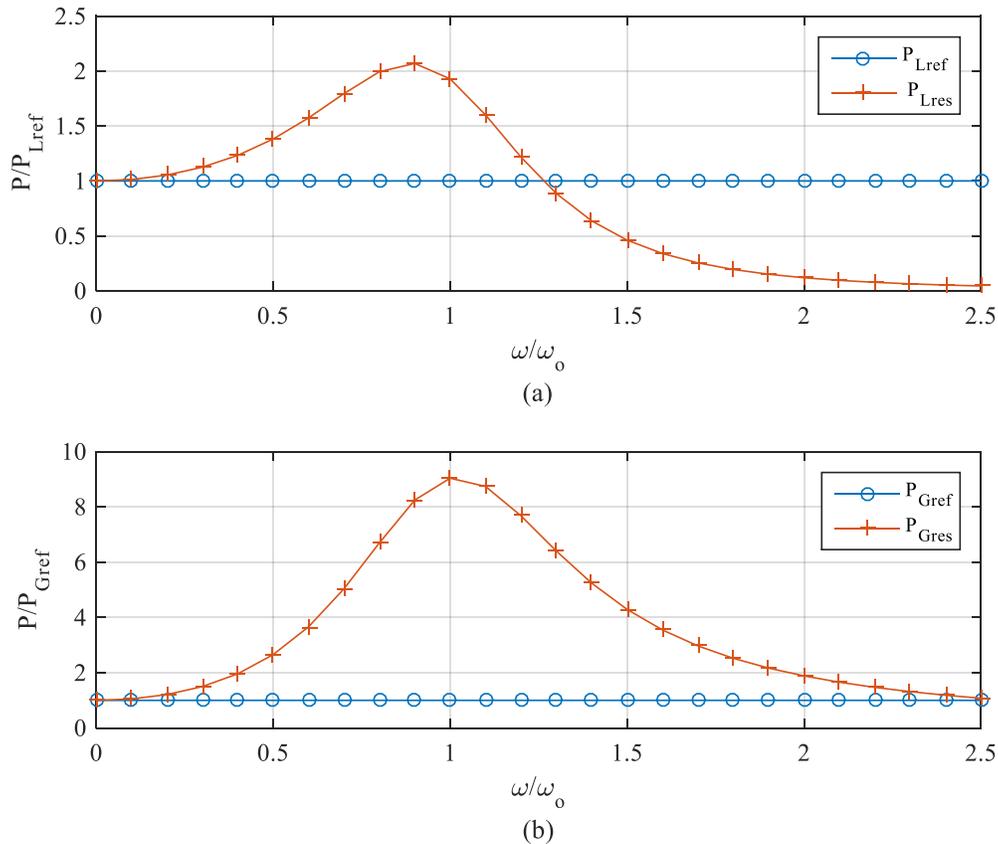


Figura 40. Potencia para el circuito equivalente de un generador al variar su frecuencia a valores cercanos a la resonancia. (a) Potencia activa entregada una carga R_L para el caso de referencia P_{Lref} y el caso de resonancia P_{Lres} . (b). Potencia entregada por el generador P_{Gref} y P_{Gres} .

4.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se planteó la manera de calcular la eficiencia energética del subsistema mecánico y eléctrico, de igual manera, se establecieron los parámetros que se pueden manipular para maximizar la conversión de energía, en el caso del subsistema mecánico se muestra el valor que debe tener el coeficiente de amortiguamiento del generador eléctrico lineal para que la captura de energía undimotriz sea máxima, por otro lado para el subsistema eléctrico se plantea la resonancia como manera para maximizar la transferencia de potencia hacia la carga.

4.6 REFERENCIAS

- [1] A. Babarit, “A database of capture width ratio of wave energy converters,” *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 610–628, 2015.
- [2] C. Bostrom, “Electrical Systems for Wave Energy Conversion,” Ph.D. dissertation, Uppsala University, 2011.
- [3] C. Cargo, “Design and Control of Hydraulic Power Take-Offs for Wave Energy Converters,” Ph.D. dissertation, University of Bath, UK, 2012.
- [4] J. Cruz, *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*. United Kingdom: Springer, 2008.
- [5] C. K. Alexander and M. N. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, 5a ed. McGraw Hill Mexico, 2013.
- [6] C. Bostrom, B. Ekergard, R. Waters, M. Eriksson, and M. Leijon, “Linear generator connected to a resonance-rectifier circuit,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 255–262, 2013.
- [7] S. Cheon, Y. H. Kim, S. Y. Kang, M. L. Lee, J. M. Lee, and T. Zyung, “Circuit-model-based analysis of a wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 7, pp. 2906–2914, 2011.
- [8] B. Zhu, J. Li, W. Hu, and X. Gao, “Review of Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission,” *Int. J. u- e-Service, Sci. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 257–272, 2015.
- [9] N. Mohan, T. M. Undeland, and R. William P., *Power electronics: Converters, Applications, and Design*, 3 Edition. US: John Wiley & Sons, 2003.
- [10] N. Mohan, “Power Electronics Circuits : An Overview,” *IEEE Ind. Electron. Soc. IECON’88. Proceedings., 14 Annu. Conf.*, vol. 3, pp. 522–527, 1988.

CAPITULO 5

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, desde la selección de nodos marítimos y la evaluación de potencial energético undimotriz en cada uno de ellos, además del análisis de diferentes casos planteados para el Generador Eléctrico Lineal. Diferentes gráficas y tablas son presentadas para mostrar el análisis de los resultados.

5.1 NODOS MARÍTIMOS

Para determinar el potencial undimotriz que puede capturar un cuerpo con un solo grado de libertad, se han considerado siete nodos de estudio. Estos nodos están ubicados en las costas pacificas de México (Figura 41) y están identificados de acuerdo con el estado y localidad más cercana a ese nodo como se puede observar a continuación:

- 1) Nayarit: San Francisco (SF)
- 2) Colima: Peña Blanca (PB)
- 3) Guerrero: Copala (Cop)
- 4) Oaxaca: Santa María Chicomtepec (SMC)
- 5) Oaxaca: San Mateo del Mar (SMM)
- 6) Chiapas: Tonalá (Ton)
- 7) Chiapas: Tapachula (Tap).

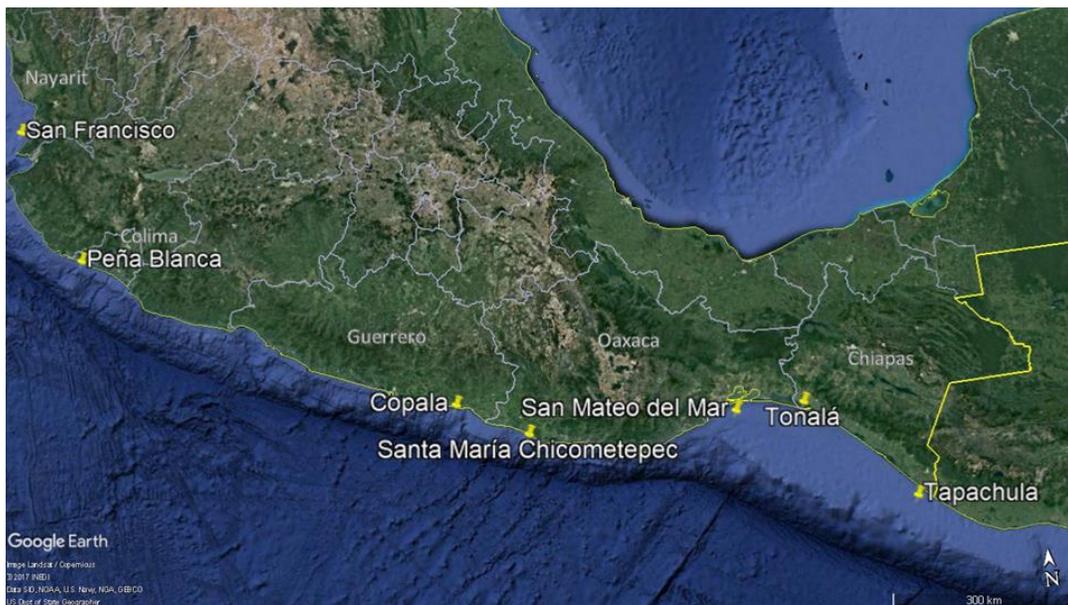


Figura 41. Ubicación geográfica de los nodos de estudio. Fuente Google Earth.

La Tabla 3 describe las características oceanográficas de cada uno de los nodos, tales como las coordenadas geográficas (latitud, longitud), distancia a la costa d (km) y la profundidad

al lecho marino h (km); los promedios anuales de los parámetros del oleaje tales como la altura significativa H_s , periodo promedio del oleaje T_z , periodo pico de la ola T_p , densidad de potencia de la ola J y la máxima potencia P_{max} que puede absorber un cuerpo de un solo grado de libertad, fueron descritos de acuerdo al modelo de transporte de la energía del oleaje en el capítulo 2.

Tabla 3. Condiciones Oceanográficas para los diferentes nodos de estudio.

Estado	Municipio / Rel. Cercano	Ubicación		d (km)	h (m)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)	J [kW/m]	P _{max} [kW]
		Lat.	Lon.							
Nayarit	San Francisco	21° N	105°30' O	14	105	0.7244	10.2808	14.3921	3.5166	92.26
Colima	Peña Blanca	19°N	104°30' O	15	293	1.1194	10.2822	14.3941	8.8384	231.95
Guerrero	Copala	16°30' N	99° O	8	130	1.1600	10.2713	14.3788	9.4960	248.68
Oaxaca	Santa María Chicometepec	16° N	98° O	12	148	1.2394	10.3024	14.4224	10.4603	275.6
	San Mateo del Mar	16° N	95° O	22	82	1.3215	8.8336	12.3662	9.8986	191.73
Chiapas	Tonalá	16°N	94° O	0.5 - 15	12	0.9823	10.0893	14.1241	7.0431	177.97
	Tapachula	14°30' N	92°30' O	24	34	1.2286	10.1638	14.2283	9.8801	253.35

5.2 SIMULACIÓN DEL PERFIL DEL OLAJE

La información presentada en la Tabla , permitió simular o reproducir el perfil del oleaje a partir del espectro de Pierson- Moskowitz, así, para cada uno de los siete nodos de estudio fue obtenido el perfil del oleaje. En la Figura 42 se puede observar el comportamiento del oleaje para dos de los nodos de estudio, San Mateo del Mar (SMM) en Oaxaca y San Francisco (SF) en Nayarit. De lo anterior es evidente apreciar la diferencia entre las alturas de ambas olas en todo el instante de tiempo, siendo mayores en San Mateo del Mar dado que la altura significativa es mayor que en San Francisco, por otro lado, la diferencia entre el periodo de ambas olas no se aprecia de manera directa debido a que los periodos promedios en estas zonas son muy similares.

5.3 POTENCIAL ENERGÉTICO UNDIMOTRIZ

Con el perfil del oleaje, el objetivo es determinar la fuerza de excitación de este mismo y por ende el comportamiento del sistema acoplado Boya-GEL cuando este interactúa con una ola incidente. En la Figura 43 se observa la posición del sistema Boya-GEL respecto a la ola incidente para el nodo de San Mateo del Mar, notando como el movimiento de la boya es más suave que el del oleaje. La Figura 44 muestra la potencia instantánea capturada por el sistema para una boya de radio $r = 2$ m, observando que no hay un valor uniforme de

potencia como es su estimado P_{maxJ} con el modelo del transporte de la energía, esto debido a la naturaleza irregular de las olas. Estos análisis proveen valores de potencia que son cercanos a la realidad.

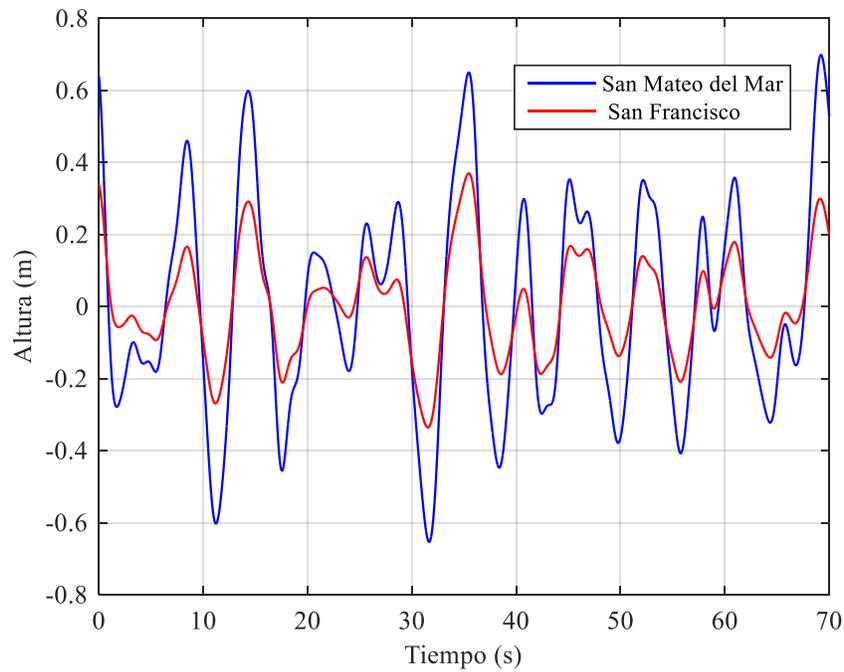


Figura 42. Altura de las olas contra tiempo para dos nodos de estudio.

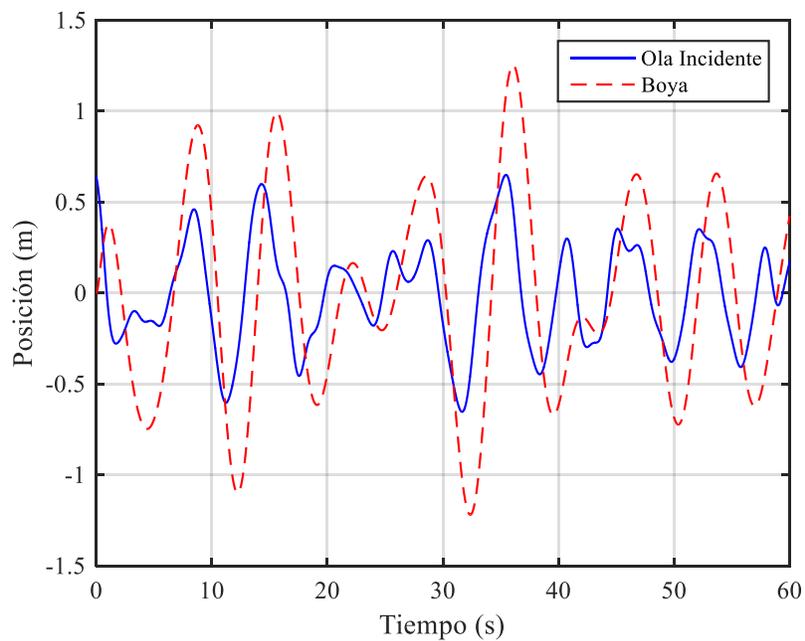


Figura 43. Perfil del oleaje y posición de la boya correspondiente al nodo de San Mateo del Mar.

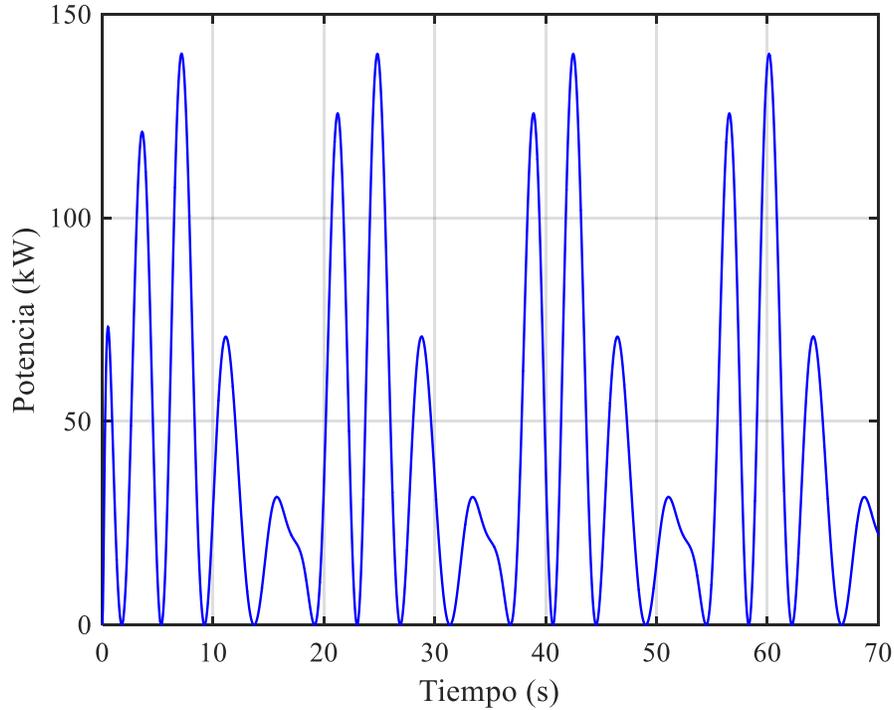


Figura 44. Potencia instantánea capturada, para el nodo de San Mateo del Mar. $C= 140$ (k N s/m) = $0.9C_{opt}$.

Incrementar las dimensiones de la boya incrementa la potencia capturada por el sistema como se puede observar en la Figura 45. La potencia promedio anual capturada se incrementa si incrementan las dimensiones de la boya, por ejemplo, un cambio en el radio de 1 a 2 m cambia la potencia promedio anual de aproximadamente 2 kW a 6 kW, siendo este incremento no lineal. En la Tabla 4 se muestra la potencia promedio capturada para todos los nodos de estudio cuando el radio de la boya varía.

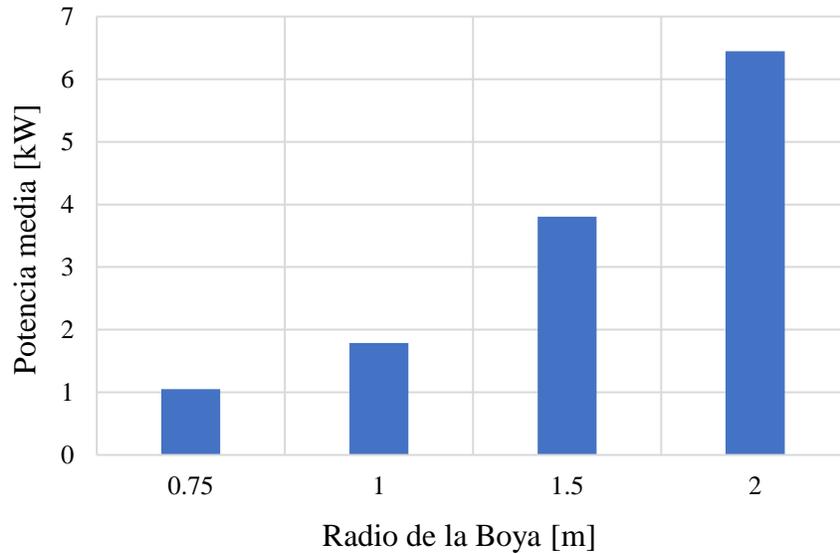


Figura 45. Potencia promedio capturada en el nodo de San Francisco (Nayarit).

Tabla 4. Potencia capturada para diferentes radios de la boya.

Radio (m)		0.75	1	1.5	2
Estado	Zona	Potencia capturada (kW)			
Nayarit	SF	1.0528	1.7879	3.8061	6.4487
Colima	PB	6.0063	10.2	21.721	36.837
Guerrero	Cop.	6.9025	11.722	24.967	42.369
Oaxaca	SMC	8.8797	15.403	32.833	55.756
	SMM	9.6106	16.444	34.414	57.528
Chiapas	Ton.	3.4808	5.9661	12.563	21.288
	Tap.	8.5031	14.67	31.068	52.869

5.4 COMPARACIÓN DE LA POTENCIA MECÁNICA CAPTURADA

La Figura 46 muestra una comparación de niveles de potencia promedio anual capturada por una boya de un solo grado de libertad para los nodos estudiados, donde la estimación realizada de acuerdo al modelo de transporte de energía de la ola por *Falnes* [1] es mucho mayor que las realizadas por medio del modelo del espectro del oleaje; Sin embargo, aunque el modelo de transporte de la energía considera parámetros de altura significativa, periodo pico y promedio del oleaje, su estimación se basa en condiciones ideales y no tiene en cuenta el perfil del oleaje, las dimensiones del dispositivo captador de energía y los parámetros del PTO, los cuales si fueron tenidos en cuenta en ese trabajo para el cálculo de la potencia promedio capturada por la boya. Para realizar una comparación válida entre los modelos analizados, todos han considerado los mismos valores promedios anuales de las condiciones oceanográficas de los nodos de estudio.

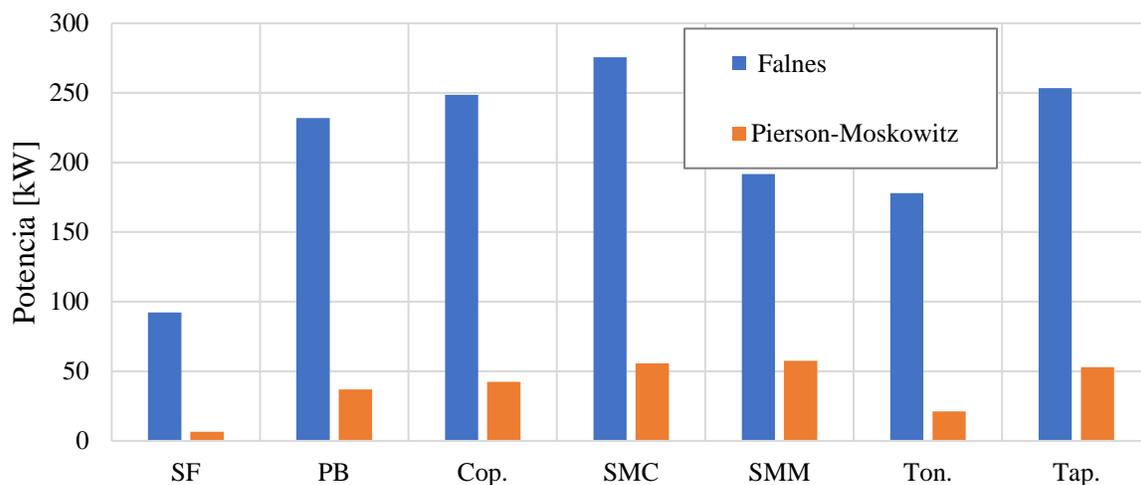


Figura 46. Estimación del potencial energético Undimotriz empleando una boya de radio de 2 m, en los nodos de estudio.

5.5 GENERADOR CONECTADO A UNA CARGA RESISTIVA

Cuando el GEL es conectado a una carga netamente resistiva el voltaje y la corriente tienen una relación lineal (Figura 47). Se puede inferir que los puntos máximos de voltaje y corriente son alcanzados cuando el trasladador está en una posición central, por otro lado, aquellos intervalos de tiempo donde el voltaje y corriente decaen y mantienen un valor cercano a cero son indicadores de que el trasladador se posiciona en su punto máximo o mínimo de acuerdo con la ola incidente.

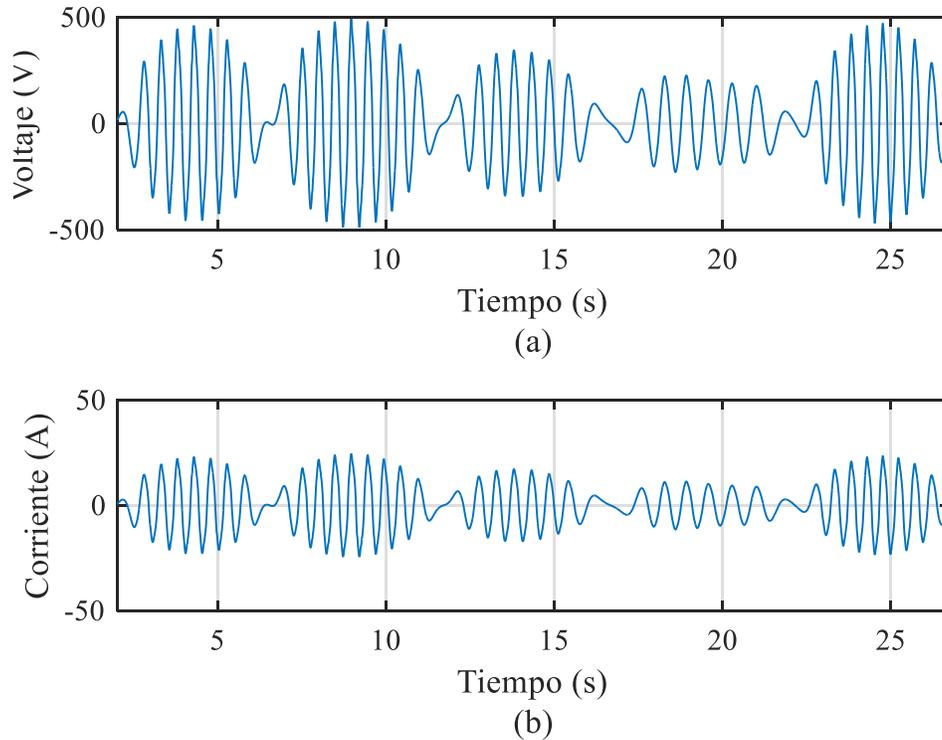


Figura 47. Voltaje y Corriente en una resistencia de carga de 20Ω conectada al generador.

En la Figura 48 (a) se puede observar la potencia instantánea que absorbe una resistencia de carga R_L de 20Ω para un generador ubicado en el nodo de San Francisco diseñado a una potencia nominal de 6.5 kW de acuerdo a la potencia mecánica capturada, a un voltaje de $170 V_{rms}$, y una frecuencia de operación de 3 Hz así mismo en la Figura 48 (b) se observa la velocidad del trasladador para olas incidentes en este nodo cuyo valor promedio es de 0.1465 m/s . Haciendo un contraste de las dos figuras es posible notar intervalos de tiempo de 0.5 a 1 s donde la potencia es nula, esto último es debido a que en esos instantes de tiempo la velocidad del trasladador es próxima a cero o es cero.

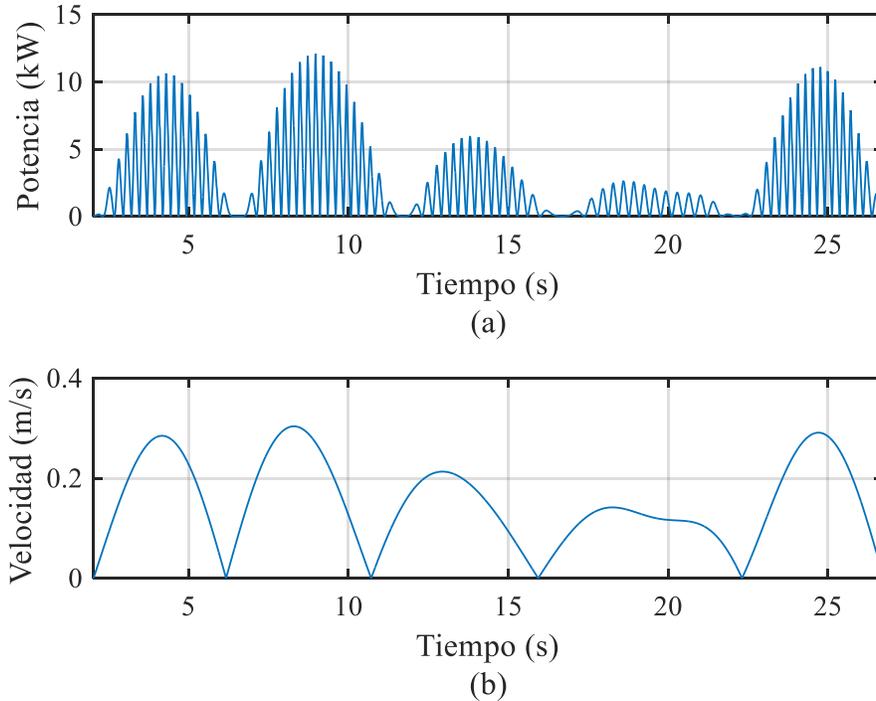


Figura 48. (a) Potencia instantánea en la carga. (b) Velocidad del trasladador para el nodo de San Francisco de Nayarit.

5.6 GENERADOR A CONECTADO A CIRCUITO RESONANTE

Para aumentar la transferencia de potencia por parte del GEL hacia la carga este fue conectado a un circuito resonante como el de la Figura 39, a partir de esto se evalúan dos casos: el primero de ellos cuando el generador está conectado a una carga resistiva, y el segundo cuando se conecta al circuito resonante.

De acuerdo al caso resonante para cada valor de carga R_L , se seleccionó un capacitor C_r que anule la reactancia del circuito, buscando así la resonancia y determinar como es su comportamiento respecto al caso netamente resistivo. Nuevamente se toma como referencia un generador diseñado para el nodo de San Francisco cuyos parámetros son:

- Potencia nominal del Generador 6.5 kW
- Voltaje del generador 170 Vrms
- Frecuencia de operación del generador 3 Hz
- Resistencia interna del generador R_g 0.2823 Ω
- Inductancia interna del generador $L_g = 24$ mH

En la Figura 49 se puede observar la potencia consumida por una carga resistiva para los casos anteriormente mencionados observando que en el caso de resonancia la potencia entregada es ligeramente mayor en comparación con el caso puramente resistivo. En la medida que los niveles de carga aumentan la potencia para ambos casos se tiende al mismo valor.

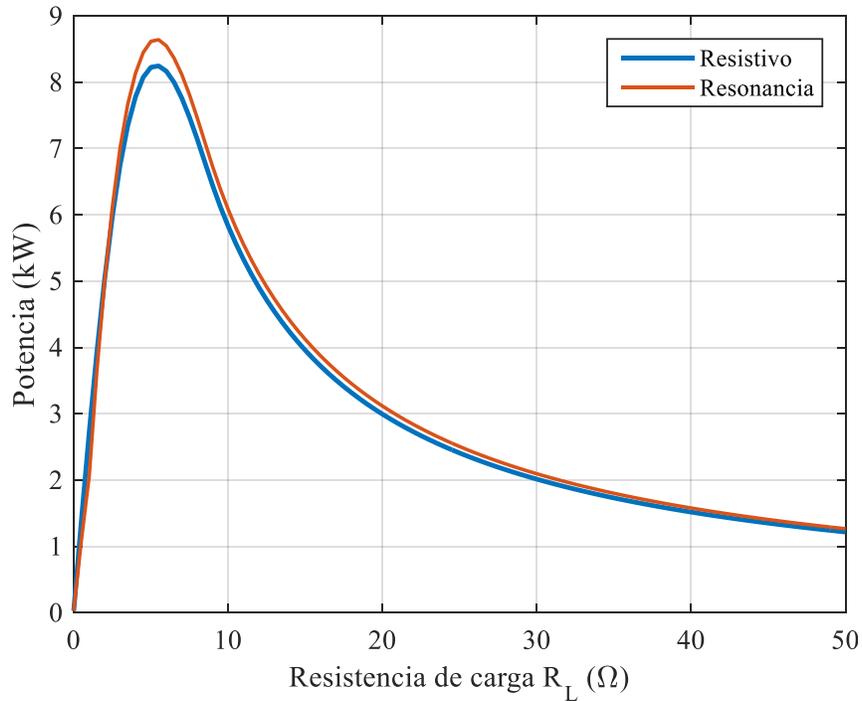


Figura 49. Potencia entregada por el GEL a una carga resistiva con y sin resonancia presente.

En la Figura 50 se puede observar el perfil de eficiencia asumiendo que el generador opera a plena carga cuando $R_L = 5 \Omega$. En el caso resistivo se obtuvo una eficiencia de 89.30 %, así mismo en el caso del resonante la eficiencia obtenida se incrementa al 94.1%.

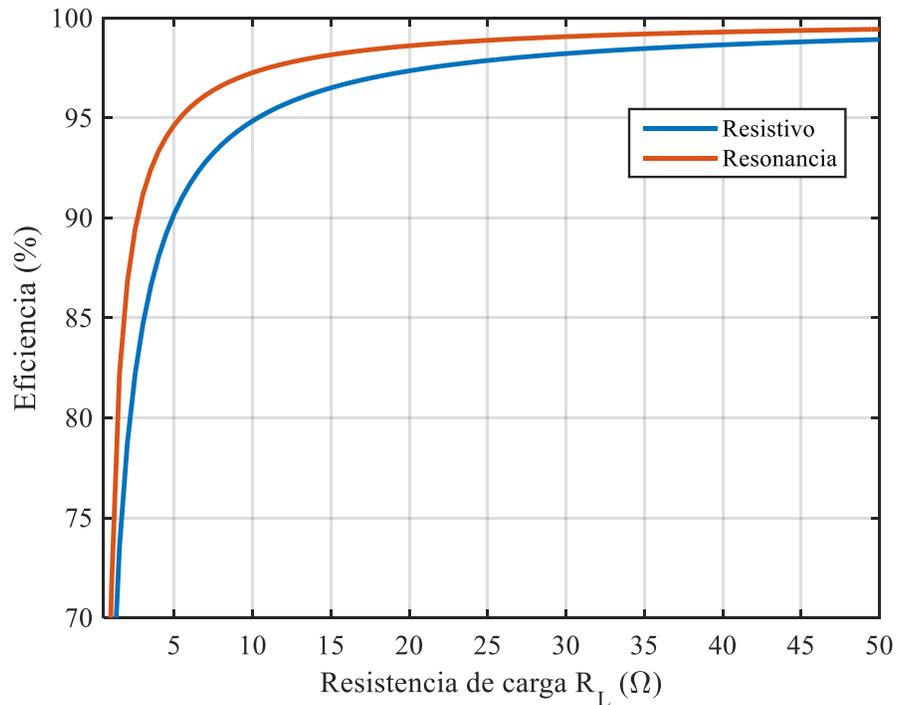


Figura 50. Eficiencia para el Generador Eléctrico Lineal de 6.44 kW ubicado en el nodo de San Francisco. Caso Resistivo y Resonante.

En la Tabla 5 se puede observar la eficiencia del Generador Eléctrico Lineal, cuyas potencias nominales equivalen a la potencia promedio capturada por la boya en el nodo de San Francisco. Se puede observar que en los diferentes casos la eficiencia del generador en el caso resonante alcanza 94% de eficiencias para un captador de 2 m de radio mientras que en el caso resistivo se alcanza una eficiencia del 92.61% con el captador de menor radio de 0.75 m, además que en el caso en la medida que el radio del captador aumenta la potencia capturada también lo hace. San Francisco es el nodo con un menor potencial undimotriz de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 5. Eficiencia para un generador ubicado en el nodo de San Francisco.

Radio del captador (m)	Potencia nominal (kW)	Eficiencia caso resistivo (%)	Eficiencia caso resonante (%)
0.75	1.0528	92.61	92.95
1	1.7879	92.56	93.33
1.5	3.8061	91.35	93.76
2	6.4487	89.30	94.1

El mismo análisis de eficiencia se realizó para el nodo de San Mateo del mar aquel que presenta un mayor potencial energético undimotriz. Destacando eficiencias entre el 96% y 98% como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 6. Eficiencia para un generador ubicado en el nodo de San Mateo del Mar.

Radio del captador (m)	Potencia nominal (kW)	Eficiencia caso resistivo (%)	Eficiencia caso resonante (%)
0.75	9.6106	98.27	98.43
1	16.444	96.41	97.18
1.5	34.414	94.65	97.68
2	57.528	94.38	98.6

5.7 GENERADOR CONECTADO AL RECTIFICADOR Y FILTRO

El objetivo de que el generador sea conectado a un puente rectificador y a un ultra capacitor como filtro, es el suavizar la señal de voltaje y eliminar las componentes de baja frecuencia de tal manera que la señal DC resultante sea lo más constante posible.

En la Figura 51 se observa el voltaje DC en una carga resistiva de 10Ω durante un periodo de tiempo de 1600 segundos, para un generador de 50 Vrms y cuyo enlace DC se seleccionó un ultracapacitor de 12 F para que el porcentaje de rizado no superara el 9%. Las variaciones

en frecuencia y amplitud de la señal de voltaje debidas a la naturaleza de la ola incidente, además de la configuración de los imanes montados en el trasladador y la velocidad de este mismo son suavizadas. Durante estos 1600 segundos se pudo observar un voltaje máximo DC $V_{ccmax} = 117 \text{ V}$ y mínimo de $V_{ccmin} = 107 \text{ V}$, respectivamente. De lo anterior se puede establecer un porcentaje de rizado de aproximadamente 9 % lo cual indica que el ultracapacitor opera como es esperado manteniendo el voltaje DC estable.

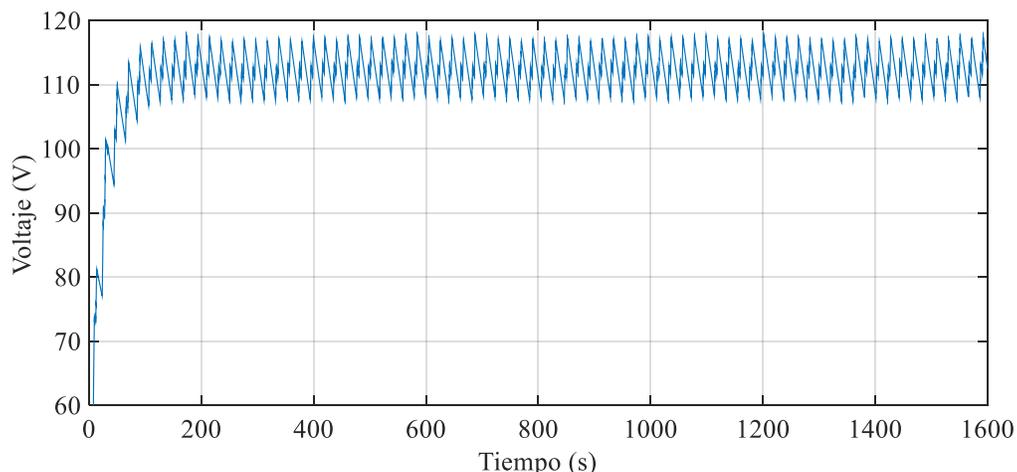


Figura 51. Voltaje DC sobre una carga resistiva de 10Ω .

En la Figura 52 (a) se puede observar un contraste entre el voltaje del generador (azul) y el voltaje en la carga (rojo) después de la rectificación y filtrado durante un rango de tiempo entre los 235 y 290 s, así como la corriente del generador en este mismo intervalo de tiempo vista en la Figura 52 (b).

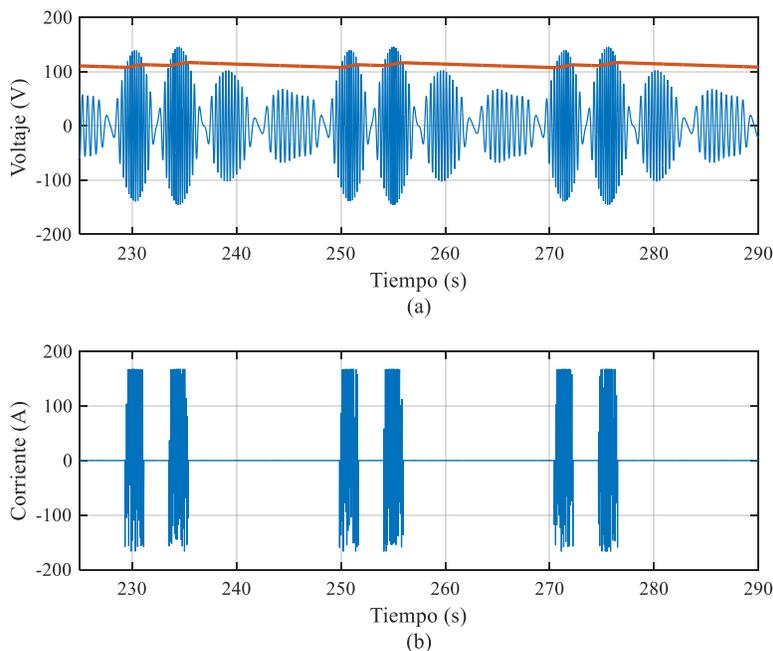


Figura 52. (a) Voltaje AC en el generador(azul) y DC para una carga de 10Ω (rojo). (b) Corriente entregada por el generador.

Si se compara el caso anterior donde el generador está conectado a una carga resistiva es posible inferir que la corriente y el voltaje no tienen una relación lineal. Cuando el voltaje AC es menor que el DC el capacitor descarga su energía en la carga, es decir, los diodos no conducen y por ende la corriente del generador es nula, como se puede observar entre los 256 y 270 s. Por otro lado, cuando la diferencia de voltaje AC y DC toman el valor requerido para que los diodos conduzcan, la corriente entregada por el generador deja de ser nula, repitiendo así este proceso de manera cíclica.

5.8 CONCLUSIONES

Se realizó una estimación del potencial energético undimotriz en nodos del pacifico mexicano, a partir del calculo del perfil del oleaje, las dinámicas y parámetros del dispositivo captador de energía y del dispositivo conversor. Los resultados obtenidos en la estimación del potencial undimotriz en este trabajo fueron comparados con lo propuesto por *Falnes* en el modelo del transporte de la energía, encontrando que estos últimos son entre un 70 y 95% mayores, dado que la estimación que realiza *Falnes* no considera las dimensiones del sistema de captación. El nodo con mayor potencial energético undimotriz para los diferentes tamaños de captadores fue el de San Mateo del Mar esto debido a que es el nodo cuyo oleaje presenta un menor periodo, contrario a esto el nodo de San Francisco fue el que presento un menor potencial Energetico Undimotriz dado que de todos los nodos de estudio es el que presenta la menor altura significativa.

Diferentes configuraciones de carga fueron acopladas al Generador Eléctrico Lineal, entre estas se estudio un circuito con una carga netamente resistiva y circuito resonante para aumentar la transferencia de potencia. Dos nodos fueron tomados San Francisco y San Mateo del Mar fueron tenidos en cuenta para este análisis. En el caso netamente resistivo del nodo de San Francisco se pudo determinar que la eficiencia del generador cuyo captador tenía radio 0.75 m fue de 92.61% siendo mayor que la de un generador cuyo captador de radio de 2 m tiene una eficiencia del 89.30%, así mismo para el nodo de San Mateo del Mar la máxima eficiencia en el caso resistivo se da para el captador de menor radio alcanzando 98.27% y la menor para el captador de mayor radio cuya eficiencias fue de , 94.38%. También en el nodo de San Mateo del Mar la eficiencia del generador cuyo captador fue de 0.75 m de radio, es mayor en contraste a los otros tres generadores.

Un puente rectificador y capacitor como filtro se usa para la estabilización de la señal del generador, destacando el uso de un *ulracapacitor* para este filtrado ya que la señal del GEL es de baja frecuencia por lo tanto un capacitor convencional no lograría mantener el voltaje dentro de niveles deseados.

5.9 REFERENCIAS

- [1] J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems: linear interactions including wave-energy extraction*. Cambridge University Press, 2002.

CAPITULO 6

En este capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo de grado, así como los posibles trabajos futuros derivados del mismo

6.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una estrategia para la evaluación de la potencia en la conversión de energía undimotriz, así como el diseño de la planta de generación undimotriz, dimensionando los componentes de la planta para transformar la energía de las olas en energía eléctrica a través de un cuerpo flotante de un solo grado de libertad.

A partir de lo anterior fue posible establecer las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a la literatura se determinó los principales componentes de una planta de generación undimotriz. Se realizó un reconocimiento del estado del arte determinando los principales componentes de una planta de generación por undimotriz, en base a esto como elemento captador fue seleccionada una boya de un solo grado de libertad, dado la sencillez de su modelo matemático, además de que el movimiento vertical que este realiza al interactuar con una ola permite ser acoplado con el Generador Eléctrico Lineal como elemento conversor de energía. El Generador Eléctrico Lineal en comparación a los otros dispositivos de conversión como los hidráulicos tiene la facilidad de realizar una conversión directa de la energía mecánica en eléctrica.
- Se describieron los modelos de cada uno de los componentes de una planta de generación undimotriz, desde la generación del perfil del oleaje considerando las características oceanográficas, las dinámicas de la boya como captador y el GEL como conversor de energía. Se muestra como dimensionar física y eléctricamente el GEL a partir de la potencia mecánica captada por la boya.
- Se estimó el Potencial energético undimotriz que puede absorber un cuerpo de un solo grado de libertad en nodos ubicados en el Golfo de California y Costa Pacífica. El potencial estimado es bajo comparado con el modelo teórico que plantea *Falnes* superando la estimación realizada en este trabajo sobre un 70 a 95%. Se debe tener en cuenta que *Falnes* en su modelo no considera la interacción de la ola con el captador de energía.
- Para incrementar la transferencia de potencia eléctrica se utilizó un circuito resonante que eliminara la reactancia del sistema y así aumentar la transferencia de potencia activa a la carga. Los Generadores diseñados para los nodos de San Mateo y San Francisco alcanzaron eficiencias energéticas por encima del 90% siendo un factor importante para

- En el dimensionamiento de una planta de generación undimotriz es importante considerar estudios de factibilidad económica, para efectos del dimensionamiento y fabricación de los componentes de la planta tales como: el dispositivo captador de energía, los imanes permanentes del Generador Eléctrico Lineal y la adquisición de los ultracapacitores.
- La estrategia de diseño planteada en este trabajo puede ser adaptada para otros dispositivos de captación y conversión, ya que hay que incluir el modelado de otros componentes debido a que la cadena de conversión contiene etapas adicionales como lo es para los dispositivos hidráulicos y tipo turbina.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

- Analizar dispositivos de captación y conversión diferentes a los ya estudiados en este trabajo con miras a incrementar el conocimiento de generación por undimotriz y evaluar cuál de estos sistemas puede ser apto para la implementación de un prototipo. Haciendo un estudio mas profundo en los factores técnicos y económicos que esto acarrea.
- Estudiar el Generador Eléctrico Lineal aplicado a otras ramas de la ingeniería como es el caso de automóviles híbridos.
- Estudiar otros dispositivos diferentes a los *ultracapacitores* para estabilizar la señal del GEL tales como convertidores matriciales, y conversores DC-DC como DC-link, que además puedan ser empleados para maximizar la trasferencia de potencia.