



CONTROL DE GENERADOR UNDIMOTRIZ CON EL FIN DE MINIMIZAR LAS  
FLUCTUACIONES DE POTENCIA.

PEDRO ANDRES BOTIA ARIAS  
GENDER YADIR ESTEBAN SIERRA

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BOGOTÁ, COLOMBIA 2020

CONTROL DE GENERADOR UNDIMOTRIZ CON EL FIN DE MINIMIZAR LAS  
FLUCTUACIONES DE POTENCIA.

PEDRO ANDRES BOTIA ARIAS  
GENDER YADIR ESTEBAN SIERRA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA

Director Temático:  
ING MAXIMILIANO BUENO LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BOGOTÁ D.C. 2020

**Nota de aceptación:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Firma del presidente del jurado** \_\_\_\_\_

**Firma del jurado** \_\_\_\_\_

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer primordialmente a la señora Ana Ilce, mi madre, quien siempre estuvo ahí dando un apoyo incondicional y luchando para darme una mejor calidad de vida. En segundo lugar, a cada uno de mis familiares y amigos que aportaron un grano de arena para poder culminar esta grandiosa carrera. Muchas gracias

Atte. Gender

Gracias a Dios por permitir la oportunidad de estudiar esta maravillosa y fascinante carrera, a mi familia por apoyar en cada decisión y proyecto, en especial a mi madre la señora Ana Cleotilde Arias por brindar un apoyo constante en los momentos difíciles, me siento orgulloso de ser un ejemplo y trazar un camino para mis hermanos. Gracias a todos mis compañeros por su grata compañía y sus enseñanzas, igualmente a los docentes que brindaron todo su conocimiento, un fuerte abrazo.

Atte. Pedro

## Tabla de contenido

Resumen .....	1
Abstract .....	3
Estado del arte.....	5
Capítulo I: Energías renovables y la generación undimotriz.....	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Estrategias de control. ....	10
1.2.1 Modelo de control predictivo (MPC). ....	10
1.2.2 Control de velocidad rotacional. ....	11
1.2.3 Control de amplitud y fase.....	12
1.2.4 Control Electrónico.....	14
Capítulo II: Potencial de generación undimotriz .....	16
2.1 Métodos de producción de la energía eléctrica.....	16
2.2 Investigación de los métodos.....	16
2.2.1 Modelo para calcular potencial de las olas. ....	17
2.2.2 Espectro Pierson-Moskowitz (1964). ....	19
2.2.3 Espectro Jonswap (1973).....	21
2.3 Selección zona de interés.....	24
2.4 Calculo de potencial. ....	25
2.5 Diseño de algoritmo para la simulación del estado del mar. ....	26
Capítulo III: Generador undimotriz .....	31
3.1 Clasificación de generadores undimotrices .....	31
3.1.1 Generadores según su ubicación. ....	31
3.1.2 Generadores según su tamaño.....	32
3.1.3 Generadores según su principio de funcionamiento.....	33
3.2 Desarrollo del modelo mecánico-PTO.....	34
3.3 Selección de generador undimotriz .....	37
3.4 Desarrollo del modelo eléctrico.....	37
3.5 Unión de los modelos. ....	45
Capítulo IV: Diseño control PI del generador undimotriz .....	48
4.1 Señal de referencia o set point. ....	49
4.2 Diseño de controlador PI.....	49
4.3 Acople PTO-generador.....	50
4.4 Modelo del generador undimotriz.....	52
4.5 Corriente y potencia generada .....	53
4.6 Señal de error.....	55
4.7 Análisis del comportamiento del control PI ante diferentes valores de referencia. ....	57
4.7.1 Referencia=669A.....	57
4.7.2 Referencia= 400A.....	58
4.7.3 Referencia=200A.....	60
Conclusiones y trabajos futuros.....	64
Bibliografía.....	66
Anexos.....	69
Anexo A. Presupuesto. ....	69
Anexo B. Código Python.....	69

## Lista de figuras

Figura 1. Situación global de las energías renovables (IDMA, 2018).....	7
Figura 2. Capacidad de generación eléctrica del Sistema Interconectado Nacional (UPME, Integración de las energías, 2015).....	8
Figura 3. Circuito equivalente de DFIG (Luckins, 2016) .....	11
Figura 4. Sistema de potencia de onda (Oscar Barambones, 2018).....	12
Figura 5. Circuito físico del PTO (Mena, 2018).....	13
Figura 6. Modelo eléctrico del estator (Mena, 2018).....	13
Figura 7. Control por banda de histéresis (Mena, 2018).....	14
Figura 8. Principio de funcionamiento convertidor Arquímedes (Garcés, 2015).....	15
Figura 9. Dispositivos de generación de energía (BDrew A. R., 2015).....	16
Figura 10. Espectros de olas de un mar completamente desarrollado para diferentes velocidades del viento según Moskowitz (Stewart, 1987) .....	19
Figura 11. Altura y período de ola significativos en el pico del espectro de un mar desarrollado calculado a partir del espectro Pierson-Moskowitz (Stewart, 1987).....	21
Figura 12. Espectro de olas de un mar en desarrollo para diferentes recuperaciones (Stewart, 1987).....	22
Figura 13. Comparativa entre el modelo de Jonswap y el Pierson-Moskowitz.....	23
Figura 14. Comportamiento de la velocidad del viento en las costas Colombianas (Atlas Interactivo - Vientos - IDEAM, 2020) .....	24
Figura 15. Interfaz gráfica Python. ....	27
Figura 16. Comportamiento de la amplitud de las olas en el Cabo de la Vela.....	29
Figura 17. Ubicación de los convertidores de energía de las olas (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarria, 2013) .....	32
Figura 18. Clasificación del convertidor de energía de onda según el tamaño: (a) absorbedor de punto OPT, (b) atenuador Pelamis y (c) terminador Wave Dragón (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarria, 2013). ....	33
Figura 19. Modelo mecánico generador absorbedor puntual. ....	34
Figura 20. Modelo mecánico generador en Simulink. ....	36
Figura 21. Comportamiento del modelo mecánico generador en Simulink. ....	36
Figura 22. Circuito equivalente de la máquina asíncrona (Echarri, 2011).....	42
Figura 23. Circuito equivalente en régimen permanente (Echarri, 2011). ....	43
Figura 24. Vista del generador doblemente alimentado Indar NCR-450-L/4 (Echarri, 2011).....	44
Figura 25. Circuito equivalente del generador asíncrono con parámetros del generador Indar NCR-450-L/4 (Echarri, 2011).....	45
Figura 26. Modelo completo del generador undimotriz.....	45
Figura 27. Diagrama de bloques de la potencia instantánea generada del modelo de WEC. ....	46
Figura 28. Potencia generada del modelo de WEC .....	46
Figura 29. Modelo de control implementado en Simulink.....	48
Figura 30. Parámetros del controlador PI.....	50
Figura 31. Elementos que conforman el sistema de transmisión (Cristancho, 2007).....	51
Figura 32. Turbina de viento con caja multiplicadora de ejes paralelos (Cristancho, 2007) .....	52
Figura 33. Caja multiplicadora tipo planetario (Cristancho, 2007) .....	52
Figura 34. Parámetros generador undimotriz .....	53
Figura 35. Corriente generada después del control PI .....	54

Figura 36. Potencia generada después del control PI.....	55
Figura 37. Potencia generada por el modelo undimotriz sin aplicar el control. ....	55
Figura 38. Señal de error (corriente de referencia vs corriente generada). ....	56
Figura 39. Diagrama de bloques del control PI con referencia de 669A. ....	57
Figura 40. Señal de corriente generada del control PI con referencia de 669A. ....	57
Figura 41. Señal de potencia generada del control PI con referencia de 669A. ....	58
Figura 42. Diagrama de bloques del control PI con referencia de 400A. ....	58
Figura 43. Señal de corriente generada del control PI con referencia de 400A. ....	59
Figura 44. Señal de potencia generada del control PI con referencia de 400A. ....	59
Figura 45. Diagrama de bloques del control PI con referencia de 200A. ....	60
Figura 46. Señal de corriente generada del control PI con referencia de 200A. ....	60
Figura 47. Señal de potencia generada del control PI con referencia de 200A. ....	61
Figura 48. Comparación entre el comportamiento de oleaje y la respuesta del control ante fluctuaciones en la altura de la ola .....	62

## **Resumen**

Colombia es claro ejemplo de dependencia para producir energía eléctrica, la cual está sujeta a la generación hidráulica y térmica en una menor proporción (Moreno García, 2016), el clima de Colombia se caracteriza por sus variaciones, lo que se dificulta su pronóstico (Puertas Orozco, 2008). El sector energético resulta afectado debido a esta variación, por ejemplo la causada en 1992, cuando Colombia sufrió un racionamiento de energía eléctrica debido al fenómeno del niño (Valencia, 2016), resulta indispensable realizar una diversificación en su matriz energética, una opción que se plantea es el uso de energías renovables, más específicamente de energía undimotriz (generada por el oleaje), pero debido a la variación de su recurso primario, los generadores sufren de fluctuaciones de energía (Hansen et al., 2018). Con este fin se plantea un control sobre el generador con el propósito de minimizar estos cambios bruscos de energía y maximizar la potencia obtenida del recurso primario, y posteriormente inyectar esta potencia a una microrred, que suministra energía eléctrica a una comunidad.

El WEC (Wave Energy Converter) es el dispositivo que en su conjunto, forma el sistema completo de generación undimotriz, es decir, es la estructura física que convierte la energía mecánica de las olas en energía eléctrica. El WEC en términos prácticos, se subdivide en dos partes: el generador eléctrico y el power take-off (PTO) o sistema de toma de fuerza. El generador eléctrico de este proyecto se basó en un generador eólico Doubly Fed Induction Generator (DFIG) o generador de inducción doblemente alimentado, más específicamente del generador Indar NCR-450-L/4, que posee características similares a las de un generador undimotriz, proporciona potencia con un amplio rango de variaciones de energía cinética, tiene la propiedad de funcionar a velocidad variable, posee pequeñas dimensiones comparadas con generadores similares, no requiere de una fuente externa para la generación de electricidad. Por estas características y la falta de información de un modelo de generación undimotriz que permita determinar la planta del sistema, no se planteó un modelo eléctrico 100% undimotriz, aunque, actualmente se plantea la idea de usar este tipo de generadores eólicos en la generación undimotriz, como es el caso de la aplicación de un control deslizante, en un generador doblemente alimentado para un sistema de columna de agua oscilante (Barambones, 2018).

El PTO cumple la función de recolectar la energía cinética proveniente de las olas del mar, y por medio de un acople PTO-generador se transfiere la energía cinética recolectada al generador DFIG. Existen diversas clasificaciones de PTO para la generación undimotriz, y se optó por el tipo absorbedor puntual porque se adapta a las condiciones del Cabo de la Vela, debido a sus dimensiones y su facilidad en el mantenimiento, disminuye los costos de operación. El PTO es un elemento indispensable, por ello se elabora un modelo realista, que consta de dos cuerpos unidos entre sí, la primera parte consiste en un flotador que se entrelaza con la masa sumergida. Finalmente, con los modelos eléctrico (generador DFIG)



y mecánico (sistema PTO), se estructura el modelo WEC generalizado, para posteriormente proceder con el control de la potencia extraída.

El documento se estructura en cuatro capítulos, en el capítulo I, se hará una introducción general de la energía renovable a nivel mundial, posteriormente se analiza la posición de las energías renovables en Colombia, presentando como una opción la generación undimotriz, además de sus diversas estrategias de control, se recalca las principales ventajas que presenta este método de generación. En el capítulo II, se realizará un estudio del potencial de generación undimotriz, a partir de la modelación matemática, una vez determinadas las entradas del sistema (variación del recurso primario), con estas entradas del sistema se procede a la implementación en Matlab y verificar la oscilación en la altura de las olas. El capítulo III se modela el generador undimotriz, a su vez, se subdivide en dos partes fundamentales, el modelo de PTO en el que se da a conocer el método para la recolección de energía mecánica, y el modelo eléctrico del WEC, que es el encargado de realizar la conversión de energía. El capítulo IV se propone un control PI para minimizar las fluctuaciones de potencia con base en los parámetros y una señal de referencia establecida.

## **Abstract**

Colombia is a clear example of dependence to produce electrical energy, which is subject to hydraulic and thermal generation to a lesser extent (Moreno García, 2016), The climate of Colombia is characterized by its variations, which makes it difficult to forecast (Puertas Orozco, 2008).. The energy sector is affected because of this variation, for example the one caused in 1992, when Colombia suffered a rationing of electrical energy due to the phenomenon of the child (Valencia, 2016), it is essential to carry out a diversification in its energy matrix, an option that is proposed is the use of renewable energies, more specifically wave energy (generated by the waves), but due to the variation of its primary resource, generators suffer from energy fluctuations (Hansen et al., 2018). To this end, a control over the generator is proposed in order to minimize these sudden energy changes and maximize the power obtained from the primary resource, and subsequently inject this power into a microgrid, which supplies electrical energy to a community.

The WEC (Wave Energy Converter) is the device that, as a whole, forms the complete wave generation system, that is, it is the physical structure that converts the mechanical energy of the waves into electrical energy. The WEC in practical terms is subdivided into two parts: the electric generator and the power take-off (PTO) or power take-off system. The electric generator of this project was based on a Double Fed Induction Generator (DFIG) wind generator or doubly fed induction generator, more specifically the generator Indar NCR-450-L / 4, which has characteristics similar to those of a wave generator, it provides power with a wide range of kinetic energy variations, it has the property of operating at variable speed, it has small dimensions compared to similar generators, it doesn't require an external source to generate electricity. Due to these characteristics and the lack of information on a wave power generation model that allows determining the system plant, a 100% wave power electrical model wasn't proposed, although the idea of using this type of wind generators in wave power generation is currently being raised, as is the case of the application of a slider, in a double-powered generator for an oscillating water column system (Barambones, 2018).

The PTO fulfills the function of collecting the kinetic energy from sea waves, and through a PTO-generator coupling the collected kinetic energy is transferred to the DFIG generator. There are various PTO classifications for wave power generation, and the point absorber type was chosen because it adapts to the conditions of Cabo de la Vela, due to its dimensions and its ease of maintenance, it reduces operating costs. The PTO is an indispensable element, for this reason a realistic model is developed, consisting of two bodies joined, the first part consists of a float that interlocks with the submerged mass. Finally, with the electric (DFIG generator) and mechanical (PTO system) models, the

generalized WEC model is structured, to later proceed with the control of the extracted power.

The document is structured in four chapters, in chapter I, there will be a general introduction of renewable energy worldwide, later the position of renewable energies in Colombia is analyzed, presenting wave power generation as an option, in addition to its various control strategies, the main advantages of this generation method are emphasized. In chapter II, a study of the wave generation potential will be carried out, based on mathematical modeling, once the inputs of the system (variation of the primary resource) have been determined, with these inputs of the system we proceed to the implementation in Matlab and verify the oscillation in the height of the waves. Chapter III models the wave generator, in turn, it is subdivided into two fundamental parts, the PTO model in which the method for the collection of mechanical energy is disclosed, and the electrical model of the WEC, which is in charge of carrying out the energy conversion. Chapter IV proposes a PI control to minimize power fluctuations based on the parameters and an established reference signal.

## **Estado del arte**

El documento de (Wang et al., 2018), hace una revisión de gran parte de las estrategias de control para sistemas de conversión de energía undimotriz. El artículo empieza con una breve descripción de cómo están las energías renovables no convencionales en el mundo. El dióxido de carbono ha aumentado de manera considerable en los últimos años, el autor piensa que ahora es el momento de crear conciencia e implementar las nuevas formas de generar la energía eléctrica, en este caso la energía undimotriz. El artículo se divide en 4 partes, comienza explicando cómo se forma la energía de las olas, muestra el modelo matemático para hallar el potencial de las olas, teniendo en cuenta la variación del periodo y la altura de la ola. Posteriormente se abre una sección para dar a conocer cuáles son los diferentes sistemas de conversión de energía y de cómo se clasifican, esta clasificación se hace por el principio de funcionamiento y el sistema de conversión secundario. En la tercera parte habla sobre los convertidores electrónicos de potencia, ya que, en la mayoría de WECS, la salida de corriente es trifásica de diferente frecuencia, es fundamental la electrónica de potencia, con los convertidores para poder inyectarle potencia a la red. La última parte hace una revisión del tema de control, en la energía undimotriz se pueden clasificar tres tipos de control, estos están clasificados según qué variable controlan. El primer tipo de control es el control hidrodinámico, que es basado en la forma geométrica del generador y la maximización de la eficiencia se efectúa en la parte de diseño y fabricación. Otra forma de controlar el generador es en el PTO, en el que se concentra en la parte de captura del recurso primario y el equipo eléctrico. Una de las principales conclusiones que dejan los autores, es difícil calcular la contribución de cada lazo de control por separado, pero para maximizar la eficiencia general, se debe crear un algoritmo robusto, que tenga en cuenta cada una de las variables.

En el artículo de investigación (Ilyas et al., 2014), identifica los principales desafíos que se tienen en la energía undimotriz, comienza explicando el problema de la generación de bajas frecuencias de las olas y la capacidad que debe tener el generador para entregar a la red una corriente estable, esto sin contar que las olas en alta mar son impredecibles y los dispositivos tienen que estar diseñados para poder trabajar en condiciones extremas. Otra parte fundamental de los desafíos es que el mantenimiento preventivo de los generadores se vuelve tedioso dependiendo de donde se encuentran instalados. La energía de las olas está muy atrasada con respecto a las demás energías renovables no convencionales en términos de implementación, pero es prometedora para mitigar los efectos de gases invernadero.

Uno de los continentes que tienen un desarrollo mayor con respecto a los demás continentes es el Europeo, es por eso que en el documento (Magagna & Uihlein, 2015), describe como está el continente con respecto a la generación de energía eléctrica con la energía de las olas. Según los autores, más del 50% de las inversiones en la energía undimotriz lo hace este continente. En reino unido la energía de las olas alimenta 0.8 GWh de electricidad a

la red. Las falencias que presenta la generación de energía undimotriz son: desarrollo de tecnología, finanzas y mercados, problemas administrativos y disponibilidad de la red.

## Capítulo I: Energías renovables y la generación undimotriz.

### 1.1 Introducción.

Las fuentes no convencionales de energía renovable han comenzado a incursionar de manera directa con el mercado energético mundial, esto se debe a diferentes aspectos económicos, sociales y ambientales. Es bien conocido que las fuentes no convencionales de energía renovable son económicamente competitivas contra las fuentes habituales de generación, además de presentar beneficios ambientales, y ofrecer un suministro a comunidades aisladas de los centros de consumo (IDMA, 2018).

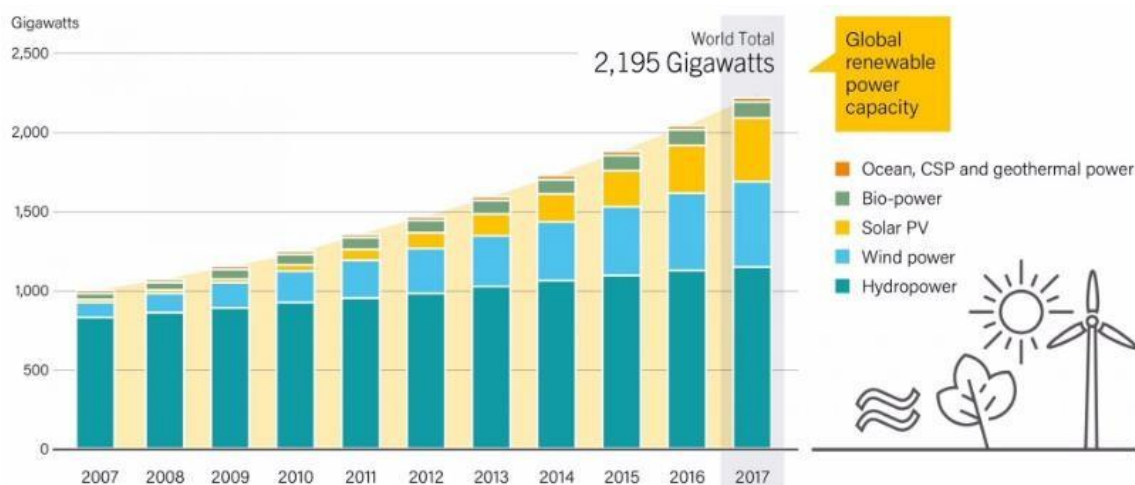


Figura 1. Situación global de las energías renovables (IDMA, 2018).

La figura 1 muestra la situación de las energías renovables en el mundo, en la última década se ha duplicado la producción de energía renovable pasando de 1000 Gigawatts a 2195 Gigawatts, se presentó un incremento notable en la generación eólica y fotovoltaica, debido a, los avances tecnológicos que facilitan su puesta en marcha, esta generación suplende necesidades energéticas como la calefacción, refrigeración y transporte, que en conjunto representan aproximadamente cuatro quintas partes de la demanda global de energía final (IDMA, 2018).

El mundo presenta una gran dependencia energética de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural, y carbón. Estos recursos son finitos, además contribuyen a la generación gases de efecto invernadero que, sumados con las coyunturas geopolíticas y económicas, han generado la necesidad en muchos países de iniciar una transición energética hacia recursos de carácter renovable. Cuando se presenta la disponibilidad del uso de alguna de las energías mencionadas anteriormente, y se posean condiciones geográficas favorables para un mejor aprovechamiento costo-efectiva y en la medida que se incentive la investigación, desarrollo y despliegue comercial de las tecnologías

asociadas, facilitara la incursión en la matriz energética mundial de este tipo de generación renovable.

En Colombia, la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional se encuentra regulada por la ley 1715 de 2014 (UPME, Ley 1715, 2014). Esta ley tiene por objetivo promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía en el sistema energético nacional. Teniendo en cuenta su participación en el mercado eléctrico, en las zonas no interconectadas, y su apoyo en el desarrollo económico sostenible, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Las finalidades de esta ley es orientar políticas públicas y definir los instrumentos tributarios, para incentivar la inversión, la investigación, el desarrollo, y la utilización de estos tipos de energías (UPME, Ley 1715, 2014).

La matriz energética colombiana, se caracteriza por ser relativamente rica tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables, con una producción total de energía de unos 5290 PJ (Petajulio). De los cuales se exportan aproximadamente 69% principalmente en forma de carbón minera y petróleo, y utiliza un 31% del cual, cerca del 78% corresponde a recursos fósiles y el 22% a recursos renovables (UPME, Integración de las energías, 2015). En cuanto a capacidad instalada la matriz energética de Colombia es de 15645 MW, cuenta con una amplia participación de energía hidroeléctrica que representa cerca de un 70% de la generación, seguido de plantas térmicas con un 28,5%, finalmente energía eólica y Cogeneración Biomasa completan la capacidad instalada como se muestra en la figura 2.

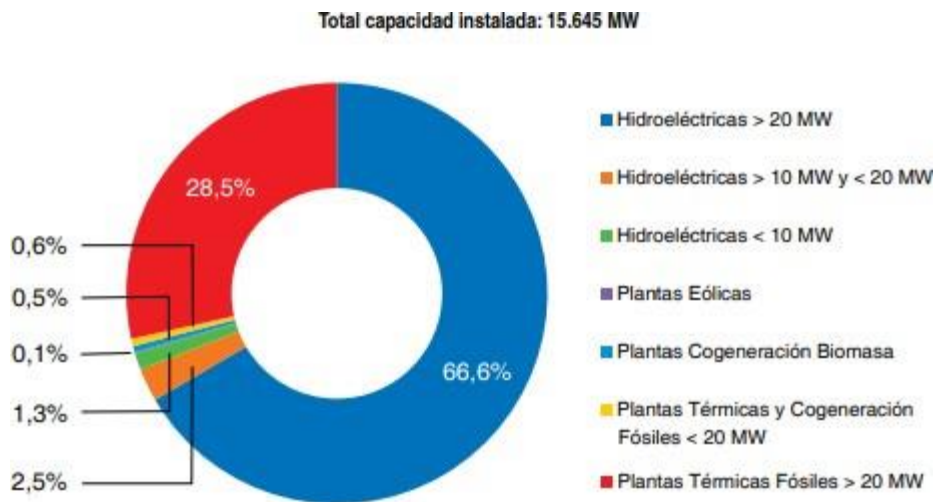


Figura 2. Capacidad de generación eléctrica del Sistema Interconectado Nacional (UPME, Integración de las energías, 2015).

La participación de fuentes no convencionales de energía en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) es del 2,71% en capacidad instalada, hecho que obedece a las barreras existentes para la mayor penetración de estas fuentes, sin embargo, Colombia presenta un sistema eléctrico nacional bajo en emisiones de carbono y con capacidad para atender su propia demanda; no obstante, las tendencias en reducción de costos y mitigación de riesgos asociadas con las fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER), sin mencionar las experiencias exitosas en el ámbito internacional y proyectos locales ambiciosos hacen que se adopten estas formas de producción. La energía de las olas oceánicas puede proporcionar el 10% o la demanda mundial de energía. La concentración especial de la energía de las olas es casi cinco veces mayor que la de la energía eólica (a 20 m sobre el nivel del mar) y de 20 a 30 veces mayor que la de la energía solar. (Luckins, 2016).

Colombia es un país privilegiado, ya que, debido a su posición geográfica tiene acceso a dos océanos (Colombia, uno de los 21 países del mundo con dos océanos, 2017), facilitando su producción de energía por sus costas. La utilización de la energía undimotriz es una opción atractiva para generar electricidad, que bien como se mencionó anteriormente es una tecnología incipiente, que necesita de una investigación exhausta, para incentivar el desarrollo y despliegue comercial de las tecnologías asociadas, de esta manera, se puede aprovechar ese potencial energético. Pero como la mayoría de fuentes no convencionales de energía renovable, tienden a presentar variaciones en su recurso primario variando según, la hora, el día y la estación del año (El reto de almacenar la energía de fuentes renovables en el futuro, 2018), a causa de estas variaciones, se generan fluctuaciones en la potencia suministrada por el generador, esto genera inestabilidad en el sistemas, como son: picos de tensión, ausencia de tensión, daños en los equipos, entre otros (Taccone, 2015). Una solución para estos inconvenientes es la de diseñar un control de un generador undimotriz, que se adapte a las condiciones del oleaje que se presenta en la costa caribe colombiana.

Se pretende realizar el diseño del control de un generador undimotriz tipo boya, con el fin de minimizar las fluctuaciones de potencia del recurso primario, esto con el fin de proporcionar un servicio de electricidad de manera confiable a través del uso de FNCER, en este caso la undimotriz, además de disminuir el uso de combustibles fósiles y el impacto ambiental, esto mediante el uso del modelado matemático. En una primera fase se realiza el modelo del generador tanto mecánico como eléctrico, finalmente se utilizará las estrategias de control para minimizar las fluctuaciones de potencia.



## **1.2 Estrategias de control.**

Existen diversidad en las estrategias de control para regular la generación de potencia en energías renovables, debido principalmente a la variación en el recurso primario. Específicamente en el caso de la generación undimotriz, se ha ensayado con distintos métodos con el fin de regular, la potencia mecánica recibida del sistema de toma de fuerza, además de hacer un control robusto sobre el generador.

Entre las principales estrategias de control que se aplican en la generación undimotriz se puede encontrar.

### **1.2.1 Modelo de control predictivo (MPC).**

El control predictivo del modelo (MPC) está enfocado en mejorar la producción de energía de un convertidor de energía inercial de las olas del mar, el objetivo de este método es realizar la compensación en diferentes ámbitos de control, como la producción de energía, el esfuerzo de control y la limitación de velocidad a través de una formulación de MPC adecuada (Bracco, 2020). Para garantizar unas condiciones de trabajo adecuadas, es necesario conocer las restricciones mecánicas y eléctricas del generador undimotriz, como las mencionas en capítulos anteriores. Con el fin de solucionar el problema del rendimiento en el generador undimotriz, se implementa un modelo lineal del generador, esto con la finalidad de, transferir la dificultad que se presenta en el MPC a un programa cuadrático, que permite una implementación rápida en línea del controlador por medio de un solucionador eficiente (Bracco, 2020). MPC es una estrategia matemática basada en modelos con múltiples variables que constan de dos elementos: el modelo del sistema que se está controlando y un optimizador que controla las acciones futuras del sistema. La ley de control se obtiene mediante la optimización de la función de costo la cual tiene en cuenta la variación del valor de referencia real y el resultado previsto (Luckins, 2016), El circuito equivalente del control se muestra en la figura 3.

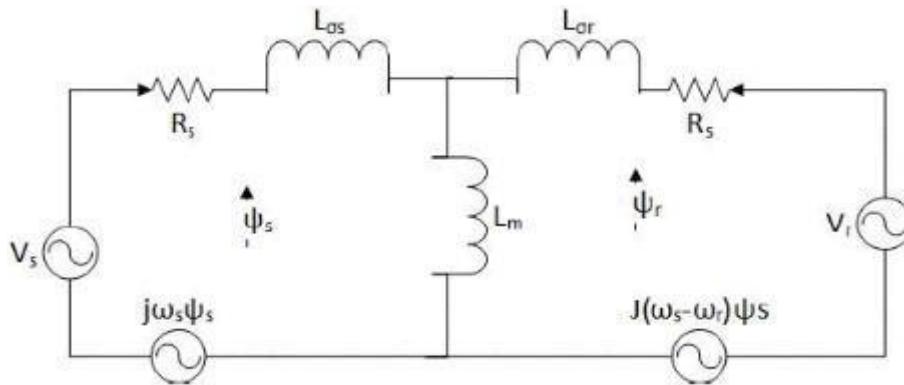


Figura 3. Circuito equivalente de DFIG (Luckins, 2016).

### 1.2.2 Control de velocidad rotacional.

El control realizado por la Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz (EIVG) y la Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa (Eibar) de la Universidad del País Vasco/Euskal. Consta de un sistema de control robusto para un generador undimotriz del tipo columna de agua oscilante, el cual consta de un generador doblemente alimentado, debido a, que presenta gran variabilidad de velocidades. El control se enfoca en controlar la velocidad de rotación de la turbina. Esto con el fin de aumentar la eficiencia del generador, a partir una velocidad invariable. En concreto se aplicó un sistema de control deslizante, el cual, se distingue por un correcto funcionamiento ante condiciones adversas y fuerzas externas, el control fue aplicado de manera escala, con resultados satisfactorios (Oscar Barambones, 2018).

Se puede transformar en un flujo de aire oscilante utilizando el dispositivo OWC que se muestra en la figura 4.

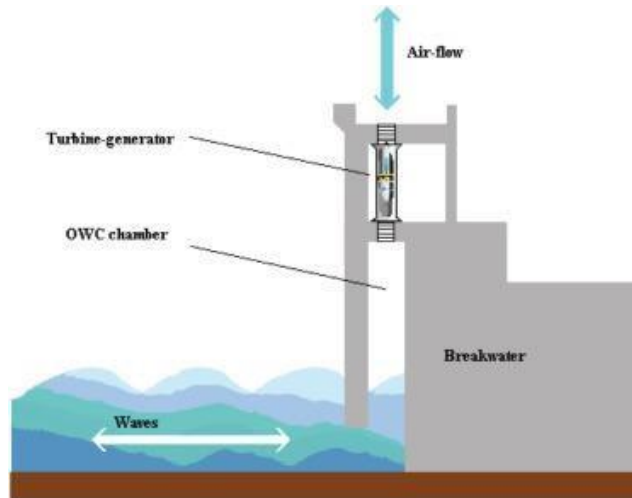


Figura 4. Sistema de potencia de onda (Oscar Barambones, 2018).

Los resultados muestran que aumenta la extracción de energía del oleaje, mediante el control que la función de llevar la velocidad de la turbina a una máxima eficiencia cabe resaltar que, en condiciones normales, la inercia de las turbinas puede ser mayor y dificultara que el sistema llegue a una velocidad deseada (Oscar Barambones, 2018).

### 1.2.3 Control de amplitud y fase.

La tesis se centra en calcular e implementar distintas estrategias de control de energía undimotriz, el control consiste en inspeccionar la componente de fase de velocidad (componente desfasada  $90^\circ$ ). Para ello se evalúa tres tipos de control sobre dos variables en específico como son la amplitud y la fase, además, de un tercer control que consta de una combinación de las variables anteriormente mencionadas. El control de amplitud hace referencia a las fuerzas del sistema respecto a las fuerzas intrínsecas de la boya, por medio de la variación de la amplitud. El control de fase se trata de variar el ángulo de la velocidad y el de la fuerza del generador (senoidales). Ahora bien, el control de amplitud y fase se compone de la fuerza ejercida en el sistema de toma de fuerza, con la finalidad de buscar un equilibrio con las fuerzas intrínsecas y además presenten un desfase de  $90^\circ$  respecto a la velocidad (Mena, 2018).

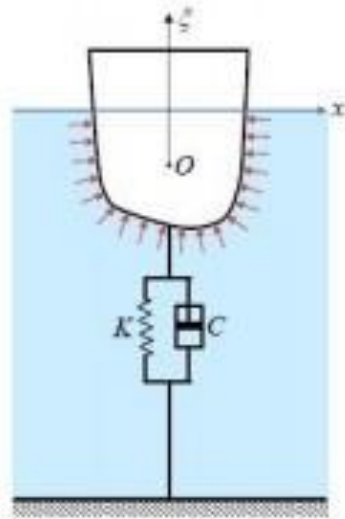


Figura 5. Circuito físico del PTO (Mena, 2018).

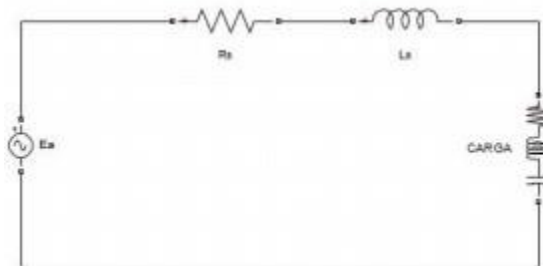


Figura 6. Modelo eléctrico del estator (Mena, 2018).

La figura 5 describe el circuito físico del PTO para este tipo de generador, teniendo tres principales elementos la masa, amortiguador y el resorte y en la figura 6 se tiene el modelo eléctrico del estator contando con tres elementos, resistencia, inductancia y por último la carga.

Las formas de onda que se usan para implementar el control son: fuerzas ejercidas por el sistema de toma de fuerza sobre la boya y la potencia extraída del generador, según el modelo de toma de fuerza con el modelo hidrodinámico. Los resultados de la investigación reflejan que el control de amplitud y fase presenta una mayor extracción de potencia para el caso estudiado, se debe tener en cuenta la capacidad nominal de la máquina para evitar averías, en caso hacer una reevaluación de los casos para establecer un margen con intervalos aceptables (Mena, 2018). En la figura 7 describe el control por banda de histéresis.

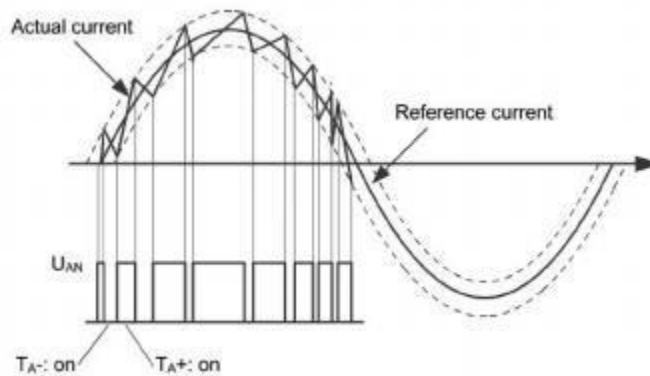


Figura 7. Control por banda de histéresis (Mena, 2018).

#### 1.2.4 Control Electrónico.

En el artículo se investiga sobre el modelo del generador undimotriz tipo Arquímedes, y las consecuencias de la conexión al sistema interconectado nacional. uno de los problemas que se presentan en la interconexión a la red es la posibilidad de resonancias subsíncronicas por las bajas oscilaciones del oleaje, además, de las oscilaciones de potencia. Se plantea un control manual para evitar las resonancias causadas por el oleaje, el control tiene el fin de regular la presión del aire y el volumen dentro de la cámara cilíndrica por medio del bombeo de agua, esto ocasiona que la regulación de la resonancia no sea de manera adecuada (Garcés, 2015). En la figura 8 muestra el generador utilizado en el documento un convertidor tomando el principio de Arquímedes como base de su funcionamiento.

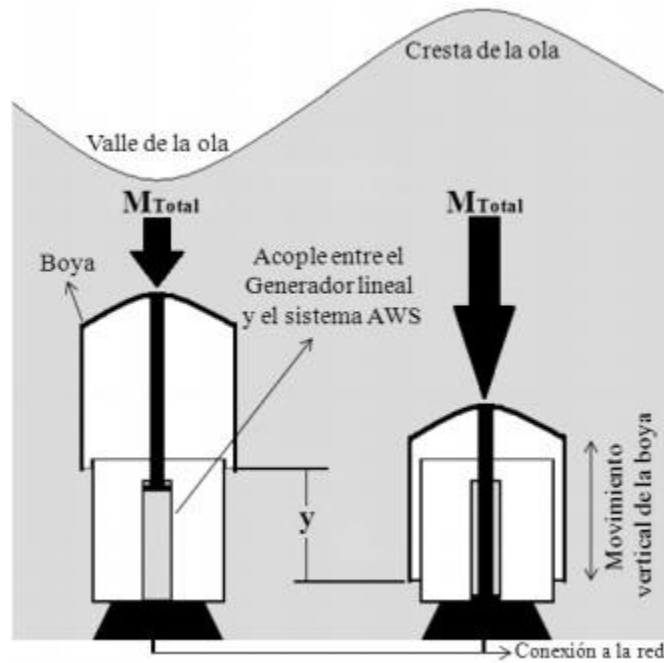


Figura 8. Principio de funcionamiento convertidor Arquímedes (Garcés, 2015).

Con las limitaciones que se presentan en el control manual se plantea un nuevo sistema de control, el control electrónico regula la fuerza de rigidez que el generador aplica al modelo de traslación, esto permite una mayor facilidad en la puesta en práctica y más rápido en su regulación (Garcés, 2015).

## Capítulo II: Potencial de generación undimotriz

### 2.1 Métodos de producción de la energía eléctrica.

El método general para producir energía eléctrica es a través de generadores eléctricos rotatorios convencionales de alta velocidad (BDrew A. R., 2015). Uno de los mayores desafíos de los convertidores de energía de olas, es el de manejar los distintos generadores, porque dependen de un recurso primario variable. Los mecanismos de obtención de energía eléctrica se pueden clasificar en dos tipos: generador eléctrico lineal, hidráulico, o por medio de turbina como se muestra en la figura 9.

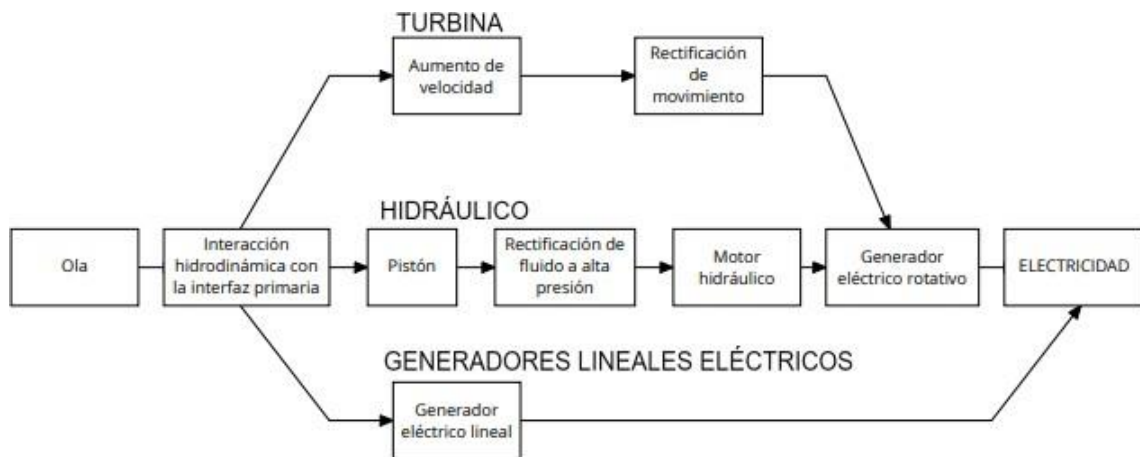


Figura 9. Dispositivos de generación de energía (BDrew A. R., 2015).

### 2.2 Investigación de los métodos.

El comportamiento de las olas de mar siempre ha sido una gran incógnita para el ser humano, gran variedad de científicos ha dedicado parte de su vida para la creación modelos matemáticos (espectro Pierson-Moskowitz) que permiten predecir y estudiar a fondo cómo funciona el movimiento de las superficies marinas. Es por esto que a lo largo de los años han surgido gran variedad de modelos y métodos para estimar el potencial del mar y conocer los movimientos del oleaje.

La definición de ola se da como un tipo de oscilación que se produce en la superficie del mar, las olas oceánicas pueden generarse por diversas maneras, tales como terremotos o la interacción de las fuerzas de los planetas del sistema solar, pero la principal causa de la generación es el viento (Wang, Isberg, & Tedeschi, 2018), el cual sopla la superficie marítima.

Las olas cuentan con las siguientes características (Neill & Hashemi, 2018):

- Longitud de onda (L): Distancia periódica de la onda.
- Altura de onda (H): Distancia pico a pico.
- Periodo (T): Distancia pico a pico entre valles o crestas, es el tiempo que dura la ola en recorrer su longitud de onda.

El tamaño de las olas depende de los siguientes factores:

- Velocidad de la corriente marina
- Tiempo en el cual el viento impacta la ola.
- Distancia donde la energía del viento se transfiere al mar para formar la ola.

Energía Cinética: Por definición sabemos que la energía cinética es el trabajo para el cual es necesario mover una masa desde un punto en reposo hasta una velocidad cualquiera. Partiendo de esto, las olas son el producto de las corrientes circulares en su superficie, donde su altura corresponde al mismo tamaño de la ola, esta altura va disminuyendo a medida que las olas se van acercando a aguas más tranquilas, estas oscilaciones circulares son las que se aprovechan para mover un generador eléctrico (Neill & Hashemi, 2018).

### 2.2.1 Modelo para calcular potencial de las olas.

Para calcular el potencial del mar se tienen varios modelos, lo que se diferencia unos de otros es con respecto a que variables se calculan, como por ejemplo la altura de la ola, el periodo de la ola, la velocidad de las corrientes marinas (Neill & Hashemi, 2018).

Modelo de onda proporcional: Es un modelo dependiente de la altura de la ola, el periodo, la gravedad y el peso específico del mar. Parámetros que caracterizan a una ola son:

- Longitud de onda: Es la distancia entre dos valles o dos crestas consecutivos. La ecuación que la caracteriza es la numero (1):

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (1)$$

Siendo: g=Aceleración de la gravedad; T= Periodo de la ola.

- Periodo de la ola: Tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes de la onda. Viene dado por la ecuación (2).

$$T = 2\pi\omega \quad (2)$$

$\omega$ =Frecuencia de la ola.

- La ecuación (3) describe como es el comportamiento de la velocidad de propagación de la onda.



$$c = \lambda T = \omega k \quad (3)$$

Dónde el número de onda, esta expresado en la ecuación (4).

$$k = 2\pi\lambda \quad (4)$$

- La ecuación (4) es la celeridad de grupo.

$$C_g \frac{C}{2} = \frac{gT}{2\pi} \quad (5)$$

La potencia depende de la altura de la ola, del periodo o frecuencia del movimiento. Las siguientes fórmulas son las expresiones de la energía, del flujo de energía y de la potencia por metro de frente de ola.

- La energía total está dada por la expresión (6).

$$E_t = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (6)$$

Donde  $\rho$  es el peso específico del mar,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $H$  diferencia entre valle.

- El flujo de energía se muestra en la ecuación (7).

$$F_E = \frac{\rho g H^2}{8} * C_g = \frac{\rho g^2 T}{32\pi} \quad (7)$$

Con respecto al oleaje, existen gran variedad de modelos que pretenden estimar el movimiento de las olas, cada uno de ellos toma diferentes características del mar para poder hacer una estimación del movimiento.

Algunos autores toman las olas con comportamiento lineal (Torres Parra & Lonin, 2007), esto quiere decir que trabajan las olas como ondas sinusoidales, que a lo largo del tiempo no tienen variaciones de frecuencia y amplitud, esto quiere decir que estos valores son constantes. Pero es bien sabido que en la vida real las olas varían a largo del tiempo, debido a que éstas dependen de varios factores, tales como: la profundidad, la velocidad del viento, las corrientes marinas, entre otras.

La finalidad de la descripción del oleaje real es desarrollar un modelo que imite todas las irregularidades que se puedan presentar en la superficie del mar (Ripoli & Muñoz, 2015).

El desarrollo de los modelos de un espectro de oleaje consiste en separar la ola en una serie de múltiples armónicos, esto conlleva a que se aproxime al estado real del mar mediante la suma de estos simples armónicos (Ripoli & Muñoz, 2015).

La principal diferencia de los espectros de oleaje es que cada uno toma diferentes características de la superficie marina para poder establecer una relación y estimar el movimiento del mar. A continuación, se presentan los principales espectros.

### 2.2.2 Espectro Pierson-Moskowitz (1964).

Como su nombre lo indica fue un modelo propuesto por Pierson-Moskowitz en el año de 1964. Es válido para oleaje totalmente desarrollado (Ripoli & Muñoz, 2015). La principal característica del modelo es que los autores asumieron, que el viento sopla constantemente sobre un gran periodo de tiempo y un área grande y, las olas se equilibraran con el viento (Stewart, 1987).

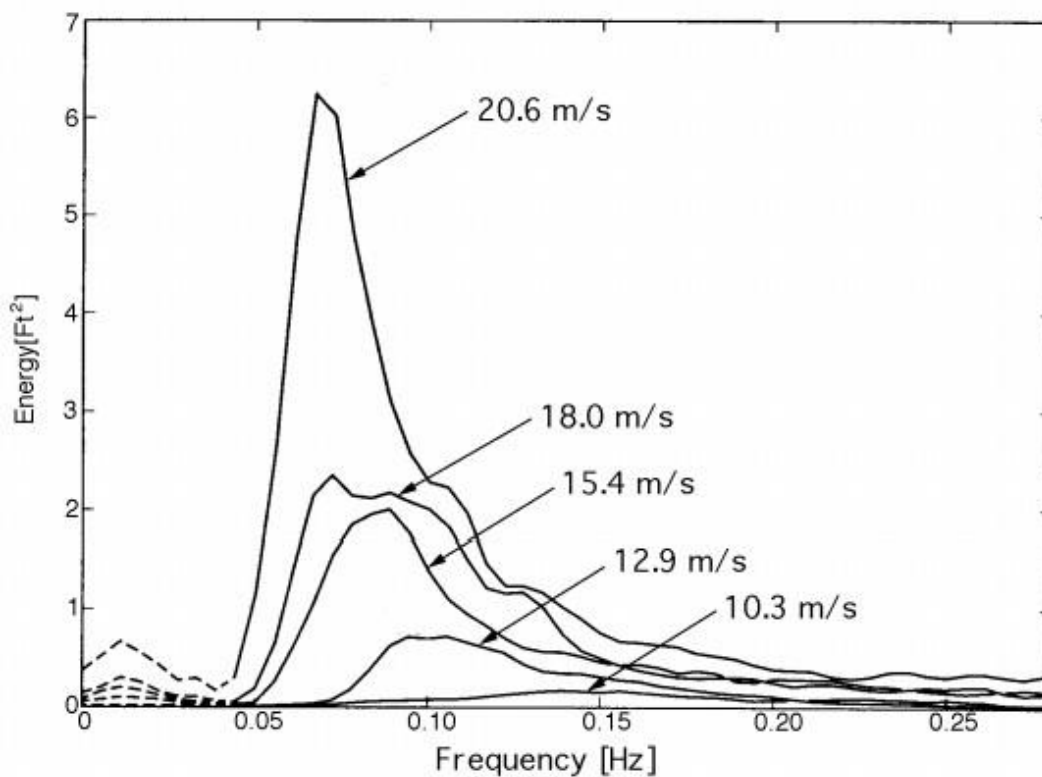


Figura 10. Espectros de olas de un mar completamente desarrollado para diferentes velocidades del viento según Moskowitz (Stewart, 1987).

Para desarrollar el espectro tomaron datos directamente en el océano atlántico, mediante acelerómetros. Los primeros datos que recolectaron fueron las características de olas cuando el viento soplabla de manera constante en la superficie marina, posteriormente se tomaron los datos a diferentes velocidades del viento, por último, se analizaron los datos y descubrieron que los espectros se comportaban como lo muestra la Figura 10.

La ecuación que describe el espectro es la (8):

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[ -\beta \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right] \quad (8)$$

Donde  $\omega = 2\pi f$  y  $f$  es la frecuencia en Hertz.  $\alpha = 8.1 * 10^{-3}$ ,  $\beta = 0.74$ ,  $\omega_0 = \frac{g}{V_{19.5}}$  y  $V_{19.5}$  es la velocidad del viento a 19.5 m.s.n.m.

La frecuencia de pico se puede calcular mediante la expresión (9).

$$\omega_p = 0.877 \frac{g}{V_{19.5}} \quad (9)$$

La altura significativa de la ola se calcula mediante la integral de  $S(\omega)$ , obteniendo la ecuación (10).

$$\xi^2 = 2.74 * 10^{-3} \frac{(V_{19.5})^4}{g^2} \quad (10)$$

Finalmente, la altura significativa de ola, mediante el espectro de Pierson-Moskowitz la describe la expresión (11):

$$H_{\frac{1}{3}} = 0.21 \frac{(V_{19.5})^4}{g} \approx 0.22 \frac{(V_{10})^4}{g} \quad (11)$$

En la figura 11 se puede observar cómo es el comportamiento de alturas y periodos significativos, calculados con el espectro de Pierson-Moskowitz.

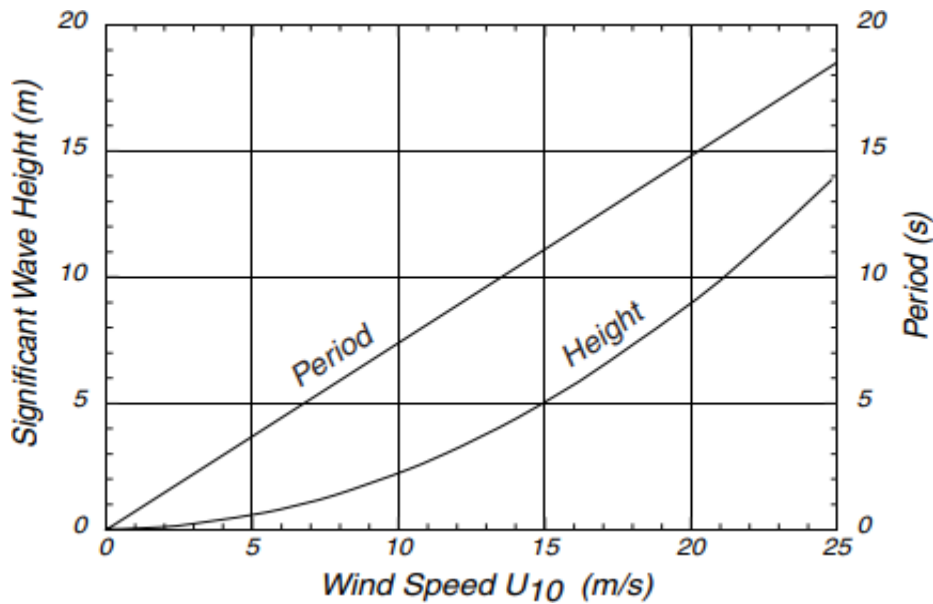


Figura 11. Altura y período de ola significativos en el pico del espectro de un mar desarrollado calculado a partir del espectro Pierson-Moskowitz (Stewart, 1987).

### 2.2.3 Espectro Jonswap (1973).

La principal diferencia que posee con el espectro anteriormente mencionado es que este se desarrolla para mares parcialmente desarrollados, esto quiere decir que no todas las ondas están presentes (Ripoli & Muñoz, 2015).

Para desarrollar el espectro, se realizaron pruebas en el mar del norte, la principal característica que encontraron fue que el espectro de onda nunca está completamente desarrollado, siempre continúa desarrollándose a lo largo del tiempo. En la figura 12 se observa el espectro que se planteó, siguiendo el descubrimiento realizado.

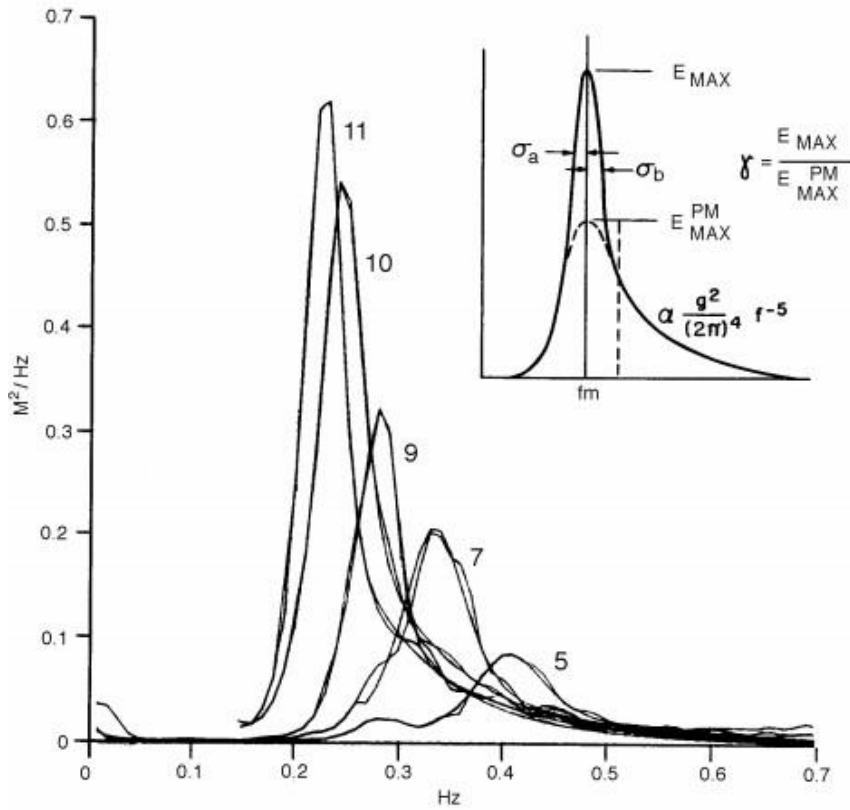


Figura 12. Espectro de olas de un mar en desarrollo para diferentes recuperaciones (Stewart, 1987).

Las ecuaciones (12) (13) representan el espectro de Jonswap:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^r \quad (12)$$

$$r = \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_p)}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (13)$$

Dónde las expresiones (14) (15) (16) representan los coeficientes del modelo.

$$\alpha = 0.076 \left( \frac{V_{10}^4}{Fg} \right) \quad (14)$$

$$\omega_p = 22 \left( \frac{g^2}{V_1^4 F} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

$$r = \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_p)}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (16)$$

$$\sigma = \begin{cases} \gamma = 3.3 & \omega \leq \omega_p \\ 0.07 & \omega \leq \omega_p \\ 0.06 & \omega > \omega_p \end{cases}$$

$F$  Es la distancia donde el viento sopla a velocidad constante. El coeficiente  $\alpha$  determina cuanto puede crecer la onda a lo largo del tiempo, y el coeficiente  $\gamma$  provoca que el pico del espectro sea más pronunciado, como se observa en la figura siete, esto provoca una mejora en las interacciones no lineales (Stewart, 1987).

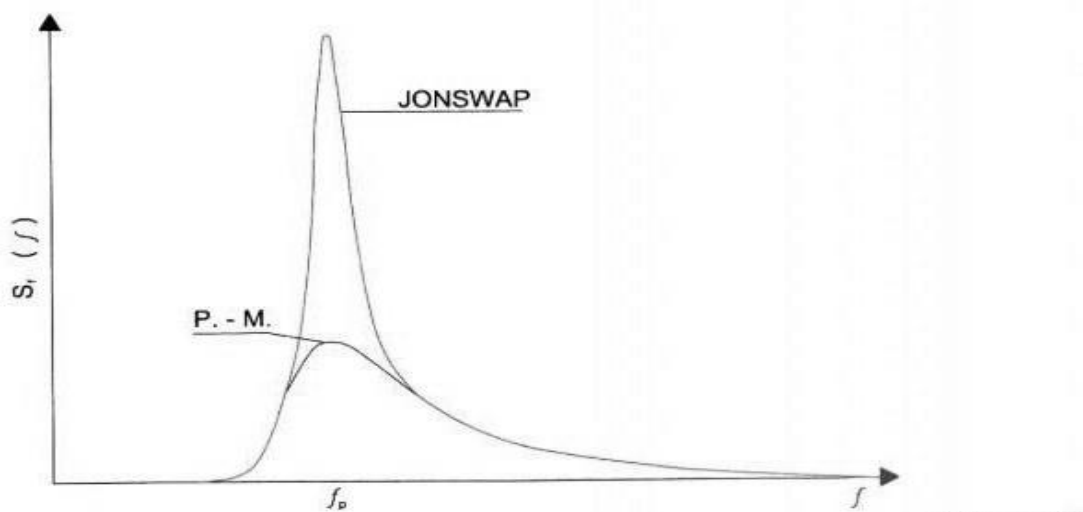


Figura 13. Comparativa entre el modelo de Jonswap y el Pierson-Moskowitz.

En la figura 13 muestra una comparativa entre los espectros Jonswap y Pierson-Moskowitz, evidenciando un pico más alto en el espectro Jonswap esto es debido a que a la inclusión del coeficiente  $\gamma$ .

### 2.3 Selección zona de interés.

Es fundamental conocer los datos de altura de ola y de la velocidad del viento, debido a esto, es que se requieren zonas donde se puedan extraerlos.

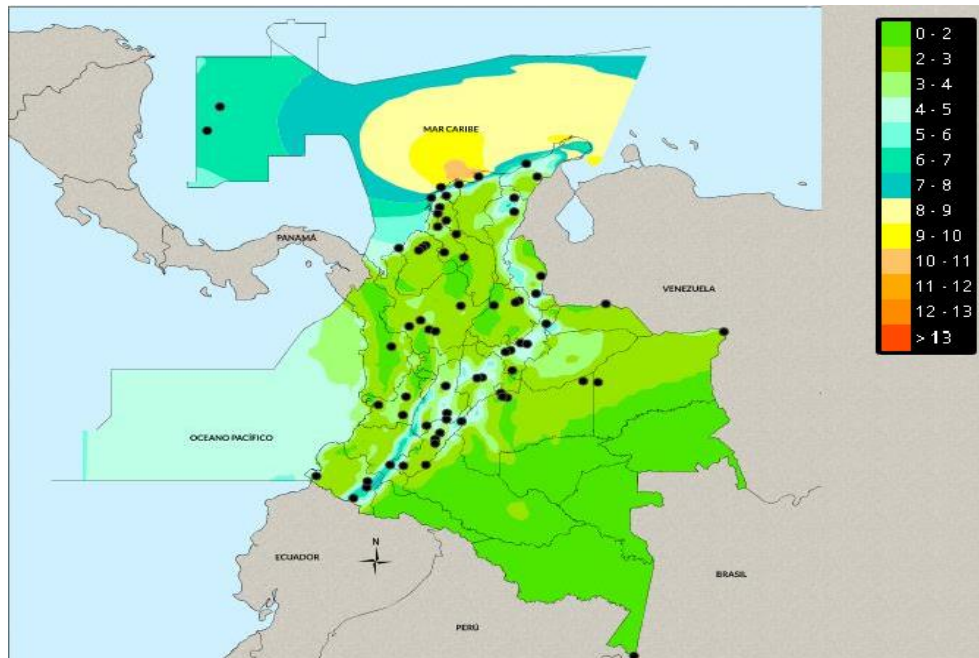


Figura 14. Comportamiento de la velocidad del viento en las costas Colombianas (Atlas Interactivo - Vientos - IDEAM, 2020)

En la figura 14, se observa como es el comportamiento del viento en las zonas costeras colombianas. Se evidencia que, en la parte del mar caribe, se presenta la mayor velocidad de viento, es por eso por lo que se selecciona como zona de estudio El Cabo de la Vela, un lugar turístico ubicado en el departamento de la Guajira.

A continuación, se presentan las tablas de los datos recopilados del oleaje y de la velocidad de viento, los datos fueron obtenidos de la empresa Winfinder, la cual es una empresa meteorológica que aporta los datos del estado del mar. Estos datos fueron tomados a diversas horas del día.

Tabla 1. Datos de velocidad de viento en el Cabo de la Vela.

<b>HORA</b>	<b>VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)</b>	<b>ALTURA (m)</b>
00:00	11	2,1
04:00	12	2
07:00	10	1,9
10:00	10	1,8
13:00	11	1,8
16:00	14	1,9
19:00	11	1,9
22:00	9	1,8
01:00	11	1,8
04:00	13	1,9
07:00	12	1,9
10:00	12	1,9
13:00	13	1,9
16:00	15	1,9
19:00	12	2,2
23:00	13	2,2
<b>PROMEDIO</b>	<b>12,6</b>	<b>2,06</b>

*Referencia: Autores.*

#### **2.4 Calculo de potencial.**

Ya teniendo los datos de la zona, se procede a calcular el potencial undimotriz, esto mediante la ecuación siete. En la tabla 2 se observa el potencial undimotriz que tiene el Cabo de la Vela.



Tabla 2. Datos de potencial undimotriz en el Cabo de la Vela.

<b>HORA</b>	<b>ALTURA (m)</b>	<b>POTENCIAL (kW/m)</b>
0:00	2,1	30,25
4:00	2	27,44
7:00	1,9	24,76
10:00	1,8	22,23
13:00	1,8	22,23
16:00	1,9	24,76
19:00	1,9	24,76
22:00	1,8	22,23
1:00	1,8	22,23
4:00	1,9	24,76
7:00	1,9	24,76
10:00	1,9	24,76
13:00	1,9	24,76
16:00	1,9	24,76
19:00	2,2	33,2
23:00	2,2	33,2
<b>PROMEDIO</b>	<b>2,06</b>	<b>27,41</b>

*Referencia: Autores.*

El Cabo de la Vela, es un sitio que tiene gran potencial para la generación undimotriz, obteniendo resultado de 27,47 kW/m en promedio. Analizando desde otra perspectiva, un proyecto de generación undimotriz en esta zona traería un gran desarrollo económico a la región, y tendría un impacto social elevado.

### **2.5 Diseño de algoritmo para la simulación del estado del mar.**

En investigaciones anteriores de proyecto integrador de la facultad de ingeniería eléctrica, se desarrolló un trabajo para determinar el potencial undimotriz de 3 tipos de generadores undimotrices esto mediante una interfaz gráfica realizada en el software de programación Python (ver Anexo B), los resultados se presentan en la figura 15.

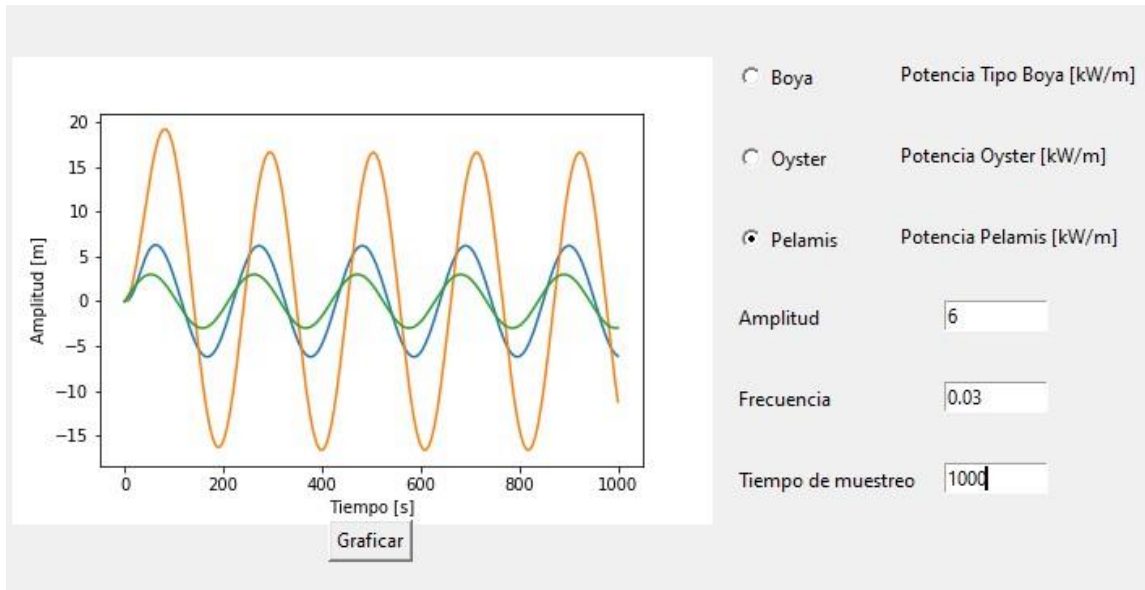


Figura 15. Interfaz gráfica Python.

Se observa en la figura 15, tres señales naranja, azul y verde pertenecen al generador tipo Pelamis, Boya, Oyster respectivamente. La interfaz gráfica está diseñada para observar el comportamiento de los modelos a diferente amplitud de ola y frecuencia, pero tomando como las olas una onda sinusoidal pura y, el principal problema radica en que esta amplitud y frecuencia quedan constante en cada simulación y como se dijo anteriormente el comportamiento real del mar, no es así es debido a esto, se inclina a un espectro para determinar el comportamiento real del oleaje.

Cabe resaltar que el generador que tiene una mayor amplitud es el Pelamis, pero tiene oscilaciones irregulares, lo que representa problemas de inestabilidad de todo el sistema, por lo que se descarta para ser utilizado. El generador tipo Boya presenta un comportamiento estable con la entrada de onda sinusoidal pura, es el generador que tiene más datos de funcionamiento, por lo cual se opta seleccionarlo como la parte mecánica del generador undimotriz para realizarle el control.

Para culminar este capítulo, se realiza la selección de cuál es el espectro que va a caracterizar las irregularidades del mar del Cabo de la Vela, analizando cuáles son las condiciones para que se pueda desarrollar cada espectro. Según la tabla 2 el viento no tiene cambios tan drásticos, esto produce que el mar del Cado de la Vela sea totalmente desarrollado, por lo que se concluye que el espectro indicado para hacer la caracterización del mar sea el Espectro Pierson-Maskowitz.

Partiendo de las ecuaciones ocho y nueve se realiza el diseño del siguiente script en el programa Matlab:

```

function [S] = Espectroonda(Vviento,w)
g=9.81;
A=8.1e-3*g^2;
B=0.74*(g/Vviento)^4;
S=A*w.^(-5).*exp(-B./(w.^4));
end

```

En el anterior script se crea una función que tiene el espectro de Pierson-Maskowitz, las entradas que tiene esta función son la velocidad del viento y la frecuencia angular. Posteriormente se hace la descripción de las olas mediante la teoría lineal. La amplitud de las olas se propaga a lo largo del eje x positivo, y se puede describir mediante componentes, esto se expresa en la ecuación (17).

$$\xi = \sum_j^N A_j \sin(\omega_j t - k_j x + \epsilon_j) \quad (17)$$

Donde,  $A_j$  es la amplitud de la ola,  $\omega_j$  frecuencia circular,  $k_j$  número de onda y por último tenemos  $\epsilon_j$  que es el ángulo de fase aleatorio. Para las aguas profundas hay una relación entre la frecuencia angular y el número de onda, la cual es la ecuación (18).

$$\frac{\omega_j^2}{g} = k_j \quad (18)$$

La amplitud se expresa en la ecuación (19):

$$A = \sqrt{(2S(\omega_j)\Delta\omega_j)} \quad (19)$$

Las ecuaciones (17) (18) y (19) son planteadas en el siguiente Script:

```

function [e1] =genonda(S,w,x,t)

persistent Ph
if isempty(Ph)
    N=length(w);
    Ph=rand(1,N)*2*pi;
end

dw=w(2)-w(1);
g=9.81;
k=w.^2./g;
A=sqrt(2*S*dw);
e1=sum(A.*sin(w.* t-k.*x+Ph));
end

```

El modelo de Pierson-Maskowitz, solo depende de la velocidad del viento, se procede a ingresar los valores de dicha velocidad que tiene el Cabo de la Vela, obteniendo el siguiente comportamiento:

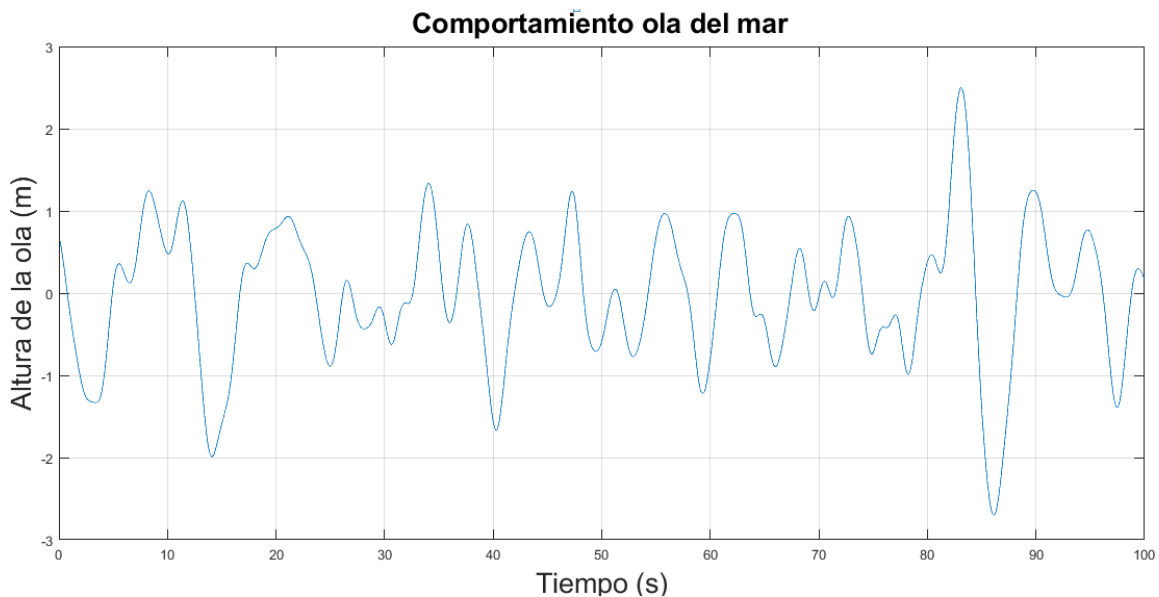


Figura 16. Comportamiento de la amplitud de las olas en el Cabo de la Vela.

En la figura 16, se observa el comportamiento del mar para el Cabo de la Vela, en el departamento de la Guajira, es importante destacar tiene gran semejanza con los datos recolectados en la tabla uno. En ciertos tiempos se determinan que existen picos de altura,

es indispensable evaluar el comportamiento del generador al momento de que se generen estos picos.

## **Capítulo III: Generador undimotriz**

Este capítulo se abarca una breve descripción del generador undimotriz, además los tipos de generadores que se encuentran implementados y una breve clasificación dependiendo de su ubicación en el mar, según las dimensiones y su principio de funcionamiento. Posteriormente procederemos a desarrollar el modelo mecánico y eléctrico con el fin de general un modelo completo, para posteriormente en los siguientes capítulos realizar el control respectivo basado en un modelo que se ajuste lo mejor posible a características realistas.

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Un ejemplo son los generadores de las centrales eléctricas, las cuales transforman la energía mecánica en eléctrica alterna (Benito, 2018). El generador es un dispositivo que como su nombre lo indica genera energía eléctrica (también están incluidos los grupos electrógenos) (MME, 2013) a partir de la energía mecánica (Grupel, 2016). En la actualidad la energía eléctrica es un recurso fundamental en el mundo globalizado y es necesaria desde el funcionamiento de una bombilla hasta dispositivos de gran complejidad como los grandes centros industriales, con el fin de colmar las deficiencias energéticas que se pueden presentar debido a la falencia de los continuo del servicio de electricidad en pequeña escala, y son usados para la alimentación de circuitos de vital importancia como el caso de un hospital o aeropuerto.

Los generadores undimotrices son dispositivos electromecánicos que son los encargados de convertir la energía mecánica de las olas en energía eléctrica (López et al., 2013). En la actualidad hay diversos generadores undimotrices instalados alrededor del mundo, en países tales como Reino Unido, Noruega, Estados Unidos, entre otros, cada uno optando por el que mejor capacidad de adaptación presente ante sus condiciones geográficas, climatológicas, y su capacidad de generación. Existen diversos tipos de generadores y se clasifican según su ubicación, según su tamaño, por último, según su principio de funcionamiento.

### **3.1 Clasificación de generadores undimotrices**

#### **3.1.1 Generadores según su ubicación.**

Existen tres tipos de generadores undimotrices, que se clasifican dependiendo de su ubicación en el mar: Dispositivos en tierra (Onshore), Generadores cerca a la costa (Nearshore), Generadores lejos a la costa (Offshore).

- Dispositivos en tierra (Offshore)

Estos generadores se encuentran ubicados en las orillas de las costas, se instalan en aguas pocas profundas. La principal característica de estos convertidores es la fácil manipulación e instalación (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarría, 2013).

- Generadores cerca a la costa (Nearshore)

Son instalados a pocos metros de la costa, en aguas poco profundas, algunos tienen amarres en suelo marino o simplemente son equipos flotantes (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarría, 2013).

- Generadores lejos a la costa (Offshore)

Son instalados en sitios donde la profundidad del agua supera los 40 m. Debido a que están alejados dificultan en gran sentido realizar el adecuado mantenimiento (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarría, 2013).

En la figura 17 se observa cómo están ubicados los convertidores.

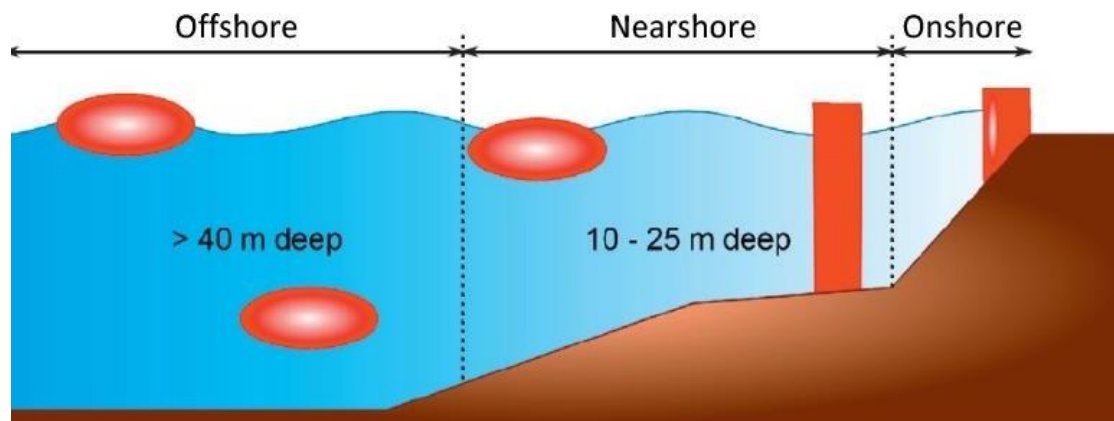


Figura 17. Ubicación de los convertidores de energía de las olas (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarría, 2013).

### 3.1.2 Generadores según su tamaño.

Según el tamaño del dispositivo, se clasifican en Atenuador, Absorbedor Puntual, Terminator.

- Atenuador

Estos dispositivos de conversión son estructuras de gran tamaño a comparación de la longitud de onda, y se instalan en paralelo con respecto a la dirección de onda. (Neill & Hashemi, 2018).

- Absorbedor puntual

Con respecto a la longitud de onda, son más pequeños. Generan electricidad mediante el balanceo, convierte el movimiento sube y baja en movimiento oscilatorio y a partir de ahí genera la electricidad (Falcão, 2010).

- Terminator

En estructura son muy parecidos al atenuador, debido a que son estructuras de larga dimensión, la diferencia consiste es en la forma que se instalan, estos se colocan de manera perpendicular de la dirección de la propagación de onda (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarria, 2013).

En la figura 18, se observa cada uno de los anteriores convertidores.

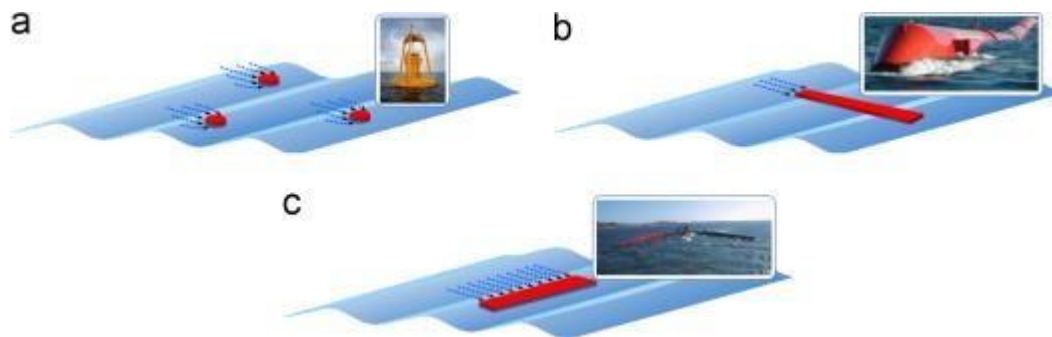


Figura 18. Clasificación del convertidor de energía de onda según el tamaño: (a) absorbedor de punto OPT, (b) atenuador Pelamis y (c) terminador Wave Dragón (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarria, 2013).

### 3.1.3 Generadores según su principio de funcionamiento.

- Diferencial de presión.

Estos dispositivos se subdividen en dos categorías, los que funcionan con el principio de Arquímedes y los OWC. El primero está ubicado en las zonas más cercanas a las playas o costas y es fijado al fondo marino. Utiliza la diferencia de presiones entre las crestas y los canales que tiene el dispositivo (Polinder, Damen, & Gardner, 2005). El segundo por lo



general se encuentra cercano a las costas, se basa el mismo funcionamiento del anterior. Usando una cámara semisumergida abierta en la parte inferior, el movimiento alternativo de las olas aumenta y disminuye el nivel de agua en el interior, moviendo el volumen de aire interno (López, Andreu, Ceballos, Martínez De Alegría, & Kortabarria, 2013).

- Estructuras flotantes.

Este tipo de generador es un dispositivo flotante, que utiliza el movimiento de movimiento vertical y horizontal de las olas (Polinder, Damen, & Gardner, 2005).

- Dispositivos de sobre voltaje.

Son aquellos en donde las ondas aumentan su energía cinética, uno de los principales generadores es el wave dragón (Bernal & Castillo, 2016).

### 3.2 Desarrollo del modelo mecánico-PTO

En la actualidad existen gran variedad de modelos mecánicos de generadores undimotrices, cada uno teniendo en cuenta diferentes características. El modelo más indicado para la zona del Cabo de la Vela es el generador de “absorbedor puntual”.

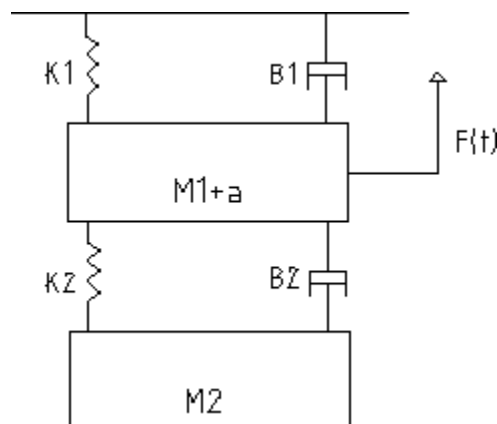


Figura 19. Modelo mecánico generador absorbedor puntual.

La figura 19 muestra cómo se modela la parte mecánica del generador undimotriz. Son dos cuerpos unidos entre sí, la primera parte consiste en un flotador que se entrelaza con la masa sumergida (PTO) (Wacher & Neilsen, 2010).

Las variables son las siguientes:

$M_1$  = Estructura de la masa del flotador.

$a$  = Masa agregada por el agua en el flotador.

$B_1$  = Amortiguación hidrodinámica del flotador.

$K_1$ = Parámetro de rigidez hidrostática (fuerza de restauración).

$B_2$ = Amortiguación del PTO.

$K_2$ = Rigidez de resorte del PTO.

$M_2$ = Masa del agua en el tubo del acelerador.

Aplicando la ley de D'Alembert's de que toda la suma de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es igual a cero (Wacher & Neilsen, 2010), se obtiene los siguientes sistemas de ecuaciones:

Para la masa  $M_1$  se tiene la expresión (20).

$$F(t) = (M_1 + a)\ddot{x}_1 + B_1\dot{x}_1 + K_1x_1 + B_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_2(x_1 - x_2) \quad (20)$$

Para masa  $M_2$  la ecuación (21):

$$M_2\ddot{x}_2 = B_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_2(x_1 - x_2) \quad (21)$$

Para facilitar los cálculos, se hace realiza una conversión al dominio de la frecuencia, esto mediante la transformada de Laplace. Quedando de la siguiente manera:

Masa  $M_1$  expresión (22).

$$F(s) = [(M_1 + a)s^2 + (B_1 + B_2)s + (K_1 + K_2)]x_1(s) - (B_2s + K_2)x_2(s) \quad (22)$$

Masa  $M_2$  la ecuación (23):

$$(M_2s^2 + B_2s + K_2) x_2(s) - (B_2s + K_2)x_1(s) \quad (23)$$

Para poder hallar la función de transferencia, se tiene que despejar  $x_2(s)$ , de la ecuación 23; obteniendo la ecuación (24).

$$x_2(s) = \frac{(B_2s + K_2)x_1(s)}{(M_2s^2 + B_2s + K_2)} \quad (24)$$

Remplazando la ecuación 24 en la 22, obteniendo la ecuación (25):

$$F(s) = [(M_1 + a)s^2 + (B_1 + B_2)s + (K_1 + K_2)]x_1(s) - \frac{(B_2s + K_2)^2x_1(s)}{(M_2s^2 + B_2s + K_2)} \quad (25)$$

Para observar el comportamiento del sistema mecánico, con la una fuerza de entrada, se desarrolla la función de transferencia; ecuación (26):

$$\frac{x_1(s)}{F(s)} = \frac{(M_2s^2 + B_2s + K_2)}{(M_1 + M_2 + aM_2)s^4 + (M_2B_1 + M_2B_2 + aB_2)s^3 + (M_2K_1 + M_2K_2 + B_1B_2 + M_1K_2 + aK_2)s^2 + (B_2K_1 + B_1K_2)s + K_1K_2} \quad (26)$$

Teniendo la función de transferencia, se lleva a un programa de simulación; En este caso fue en Simulink.

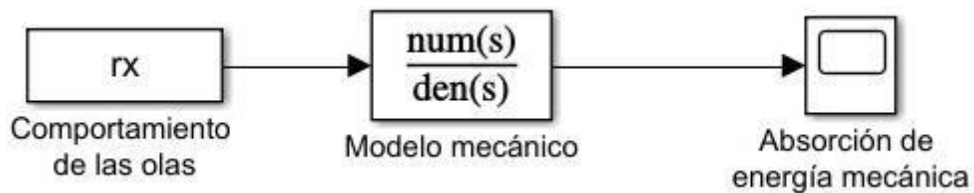


Figura 20. Modelo mecánico generador en Simulink.

La figura 20 muestra el modelo mecánico en Simulink, teniendo como entrada el movimiento de las olas del mar.

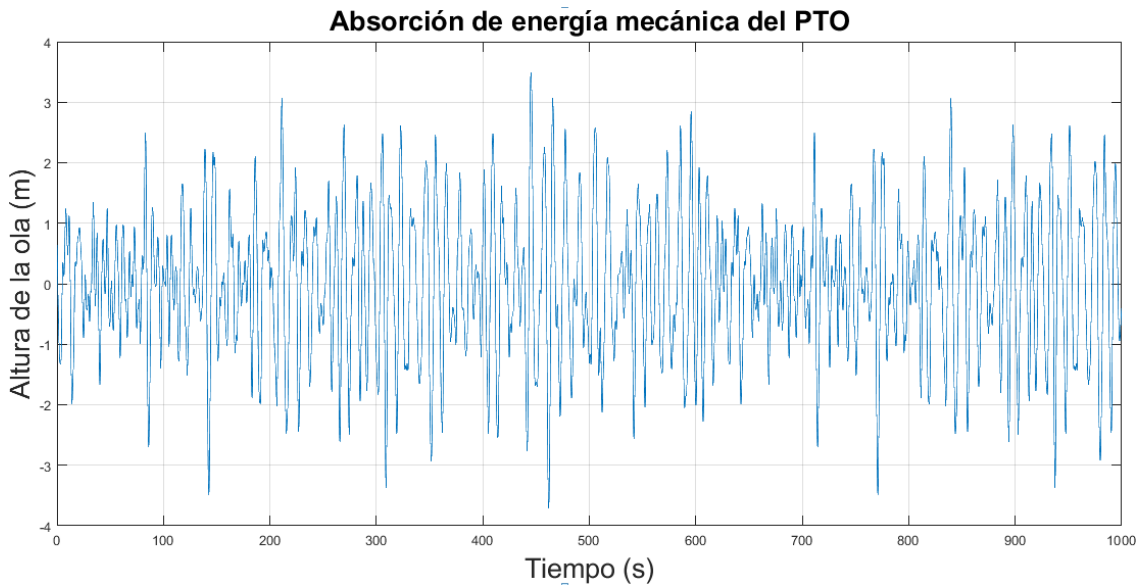


Figura 21. Comportamiento del modelo mecánico generador en Simulink.

Al observar el comportamiento del modelo en la figura 21 y teniendo como entrada la señal del movimiento de las olas del mar, se puede concluir que el modelo absorbe el movimiento

de manera adecuada, aunque se nota que tiene picos de altura, se corrobora que son los mismos que tiene las olas.

### **3.3 Selección de generador undimotriz.**

Los generadores doblemente alimentados presentan la propiedad de funcionar a una velocidad variable, además sus dimensiones son menores, si las comparamos con otros generadores de velocidad variable, debida principalmente a que la potencia del rotor es la única que se transforma, y se aproxima a un 30% de la energía total suministrada. Al disminuir la conversión de potencia, también se reducen las pérdidas y así acrecentando la eficiencia de la máquina. Esta clase de generadores pueden variar su factor de potencia, es decir, pueden cumplir la función de suministrar potencia reactiva si se desea, sin mencionar que los costos de mantenimiento e instalación resultan ser económicos. Esta característica de los generadores representa una gran ventaja porque su generación sea de bajo costo y simplicidad de control. También es importante resaltar que existen generadores síncronos empleados en la generación de energía renovable, más específicamente en la generación eólica, pero requieren de excitación para generar electricidad, lo que conlleva a el uso necesario de un convertidor, y elementos de transferencia de energía para magnetizar o mediante el uso de imanes permanentes.

Existen diferentes variantes del generador doblemente alimentado, una de esas variantes se caracteriza por el rotor bobinado, generalmente desfasados  $120^\circ$ , y su alimentación se da por los bobinados del rotor. Ahora bien, si se hace un corto en los devanados rotoricos, tendrá el mismo comportamiento que un generador jaula de ardilla.

Las ventajas que se pueden resaltar de la aplicación del generador doblemente alimentado son: es un generador asíncrono, el cual, si es empleado en el uso de energía renovable, disminuye en gran medida los costos de instalación y mantenimiento. además de ser un generador responsable con el entorno que rodea, ya que, no genera gases contaminantes. sin mencionar que posee la capacidad de ser autónoma y silenciosa, no requiere de una fuente externa de excitación ni combustible para la generación de electricidad, y presenta una mayor eficiencia en los procesos. en cuanto a las desventajas, presentan una baja eficiencia en la adsorción de la energía mecánica, toma tiempo por su inversión y funcionamiento de las centrales.

### **3.4 Desarrollo del modelo eléctrico.**

Para el desarrollo del modelo WEC en el proyecto se usará el modelo de la máquina asíncrona, que realizara la función de generador, es decir, genera electricidad a partir de la conversión de una potencia mecánica entrante. La máquina asíncrona está compuesta por dos partes, una parte fija llamada estator y una parte móvil denominada rotor, a su vez el rotor se puede clasificar en dos tipos, jaula de ardilla y de rotor bobinado (Echarri, 2011).

Se llevará a cabo el estudio de un generador asíncrono de rotor bobinado, el rotor presenta bobinados distribuidos, además, posee determinada cantidad de polos que se reflejan en las tres fases. La fuente de alimentación es la red, lo que supone un equilibrio en las corrientes que inyectadas al estator y están dadas por las ecuaciones (27) (28) (29):

$$I_A = \sqrt{2}I_{EST}\cos(\omega_{EST}t) \quad (27)$$

$$I_B = \sqrt{2}I_{EST}\cos(\omega_{EST}t - \frac{2\pi}{3}) \quad (28)$$

$$I_C = \sqrt{2}I_{EST}\cos(\omega_{EST}t + \frac{2\pi}{3}) \quad (29)$$

Estas corrientes al estar desfasadas  $120^\circ$  se rigen por el teorema de Ferraris que formula, un conjunto de bobinas en las cuales circulan unas corrientes desfasadas en el tiempo y separadas de manera equidistante genera un campo magnético senoidal, y su desplazamiento se rige por la misma frecuencia, que se encuentra las corrientes en la bobina. (Teorema de Ferraris, 2006), es decir, un campo magnético giratorio ( $F_{mms}$ ) que gira a la velocidad de sincronismo ( $\Omega_{EST}$ ), expresada en (30).

$$F_{mms}(\theta_{EST}t) = \frac{3N_{seq}\sqrt{2}I_{EST}}{\pi} \text{sen}(\theta - \omega_{EST}t) \quad (30)$$

El generador asíncrono es alimentado por el estator, esto genera un campo magnético giratorio en el entrehierro a velocidad de sincronismo, la velocidad del campo generado se relaciona de manera directa con la frecuencia de las corrientes estáticas y con el número de pares de polos de la máquina, mediante la expresión (31).

$$\Omega_{EST} = \frac{\omega_{EST}}{p} \quad (31)$$

la tensión inducida en cada devanado se muestra en las ecuaciones (32) (33) (34), sin tomar en cuenta las pérdidas en las resistencias internas será:

$$v_A = \frac{d\psi_A}{dt} \quad (32)$$

$$v_B = \frac{d\psi_B}{dt} \quad (33)$$

$$v_c = \frac{d\psi_c}{dt} \quad (34)$$

El flujo de cada devanado está dado por la red, ya que, el estator está conectado con la misma.

Cabe resaltar que el rotor está conformado por un devanado trifásico, las bobinas se conectan en estrella, mientras que los otros extremos se unen a tres anillos rozantes, que a su vez rozan con las escobillas, estas conducen los contactos eléctricos al exterior. Se presume que inicialmente el rotor está en circuito abierto, puesto que el campo magnético creado en el entrehierro por el estator que gira a  $\Omega_{EST}$ , observa un campo magnético variable, ya que, está girando a una velocidad  $\Omega_m$  distinta a la de sincronismo (Echarri, 2011).

Este campo variable genera tensiones inducidas en las bobinas del rotor, sin tener en cuenta las resistencias internas y fugas que se obtienen las ecuaciones (35) (36) (37).

$$v_a = \frac{d\psi_a}{dt} \quad (35)$$

$$\psi_a = N_{req}\phi_a \quad (36)$$

$$\omega_m = \rho\Omega_m \quad (37)$$

$\phi_a$ : Flujo del entrehierro visto por el devanado “a”.

Se procede a calcular la tensión en el devanado “a” del rotor en la expresión (38), el devanado “b” del rotor en la expresión (39), y el devanado “c” del rotor en la expresión (40).

$$v_a = -N_{req}\phi_{max}(\omega_{EST} - \omega_m)\text{sen}((\omega_{EST} - \omega_m)t + \theta_{r0}) \quad (38)$$

$$v_b = -N_{req}\phi_{max}(\omega_{EST} - \omega_m)\text{sen}((\omega_{EST} - \omega_m)t + \theta_{r0} - \frac{2\pi}{3}) \quad (39)$$

$$v_c = -N_{req}\phi_{max}(\omega_{EST} - \omega_m)\text{sen}((\omega_{EST} - \omega_m)t + \theta_{r0} + \frac{4\pi}{3}) \quad (40)$$

La frecuencia y pulsación de las tensiones y corrientes en el rotor,  $f_r$  en la expresión (42) y  $\omega_r$  en la expresión (41).

$$\omega_m = \omega_{EST} - \omega_r \quad (41)$$

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} \quad (42)$$

La pulsación es la variación entre las velocidades magnéticas y mecánicas en el rotor, ambas magnitudes son expresadas en unidades eléctricas, por ende, el deslizamiento ( $s$ ) es la relación que existe entre la pulsación del rotor y la velocidad de sincronismo, es decir, expresa la “distancia” entre la velocidad a la que gira la máquina y la velocidad de sincronismo, es un parámetro fundamental en una maquina asíncrona y su valor nominal está comprendido entre 0.02 y 0.04 (Echarri, 2011).

$$s = \frac{\omega_{EST} - \omega_m}{\omega_{EST}} = \frac{\omega_r}{\omega_{EST}} = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\Omega_{EST} - \Omega_m}{\Omega_{EST}} = \frac{\Omega_r}{\Omega_{EST}} \quad (43)$$

Teniendo en cuenta el deslizamiento, la ecuación de tensión inducida en el rotor es:

$$v_a = -N_{req}\phi_{max}s\omega_{EST}\text{sen}(s\omega_{EST}t + \theta_{r0}) \quad (44)$$

Si el  $s=0$  la máquina giraría a la velocidad de sincronismo, por ende, el rotor no observaría la variación de flujo magnético, por lo  $v_a$  sería 0, en cambio si el rotor estuviera bloqueado,  $s$  sería igual a 1 y las ecuaciones de rotor y estator serían semejantes a las de un transformador. Procedemos a cortocircuitar el rotor, lo que provoca una circulación de corrientes desfasadas y debido a la equidistancia entre bobinas, se aplica el teorema de ferraris, es decir, se crea un campo magnético rotativo  $F_{mmr}$ , éste gira a  $\Omega_r$  respecto del rotor, dada en la ecuación (46), sin embargo, el rotor gira mecánicamente a una velocidad de  $\Omega_m$ , por ende la velocidad del campo magnético generado está dada en (45).

$$\Omega_{mmr} = \Omega_m + \Omega_r = \Omega_s \quad (45)$$

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{\rho} \quad (46)$$

Es importante resaltar que la velocidad del campo magnético generado por el rotor ( $F_{mmr}$ ), la velocidad del campo magnético generado por el estator ( $F_{mms}$ ), y la velocidad de sincronismo es la misma. Como consecuencia, de esta relación entre el campo del estator y el rotor, se puede establecer una relación con el seno del ángulo de desfase (48), para que el par tenga un valor constante las velocidades de los campos debe ser iguales (Echarri, 2011).

$$\Omega_{EST} = \frac{\omega_{EST}}{p} \quad (47)$$

$$T = -K * F_{mmr} * F_{mms} * \text{sen}(\theta) \quad (48)$$

Ahora bien, si la maquina alcanza una velocidad de sincronismo los devanados del rotor no señalan una variación de campo, por ende, no se presentan tensiones inducidas, al no tener tensiones inducidas, las corrientes en el rotor y el campo magnético generados por el rotor son nulos. Por lo anterior el par generado por la maquina asíncrona a velocidad de sincronismo es igual a 0. Finalmente agregamos las resistencias internas y los flujos de fugas. Para obtener el modelo de la maquina asíncrona de régimen permanente.

Las ecuaciones (49) (50) (51) (52) (53) y (54) describen el comportamiento del estator.

$$v_A = R_S i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \quad (49)$$

$$\Psi_{totalA} = \Psi_{fugasA} + \Psi_{magnéticoA} \quad (50)$$

$$\psi_A = \psi_{fA} + N_{seq} \phi_{Ae} \quad (51)$$

$$\psi_{fA} = L_{fs} i_A \quad (52)$$

$$\phi_{Ae} = \phi_{MAX} \cos(\omega_{EST} t + \theta_{EST0}) \quad (53)$$

$$v_A = R_S i_A + L_{fs} \frac{di_A}{dt} = N_{seq} \phi_{MAX} \omega_{EST} \text{sen}(\omega_{EST} t + \theta_{EST0}) \quad (54)$$

$\phi_{Ae}$ : flujo del entrehierro visto por el devanado A.

Las ecuaciones (55) (56) (57) (58) (59) y (60) describen el comportamiento del rotor.

$$v_a = R_r i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (55)$$

$$\Psi_{total a} = \Psi_{fugas a} + \Psi_{magnético a} \quad (56)$$

$$\psi_a = \psi_{fa} + N_{req} \phi_{ae} \quad (57)$$

$$\psi_{fa} = L_{fr} i_a \quad (58)$$

$$\phi_{ae} = \phi_{MAX} \cos(\omega_{EST} - \omega_m)t + \theta_{r0}) \quad (59)$$



$$v_a = R_r i_a + L_{fr} \frac{di_a}{dt} = N_{req} \phi_{MAX} \omega_r \text{sen}(\omega_r t + \theta_{r0}) \quad (60)$$

$\phi_{ae}$ : flujo del entrehierro visto por el devanado “a”.

En conclusión, organizando las ecuaciones y agregando el deslizamiento se obtiene las fuerzas electromotrices inducidas en el estator  $e_a$  expresión (61) y en el rotor  $e_A$  expresión (62).

$$e_A = v_A - i_A * R_s - L_{fs} * \frac{di_A}{dt} = -N_{eqs} * \phi_{MAX} * \omega_{EST} * \text{sen}(\omega_{EST} - \theta_{s0}) \quad (61)$$

$$e_a = v_a - i_a * R_r - L_{fr} * \frac{di_a}{dt} = -N_{eqr} * \phi_{MAX} * s * \omega_{EST} * \text{sen}(s * \omega_{EST} * t + \theta_{r0}) \quad (62)$$

Al realizar el análisis de las anteriores ecuaciones y tomando en cuenta el deslizamiento del rotor, su relación de transformación está dada en (63).

$$a = \frac{N_{eqs}}{N_{eqr} * s} \quad (63)$$

El circuito equivalente de la maquina asíncrona se muestra en la figura 22.

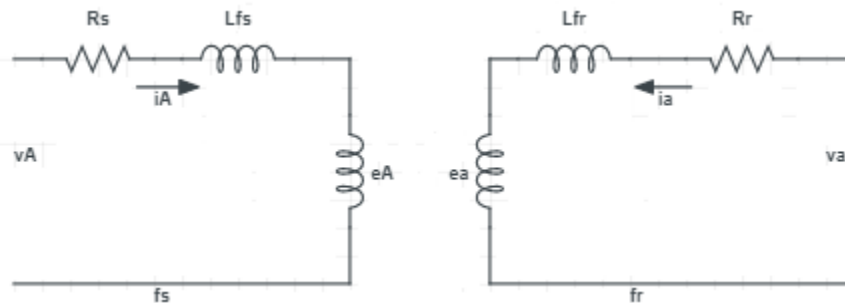


Figura 22. Circuito equivalente de la máquina asíncrona (Echarri, 2011).

El modelo de circuito equivalente en régimen permanente del generador doblemente alimentado se obtiene al suponer que la alimentación del generador se hará por medio de un convertidor, que alimenta el rotor y presenta una tensión de  $V_r/s$ . El modelo de circuito equivalente en régimen permanente se muestra en la figura 23.

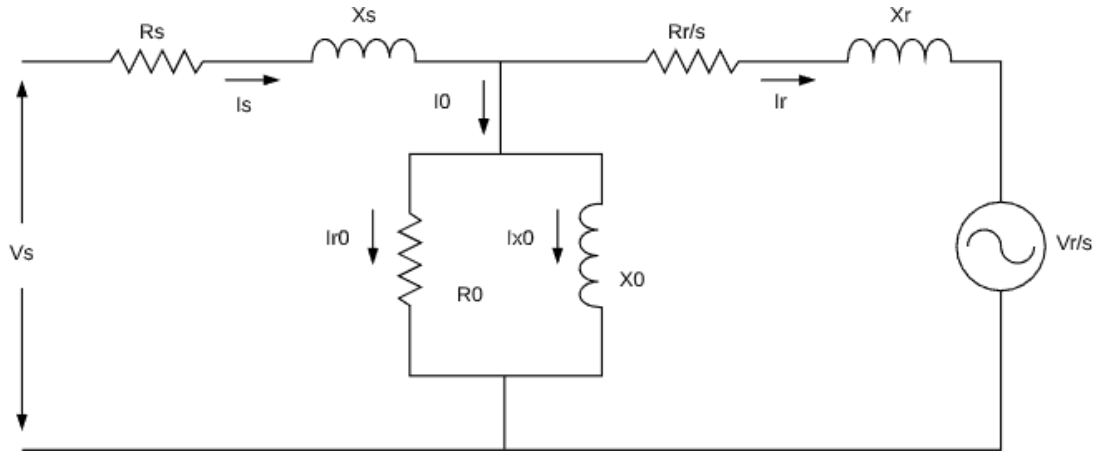


Figura 23. Circuito equivalente en régimen permanente (Echarri, 2011).

Parámetros:

$R_s$ : Resistencia devanado del estator.

$R_{r/s}$ : Resistencia devanado del rotor referida al estator.

$X_s$ : Reactancia de fugas del estator.

$X_r$ : Reactancia de fugas del rotor referida al estator.

$R_0$ : Resistencia de pérdidas magnéticas.

$X_0$ : Reactancia de magnetización.

Variables:

$V_{est}$ ,  $I_{est}$ : tensión y corriente por fase del estator.

$I_r$ : corriente por el rotor referida al estator.

$I_0$ : corriente de vacío

$I_{R0}$ : componente de pérdidas de la corriente de vacío

$I_{X0}$ : componente de magnetización de la corriente de vacío

Parámetros del modelo:

El generador modelado es un Indar NCR-450-L/4 de la figura 24, utilizado en los aerogeneradores G52 de Gamesa Eólica, con conexión rotórica por anillos rozantes.



Figura 24. Vista del generador doblemente alimentado Indar NCR-450-L/4 (Echarri, 2011).

Las características son las siguientes:

Marca: Indar.

Descripción: generador asíncrono doblemente alimentado.

Tensión nominal: 690 V.

Potencia nominal: 800 kW.

Factor de potencia: 1.

Número de polos: 4.

Velocidad de sincronismo: 1500 rpm.

Velocidad a plena carga: 1620 rpm.

Tensión a rotor bloqueado: 1852 V.

Momento de inercia: 65 kgm<sup>2</sup>.

Los parámetros del circuito equivalente conectado en estrella son:

Resistencia del estator:  $R_s = 0.016 \text{ Ohm}$

Reactancia del estator:  $X_s = 0.074 \text{ Ohm}$

Resistencia del rotor, referida al estator:  $R'_r = 0.0125 \text{ Ohm}$

Reactancia del rotor, referida al estator:  $X'_r = 0.121 \text{ Ohm}$

Reactancia de magnetización:  $X_m = 6.78 \text{ Ohm}$

Resistencia de magnetización:  $R_m = 215 \text{ Ohm}$

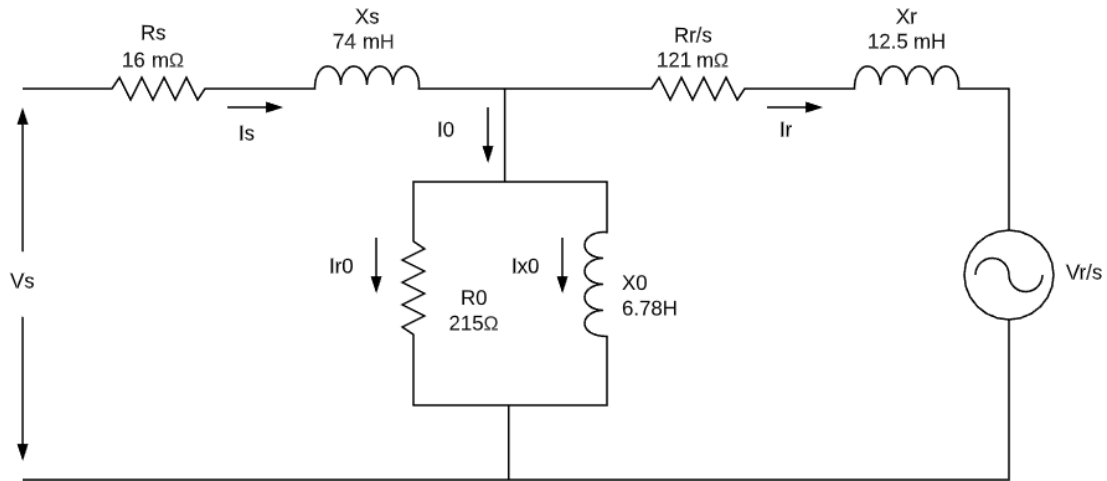


Figura 25. Circuito equivalente del generador asíncrono con parámetros del generador Indar NCR-450-L/4 (Echarri, 2011).

Par realizar la simulación del modelo de la maquina asíncrona mostrada en la figura 25, es indispensable conocer la tensión rotórica a imponer para trabajar en condiciones nominales ( $P=800\text{Kw}$  y  $f_{dp}=1$ ).

### 3.5 Unión de los modelos.

La figura 26, muestra la estructura del enlace entre el sistema de captación de energía cinética y el modelo del generador undimotriz.

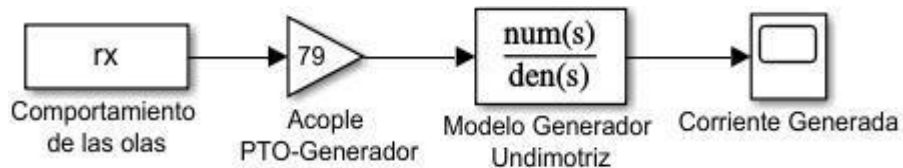


Figura 26. Modelo completo del generador undimotriz.

El modelo consta de tres partes, la entrada la cual consiste en el movimiento de las olas del mar, después tenemos la parte de acople del sistema de fuerza con el generador (PTO), este se basa en una caja multiplicadora (Gearbox), tiene una relación de 1:79, esto es debido porque brinda la mayor relación entrada-salida. Después tenemos el modelo del generador undimotriz, se realizó una reducción del diagrama de bloques, esto es debido a que la parte mecánica y eléctrica estaban en cascada. El modelamiento se llevó a cabo mediante ecuaciones diferenciales, posteriormente se pasó al dominio de la frecuencia, con la ayuda de la transformada de Laplace.

A partir del modelo del generador undimotriz, se procede a comprobar las variaciones de potencia, con base en la altura de la ola.

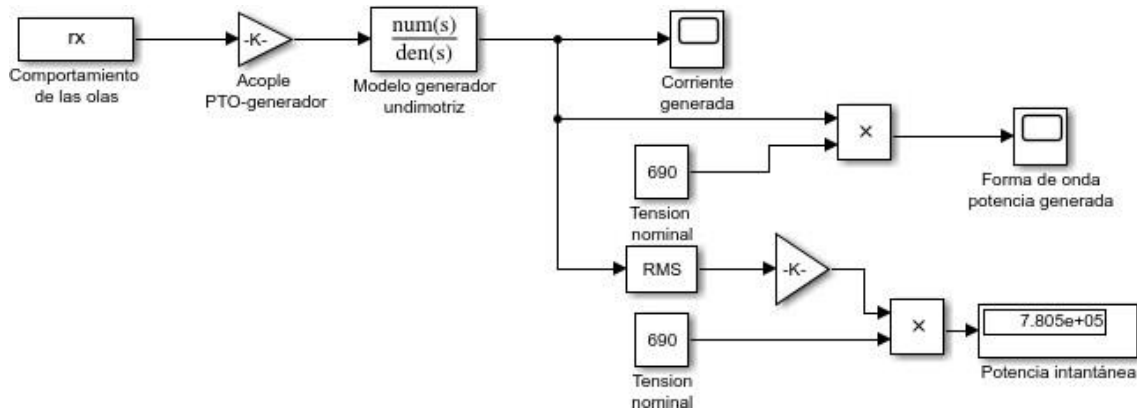


Figura 27. Diagrama de bloques de la potencia instantánea generada del modelo de WEC.

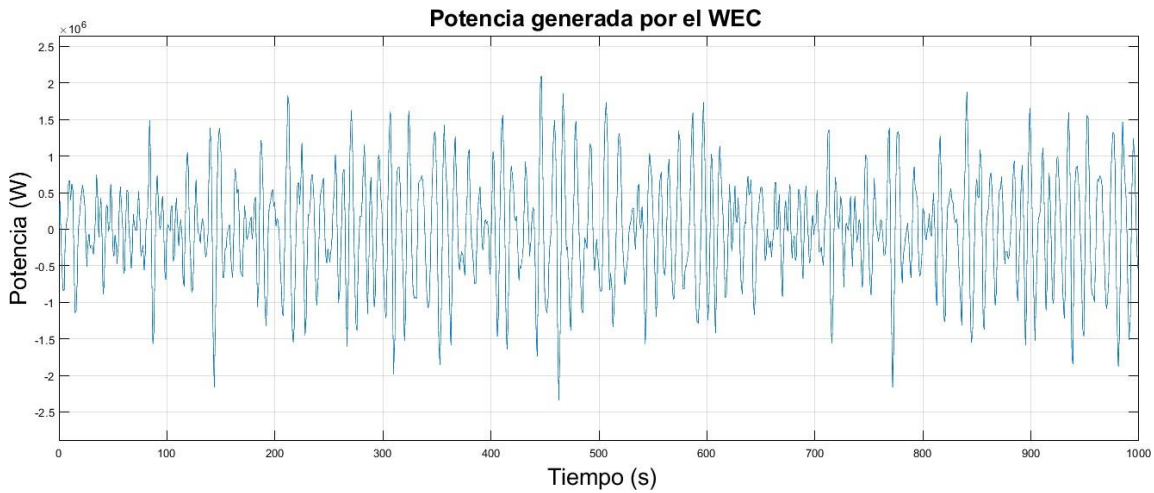


Figura 28. Potencia generada del modelo de WEC.

En la figura 27, se observa el modelo en Simulink de la potencia instantánea del generador undimotriz y la figura 28, muestra la forma de onda de la potencia generada del WEC. En este caso de estudio, con el comportamiento real de las olas se presenta un pico de potencia de 1200 kW, esto genera graves averías o incluso daños en el generador, a su vez provoca sobre costos en el mantenimiento y adquisición de equipos. Es importante resaltar que la potencia instantánea generada es de 780.5 kW, es decir, con el modelo hidrodinámico del mar se llega a un valor cercano a su potencia nominal, la cual es de 800 kW.

Otro punto para tener en cuenta es la calidad de la energía, por normas nacionales e internacionales el suministro de energía eléctrica debe cumplir estándares de calidad, las variaciones abruptas en la potencia provocan problemas en la calidad de potencia y en consecuencia hace que no se cumpla con dichos estándares. Uno de los principales problemas que genera las fluctuaciones de potencia tanto activa como reactiva es la emisión Flicker, se contempla como una medición de parpadeo en las bombillas, lo que conlleva a molestias a los usuarios y que se reduzca de manera significativa la vida útil de los equipos eléctricos. Es indispensable que se logre minimizar estas fluctuaciones lo mayor posible, para que se brinde un servicio de energía eléctrica, con los más altos estándares de calidad.

## Capítulo IV: Diseño control PI del generador undimotriz

El sistema de control implementado en el modelo del generador undimotriz es un controlador PI, el cual consta de un controlador, la planta del generador undimotriz, un acople que une los modelos mecánico y eléctrico, las entradas del sistema que definen el comportamiento del oleaje, y la corriente nominal del generador Indar NCR-450-L/4 con el fin de establecer una referencia en el sistema de control. Es importante resaltar que el modelo del generador undimotriz está constituido de dos modelos, un modelo mecánico que recolecta la energía cinética generada por las oscilaciones de las olas del mar, además, de un generador eólico Indar NCR-450-L/4 que reúne características como la de funcionar a velocidad variable, presenta pequeñas dimensiones, esta clase de generadores pueden variar su factor de potencia y es ampliamente usado en la generación de energía renovable, además, no genera gases contaminantes. sin mencionar que posee la capacidad de ser autónoma y silenciosa, no requiere de una fuente externa de excitación ni combustible para la generación de electricidad.

Con el fin de minimizar las fluctuaciones de potencia del generador se lleva a cabo el sistema de control como se muestra en la figura 29.

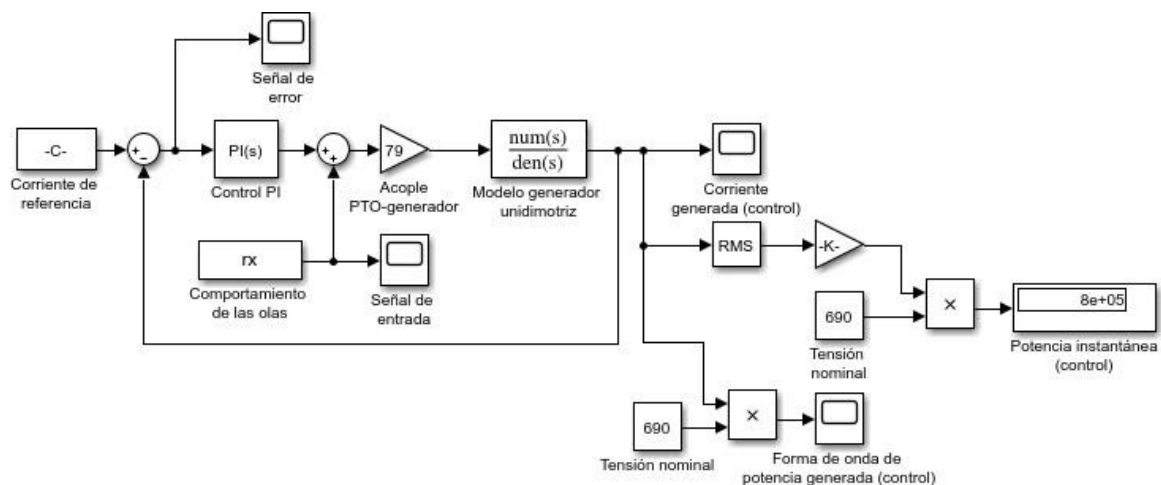


Figura 29. Modelo de control implementado en Simulink.

El sistema de control se divide en cinco partes importantes y tres señales que muestran el comportamiento del sistema:

- Señal de referencia o set point.
- Controlador PI.
- Acople PTO-generador.
- Modelo del generador undimotriz.
- Comportamiento de las olas.

Señales:

- Corriente generada.
- Potencia generada.
- Señal de error.

#### 4.1 Señal de referencia o set point.

La señal de referencia es el valor al cual se quiere llevar la variable de estado, en este caso se controla la corriente del generador Indar NCR-450-L/4, por ende, se establece como referencia la corriente nominal.

La máquina en cuestión trabaja con  $\text{fdp} = 1$  y potencia activa  $P = 800 \text{ kW}$ , por lo que puede obtenerse la corriente estatórica que absorberá en régimen permanente, se muestra en la ecuación (71).

$$I_s = \frac{800kW}{3 \frac{690}{\sqrt{3}}} = 669,39A \quad (64)$$

En el modelo se representa como un valor constante, que regirá al valor al que se desea llegar con el generador undimotriz.

#### 4.2 Diseño de controlador PI.

La ley 1715 del 2014 tiene como finalidad regular la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Partiendo del objetivo de esta ley se centra el diseño, más específicamente en los artículos 4,7,9 y 23. Se realiza el diseño del controlador, incentivando la inclusión de la generación undimotriz en las costas del caribe colombiano, promoviendo la sustitución de generación diesel a generación undimotriz, esto mediante la investigación que se desarrolla, a futuro va a permitir el estudio de factibilidad, para la construcción de un parque de generación undimotriz en Colombia.

El diseño del controlador también está regulado por la resolución 030 del 2018 de la comisión de regulación de energía y gas (CREG), la cual establece los lineamientos para la autogeneración y la generación distribuida. En el diseño se establece un límite de generación de potencia de 1 MW, para que el sistema sea catalogado como autogenerador de pequeña escala y se le apliquen los estándares que estipula esta resolución con respecto a esta generación.

Basado en esta resolución se desarrolla el diseño del controlador el cual consiste en un bloque *PID controller* de simulink, estos parámetros son de vital importancia para la estabilización de la señal de corriente, sin que se presenten grandes oscilaciones en su señal y presenten una respuesta en un intervalo corto de tiempo.



Los parámetros del controlador se pueden visualizar en la figura 30.

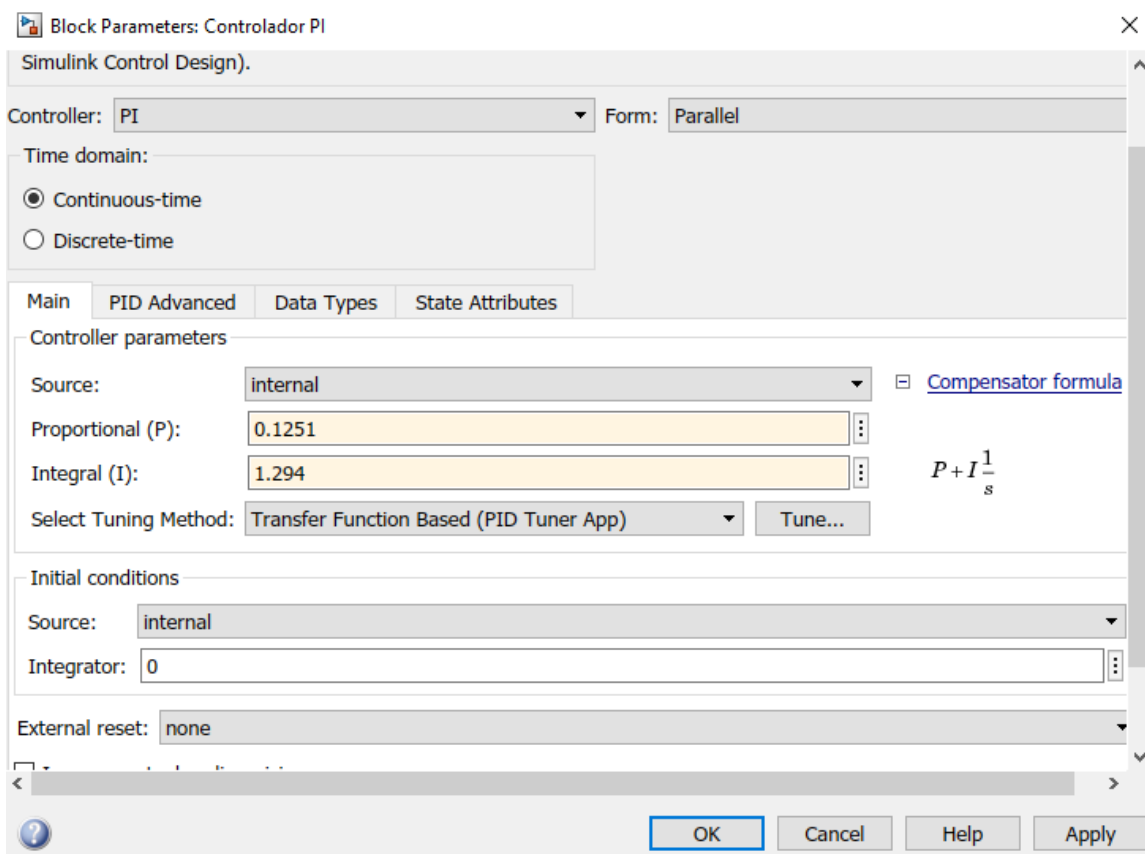


Figura 30. Parámetros del controlador PI.

### 4.3 Acople PTO-generador.

En los sistemas de generación eólica, se implementa un sistema de transmisión de energía mecánica a rotacional, llamada caja multiplicadora. En la figura 31, se muestra la composición de un generador eólico y sus partes, haciendo énfasis en la caja multiplicadora.

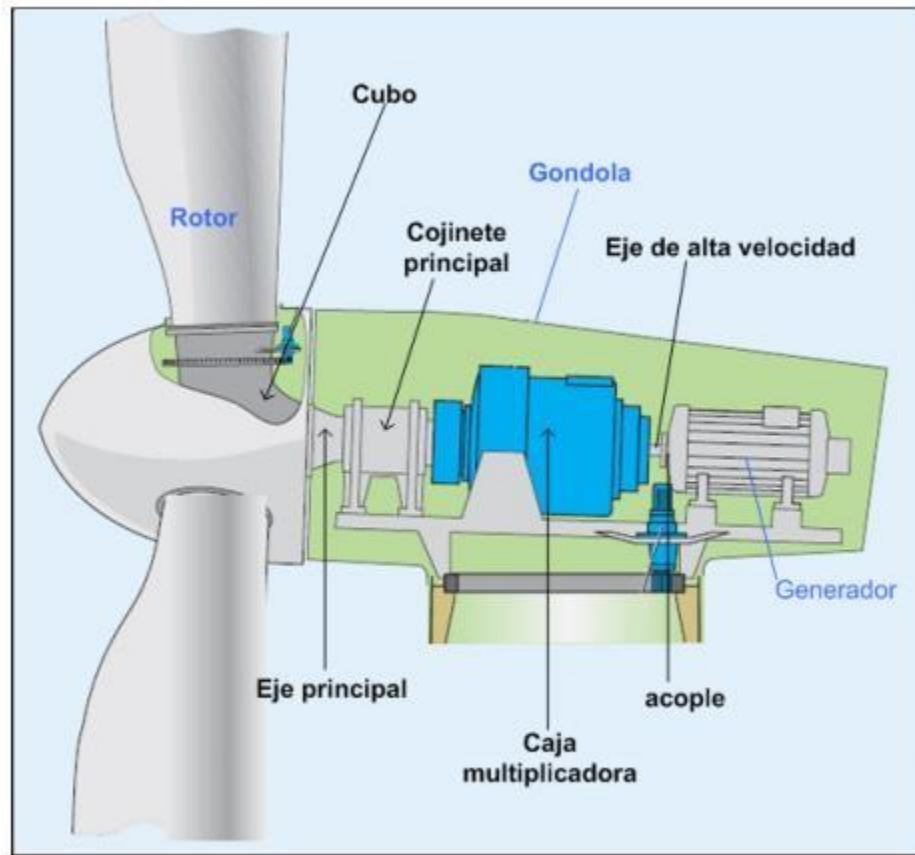


Figura 31. Elementos que conforman el sistema de transmisión (Cristancho, 2007).

Este elemento permite multiplicar las revoluciones del rotor, para que el generador funcione en su régimen de operación, actualmente se distinguen dos cajas multiplicadoras: caja multiplicadora helicoidal de ejes paralelos o tipo planetario. Presentan una relación de velocidades constante, buscando una relación óptima entre su capacidad de carga y su eficiencia (Cristancho, 2007). La figura 32, se ver la turbina de viento con una caja multiplicadora

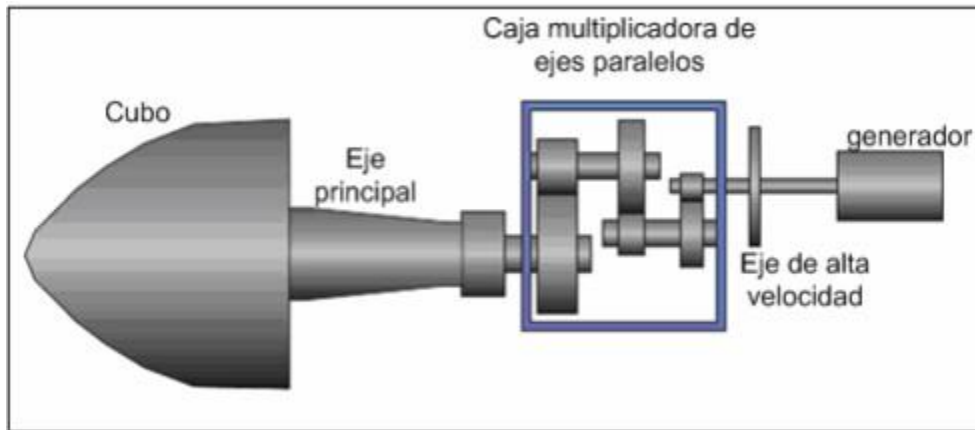


Figura 32. Turbina de viento con caja multiplicadora de ejes paralelos (Cristancho, 2007).

La lubricación en la caja multiplicadora se hace por medio de salpicadura, manteniendo los valores de temperatura dados por el fabricante, en generación eólica se tiende a usar la caja multiplicadora tipo planetario debido a sus dimensiones, peso, ruido, y eficiencia. La figura 33, se puede ver la caja multiplicadora de tipo planetario.

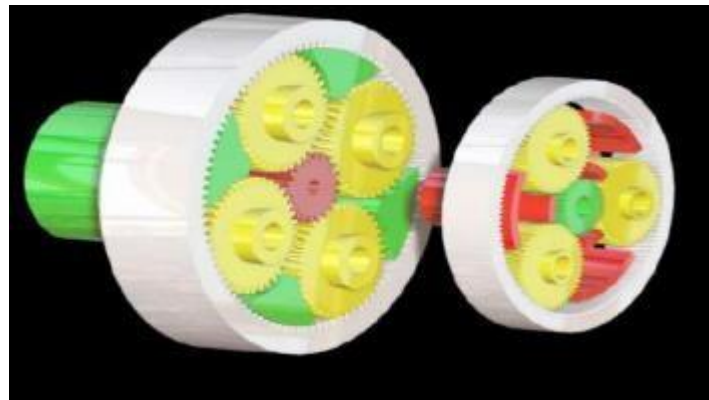


Figura 33. Caja multiplicadora tipo planetario (Cristancho, 2007).

En el modelo de generador eólico “Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas” de Omar Cristancho y Dario Prada (Cristancho, 2007), se toma una ganancia de 79 entre las aspas y el generador, por ende, se toma como referencia en el modelo del generador undimotriz, esto debido principalmente a que el generador corresponde a uno eólico y cumple similitudes en cuanto a su potencia nominal.

#### 4.4 Modelo del generador undimotriz.

El modelo del generador undimotriz se empleó el bloque *Transfer Fcn* de Simulink, el bloque permite modelar el sistema undimotriz, mediante la función de transferencia de la

corriente del generador en el dominio de Laplace. El bloque funciona para sistemas SIMO Y SISO, el modelo corresponde a un sistema SISO, es decir, presenta una entrada y una única salida, además, los coeficientes del denominador son de mayor orden que los del numerador. De esta manera se cumplen con las condiciones para el uso de este bloque.

La planta se caracteriza por la corriente, que en este caso se tomó como variable de estado en el dominio de Laplace, por consiguiente, se obtiene la planta del generador undimotriz, basado en la unión en cascada del modelo mecánico del PTO, y el modelo eléctrico del generador Indar NCR-450-L/4, como se observa en la figura 34.

Los parámetros de la planta son los siguientes:

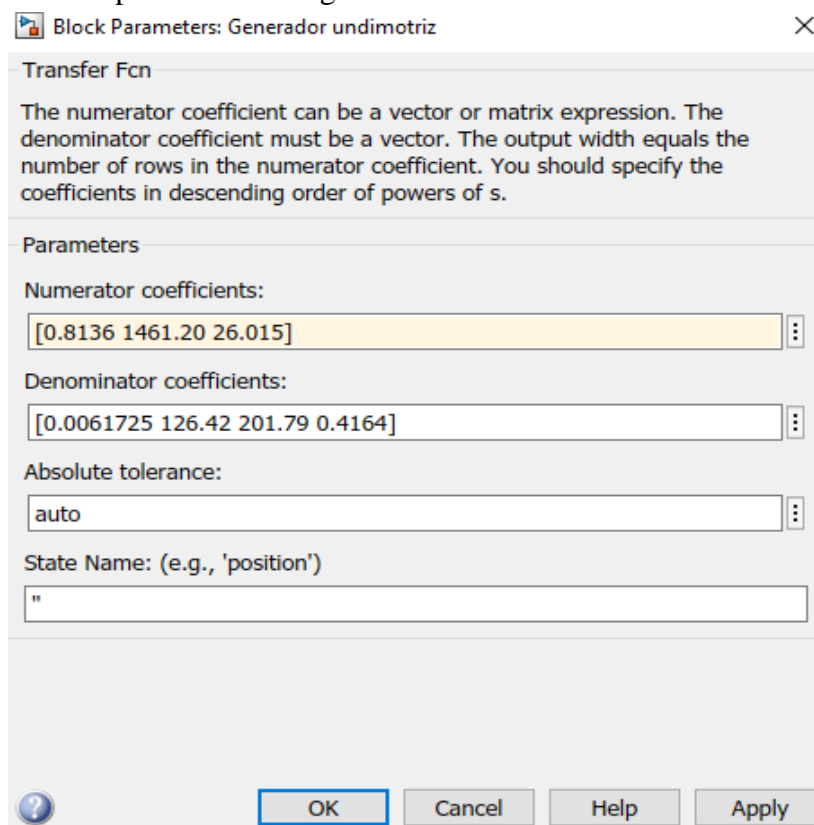


Figura 34. Parametros generador undimotriz.

#### 4.5 Corriente y potencia generada.

La corriente que produce el generador, después de aplicar el control PI y las entradas del comportamiento del oleaje, cumplen con los parámetros nominales de la máquina. Es decir, que se han obtenido las condiciones ideales para un correcto funcionamiento de la maquina sin afectaciones en su estructura.

La corriente generada presenta un valor cercano al nominal de 669A, como se aprecia en la figura 35.

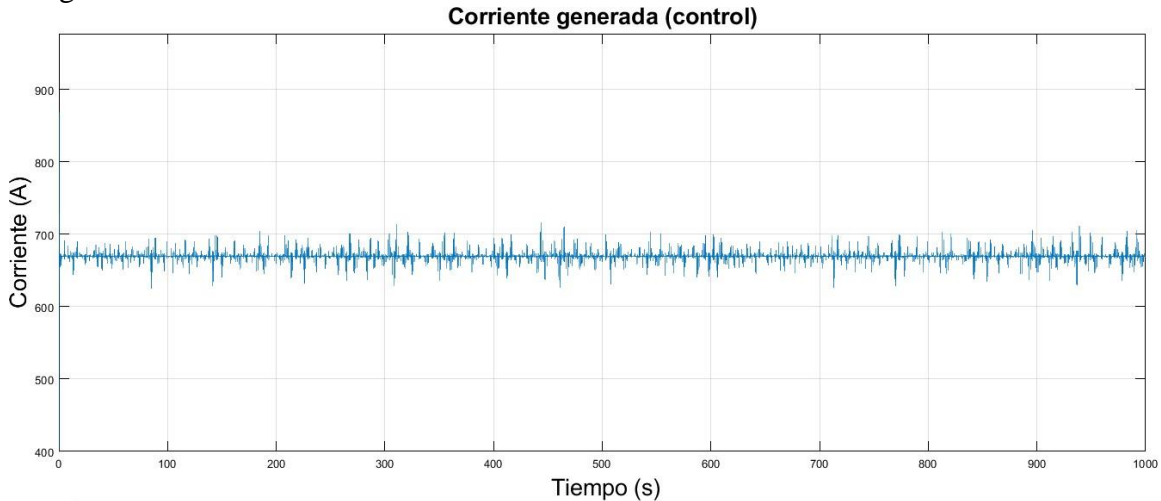


Figura 35. Corriente generada después del control PI.

La potencia nominal del generador Indar NCR-450-L/4 es de 800kW, como se muestra en la figura 36, la potencia generada mediante el control PI garantiza sus límites muy cercanos a los valores nominales. Previendo posibles daños en el generador debido a los picos de potencia, por falta de un control adecuado que minimice las fluctuaciones. La potencia controlada presenta pequeñas fluctuaciones, que el generador es capaz de asumir sin entrar en riesgo. Al estabilizar la potencia se pueden optar por generadores con potencia nominal cercana a la necesaria, sin necesidad de una sobredimensión muy cuantiosa, y así disminuir los costos de inversión en este tipo de generación, ya que, se puede establecer los rangos de operación sin una gran sobredimensión.

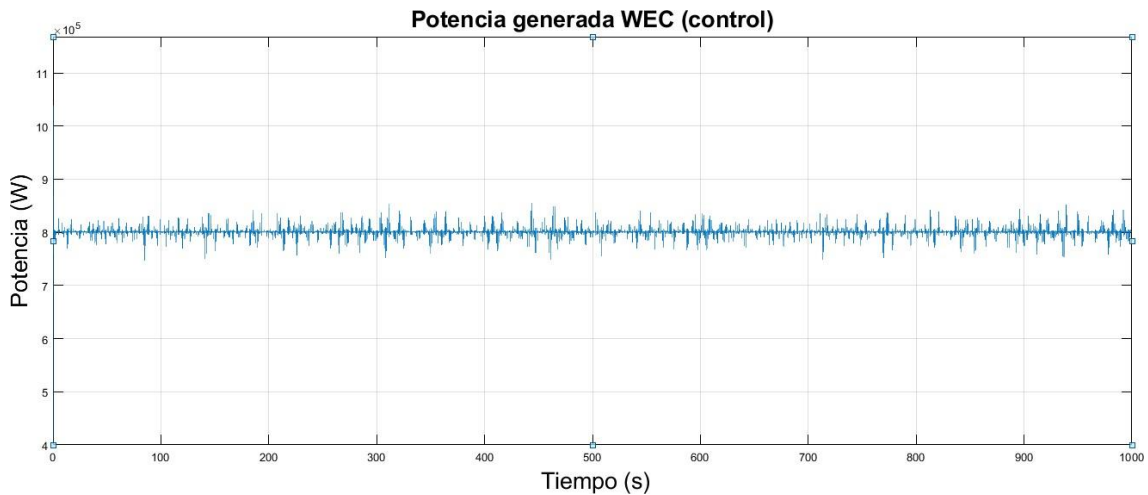


Figura 36. Potencia generada después del control PI.

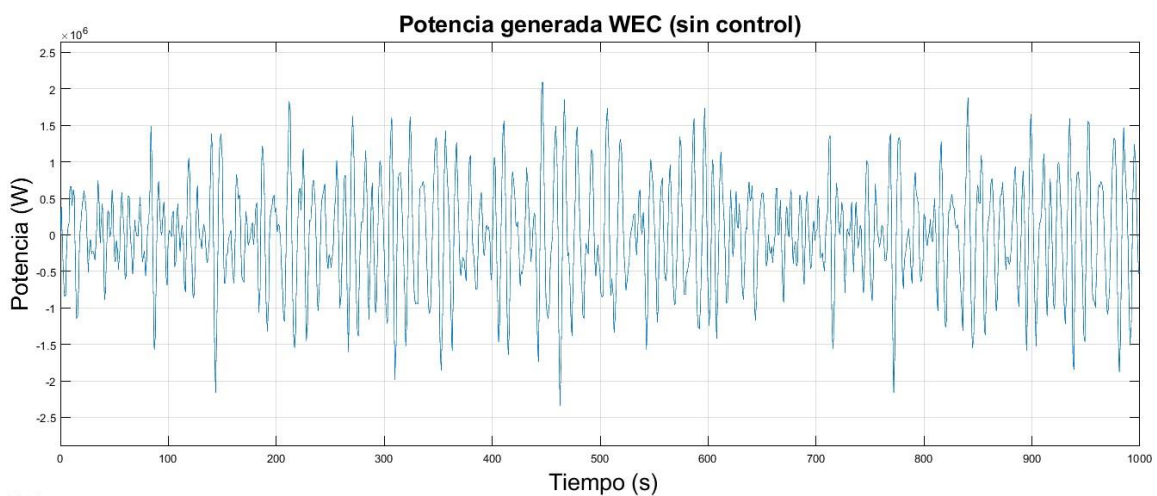


Figura 37. Potencia generada por el modelo undimotriz sin aplicar el control.

Se aprecia una gran disminución en las fluctuaciones de potencia debido a la aplicación del control PI. En la figura 36, se aprecia que el control lleva al sistema WEC a condiciones nominales (800kW) con unas leves variaciones comparadas con las presentadas en la figura 37, donde se muestra el sistema WEC sin ningún tipo de control, presentado oscilaciones de potencia que varían entre los 0GW, hasta los 1.5GW causando daños irreparables en el generador doblemente alimentado Indar NCR-450-L/4.

#### 4.6 Señal de error.

La señal de error es la diferencia entre la corriente nominal del generador y la corriente generada, es una característica fundamental de un lazo de control cerrado, que presenta la

peculiaridad de poseer una realimentación negativa de la salida, con el fin de compararla con la entrada y posteriormente corregir la salida. Esta señal de error tiene acción directa sobre el control PI. En la figura 38, se observa la señal de error del sistema de control de lazo cerrado, es muy cercana a cero. Por ende, se puede concluir que los parámetros del controlador son ideales y la amplitud de las olas detectado por el modelo mecánico es lo suficiente para alcanzar una corriente nominal en la máquina (WEC), cabe resaltar que la señal de error no siempre es cero, presentan unas pequeñas oscilaciones debido a la variación en el oleaje y, por consiguiente, la generación de corriente comparada con la corriente nominal de la maquina no se estabiliza en cero.

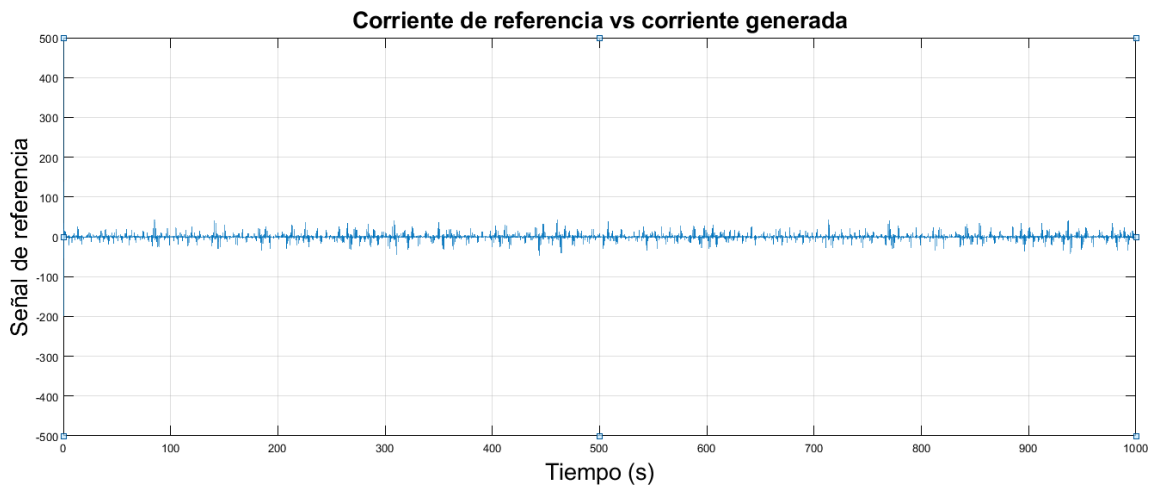


Figura 38. Señal de error (corriente de referencia vs corriente generada).

## 4.7 Análisis del comportamiento del control PI ante diferentes valores de referencia.

### 4.7.1 Referencia=669A.

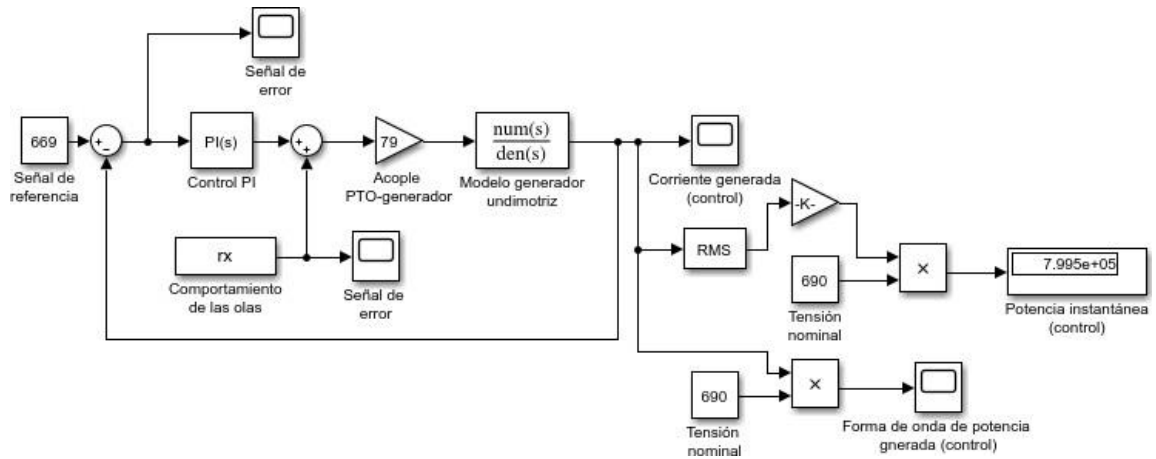


Figura 39. Diagrama de bloques del control PI con referencia de 669A.

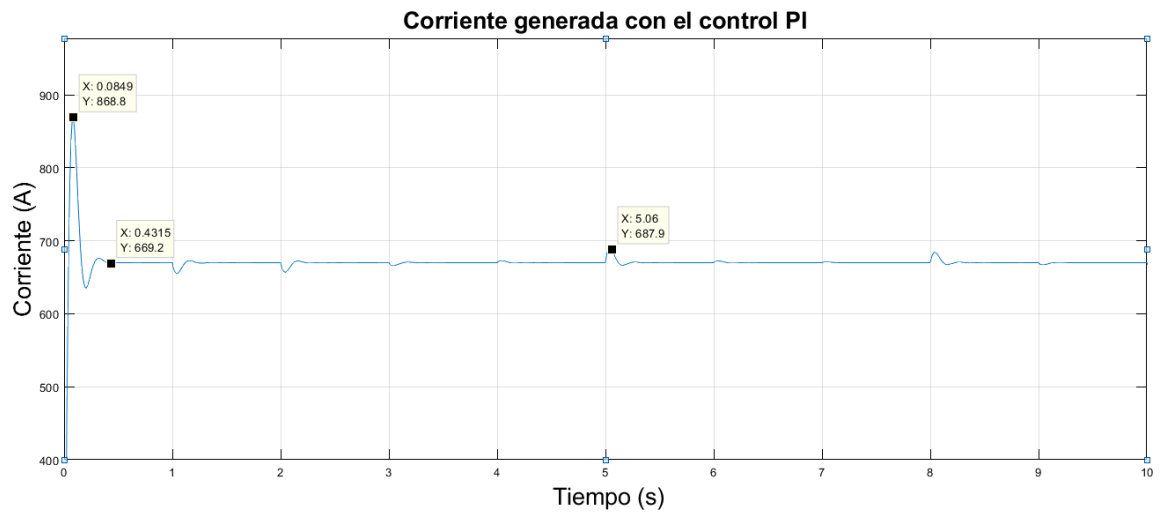


Figura 40. Señal de corriente generada del control PI con referencia de 669A.



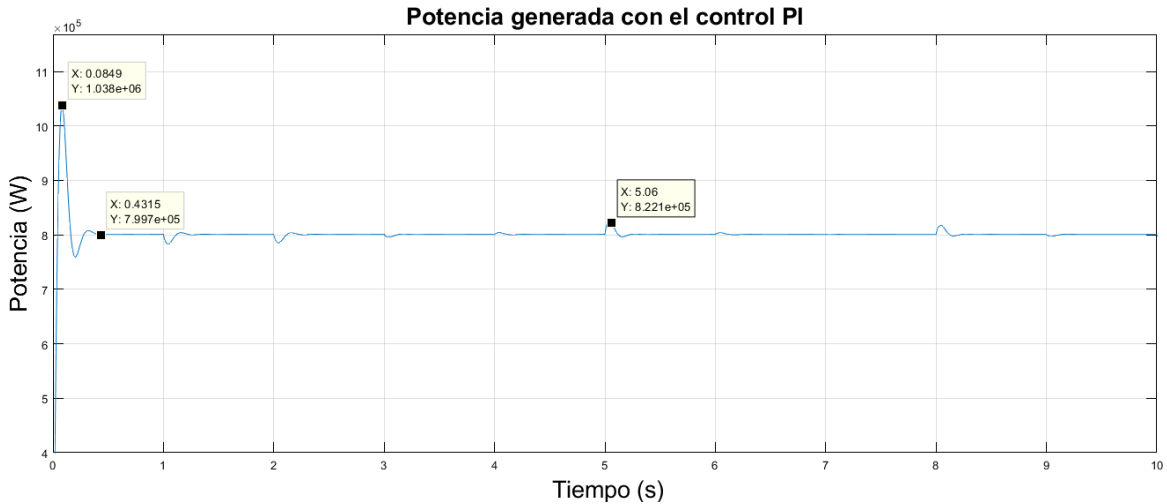


Figura 41. Señal de potencia generada del control PI con referencia de 669A.

Para observar el comportamiento del control, se determinó disminuir el tiempo de simulación a 10 segundos. La figura 40 arroja los resultados de corriente después de haber pasado por el control, teniendo como referencia la corriente nominal del generador. Se observa un importante sobrepaso en el segundo 0.0849 del 130%, cabe señalar que según criterio de coordinación de protecciones un generador tiene como máxima capacidad de 150% la corriente nominal para que sufra daños, según este criterio el sobrepaso no ocasionaría ninguna activación de protecciones. En el segundo 0.5 se estabiliza el sistema, solo obteniendo ligeras perturbaciones en el segundo 5 y segundo 8. La figura 41 pertenece a la potencia de salida del generador que se comporta de manera similar.

#### 4.7.2 Referencia= 400A.

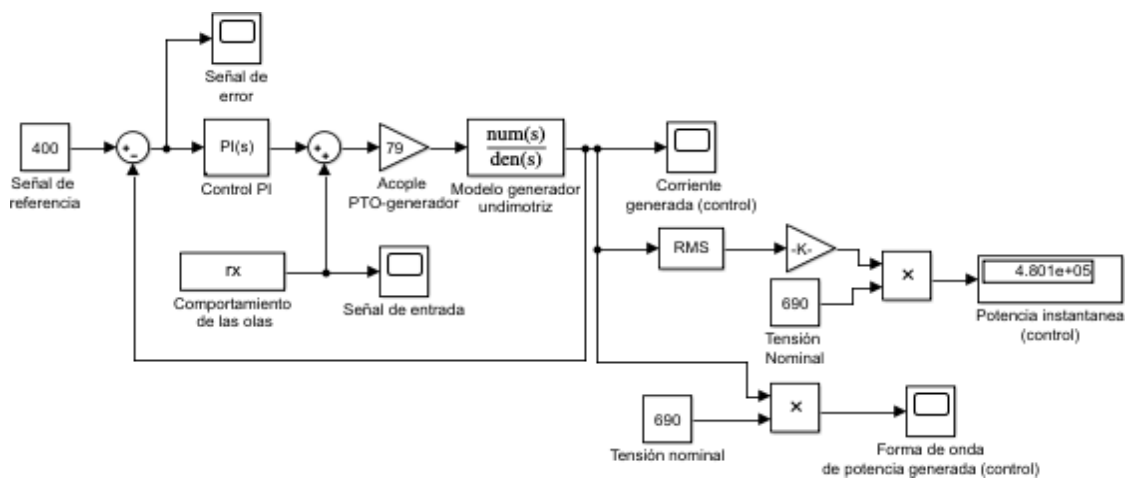


Figura 42. Diagrama de bloques del control PI con referencia de 400A.

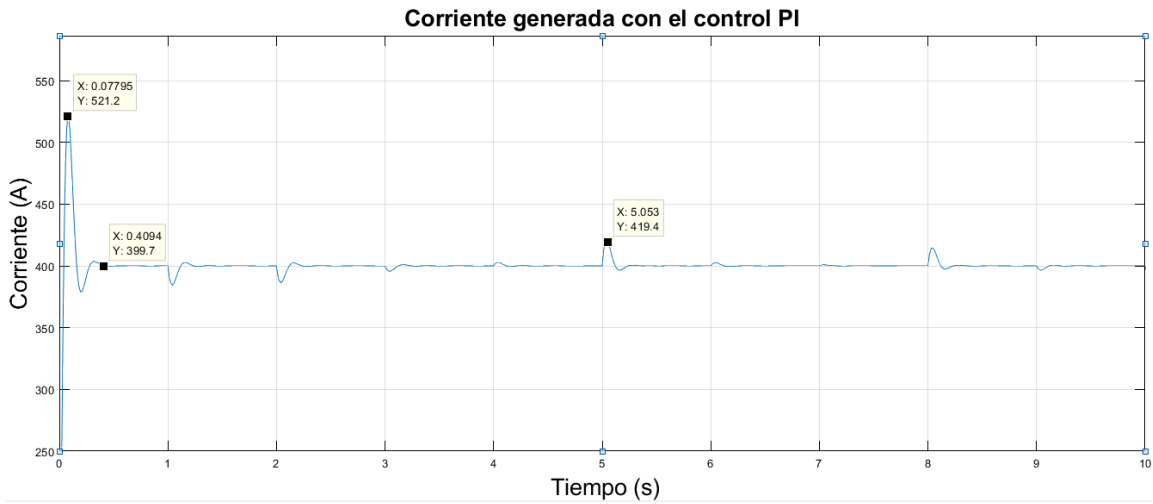


Figura 43. Señal de corriente generada del control PI con referencia de 400A.

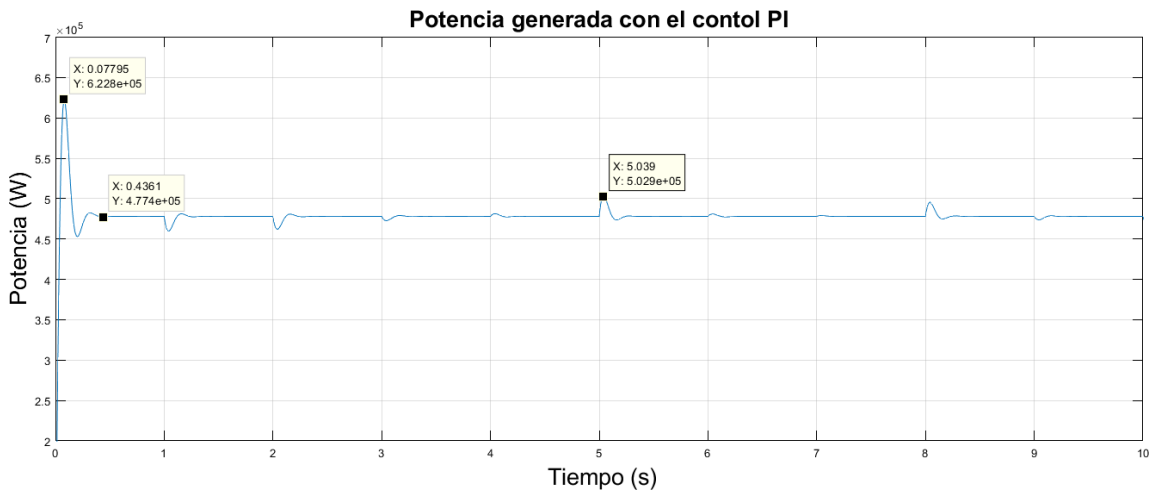


Figura 44. Señal de potencia generada del control PI con referencia de 400A.

Las figuras 43, 44 muestran la corriente y la potencia de salida del generador, con una referencia de 400A. Teniendo como principal característica que se tiene un sobrepaso que no alcanza la corriente nominal del generador, otro punto a evaluar es que el sistema se estabiliza en un tiempo menor en comparación con el sistema que tiene de referencia la corriente nominal.

### 4.7.3 Referencia=200A.

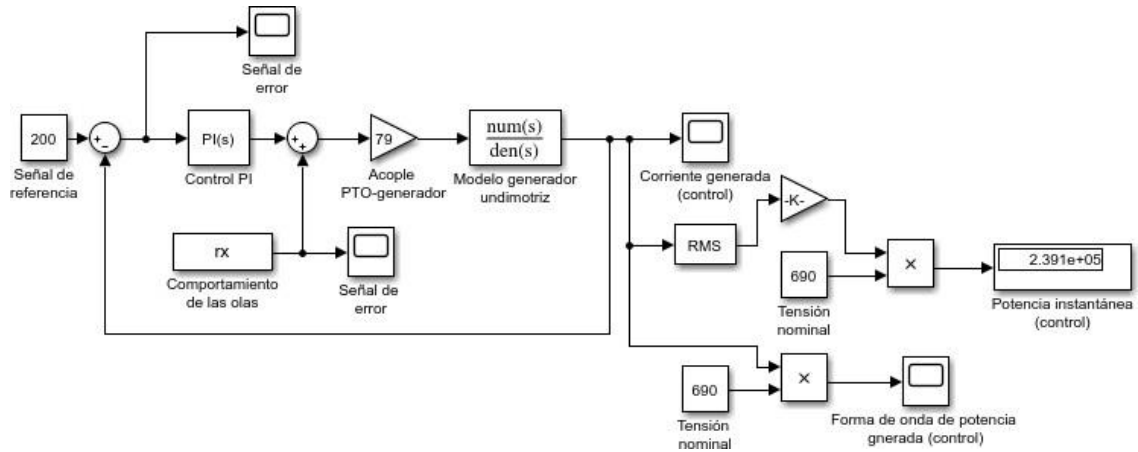


Figura 45. Diagrama de bloques del control PI con referencia de 200A.

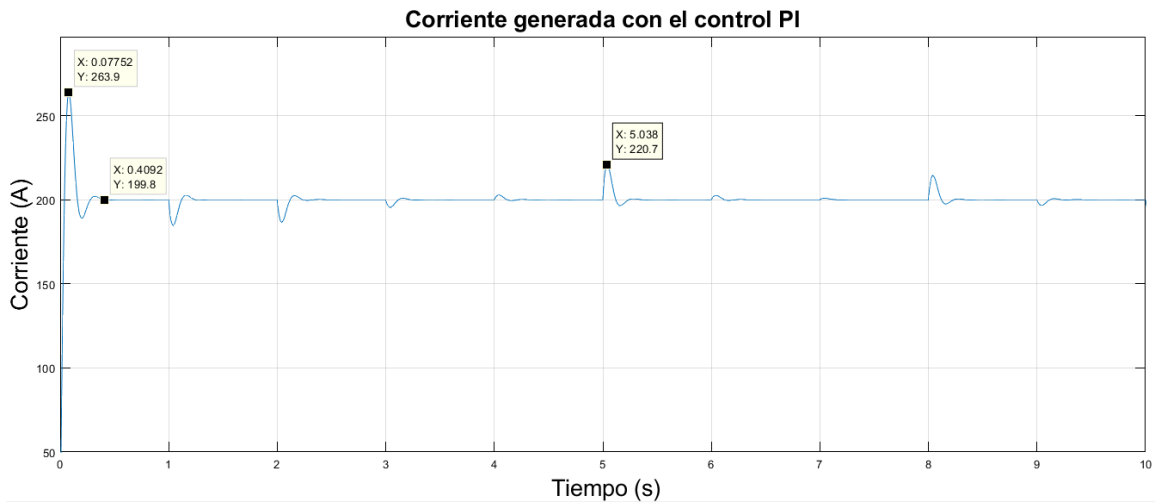


Figura 46. Señal de corriente generada del control PI con referencia de 200A.

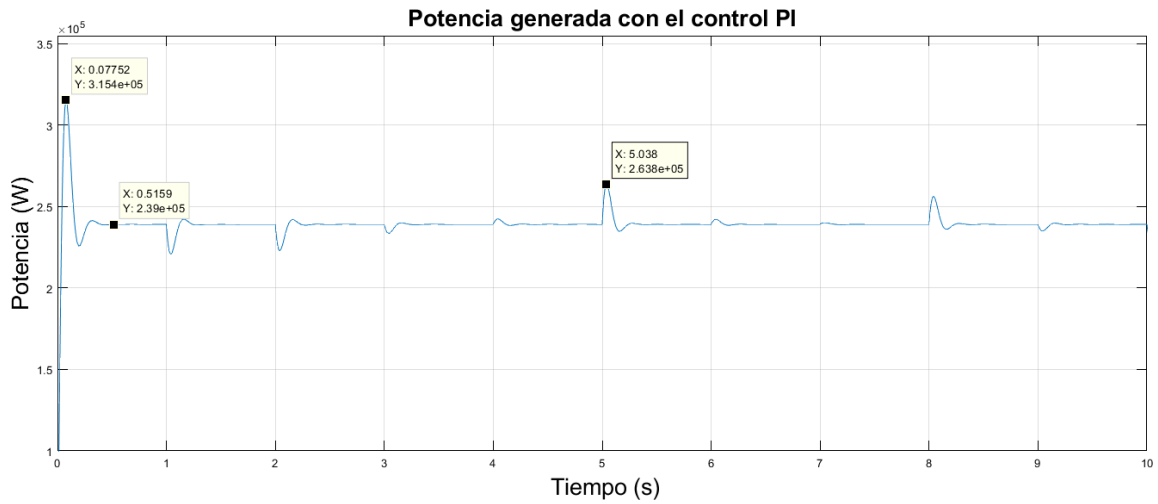


Figura 47. Señal de potencia generada del control PI con referencia de 200A.

Las figuras 46 y 47 también muestran el comportamiento de corriente y potencia, pero con una señal de referencia de 200 A, con esta referencia se obtienen más perturbaciones y, los picos de estas son más pronunciados, las mismas características las tiene la señal de la potencia.

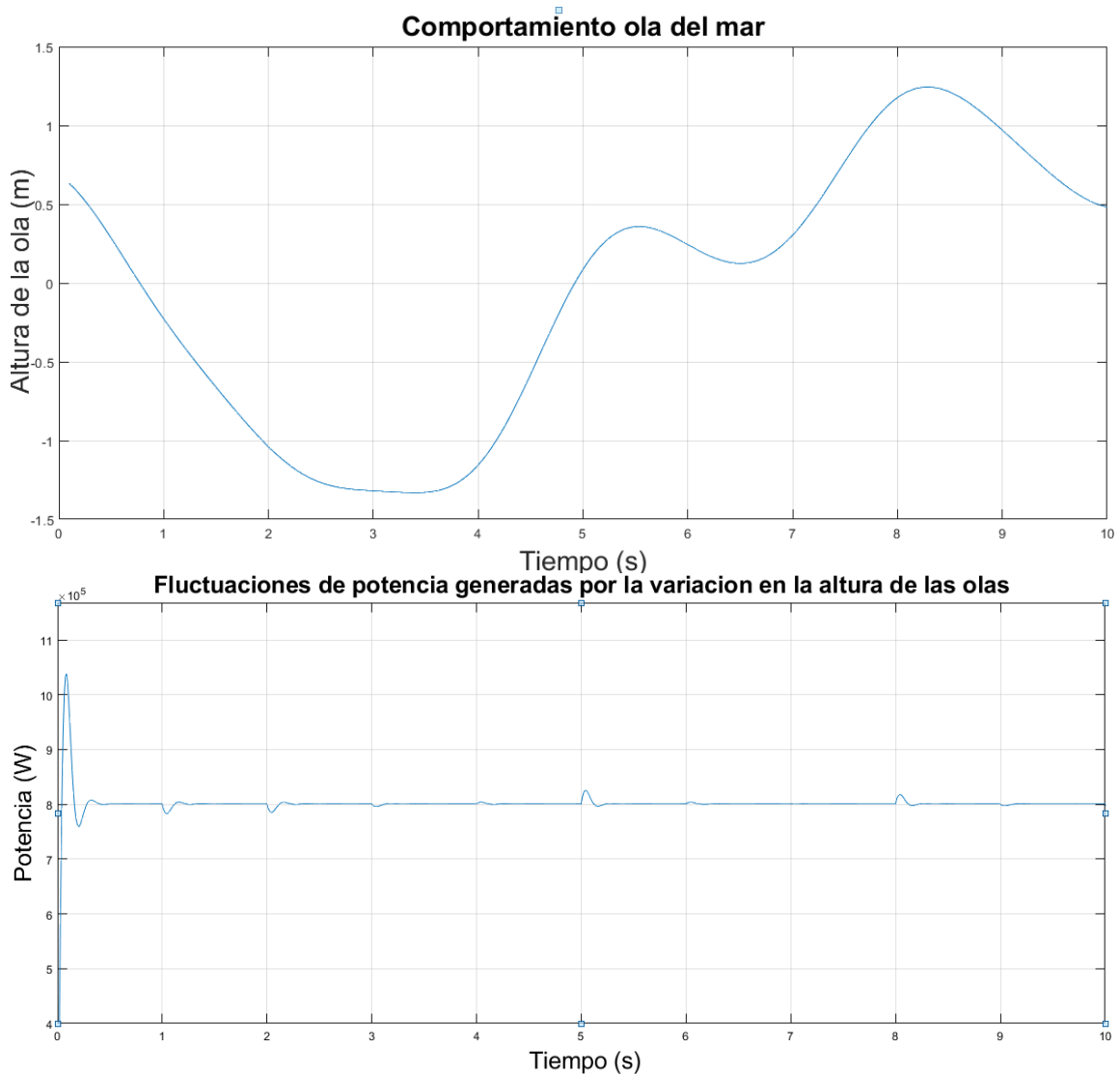


Figura 48. Comparación entre el comportamiento de oleaje y la respuesta del control ante fluctuaciones en la altura de la ola.

En la parte superior de la figura 48, se encuentra el comportamiento de las olas del mar con un tiempo de simulación de 10 segundos, esto para que se logren identificar las perturbaciones que tiene la potencia después del tiempo de estabilización. Las leves perturbaciones que se presentan después del primer segundo son generadas por el oleaje

del mar. El control es capaz de responder ante esta perturbación del sistema y volver la señal a su referencia.

## Conclusiones y trabajos futuros

El papel de las energías renovables en Colombia implica un cambio en la generación de energía y nuevas propuestas para disminuir el porcentaje de ZNI (zona no interconectada) que actualmente es del 52% lo que corresponde a cerca de 1.900.000 habitantes en el territorio colombiano. Estas zonas se encuentran localizadas en 17 departamentos, 97 municipios. IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas) caracteriza el departamento insular (San Andrés y Providencia) entre otras zonas costeras, como ZNI debido a diferentes factores como es la baja densidad poblacional, bajo consumo promedio, altas pérdidas, baja capacidad de pago por parte de los usuarios, zonas costeras e insulares. Bajo estas circunstancias la generación undimotriz resulta una alternativa atractiva, aunque, la generación undimotriz conlleva un dilema que abarcan gran parte de las energías renovables, como son las fluctuaciones de potencia ocasionadas por la variación del recurso primario. Para ello se propone un control PI del generador Indar NCR-450-L/4, con el fin de reducir estas fluctuaciones y acoplar esta generación con una microrred y así satisfacer las necesidades energéticas de una comunidad en específico.

Se calculó el potencial undimotriz en el Cabo de la Vela, esto con el modelo de onda proporcional, obteniendo valores que hacen que dicha región sea viable para la construcción de parques de generación undimotriz, además, este sitio cuenta con las características ambientales y topográficas ideales para el desarrollo de este proyecto. Cabe resaltar que en los últimos años el Cabo de la Vela se ha convertido en un gran sitio turístico, lo que provoca que se genere una demanda de energía eléctrica de calidad.

Es fundamental tener en cuenta como es el comportamiento del mar, esto para evaluar cómo será el funcionamiento del generador undimotriz. El espectro de Pierson-Moskowitz permite hacer una caracterización del mar, teniendo como principal variable la velocidad de viento. La primordial característica que se observa en la figura 14, es que el oleaje es irregular tanto en altura, como frecuencia. La mayoría de literatura se modela el mar como una onda sinusoidal de frecuencia constante, es por esto por lo que no se tenía en cuenta las fluctuaciones que genera el recurso primario.

El modelo de generador undimotriz se basó en un modelo mecánico (figura 12), que consta de masas, amortiguadores, y resortes con características reales, además, de un modelo eléctrico, más específico de un generador Indar NCR-450-L/4, se tomó la decisión de tomar este generador, por las ventajas que presenta, dentro de las cuales se puede resaltar:

- Los generadores doblemente alimentados presentan la propiedad de funcionar a una velocidad variable
- Pequeñas dimensiones comparadas con otros generadores de velocidad variable. debido principalmente a que la potencia del rotor es la única que se transforma.

- Esta clase de generadores pueden variar su factor de potencia, es decir, pueden cumplir la función de suministrar potencia reactiva si se desea,
- Bajos costos de mantenimiento e instalación
- El generador doblemente alimentado, es empleado en el uso de energía renovable como es la energía eólica
- No genera gases contaminantes. sin mencionar que posee la capacidad de ser autónoma y silenciosa, no requiere de una fuente externa de excitación ni combustible para la generación de electricidad.

El control del sistema de generación undimotriz se realizó a partir del modelo del generador asíncrono doblemente alimentado Indar NCR-450-L/4, con su respectivo modelo mecánico, estos modelos se simplifican unidos por medio del acople o caja multiplicadora. El sistema se caracteriza por ser un sistema SISO, donde la entrada del sistema es la altura del mar en metros definida por el modelo Pierson-Moskowitz, y la salida del sistema es la corriente del generador en amperios. Es importante aclarar que la variable de estado elegida para caracterizar la planta es la corriente de salida del generador en el dominio de Laplace. Al implementar el controlador PI al sistema, se observa que la corriente de salida del generador corresponde a un valor muy cercano al nominal 669A (figura 34), por lo tanto, su potencia nominal se estabiliza en 800kW, gracias a que el modelo del comportamiento del mar permite que alcance estos niveles de generación, aunque, con unas leves perturbaciones generadas por los parámetros establecidos en el controlador y los picos de las olas del mar que se ven reflejadas a la salida del sistema. La señal de error del sistema presenta una diferencia entre la señal de corriente del generador y la nominal muy cercana a cero, lo que corrobora la eficacia del control aplicado. Esto conlleva a la conclusión que el control demuestra una reducción significativa de las fluctuaciones de potencia, a raíz de las oscilaciones del oleaje marítimo.

Como trabajo a futuro se propone un control combinado, que además de controlar el generador se controle la potencia mecánica absorbida, por medio del ángulo de inclinación y las fuerzas que interactúan entre las olas del mar y las aspas del modelo de recolección de energía cinética, con un control en las entradas del modelo propuesto en el documento, se reducen los tiempos de estabilización de la potencia generada, además de un mayor control en la absorción de energía cinética, aumentando o disminuyendo la captación dependiendo de las condiciones de la microrred. También se recomienda hacer un análisis de comportamiento del generador undimotriz a condiciones ambientales atípicas, tales como tormentas, tsunamis, olas de gran altura, esto para tomar decisiones de funcionamiento.



## Bibliografía

- Atlas Interactivo - Vientos - IDEAM.* (06 de 05 de 2020). Recuperado el 06 de 05 de 2020, de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>
- Barambones, O. (2018). Control de modo deslizante adaptativo para un generador de inducción de doble alimentación utilizado en un sistema de columna de agua oscilante. *energies*.
- BDrew, A. R. (2015). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*.
- BDrew, A. R. (s.f.). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy Vol. 223 Part A: J. Power and Energy*.
- Benito, A. B. (2018). *Máquinas Eléctricas*. Mexico: Facultad Nacional de Ingeniería.
- Bernal, C., & Castillo, N. (2016). Análisis técnico para la implementación de un sistema undimotriz para generación de energía eléctrica en Colombia. *Universidad de la Salle*.
- Bracco, G. (2020). Optimizing energy production of an Inertial Sea Wave Energy Converter via. *Science Direct*.
- Colombia, uno de los 21 países del mundo con dos océanos.* (08 de 06 de 2017). Recuperado el 05 de 05 de 2020, de La opinión : <https://www.laopinion.com.co/zona-verde/colombia-uno-de-los-21-paises-del-mundo-con-dos-oceanos-134761#OP>
- Cortes, P. P. (2018). Aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa asturiana. *Universidad de Oviedo*.
- Cristancho, O. G. (2007). Modelado y simulación del sistema. *Universidad industrial de Santander*.
- Douglas Ernesto, C. C. (2010). *La energía mareomotriz como energía renovable*.
- Echarri, J. Á. (2011). Estudio de diferentes topologías. *Universidad pública de Navarra*.
- educativo, P. (06 de Abril de 2012). *Portal educativo*. Obtenido de <https://www.portaleducativo.net/sexta-basico/756/Energia-renovable-y-no-renovable>.
- El reto de almacenar la energía de fuentes renovables en el futuro.* ( de 2018). Recuperado el 07 de 06 de 2020, de Hipertextual: <https://hipertextual.com/presentado-por/siemens/almacenamiento-de-energia>
- Falcão, A. F. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(3), 899-918.
- Garcés, R. J.-A. (2015). Generación Undimotriz: Integración con la red y análisis de resonancia subsíncrona. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Grupel. (2016). ¿Cómo funciona un generador de energía? *Grupel*.
- Hossain, J. (2016). A wave-to-wire model of ocean wave energy conversion system using MATLAB/Simulink platform. *IEEE*.
- IDMA. (2018). Situación global de la energías renovables. *IDMA*.

- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martínez De Alegría, I., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 413-434.
- Luckins, A. (2016). Model predictive control strategy for direct drive PMSG and DFIG for ocean wave energy converter system. *IEEE*.
- Mena, A. G. (2018). Implementacion de control de amplitud y fase de un convertidor de energia undimotriz. *Universidad politecnica de Madrid*.
- MME. (2013). RETIE.
- Moreno García, H. E. (2016). Estudio de pre-factibilidad para generación de energía mareomotriz en la Costa Pacífica Colombiana.
- Neghme, I. M. (2018). Un sistema de energía undimotriz. *Ciencia y Tecnología*, 274-279.
- Neill, S. P., & Hashemi, M. (2018). *Wave Energy*. Elsevier.
- Oscar Barambones, J. A. (2018). A real time sliding mode control for a wave energy converter based on a wells turbine. *Ocean Engineering*.
- Polinder, H., Damen, M. E., & Gardner, F. (2005). Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator. *European Transactions on Electrical Power*, 15(3), 245-256.
- Prudell, J. H. (2012). Direct drive ocean wave energy electric plant design methodology. *IEEE*.
- Puertas Orozco, O. L. (2008). Incidence of El Niño southern oscillation in the precipitation and the temperature of the air in Colombia, using Climate Explorer. *Ingenieria y Desarrollo*, 104-118.
- Qin, C. (2018). Equivalent Modeling of Direct-drive Wave Array in Frequency Domain. *IEEE*.
- REN21. (2014). Renewables 2014 Global Status Repor.
- Ripoli, F., & Muñoz, A. (2015). Descripción espectral del oleaje. *Escuela Politecnica Superior de Alicante*.
- Stewart, R. H. (1987). Physical oceanography. *Deep Sea Research Part B. Oceanographic Literature Review*, 34(8), 629-645.
- Taccone, G. L. (2015). Fluctuaciones-Perturbaciones en la alimentación eléctrica. *electricidad en la ingeniería*.
- Teorema de Ferraris, d. g. (junio de 2006). *Bjorn512*. Obtenido de Bjorn512: <https://sites.google.com/site/bjorn512/efectos-y-principios/teorema-de-ferraris>
- Torres Parra, R. R., & Lonin, S. (2007). Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. *Boletín Científico CIOH*, 18(25), 8-18.
- UPME. (2014). Ley 1715. 26.
- UPME. (2015). Integración de las energías.
- Valencia, A. C. (2016). Crisis energética en Colombia. *TIA Tecnología, investigación y academia*, 74--82.
- Wacher, A., & Neilsen, K. (2010). Mathematical and Numerical Modeling of the AquaBuOY Wave Energy Converter. *Industry Case Studies Journal*, II, 16-33.

Wang, L., Isberg, J., & Tedeschi, E. (2018). Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 366-379.

## Anexos.

### Anexo A. Presupuesto.

Iniciar con un proyecto de generación undimotriz tiende a ser costoso, se debe de tener en cuenta varios factores, tantos costos de construcción, operación, mantenimiento y por último costos de desmantelamiento. Algo muy importante a la hora de hacer la viabilidad de un proyecto de energía undimotriz es el lugar donde se va a instalar, debido a que según su ubicación puede subir los costos de construcción de manera exponencial.

Costo generador tipo Boya:

Es uno de los dispositivos que posee más información para realizar un estudio de costos realistas. Los precios son presentados en dólares.

*TABLA 3. Costos de inversión Boya*

<b>Tipo</b>	<b>Costo</b>
Dispositivo	US \$ 3-4 Millones
Accesorios	US \$ 0,3-0,4 Millones
Instalación	US \$ 1,2-1,6 Millones
Envío	US \$ 0,2-0,3 Millones
<b>Total</b>	<b>US \$ 4,7-6,3 Millones</b>

*Referencia: Autores.*

Después se tiene el costo de mantenimiento, operación y desmantelamiento. Recopilando esta información, tenemos:

*TABLA 4. Costos de mantenimiento, operación y desmantelamiento Boya.*

<b>Tipo</b>	<b>Costo</b>
Operación y mantenimiento anual	US \$ 0,049-0,272 Millones
Reacondicionamiento	US \$ 0,49-0,68 Millones
Desmantelamiento	US \$ 0,5-1 Millones
<b>Total para la vida útil (25 años)</b>	<b>US \$ 1,72-8,4 Millones</b>

*Referencia: Autores.*

### Anexo B. Código Python.

```

import numpy as np
import tkinter as tk
import matplotlib
matplotlib.use('TkAgg')
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import scipy.signal as ss

```

```

Ventana=tk.Tk()
Ventana.title("Sistemas Undimotrices")
Am=tk.StringVar()
Fre=tk.StringVar()
Tiem=tk.StringVar()
entrada_texto =tk.Entry(Ventana, width=10, textvariable=Am)
entrada_texto.grid(padx=580,pady=200)
etiqueta =tk.Label(Ventana, text="Amplitud").place(x=450,y=200)
entrada_texto1=tk.Entry(Ventana, width=10, textvariable=Fre).place(x=580,y=250)
etiqueta =tk.Label(Ventana, text="Frecuencia").place(x=450,y=250)
entrada_texto1=tk.Entry(Ventana, width=10, textvariable=Tiem).place(x=580,y=300)
etiqueta =tk.Label(Ventana, text="Tiempo de muestreo").place(x=450,y=300)
valor=tk.Label(Ventana, text="Potencia Tipo Boya [kW/m]").place(x=550,y=50)
valor=tk.Label(Ventana, text="Potencia Oyster [kW/m]").place(x=550,y=100)
valor=tk.Label(Ventana, text="Potencia Pelamis [kW/m]").place(x=550,y=150)

```

```
def GRAFICAR():
```

```

    Frecuencia=float(Fre.get());
    Amplitud=float(Am.get())
    Tiempo=float(Tiem.get())

```

```
    s=selec.get()
```

```
    if s==1:
```

```

        M1=30;
        M2=30;
        a=30;
        B1=10;
        B2=10;
        k1=1
        k2=1
        num=[M2,B2,k2];
        den=[(M1+M2+a*M2),(M2*B1+M2*B2+M1*B2+a*B2),(M2*k1+M2*k2+B1*B2+M1*k2+k2*a),(k1*B2+B1*k2),(k1
        mySystem = ss.lti(num, den)
        t1 = np.arange(0,Tiempo,0.1)
        step = np.ones(t1.size)
        sin=step*np.sin(t1*Frecuencia)*Amplitud
        step[t1>=1] = 1
        tout1, outSignal1, xout = ss.lsim(mySystem, sin, t1)
        plt.plot(tout1,outSignal1)
        maxi1=max(outSignal1)
        valor=0.98*maxi1*maxi1
        c20 = tk.StringVar()
        c20.set(valor)
        valor=tk.Label(Ventana,textvariable=c20).place(x=720,y=50)

```

```

fig.canvas.draw()
if s==3:
    M=1;
    B=1;
    a=1;
    k=2;
    num=[1];
    den=[M+a,B,k]
    mySystem = ss.lti(num, den)

# Generate inSignal
t = np.arange(0,Tiempo,0.1)
step = np.ones(t.size)
sin=step*np.sin(t*Frecuencia)*Amplitud
step[t>=1] = 1

# Simulate and plot outSignal
tout, outSignal, xout = ss.lsim(mySystem, sin, t)
plt.plot(tout,outSignal)
maxi2=max(outSignal)
valor2=0.98*maxi2*maxi2
c202= tk.StringVar()
c202.set(valor2)
valor=tk.Label(Ventana,textvariable=c202).place(x=720,y=150)

fig.canvas.draw()

if s==2:
    M=0.3;
    B=10;
    A=0.1;
    d=2;
    num=[1];
    den=[(M),(B),(A*d)]
    mySystem2= ss.lti(num, den)
    t2= np.arange(0,Tiempo,0.1)
    step = np.ones(t2.size)
    sin2=step*np.sin(t2*Frecuencia)*Amplitud
    step[t2>=1] = 1
    tout2, outSignal2, xout2 = ss.lsim(mySystem2, sin2, t2)
    plt.plot(tout2,outSignal2)
    maxi3=max(outSignal2)
    valor1=maxi3*maxi3*0.7
    c201= tk.StringVar()
    c201.set(valor1)
    valor=tk.Label(Ventana,textvariable=c201).place(x=720,y=100)
    fig.canvas.draw()

```

*#Ubicacion del grafico*

```
fig=plt.figure()
FIGURE=FigureCanvasTkAgg(fig, master=Ventana)
FIGURE.get_tk_widget().place(x=5, y=50)
plt.ylabel('Amplitud [m]')
plt.xlabel('Tiempo [s]')
selec=tk.IntVar()
Graficar=tk.Button(Ventana, text="Graficar", command=GRAFICAR).place(x=200, y=335)
Boya=tk.Radiobutton(Ventana, text="Boya", value=1,
                    variable=selec).place(x=450, y=50)
Oyster=tk.Radiobutton(Ventana, text="Oyster", value=2,
                      variable=selec).place(x=450, y=100)
Pelamis=tk.Radiobutton(Ventana, text="Pelamis", value=3,
                       variable=selec).place(x=450, y=150)

Ventana.mainloop()
```