



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA



“Estudio numérico-experimental de una boya para equipo undimotriz de segunda generación”

David Alejandro Olivos Ibáñez

Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía: Alex Flores Maradiaga

Profesor Correferente: Udo Rheinschmidt

Fecha: Noviembre 2020

1 Resumen ejecutivo

La energía undimotriz es una de las energías renovables que tiene el mayor potencial energético en el mundo, la cual no se ha podido aprovechar debido a su poco desarrollo y la complejidad del medio donde esta se presenta.

En este trabajo se profundizará en cómo aprovechar esta energía, la cual utiliza la fuerza contenida en las olas, para producir energía. Para captar esta fuerza se diseñarán diferentes geometrías de boyas, con el fin de analizar el comportamiento de estos cuerpos al enfrentarse a las olas. Las condiciones de oleaje a estudiar se basarán en las olas que se producen la zona de Punta Curaumilla, ubicada en el sector de Laguna Verde, Región de Valparaíso.

Para reproducir este suceso se utilizará el software ANSYS AQWA, el cual permite simular la interacción de olas con cuerpos o estructuras. Del software se utilizarán los módulos Hydrodynamic Diffraction e Hydrodynamic Response, los cuales permitirán obtener diversos resultados que serán analizados para las diferentes geometrías diseñadas. Mediante el análisis y comparación de resultados obtenidos para cada una de las geometrías, se determina que la boya cilíndrica de 3 metros de diámetro es la que presenta un mejor comportamiento respecto al oleaje, por lo cual se procede a simular nuevas boyas con referencia a este diámetro para encontrar un diseño óptimo.

De las nuevas boyas analizadas se determina que una boya cilíndrica de diámetro de 2,75 metros es la opción más viable, dado que tiene un movimiento muy similar al oleaje incidente, lo cual permitiría una mayor resonancia. También se determinó que las fuerzas más influyentes para la absorción de energía son la fuerza de Froude-Krylov y la de difracción, las cuales se relacionan directamente con la forma y movimiento de la boya.

Índice

1	Resumen ejecutivo.....	2
2	Introducción	7
3	Objetivos.....	8
4	Estado del arte	8
4.1	Tecnología desarrollada en el mundo	8
4.2	Contexto nacional.....	11
4.3	Convertidores de energía de las olas	14
5	Metodología de trabajo	19
6	Marco Teórico	20
6.1	Las Olas	21
6.2	Parámetros de una ola.....	23
6.3	Teoría de Airy	25
6.4	Absorbedor puntual.....	32
6.5	Resonancia.....	38
7	Ubicación y Diseño de boya	39
7.1	Ubicación	39
7.2	Diseño de boya	41
8	Simulación numérica en Ansys Aqwa	45
8.1	Geometry.....	46
8.2	Model	48
9	Análisis y Resultados	54
9.1	Boyas preliminares	54
9.2	Optimización de Geometría.....	65
10	. Conclusiones	72
11	. Bibliografía.....	74

Índice de Imágenes

Imagen 1: Potencial undimotriz en el mundo en kW/m de frente de ola[2].	9
Imagen 2: Estructura de extracción undimotriz "Pelamis".	10
Imagen 3: Central undimotriz Mutriku.	10
Imagen 4: Planta Manzanillo, México.	11
Imagen 5: Capacidad Instalada del Sistema Eléctrico Nacional.[3]	12
Imagen 6: Potencial de generación en Chile.	13
Imagen 7: Proyecto Cifuncho II.	13
Imagen 8: Proyecto Wilefko.	14
Imagen 9: WECS clasificados según su ubicación.[4]	15
Imagen 10: Captación de energía según la posición[4].	16
Imagen 11: Columna de agua oscilante.[5]	17
Imagen 12: Wave dragón.[5]	17
Imagen 13: Pato de Salter.[5].	18
Imagen 14: Pelamis.[4]	18
Imagen 15: Generación de olas por medio de la energía del sol. [2].	20
Imagen 16: Energía de una Ola.[2]	21
Imagen 17: Movimiento descrito por las partículas marinas.[6]	22
Imagen 18: Tipos de olas.[7]	22
Imagen 19: Parámetros de una ola.[7]	23
Imagen 20: Representación de η en función de la fase.[7].	26
Imagen 21: Volumen de control.[7]	27
Imagen 22: Delimitación de los campos de validez según profundidad. [7]	30
Imagen 23: Trayectoria de las partículas para aguas profundas, intermedias y someras.[7]	32
Imagen 24: Representación de un oscilador mecánico.[8]	32
Imagen 25: Representación de las oscilaciones para un sistema crítico, sobreamortiguado y poco amortiguado.	34
Imagen 26: Dominio de fuerzas según tamaño de una estructura.[9]	36
Imagen 27: Resonancia de una onda sin amortiguación.	38
Imagen 28: Boceto de la geometría	42
Imagen 29: Creación de la geometría por medio de revolución.	42
Imagen 30: Diseño de boyas.	43

Imagen 31: Workbench con HD y HR enlazados.....	45
Imagen 32: Representación función Thin/Surface.....	46
Imagen 33: Menú comando "Slice"	47
Imagen 34: Creación "Form New Part"	47
Imagen 35: Outline del Módulo Model	48
Imagen 36: Details of Geometry	48
Imagen 37: Details of Point Mass	49
Imagen 38: Mallado de la geometría	50
Imagen 39: Details of Mesh	50
Imagen 40: "Analysis Settings".....	51
Imagen 41: " Wave Directions".....	51
Imagen 42: "Wave frequencies".....	52
Imagen 43: "Analysis Settings" de HR.....	53
Imagen 44: Posición en el tiempo de Cilindro-cono de 3 metros.....	54
Imagen 45: Posición en el tiempo de Cilindro-cono de 5 metros.....	55
Imagen 46: Posición en el tiempo de Cilindro-cono de 7 metros.....	55
Imagen 47: Posición en el tiempo de Boya Cilíndrica de 3 metros.....	56
Imagen 48: Posición en el tiempo de Boya Cilíndrica de 5 metros.....	56
Imagen 49: Posición en el tiempo de Boya Cilíndrica de 7 metros.....	57
Imagen 50: Posición en el tiempo de Boya Cilindro-Esfera de 3 metros.	58
Imagen 51: Posición en el tiempo de Boya Cilindro-Esfera de 5 metros.	58
Imagen 52: Posición en el tiempo de Boya Cilindro-Esfera de 7 metros.	59
Imagen 53: Posición en el tiempo boya esférica de 5 metros.	60
Imagen 54: Posición en el tiempo para boyas de Diámetro de 3 metros.	61
Imagen 55: Posición en el tiempo para Diámetro de 5 metros.....	62
Imagen 56: Posición en el tiempo para Diámetro de 7 metros.....	63
Imagen 57: Masa agregada a una frecuencia de 0,094 [Hz]	63
Imagen 58: Factor de Amortiguación a una frecuencia de 0,094 [Hz]	64
Imagen 59: Posición en el tiempo para diámetro de 2,5 metros.	65
Imagen 60: Posición en el tiempo para diámetro de 3,5 metros.	66
Imagen 61: Posición en el tiempo para un diámetro de 2,75 metros.	67
Imagen 62: Posición en el tiempo para diámetros de 2,5; 2,75 y 3 metros	67
Imagen 63: Comparación de Fuerza de Froude-Krylov.....	69
Imagen 64: Comparación de Fuerza de Difracción.....	70

Imagen 65: Comparación Fuerza de Restauración Hidrostática.....	70
Imagen 66: Comparación entre la fuerza de radiación y el movimiento de la boya.	71

Índice de Tablas

Tabla 1: Ecuaciones para determinar los parámetros de una ola en función de la profundidad (h o d).	31
Tabla 2: Parámetros de oleaje.....	39
Tabla 3: Clasificación de zona según Longitud de onda y Profundidad con datos de ECC	40
Tabla 4: Clasificación de zona según Longitud de onda y Profundidad con datos de EEM	40
Tabla 5: Parámetros de olas de punta Curaumilla para aguas intermedias	40
Tabla 6: Diámetros característicos	41
Tabla 7: Dimensiones de las boyas.....	44
Tabla 8: Amplitud máxima promedio para diámetro de 3 metros.....	60
Tabla 9: Amplitud máxima promedio para diámetro de 5 metros.....	60
Tabla 10: Amplitud máxima promedio para diámetro de 7 metros.....	61
Tabla 11: Valores de Amplitud máximos.	68

2 Introducción

Durante los últimos años se ha evidenciado como el medio ambiente se ha deteriorado producto de los avances y el desarrollo del ser humano. Una de estas consecuencias es el efecto invernadero, el cual, a pesar de ser un fenómeno natural, se ha incrementado producto de la alta emisión de gases de efecto invernadero, los cuales provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles como el carbono, petróleo o gas natural.

Debido a esta situación surgieron las energías renovables, las cuales son fuentes de energía limpia e inagotable, donde su principal diferencia con los combustibles fósiles es que no producen gases de efecto invernadero, ni emisiones contaminantes. Existen diversas formas de producir esta energía, las más conocidas son la energía solar y eólica, las cuales han tenido un crecimiento enorme y son cada vez más accesibles. Pero también se está explorando la forma de producir nuevas energías limpias, de las cuales existe una con un gran potencial aun por desarrollar, la energía undimotriz.

La energía undimotriz es la energía que se produce por la acción del viento sobre la superficie del mar, generando olas que transmiten esta energía por kilómetros hasta que finalmente rompen en las costas liberando esta energía.

Considerando el extenso mar de Chile, la extracción de este tipo de energía se presenta como una alternativa que podría ser explotada a lo largo del país, solucionando la transmisión de energía a varios lugares apartados o incluso islas que podrían generar su propia energía. Pero también hay que considerar que es una tecnología que aún está en desarrollo y no tiene el nivel de avance que otras más desarrolladas como la energía solar o eólica. Es por esto por lo que se han desarrollado diversos mecanismos que buscan extraer la energía de diversas maneras, ya sea aprovechando la energía cinética o potencial para producir electricidad.

Este trabajo pretende mediante la simulación numérica predecir el comportamiento de una boya que, al enfrentarse a una ola incidente, pueda absorber la energía potencial de la ola y cuantificarla mediante el desplazamiento del cuerpo de estudio. Además, se analizarán las variables y fuerzas involucradas en el proceso para comprender el fenómeno y optimizar la geometría de la boya.

3 Objetivos

Objetivo general

- Investigar y analizar las geometrías óptimas, el comportamiento cinemático y parámetros dinámicos de una boya para la explotación de energía undimotriz en aguas intermedias.

Objetivos específicos

- Investigar el estado del arte y marco teórico normativo de la tecnología undimotriz.
- Diseñar modelos preliminares de geometrías de boyas.
- Simular computacionalmente el comportamiento dinámico de las olas y su interacción con las boyas diseñadas, utilizando el software modular ANSYS-AQWA.
- Analizar el comportamiento de diferentes parámetros en función de su geometría.
- Optimizar una geometría de boya que permita aprovechar mejor el recurso energético.

4 Estado del arte

4.1 Tecnología desarrollada en el mundo

El desarrollo de la tecnología undimotriz se viene produciendo desde hace mucho tiempo, donde en el año 1799 en Francia se patenta el primer convertidor de energía de este tipo. Sin embargo, no logra un mayor desarrollo hasta la década de los 80 donde se comenzó a trabajar e implementar, debido a la enorme reserva energética que este recurso representa.

Se estima que el potencial de energía disponible en las olas de los océanos en el mundo es alrededor de 2.700 GW[1], del cual el total disponible para usarse es aproximadamente 500 GW. Según estos datos, hay una enorme cantidad de energía a nivel mundial que puede ser aprovechada como se aprecia en la Imagen 1.

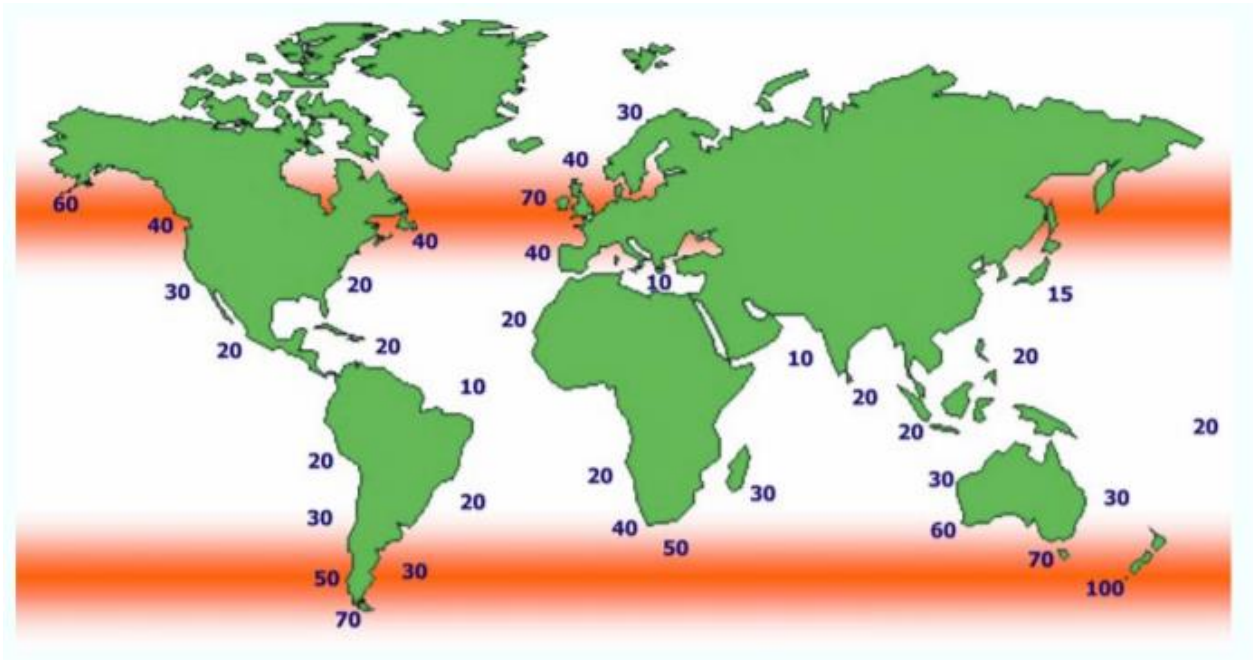


Imagen 1: Potencial undimotriz en el mundo en kW/m de frente de ola[2].

De esta imagen se observa que los mayores potenciales energéticos se encuentran a lo largo de las costas de Canadá y Estados Unidos, en la costa sur de Australia y América del Sur y en la costa occidental de Europa donde países como Noruega, Escocia y Reino Unido son los líderes en el desarrollo de esta tecnología.

Dado el gran potencial que presentan estos países, se crea en el año 2003 el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC), creado por el gobierno británico para impulsar la industria de este tipo de energía. Este centro cuenta con instalaciones para la prueba de olas y mareas, en variadas condiciones climatológicas y marinas, para analizar en detalle el rendimiento de prototipos.

Una de las tecnologías más desarrolladas es la de Pelamis Wave power, la cual es una empresa que ha instalado la primera planta undimotriz comercial, ubicada en Agucadoure, Portugal en el año 2008. Esta planta tiene una potencia inicial 2,25 MW, con lo que se abastece a alrededor de 6.000 personas.

Pelamis consiste en tubos conectados que están semisumergidos, los cuales tienen 3 secciones cilíndricas, donde se encuentran los módulos de conversión de energía, los cuales transforman la energía cinética de las olas en energía eléctrica.



Imagen 2: Estructura de extracción undimotriz "Pelamis".

Otra de las centrales desarrolladas posteriormente es la Central de Mutriku, en España, la cual se inauguró en el año 2011. Esta consta de 16 turbinas con una potencia total de 296 kW. Esta planta utiliza la tecnología denominada columna de agua oscilante (OWC) la cual consiste en una estructura cuya parte superior forma una cámara de aire y la inferior esta sumergida en el agua. De esta forma cuando la ola viene, el nivel de agua dentro de la cámara aumenta, desplazando aire y moviendo una turbina ubicada en el interior de la estructura.



Imagen 3: Central undimotriz Mutriku.

A pesar de que la tecnología undimotriz tiene un enorme desarrollo en Europa, en Latinoamérica también se han logrado avances significativos en esta área. Unos de los proyectos destacables es la Planta Manzanillo en México, la cual será la primera planta undimotriz del país, que consiste en una serie de flotadores colocados muy cerca de la playa, conectados a un pistón hidráulico, el cual mediante el movimiento de las olas producirá energía eléctrica. Esta planta comenzó su construcción en el año 2019 y se espera su entrada en operación en el año 2020, la cual tendrá una capacidad instalada de 5 MW.

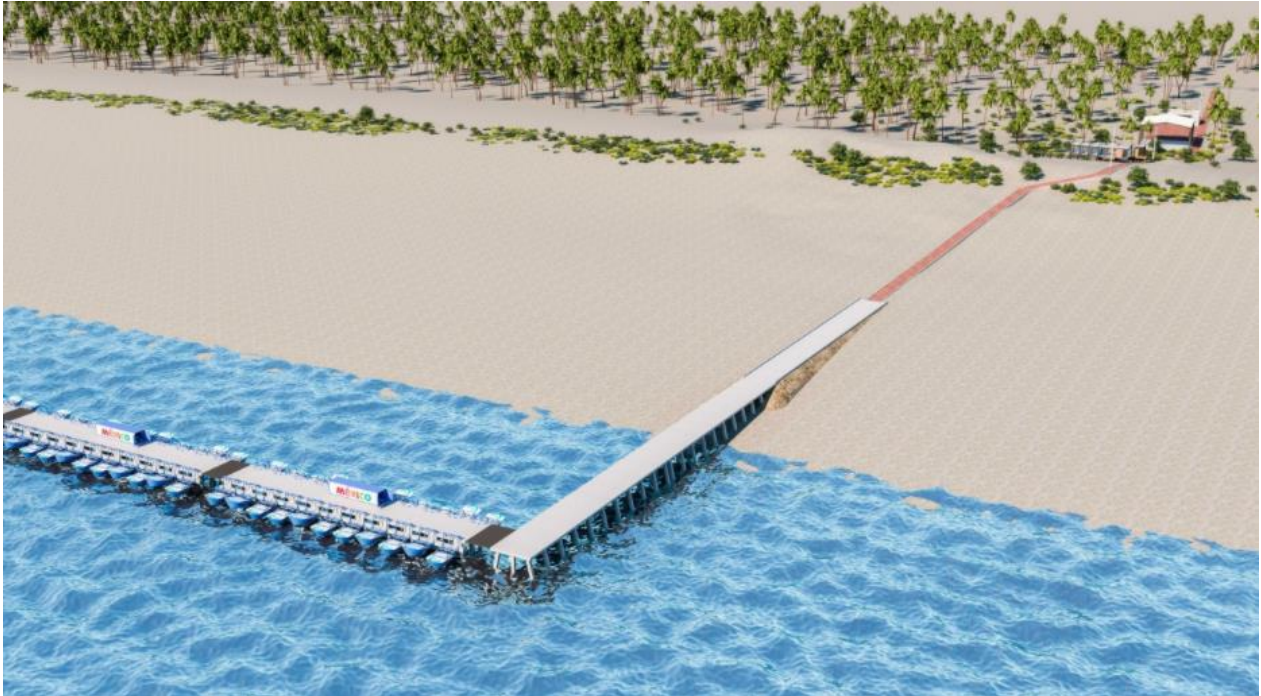


Imagen 4: Planta Manzanillo, México.

4.2 Contexto nacional

En los últimos años Chile ha tenido enorme crecimiento en el desarrollo de energías renovables, principalmente en la solar y eólica. Este crecimiento se debe en parte a la ley 20.698, la cual fomenta la participación de ERNC y establece como primera meta un 20% de participación en la generación eléctrica del país.

Según la Asociación Chilena de Energías Renovables y almacenamiento (ACERA), a diciembre de 2019 las ERNC constituyen el 23,3% de la capacidad instalada del país, y aportaron el 19,4%[3] de la generación eléctrica, la cual a septiembre de 2020 aumento a una capacidad instalada del 25,8%.

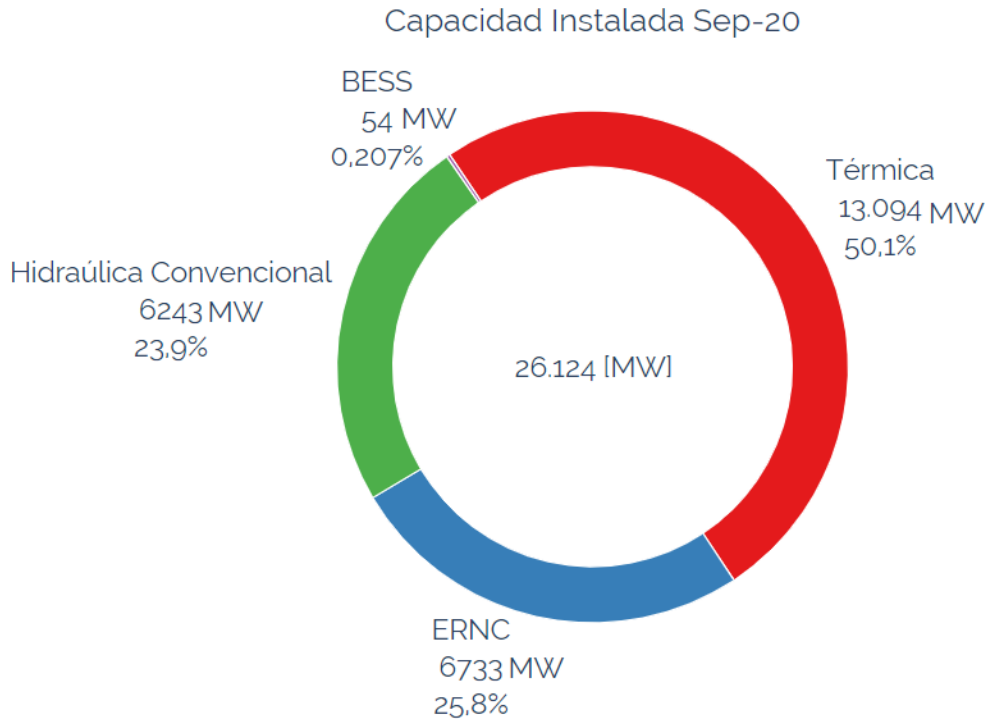


Imagen 5: Capacidad Instalada del Sistema Eléctrico Nacional.[3]

Estos datos ejemplifican el gran esfuerzo que se está haciendo a nivel nacional por hacer un cambio en la matriz energética, a lo cual aún falta mucho, ya que la siguiente meta es llegar al 70% planificado para el año 2050.

Dado el enorme desarrollo que falta para cumplir esta meta y el gran potencial energético que presenta el país, la energía undimotriz puede ser una alternativa viable, ya que es el recurso más abundante en nuestro país, del cual se estima 240 GW de potencial teórico, con niveles de energía desde los 20 kW/m en el norte y 50 kW/m en el sur, además de ser un recurso disponible las 24 horas, todos los días del año.

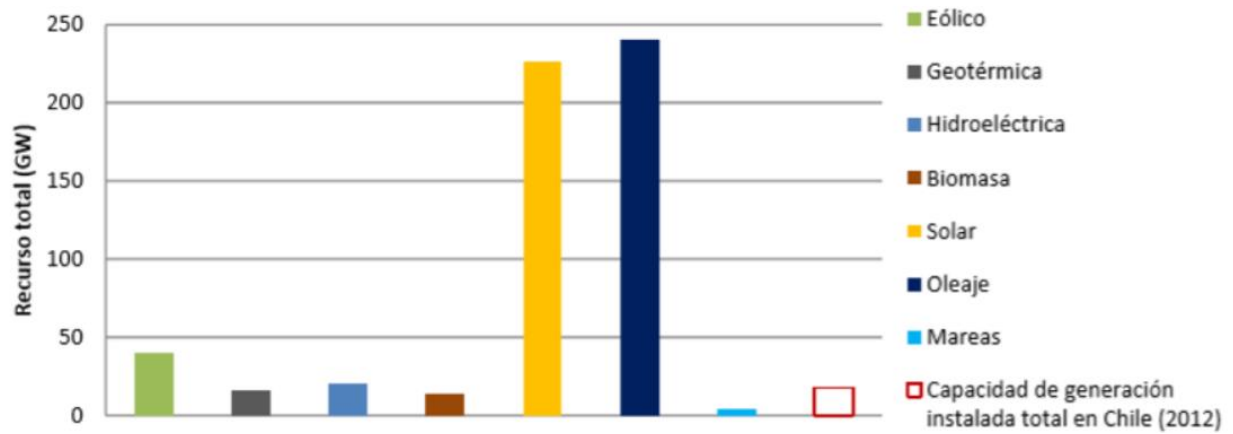


Imagen 6: Potencial de generación en Chile.

Fuente: Centro de energías renovables; Baird & Associates S.A

Con el gran potencial que hay por explotar, ya existen diversos prototipos que pretenden aprovechar esta energía. Uno de estos proyectos es el Cifuncho II, el cual es un equipo undivagomotriz, que ocupa un espacio de 100 m² en el mar y está diseñado para producir entre 50 KW y 100 KW, el cual pretende aumentar su producción a una escala industrial. Otro proyecto que destacar es Wilefko, el cual tiene una capacidad de extracción de 175.000 MWh anual en 1 km de costa, lo cual equivale a una potencia de 20 MW.



Imagen 7: Proyecto Cifuncho II.



Imagen 8: Proyecto Wilefko.

4.3 Convertidores de energía de las olas

Los convertidores de energía de olas son conocidos como WEC (Wave Energy Converter), los cuales existen diversos tipos y pueden clasificarse según su posición respecto a la costa, la forma en que se mueven, su principio de funcionamiento, entre otros.

4.3.1 Según ubicación

Según el sitio de instalación estos se clasifican en dispositivos sobre la costa, cerca de la costa y lejos de la costa[4].

- Sobre la costa (on-shore): Se trata de dispositivos apoyados en la costa: en acantilados rocosos, integrados en estructuras fijas como diques rompeolas o sobre el fondo en aguas poco profundas. Estos dispositivos también se conocen como Dispositivos de Primera Generación. Los dispositivos on-shore presentan unas ventajas importantes en términos de facilidad de instalación, inexistencia de amarres, bajos costes de mantenimiento, mayor supervivencia y menor distancia a costa para el transporte e integración de la energía producida. Sin embargo, su desarrollo está limitado por el reducido número de ubicaciones potenciales, menor nivel energético del oleaje y su impacto medioambiental y visual.
- Cerca de la costa (near-shore): Son dispositivos ubicados en aguas poco profundas (10-40 m) y distanciados de la costa unos cientos de metros. Estas profundidades moderadas son apropiadas para dispositivos de gran tamaño

apoyados por gravedad sobre el fondo o flotantes. Estos dispositivos también se conocen como dispositivos de segunda generación. La elección de una ubicación near-shore se realiza para superar los problemas asociados a los dispositivos en costa y evitar la necesidad de sistemas de fondeo costosos.

- Lejos de la costa (off-shore): Se trata de dispositivos flotantes o sumergidos ubicados en aguas profundas (50-100 m). Son el tipo de convertidores más prometedor ya que explotan el mayor potencial energético existente en alta mar. Estos dispositivos también se conocen como dispositivos de tercera generación. Hasta el momento, su desarrollo se ha visto perjudicado y retrasado porque deben hacer uso de tecnologías muy fiables y costosas que garanticen su supervivencia ya que ésta representa un aspecto clave para este tipo de dispositivos. Por lo tanto, la explotación de la energía del oleaje off- shore de modo rentable requiere de plantas con potencias instaladas de decenas de megavatios formadas por conjuntos de unidades. Estas plantas multidispositivo pueden llegar a ocupar superficies extensas y en consecuencia pueden llegar a interferir con la navegación.

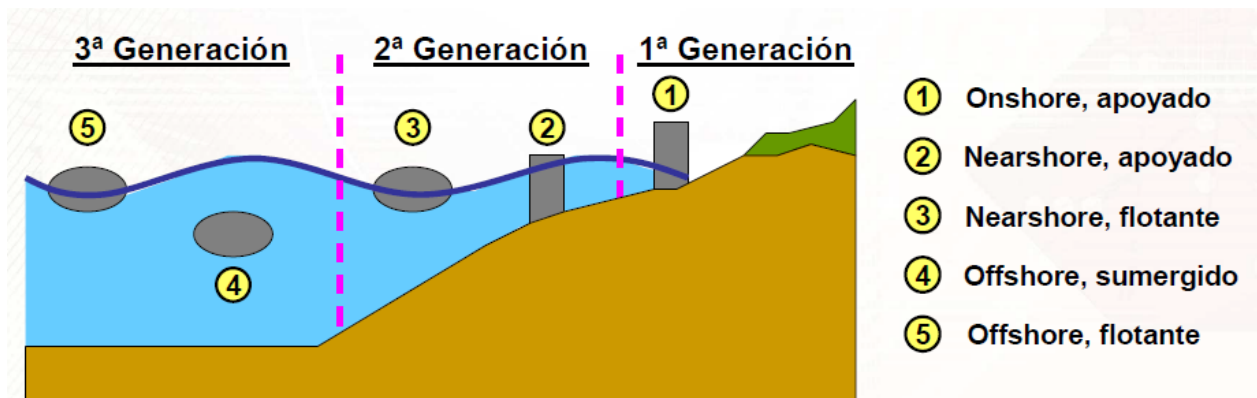


Imagen 9: WECS clasificados según su ubicación.[4]

4.3.2 Según su posición

También pueden ser clasificados por su orientación respecto al oleaje y forma, los cuales son: Absorbedores puntuales, atenuadores y totalizadores o terminadores.

- Absorbedores puntuales: Son estructuras de tamaño reducido en comparación al oleaje incidente. Generalmente se colocan varios dispositivos agrupados en diferentes configuraciones. Concentran el oleaje en un punto.
- Atenuadores: Tienen forma alargada y se colocan paralelos a la dirección de avance de la ola. Captan energía de manera progresiva. Las fuerzas a ambos lados

de la estructura se compensan, de manera que requieren un sistema de amarre menos resistente que otros tipos.

- Totalizadores o terminadores: Son de forma alargada y se colocan perpendicular a la dirección de avance de las olas. Requieren un sistema de amarre más fuerte que los atenuadores.
-

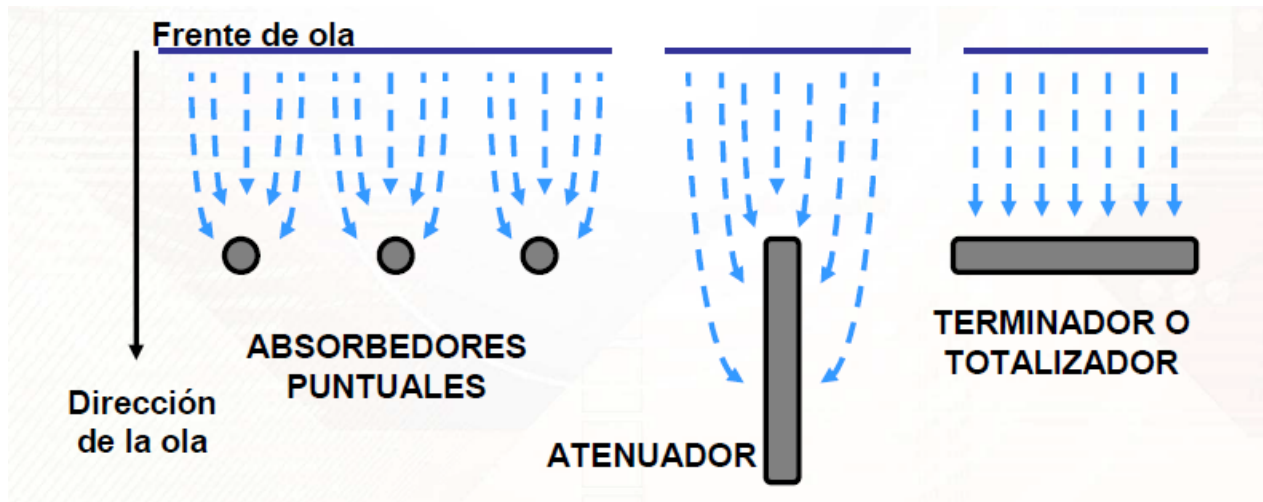


Imagen 10: Captación de energía según la posición[4].

4.3.3 Mecanismos más comunes

- Columna de agua oscilante (OWC): Este sistema aprovecha el recurso energético de las olas mediante la oscilación del agua de oleaje en el interior de una cámara. Cuando la ola penetra la cavidad, esta aumenta la presión en la columna ejerciendo una fuerza sobre el aire encerrado en la cámara, el cual mueve una turbina. Luego al retroceder la ola, esta provoca una disminución de la presión,

moviendo el aire nuevamente para llenar el vacío de ola, provocando una succión de aire que mueve nuevamente la turbina.

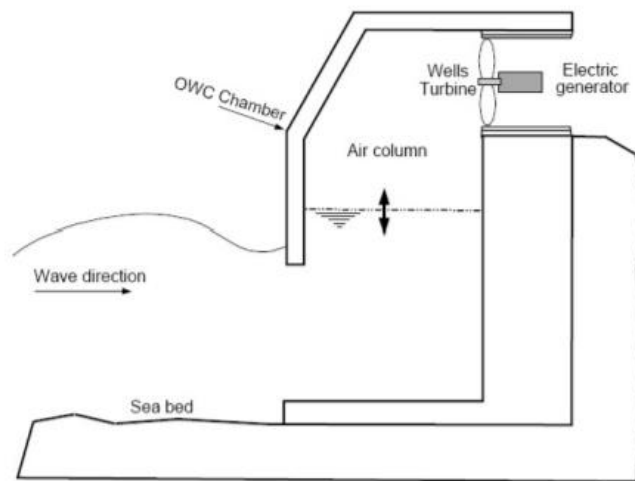


Imagen 11: Columna de agua oscilante.[5]

- Wave dragón: Este sistema utiliza un reflector que concentra las olas en dirección a una rampa, para llenar un reservorio ubicado a un nivel más alto. El agua acumulada desciende por un conducto donde está ubicada una turbina, la cual se mueve por el paso del agua. La potencia nominal de este dispositivo es de 4 a 7 MW.

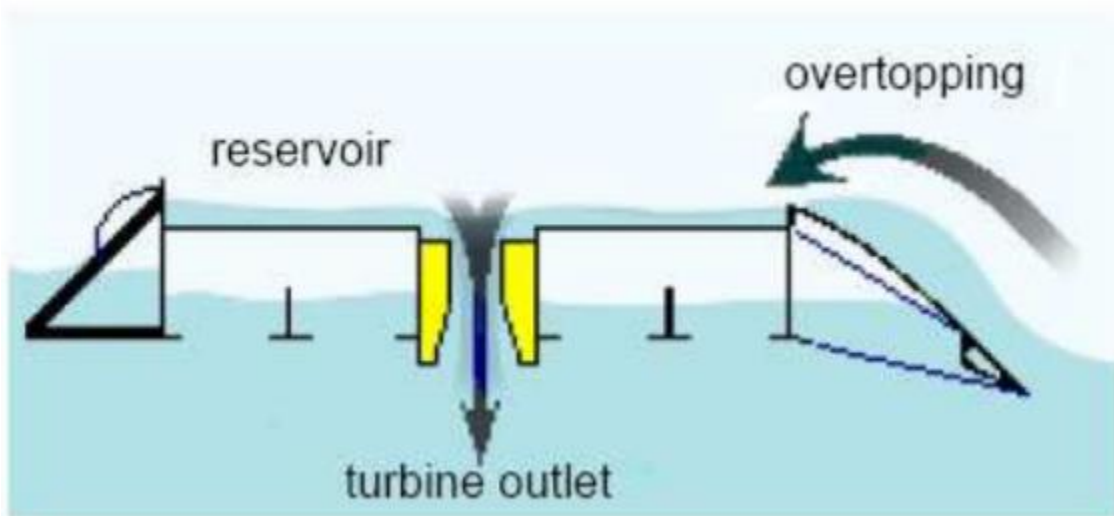


Imagen 12: Wave dragón.[5]

- Pato de Salter: Es uno de primeros sistemas desarrollados para extraer energía undimotriz. Fue inventado en el año 1970 y consiste en una estructura off-shore anclada al lecho marino, la cual tiene una cámara que rota sobre su eje por la fuerza de las olas, para transformar este movimiento rotatorio a energía eléctrica.

A pesar de ser un sistema muy eficiente, es muy difícil su implementación debido a su complejo y costoso sistema hidráulico.

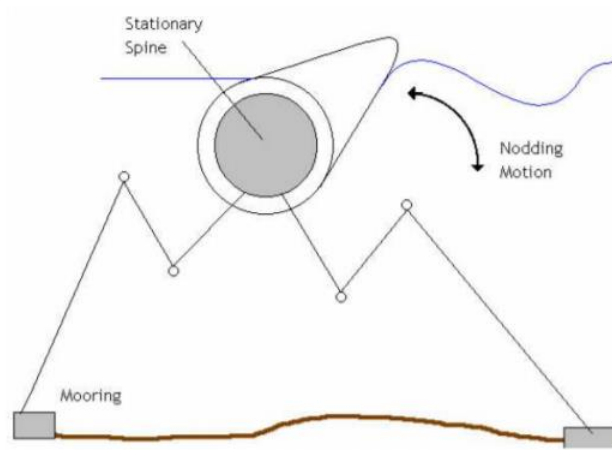


Imagen 13: Pato de Salter.[5]

- Pelamis o Serpiente Marina: Sistema creado en Escocia, el cual consiste en 4 cilindros articulados de 3,5 m de diámetro y 30 metros de longitud que hacen de flotadores y tres cilindros articulados de 3,5 metros de diámetro y 5 metros de largo, los cuales son las unidades generadoras de energía. El sistema genera energía mediante el movimiento serpenteante arriba abajo y de lado a lado, el cual se transmite a un sistema hidráulico que mueve los generadores eléctricos.

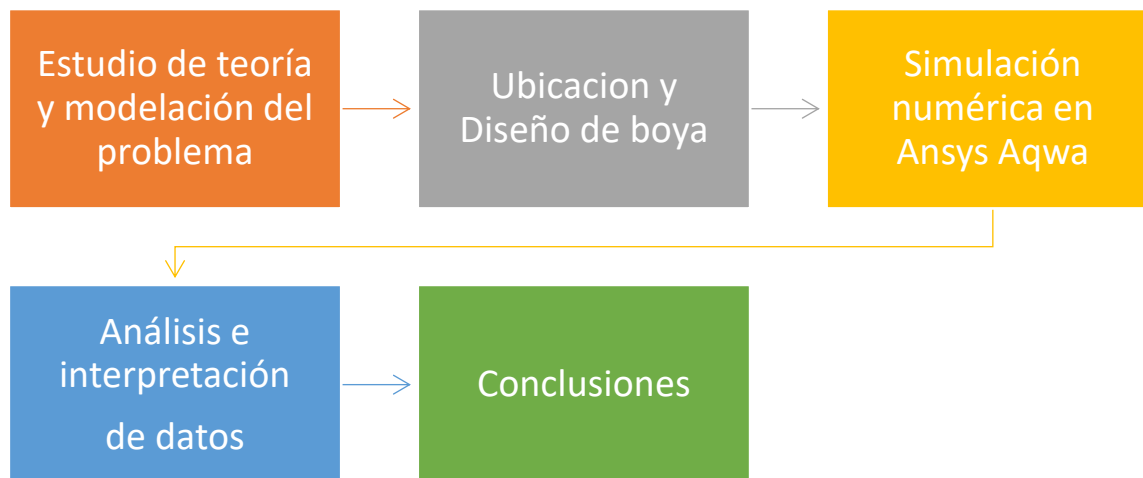


Imagen 14: Pelamis.[4]

5 Metodología de trabajo

Mediante el estudio de la situación actual del desarrollo de la energía undimotriz, este trabajo pretende estudiar el comportamiento de diferentes geometrías de boyas sometidas a un oleaje regular, para poder comprender y analizar las variables asociadas a esta interacción y poder optimizar un modelo que permita una mayor extracción energética a través del movimiento vertical del cuerpo.

Para cumplir este objetivo se define la siguiente metodología de trabajo:



- Estudio de teoría y modelación del problema: Etapa inicial en la cual se realiza el estudio teórico aplicable al objetivo que se busca realizar. Según el estado del arte analizado existen múltiples tipos de tecnología undimotriz, por lo cual lo inicial será comprender el comportamiento de las olas, sus parámetros más relevantes y como se transmite la energía en ella. También hay que caracterizar un modelo que describa el movimiento de la boya y las variables que intervienen.
- Ubicación y Diseño de boya: En esta sección se definirá los parámetros de estudio de la zona escogida, la cual corresponde a Punta Curaumilla. Mediante algunos estudios y herramientas se obtendrán los parámetros básicos para definir el oleaje a simular y la selección de criterios que permitan describir el estudio. Además, se crearán las geometrías preliminares a estudiar, para posteriormente optimizar el modelo más adecuado.
-
- Simulación numérica en Ansys Aqwa: Con los parámetros básicos y las geometrías definidas, se procederá a simular la interacción de las boyas con el

oleaje característico de Punta Curaumilla, esto mediante el software Ansys Aqwa y sus módulos Hydrodynamic Diffraction (HD) y Hydrodynamic Response (HR).

- Análisis e interpretación de resultados: Obtención de datos obtenidos de Ansys Aqwa, con los cuales se analizarán las variables más relevantes y se optimizara el diseño el base a los resultados
- Conclusiones:

6 Marco Teórico

La energía undimotriz o energía de las olas es una forma de almacenamiento de la energía solar. El sol produce diferentes temperaturas a través del planeta generando vientos que soplan sobre la superficie del océano que a su vez causan el oleaje. Las olas pueden viajar cientos de kilómetros con mínima pérdida de energía y con una densidad de potencia mayor que la potencia del viento o la potencia del sol.

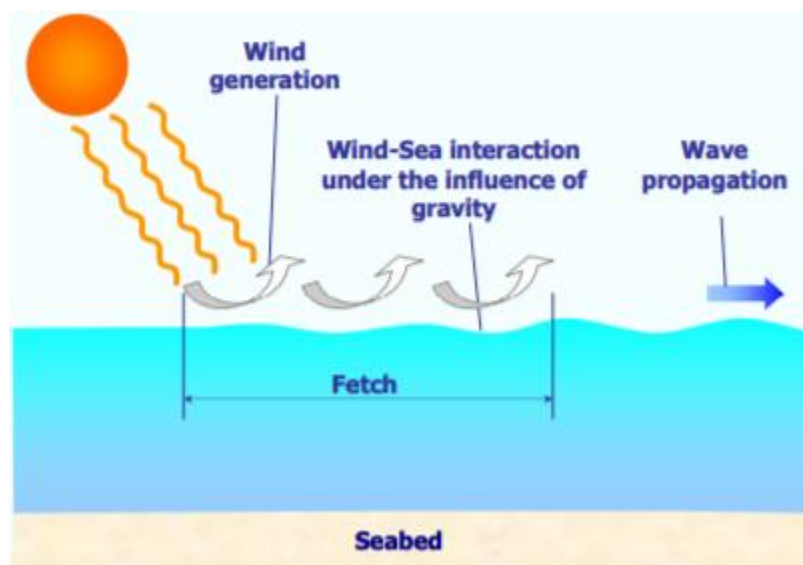


Imagen 15: Generación de olas por medio de la energía del sol. [2]

Este movimiento de masa de agua podemos expresarlo como energía en movimiento la cual se descompone en la energía cinética de las partículas las cuales se mueven de manera circular en aguas profundas donde el fondo marino no afecta a la ola., y la energía potencial de las partículas según su posición en el tiempo.

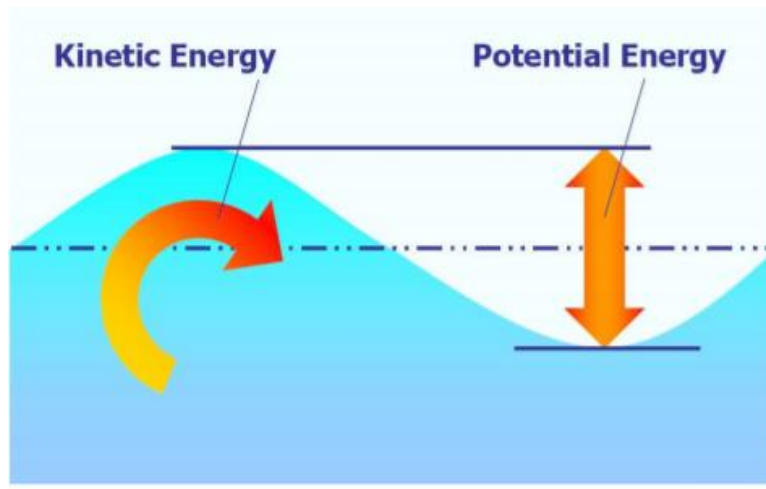


Imagen 16: Energía de una Ola.[2]

6.1 Las Olas

Las olas son ondas mecánicas (es decir, perturbaciones de un medio material) que se desplazan por la superficie de mares, océanos, ríos, lagos, canales, etc. Se propagan por la interfase o frontera de separación entre dos medios materiales, en este caso se trata del límite entre la atmósfera y la mar.

Al paso de las olas, las partículas de agua experimentan un movimiento de vaivén horizontal en la dirección de propagación de la onda (longitudinal) y otro vertical perpendicular a la dirección de propagación de la ola (transversal), el resultado es que describen un movimiento orbital circular, regresando casi al mismo sitio donde se encontraban. En realidad, se produce un pequeño desplazamiento neto del agua en la dirección de propagación, dado que en cada oscilación las partículas no retornan exactamente al mismo punto, sino a otro ligeramente más adelantado. Es por esta razón por la que el viento no provoca solamente olas, sino también corrientes superficiales.

Hay que distinguir dos movimientos. El primero es la oscilación del medio movido por la onda es un movimiento circular. El segundo es la propagación de la onda, que se produce porque la energía se transmite con ella, trasladando el fenómeno con una dirección y velocidad. El perfil de una ola, resultante del movimiento circular y de la propagación, en un instante dado, es una curva geométrica llamada trocoide y que se genera por un punto m de un círculo, cuya circunferencia rueda sin resbalar sobre una recta.

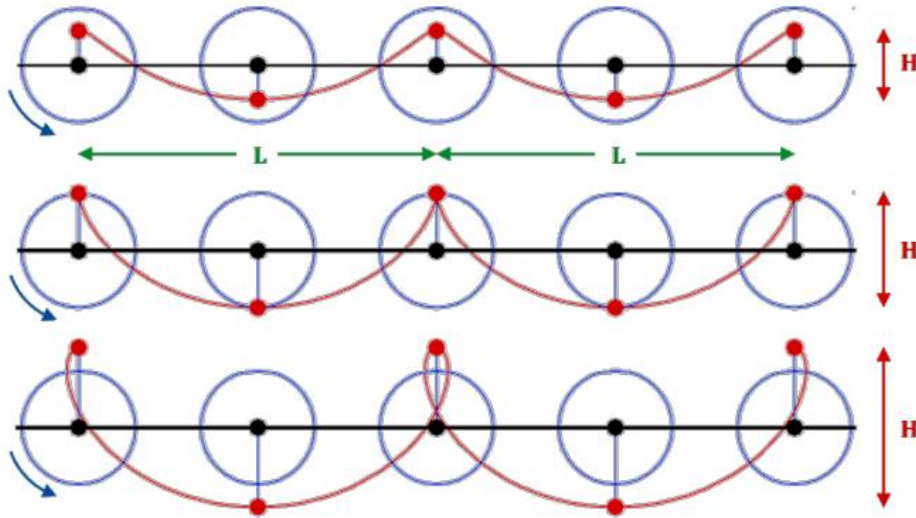


Imagen 17: Movimiento descrito por las partículas marinas.[6]

Existen distintos tipos de olas, las cuales tienen características propias. Estas pueden ser clasificadas de distintas maneras, como lo muestra la Imagen 18 , donde aparecen de olas clasificadas por distintos criterios.

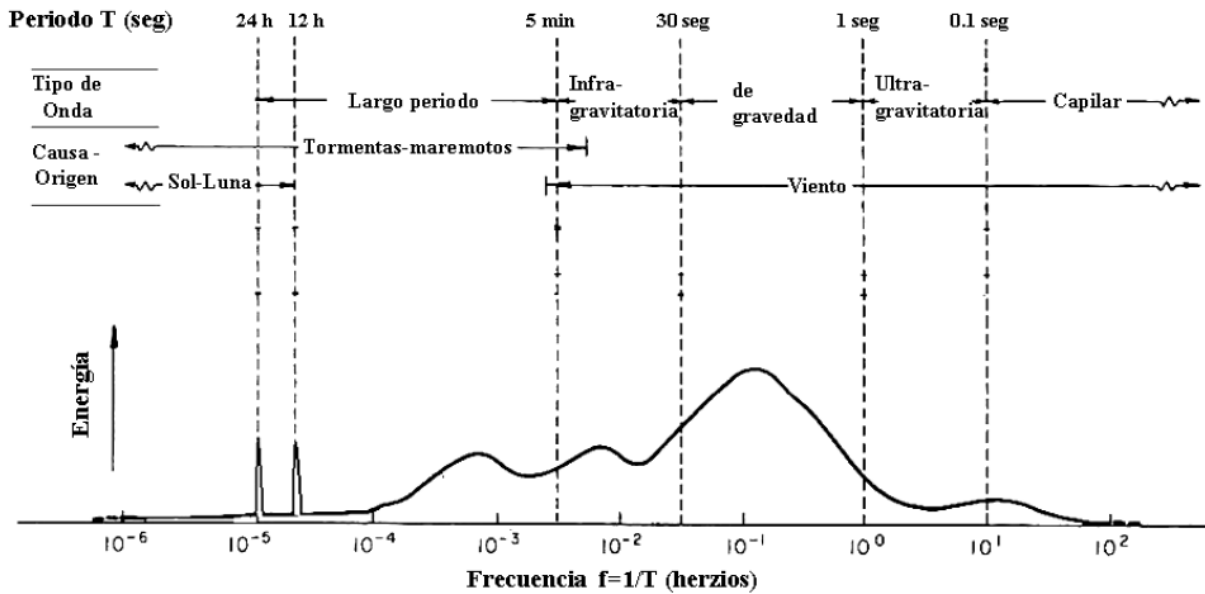


Imagen 18: Tipos de olas.[7]

Según esta imagen no solo el viento produce olas, estas también se producen por tormentas, maremotos o el sol y la luna. Pero de estas olas la que presentan una mayor energía contenida son las olas gravitatorias o de gravedad, las cuales tienen un periodo entre 1-30 segundos.

A pesar de que cada tipo de ola tiene sus características definidas, en la realidad un oleaje este compuesto por una variedad de olas. Si el oleaje es producido por una tormenta, se generan un espectro de olas con distintas direcciones, alturas y periodo, lo cual se denomina oleaje tipo SEA, el cual es un oleaje caótico y muy difícil de analizar analíticamente. Por el contrario, si el oleaje es regular con trenes de ondas similares entre sí, se denomina oleaje tipo SWELL o mar de fondo, y puede ser analizado mediante diversas teorías.

6.2 Parámetros de una ola

Según lo dicho anteriormente una ola es una onda que se desplaza en el mar como medio de propagación. Esta onda puede ser descrita mediante una serie de parámetros que se muestran en la siguiente imagen.

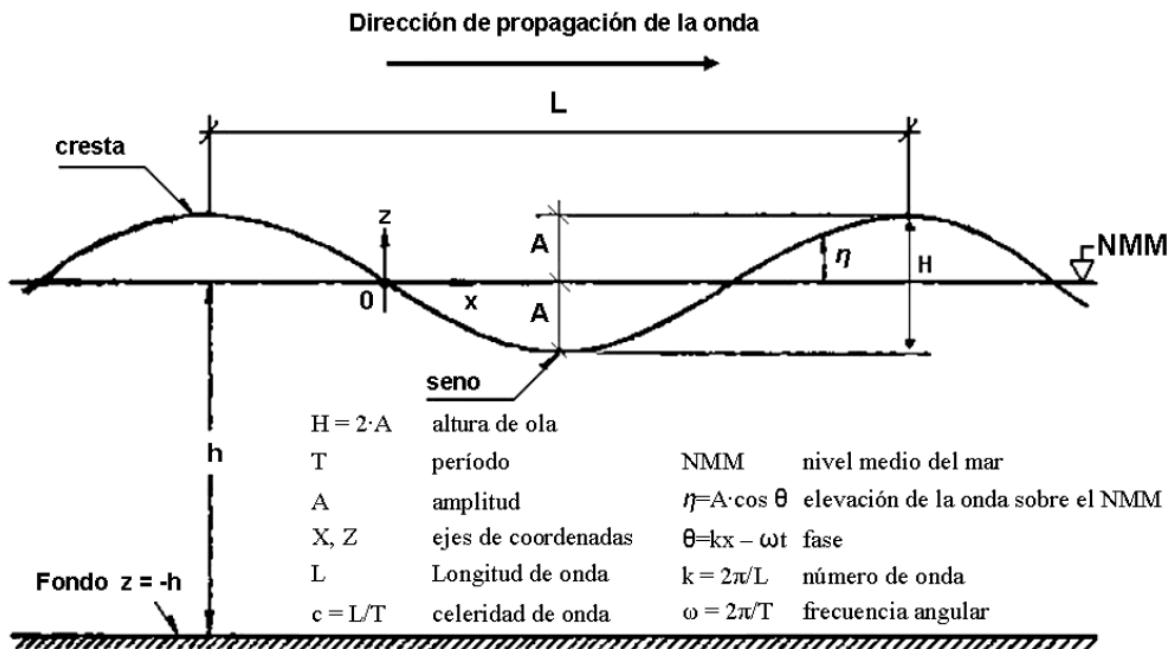


Imagen 19: Parámetros de una ola.[7]

- Cresta: Punto mas alto de la onda.
- Seno: Punto mas bajo de la onda.
- Altura de ola (H): Es la distancia vertical entre la cresta y el seno.

- Amplitud (A): es la distancia vertical entre el Nivel Medio del Mar (NMM) y la cresta o el seno. La altura de ola es el doble de la amplitud.
- Longitud de onda (L): Es la distancia entre dos crestas o senos consecutivos.
- Profundidad (h): También expresada como d (Depth) en la bibliografía anglosajona, expresa la distancia entre el nivel medio del mar (NMM) y el fondo. El eje X se ubica en la superficie del mar, en lo que sería su nivel medio. El eje Z es el eje vertical, de modo que $z=0$ es la superficie del agua y $z = -h$ o $z = -d$ será el fondo del mar.
- Periodo (T): Es el tiempo que tardan dos crestas o senos consecutivos en pasar por un mismo punto y es un valor constante.
- La frecuencia (f): Es la inversa del periodo, y representa el número de repeticiones por unidad de tiempo.
- El peralte (s): o steepness es un parámetro que relaciona la altura con la longitud de onda, dando una idea de la pendiente de esta.

$$s = \frac{H}{L} \quad (1)$$

- La celeridad de onda (c): Es la velocidad a la que se desplaza o propaga la onda.

$$c = \frac{L}{T} \quad (2)$$

- Frecuencia angular (w): Es la Medida de velocidad de rotación de un cuerpo. Ángulo recorrido durante el giro en la unidad de tiempo.

$$w = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

- El Número de onda (k): Es una magnitud de frecuencia que indica el número de veces que vibra una onda en una unidad de distancia.

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (4)$$

- La fase θ (theta) de una onda: Parámetro varía entre 0 y $2 \cdot \pi$, permite conocer en qué punto del movimiento ondulatorio se encuentra una partícula.

$$\theta = \frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t \quad (5)$$

Utilizando las expresiones (3) y (4) en la expresión (5), se obtiene una nueva expresión para la fase:

$$\theta = kx - wt \quad (3)$$

6.3 Teoría de Airy

Es un modelo matemático también conocido como el de ondas de pequeña amplitud u ondas sinusoidales, es uno de los modelos más implementados para la resolución de problemas relacionados a olas. Esta teoría se utiliza principalmente en zonas alejadas de la costa, debido a que considera una serie de hipótesis que permiten resolver las ecuaciones diferenciales de manera más sencilla, por este motivo este modelo no sirve para zonas cercanas a la orilla debido al complejo cambio de las olas en esta zona, por la influencia de la profundidad en el comportamiento de las olas.

La teoría de Airy se basa en la resolución de la teoría del potencial, simplificando algunos términos, lo cual permite reducir un problema de segundo orden a uno más simple.

Las hipótesis planteadas son:

1. La profundidad es constante: Esto implica que, en puntos cercanos a la costa, donde la pendiente del fondo es relativamente importante, el error cometido puede alcanzar un 20%.
2. Se trabaja en un medio bidimensional: En los cuales se trabaja con los ejes X y Z para describir la propagación de la onda, por lo tanto, las variaciones en el eje Y son nulas. Esto implica que la onda de Airy solo puede ser usada para oleajes tipo SWELL, excluyendo a las SEA debido a que estas se describen de manera más compleja.
-
3. La forma de las olas es constante: Aunque esto no se ajusta a la realidad, ya que las olas al acercarse a la costa se peraltan y posteriormente se rompen, por lo tanto, se considera que la forma sinusoidal permanece invariable.
4. Se trata de un fluido incompresible: Es decir su densidad (ρ) permanece constante, ya que de no ser así no se podrían aplicar una serie de ecuaciones fundamentales para resolver las ecuaciones diferenciales.
-
5. El fluido es no viscoso: Se trata de un fluido ideal con viscosidad (ν) nula.
6. Se desprecia la tensión superficial del agua: Esta simplificación solo sería un problema si se analiza un modelo a muy pequeña escala, debido a que las fuerzas de tensión superficial son despreciables en comparación a las gravitatorias.

7. El peralte es muy pequeño: Es decir $s = H/L \ll 1$. Esta suposición permite despreciar términos cuadráticos, para poder linealizar las ecuaciones diferenciales.

En la onda de Airy la superficie libre es representada por η (eta), la cual indica la elevación de una partícula de agua respecto al NMM al paso de una onda y se calcula mediante:

$$\eta = A \cos(\theta) = \frac{H}{2} \cos(kx - wt) \quad (4)$$

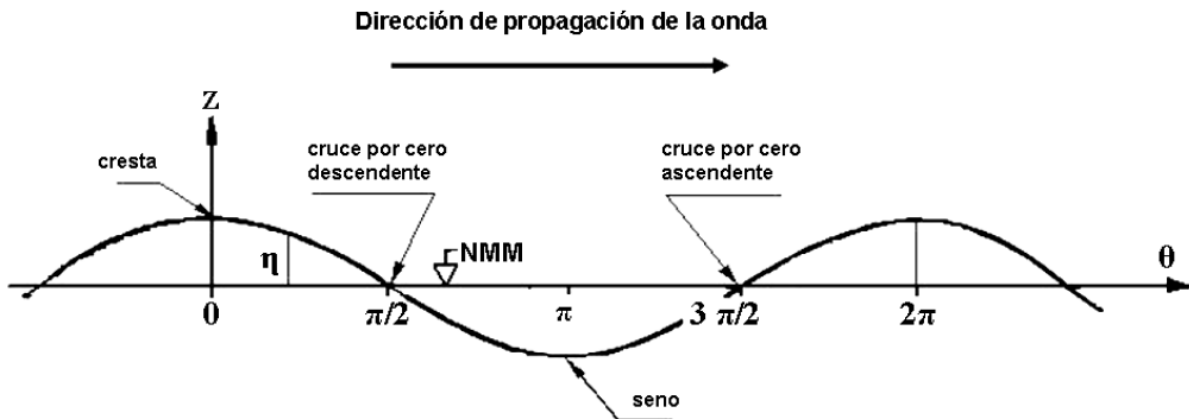


Imagen 20: Representación de η en función de la fase.[7]

6.3.1 Condiciones de contorno

Para analizar esta teoría, se utilizan las ecuaciones de conservación de masa y de la cantidad de movimiento que se presentan a continuación:

Conservación de masa
$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad (5)$$

Conservación de momento en x
$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (6)$$

Conservación de momento en z
$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g = \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \right) \quad (7)$$

Aplicando la teoría de flujo potencial, es posible simplificar estas ecuaciones. Para esto se utiliza una función potencial, expresando el campo de velocidades bidimensional como:

$$\vec{v} = (u, w) = \nabla \cdot \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (8)$$

Utilizando la ecuación (8) en (5) obtenemos la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + w \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

Por otra parte, al utilizar la ecuación (11) en la expresión (7), se obtiene la ecuación de Bernoulli:

$$gz + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

Para poder definir las condiciones de contorno se establece un volumen de control a analizar, el cual estará delimitado a los costados por las crestas de la ola, la parte inferior por el fondo marino y la parte superior por la interfase océano-atmósfera.

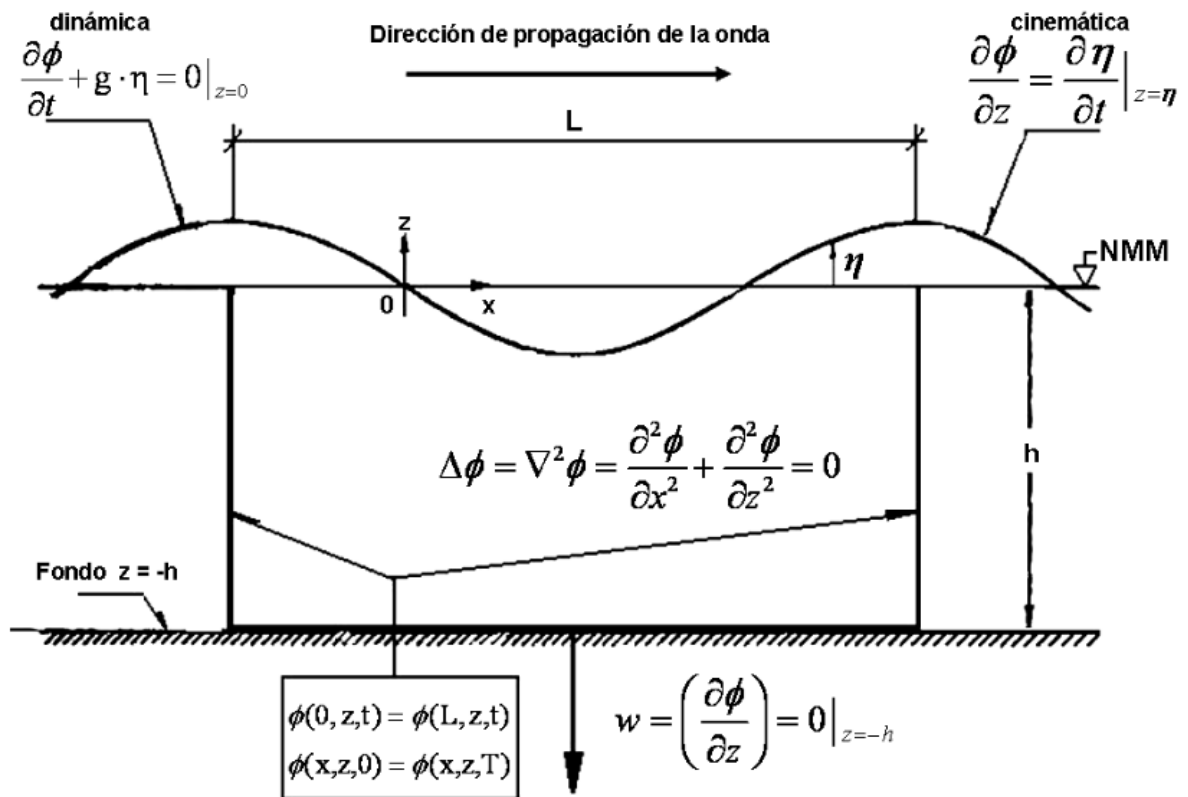


Imagen 21: Volumen de control.[7]

- En el fondo: Según la hipótesis planteada la profundidad es constante y además supondremos que es impermeable, de esta forma la componente vertical de velocidad en el fondo es cero:

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \Big|_{z=-h} \quad (11)$$

- En la superficie: La condición dinámica supone que existe la misma presión en cada lado de la interfase, si se considera la presión atmosférica como constante y

de valor $p=0$ en la superficie del mar ($z=\eta$), con esta suposición la ecuación (10) queda como :

$$g\eta + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \Big|_{z=\eta} \quad (12)$$

Si $s \ll 1$ (hipotesis 7, ecuación (1)), es posible despreciar los términos cuadráticos y linealizar la expresión a:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \Big|_{z=\eta} \quad (13)$$

En la condición cinemática se asume que la interfase que separa el agua del aire es una película irrompible y por lo tanto una función continua en el espacio-tiempo, de modo que:

$$z = \eta(x, t)$$

Por lo tanto, se puede definir

$$w = \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \cdot \frac{dt}{dt} \quad (14)$$

Recordando que

$$w = \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad y \quad u = \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

La ecuación (13) se puede expresar linealmente como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (15)$$

- En los contornos laterales:

Si el flujo de velocidades deriva de un potencial ϕ que depende de (x, z, t) , y ambas paredes coinciden en puntos homólogos como las crestas, entonces existirá una periodicidad en el espacio:

$$\phi(0, z, t) = \phi(L, z, t) \quad (16)$$

Y en el tiempo:

$$\phi(x, z, 0) = \phi(x, z, T) \quad (17)$$

6.3.2 Solución al potencial de la onda de Airy

Mediante las hipótesis, simplificaciones y condiciones de borde expresadas anteriormente, ya es posible dar solución al problema, donde todo se redujo a tres incógnitas: el potencial $\phi = \phi(x, z, t)$ y la presión $p = p(x, z, t)$, donde ambas dependen de tres variables, y la elevación del mar $\eta = \eta(x, t)$ que solo depende de dos. Pero utilizando la ecuación (3), la cual relaciona la variable espacial de propagación en x con el tiempo t , se puede simplificar el problema a solo dos variables θ y z .

$$\phi(x, z, t) = \phi(\theta, z)$$

$$\eta(x, z, t) = \eta(\theta, z)$$

Además, se puede suponer que la función potencial ϕ es el producto de dos funciones de variables separadas:

$$\phi(\theta, z) = F(\theta) \cdot Z(z) \quad (18)$$

Las funciones que cumplen la ecuación (18) son las del tipo sinusoidal e hiperbólica, y podemos expresarlas como:

$$F(\theta) = A \cdot \sin(\theta) \quad (19)$$

$$Z(z) = C \cdot \frac{\cosh[k(z + h)]}{\sinh(kh)} \quad (20)$$

Donde las constantes A y C surgen de las condiciones de contorno. Aplicando estas soluciones se obtiene la ecuación conocida como Relación de Dispersión:

$$\omega^2 = gk \cdot \tanh(kh) \quad (21)$$

Que también puede expresarse como:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right) \quad (22)$$

Además, conocemos la ecuación (4):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Ya con todas las ecuaciones gobernantes y condiciones de borde, es posible obtener la solución analítica de la función potencial:

$$\phi = \frac{Hc}{2} \cdot \frac{\cosh[k(z + h)]}{\sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (23)$$

De esta forma el potencial queda determinado por 5 incógnitas: H , h , k ($k=2\pi/L$), w ($w=2\pi/T$) y c . Sin embargo la celeridad de onda (c) depende de L y T , y se tiene la ecuación (22) que relaciona a ambas, por lo tanto solo habrá que encontrar 3 parámetros independientes para definir la onda, los cuales son la altura de la ola (H), la profundidad (h) y otro más entre L , T o c , pero normalmente se elige T por su fácil obtención. De esta manera es posible resolver las ecuaciones que modelan una ola sinusoidal en función de tres parámetros independientes, los cuales permitirán comprender el movimiento de una ola a través del tiempo y el espacio.

6.3.3 Aguas profundas y someras

Basado en la teoría de Airy y la de flujo potencial es posible determinar un modelo que permite describir el comportamiento de una ola, pero este no es válido en todo el mar, ya que cuenta con hipótesis y simplificaciones que pueden inducir al error según la zona de estudio.

Para reducir estos errores existen límites de validez, los cuales quedan determinados por una profundidad adimensional h/L . Dado que el comportamiento de una ola varía según la profundidad a la que se encuentra, estas se clasifican en tres zonas: Aguas profundas, intermedias y someras.

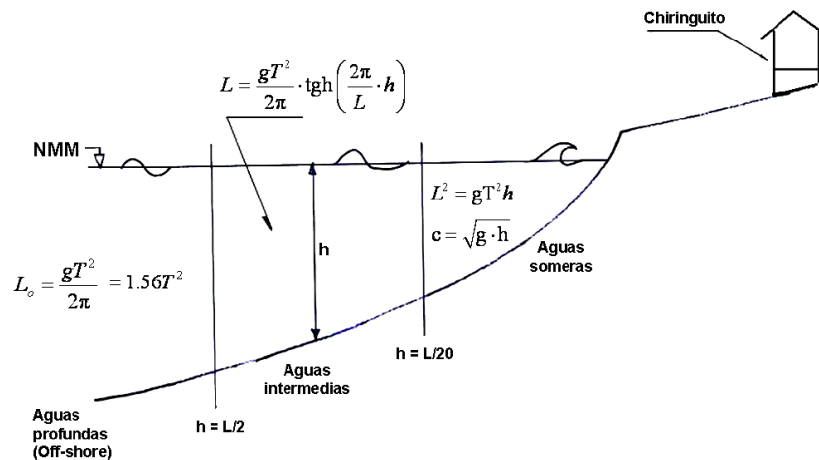


Imagen 22: Delimitación de los campos de validez según profundidad. [7]

- Aguas someras: También denominadas Shallow Waters, son aquellas que son poco profundas y poseen una profundidad mucho menor en comparación a su longitud de onda ($h/L < 1/20$).
- Aguas profundas: Son aquellas donde las profundidades son superiores a la mitad de la longitud de onda ($h/L < 2$).

- Aguas intermedias: Se denomina a la zona de transición entre aguas someras y aguas profundas ($L/20 < h < L/2$).

Según esta clasificación es posible determinar una serie de aproximaciones que permiten obtener los distintos parámetros que componen una ola según la profundidad donde se analiza.

Tabla 1: Ecuaciones para determinar los parámetros de una ola en función de la profundidad (h o d).

	AGUAS SOMERAS* $d \leq L/20$	AGUAS INTERMEDIAS* $L/20 > d > L/2$	AGUAS PROFUNDAS* $d \geq L/2$
Ecuación de la superficie libre	$\eta = a \cdot \text{sen}(k \cdot x - \omega \cdot t)$		
Velocidad de fase (Celeridad) C =	$\sqrt{g \cdot d}$	$\frac{g}{\omega} \cdot \text{tgh}(k \cdot d)$	$\frac{g}{\omega}$
Longitud de onda L =	$T \cdot \sqrt{g \cdot d}$	$\frac{gT^2}{2\pi} \cdot \text{tgh}\left(\frac{2\pi \cdot d}{L}\right)$	$\frac{gT^2}{2\pi}$
Frecuencia angular $\omega^2 =$	$g \cdot k^2 \cdot d$	$g k \text{ tgh}(k \cdot d)$	$g k$
Celeridad de grupo $C_g =$	$\sqrt{g \cdot d}$	$\frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\text{senh}(2kd)} \right] \cdot C$	$\frac{g}{2\omega} = \frac{1}{2} \cdot C$
Comp. horizontal de velocidad $u =$	$a \sqrt{\frac{g}{d}} \text{sen}(kx - \omega t)$	$\frac{agk}{\omega} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$	$a \cdot \omega \cdot e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$
Comp. vertical de velocidad $w =$	$a\omega \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos(kx - \omega t)$	$-\frac{agk}{\omega} \cdot \frac{\text{senh}[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - \omega t)$	$-a \cdot \omega \cdot e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Desp. horizontal de la partícula $\xi_\omega =$	$\frac{a}{\omega} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos(kx - \omega t)$	$\frac{agk}{\omega^2} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - \omega t)$	$a \cdot e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Desp. vertical de la partícula $\zeta =$	$a \left(1 + \frac{z}{d}\right) \text{sen}(kx - \omega t)$	$-\frac{agk}{\omega^2} \cdot \frac{\text{senh}[k \cdot (d+z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$	$-a \cdot e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$

Otra implicancia de las zonas de validez es la trayectoria de las partículas. Como se dijo anteriormente estas partículas tienen una órbita circular, lo cual se cumple para aguas profundas donde el paso de la ola es despreciable a cualquier objeto o superficie que este a una distancia mayor que la mitad de la longitud de onda. Pero a medida que la profundidad disminuye, la superficie de fondo comienza a tener un efecto en la trayectoria de las partículas, las cuales se mueven de manera elíptica para aguas intermedias y someras.

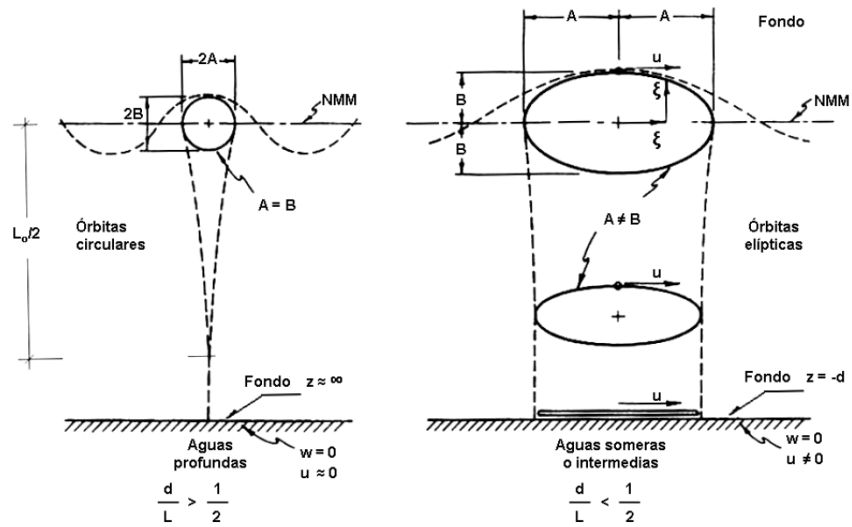


Imagen 23: Trayectoria de las partículas para aguas profundas, intermedias y someras.[7]

6.4 Absorbedor puntual

El mecanismo de obtención de energía que se desea probar es un absorbedor puntual, el cual consiste en una boya de dimensiones horizontales pequeñas en comparación con la longitud de onda de una ola incidente. La boya oscila con uno o más grados de libertad con el fin de absorber la energía proveniente del frente de onda, para posteriormente transformar este movimiento en energía útil.

El comportamiento de un absorbedor puntual se puede modelar como un oscilador mecánico, compuesto por un sistema de amortiguación de masa con un grado de libertad, sometido a una fuerza externa en la dirección del grado de libertad.

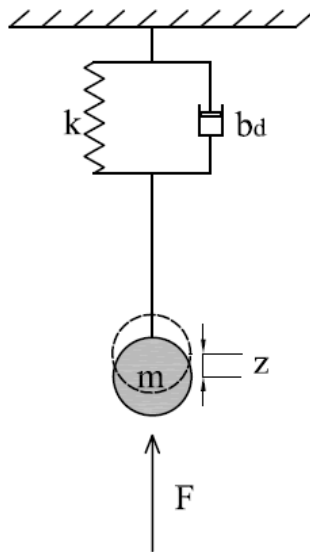


Imagen 24: Representación de un oscilador mecánico.[8]

De acuerdo con la segunda ley de Newton, el problema se puede modelar mediante la siguiente ecuación:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + b_d \frac{dz}{dt} + k_d z = F_A \sin (wt) \quad (24)$$

Donde:

- m: masa de la boya
- b_d : Coeficiente de amortiguación
- k_d : Coeficiente de restauración
- F_A : Fuerza armónica

La ecuación (24) es una ecuación diferencial de segundo orden, que presenta una solución homogénea para la oscilación libre del cuerpo y una solución particular para la oscilación forzada producto de la fuerza armónica.

Para encontrar la solución homogénea ($F_A \sin(wt) = 0$) se asume una solución de la forma:

$$z = z_A e^{qt} \quad (25)$$

Donde z_A representa la amplitud de oscilación, luego reemplazando (25) en (24) es posible llegar a dos soluciones:

$$(mq^2 + b_d q + k_d) z_A e^{qt} = 0$$

$$q_{1,2} = \frac{b_d}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{b_d}{2m}\right)^2 - \frac{k_d}{m}} \quad (26)$$

Si el discriminante es igual a cero la ecuación (tiene una única solución, en ese caso la oscilación esta críticamente amortiguada, lo que implica que el sistema regresa a su posición de equilibrio lo más rápido posible sin vibrar respecto a la posición de equilibrio. El coeficiente asociado a esto se llama coeficiente de amortiguación critico (b_c):

$$b_c = 2\sqrt{k_d m} = 2m w_n \quad (27)$$

Donde w_n es la pulsación natural del sistema, dada por:

$$w_n = \sqrt{\frac{k_d}{m}} \quad (28)$$

Ya definido el coeficiente de amortiguación crítico, es posible trabajar con una relación entre esta variable y el coeficiente de amortiguación, denominado ζ :

$$\zeta_d = \frac{b_d}{b_c} \quad (29)$$

Esta relación permite describir la amortiguación del sistema, si $\zeta > 1$ el sistema se amortigua de manera sobre crítica, lo que implica que el sistema vuelve a su posición de equilibrio de manera no oscilatoria, lo que requiere más tiempo que un sistema críticamente amortiguado. En el caso que $\zeta < 1$, el sistema está poco amortiguado, que el sistema vuelve a su posición de equilibrio con una oscilación paulatina hasta volver a su posición de equilibrio.

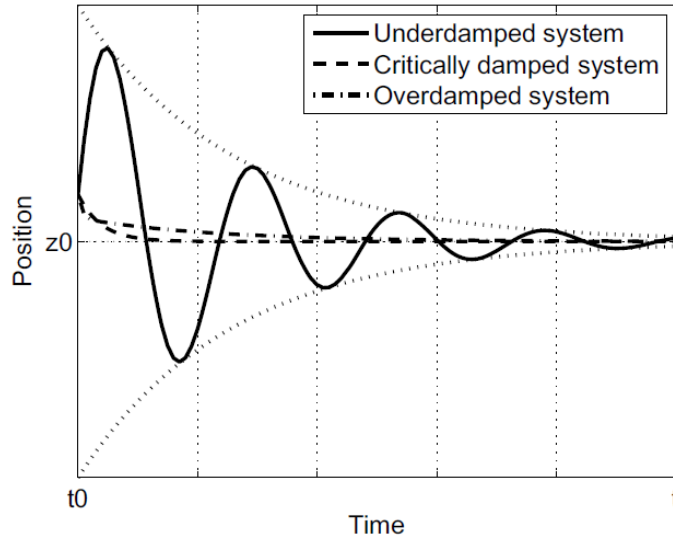


Imagen 25: Representación de las oscilaciones para un sistema crítico, sobreamortiguado y poco amortiguado.

Dado que existen dos soluciones según la ecuación (26), la solución descrita en (25) puede describirse como:

$$z = A_1 e^{q_1 t} + A_2 e^{q_2 t} \quad (30)$$

Las constantes A_1 y A_2 se determinan mediante las condiciones iniciales del sistema, pero como las soluciones $q_{1,2}$ son valores conjugados complejos, las constantes $A_{1,2}$ deben ser un par complejo conjugado para que z sea real.

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} z_{Af} (\sin \beta_f - i \cos \beta_f) \\ A_2 &= \frac{1}{2} z_{Af} (\sin \beta_f + i \cos \beta_f) \end{aligned} \quad (31)$$

Ya con esto es posible formar la solución homogénea de la ecuación:

$$z = z_{Af} e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \beta_f) \quad (32)$$

Donde el subíndice “f” representa la oscilación libre del sistema sin considerar una fuerza externa, además la función exponencial presente en (32) es la responsable del efecto de disminución de amplitud.

Cuando se aplica una fuerza externa al sistema, la solución completa de la ecuación (24) consiste en la suma de la oscilación libre, que depende de las condiciones iniciales y de la oscilación forzada u oscilación en estado estacionario, que se llama solución particular de la ecuación diferencial, que tiene la forma:

$$z = z_{AS} \sin (wt + \beta_S) \quad (33)$$

Con Z_{AS} la oscilación en estado estacionario del sistema y β_S el Angulo de fase entre la fuerza externa y el movimiento del sistema, por lo tanto, el Subíndice S denota “estado estable”

Finalmente, un absorbedor puntual sometido a una fuerza externa como la ola se describe como la suma de la solución homogénea y particular, que resulta:

$$z = z_{Af} e^{-\zeta w_n t} \sin (\sqrt{1 - \zeta^2} w_n t + \beta_f) + z_{AS} \sin (wt + \beta_S) \quad (34)$$

6.4.1 Ecuación de movimiento de un absorbedor puntual

Como se discutió en el ítem anterior, un absorbedor puntual se puede modelar como un oscilador mecánico, que describe su movimiento según la ecuación (34). Ahora para estudiar la reacción de una boya frente a una ola incidente, se puede plantear el problema según la segunda ecuación de Newton:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{ex} + F_{rad} + F_{res} + F_{damp} + F_{tun} \quad (35)$$

Según esta ecuación la fuerza resultante sobre la boya queda determinada por la masa (m) de esta por su aceleración ($\frac{d^2 z}{dt^2}$), esto igualado a la fuerza total que se ejerce sobre la boya, la cuales se explican a continuación.

El primer término del lado derecho de la ecuación (35) corresponde la fuerza externa (F_{ex}) provocado por la ola incidente, la cual se compone de fuerzas inerciales y fuerzas viscosas. Para estructuras flotantes de pequeñas dimensiones, es decir que su tamaño sea mucho menor a la ola incidente ($D < L/5$), estos no tienen una influencia considerable en el oleaje, por lo tanto se pueden despreciar las fuerzas viscosas[9].

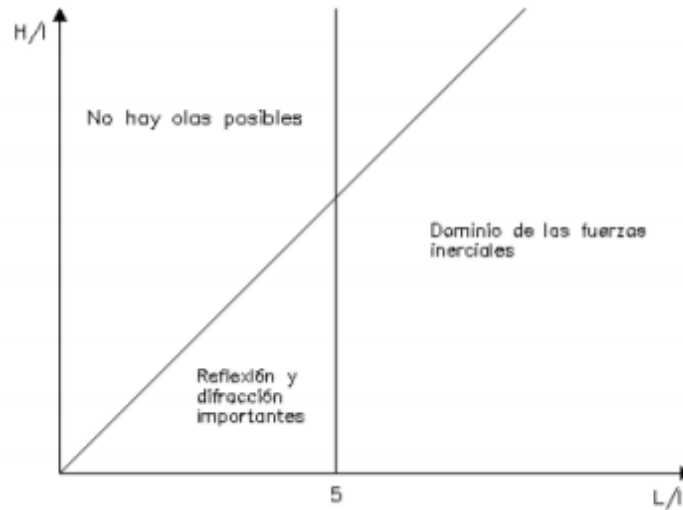


Imagen 26: Dominio de fuerzas según tamaño de una estructura.[9]

Según este criterio solo se considerarán las fuerzas inerciales que actúan sobre la boya, las cuales son:

- Fuerza de Froude-Krylov: Es la fuerza asociada a la ola incidente sin perturbación. Es la fuerza que siente la boya asumiendo que esta misma no está ahí. Es la fuerza inherente a la ola.
- Fuerza de difracción: Es la fuerza que siente la boya debido a su interferencia con la ola. Se asume que la boya esta fija.

El siguiente término de la ecuación es F_{rad} , que corresponde a la fuerza de radiación: Esta fuerza se origina por el movimiento oscilatorio de la boya, la cual puede ser descompuesta según la teoría lineal en dos términos:

$$F_{rad} = -m_a(w) \frac{d^2z}{dt^2} - b_{hyd}(w) \frac{dz}{dt} \quad (36)$$

El primer término introduce una nueva variable llamada masa agregada (m_a), la cual relaciona la fuerza requerida para acelerar el fluido que este alrededor del cuerpo para poder moverse dentro del fluido; y el otro termino introduce las fuerzas relacionadas a la amortiguación del fluido al oscilar, que depende de un factor de amortiguación hidrodinámico y la velocidad de la boya.

La fuerza de restauración F_{res} es la resultante entre la fuerza de Arquímedes y la fuerza de gravedad La fuerza de restauración puede expresarse como:

$$F_{res} = F_{arq} - F_g = \rho g V(t) - mg = -k_d z \quad (37)$$

Donde $V(t)$ es el volumen instantáneo sumergido en el mar, el cual a medida que el cuerpo oscila este volumen cambia, lo cual implica una variación de la fuerza

dependiente del tiempo. La variable k_d corresponde a un coeficiente de restauración hidrostático y se puede expresar como $k_d = \rho g A_w$, donde A_w es el área transversal entre el cuerpo y la superficie marina.

Además de las fuerzas producidas por el oleaje y el contacto con el mar, también existen fuerzas producidas por factores externos, que se utilizan para controlar el comportamiento de un absorbedor puntual, las cuales son:

- F_{damp} : Es una fuerza producida por un Power Take Off (PTO), el cual es un sistema acoplado a la boya con el fin de convertir la energía absorbida por el cuerpo y transformarla en energía eléctrica. Estos sistemas permiten tener un control sobre la fase de la boya mediante una fuerza amortiguadora, esta fuerza se muestra como:

$$F_{damp} = b_{ext} \frac{dz}{dt} \quad (38)$$

Donde b_{ext} es un coeficiente de amortiguación lineal externo propio del PTO para extraer la energía del sistema

- F_{tun} : Al igual que F_{damp} , corresponde a una fuerza externa producida por un sistema acoplado al absorbedor puntual para controlar su movimiento, con el objetivo de controlar la fase de la boya aumentando su inercia, se expresa como:

$$F_{tun} = m_{sup} \frac{d^2z}{dt^2} \quad (39)$$

donde m_{sup} corresponde a una masa suplementaria al sistema para modificar la inercia de este y así controlar su fase.

Cabe mencionar que en este trabajo no se consideraran F_{damp} y F_{tun} , ya que lo que se desea estudiar es el comportamiento de un objeto flotante y su interacción natural al estar sometida a un oleaje constante.

Ya definidos todos los términos de la ecuación (35) esta puede reescribirse como:

$$(m + m_a(w)) \frac{d^2z}{dt^2} + b_{hyd} \frac{dz}{dt} + k_d z = F_{ext}(w, t) \quad (40)$$

De esta forma el movimiento de la boya queda determinado por factores que serán analizados numéricamente, como lo son la masa del sistema y el área transversal del cuerpo en contacto con la superficie marina relacionado al coeficiente k_d .

Por último, si recordamos la ecuación (33) la cual es una solución particular para una oscilación forzada o de estado estacionario, para una un sistema que se le aplica una fuerza externa, es posible relacionarla con la ecuación (4, obteniendo:

$$z_A(w) = \frac{F_{ext,A}(w)}{\sqrt{[k_d - (m + m_a(w))w^2]^2 + (b_{hyd}(w)w)^2}} \quad (41)$$

$$\beta_{mot} = \beta_{F_{ext}} - \arctan\left(\frac{b_{hyd}(w)w}{[k - (m + m_a(w))w^2]}\right) \quad (42)$$

donde z_A es la amplitud en estado estacionario y β_{mot} la fase del sistema en estado estacionario.

6.5 Resonancia

La resonancia es un fenómeno que ocurre cuando un cuerpo capaz de oscilar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de oscilación coincide con el periodo de oscilación natural del cuerpo. Cuando esto ocurre los movimientos del cuerpo tienden a amplificarse, lo cual produce un aumento de la amplitud natural del cuerpo oscilante, lo que resulta en una mayor absorción de energía.

En el caso de una boya en el medio del mar, es posible replicar este fenómeno si la oscilación natural de la boya se asemeja a la oscilación de la onda incidente. Por lo tanto, es un factor relevante al momento de diseñar una boya, ya que, si se replica este fenómeno, se podría obtener una mayor absorción de energía por parte de la boya. Una consideración importante es que, si el cuerpo no sufriera amortiguación, la resonancia produciría un aumento infinito de la amplitud del cuerpo, lo que resultaría en un sistema inestable y muy difícil de controlar. Por lo tanto, lo deseable es que el cuerpo entre en resonancia, pero al mismo tiempo esta se vea afectada por la amortiguación.

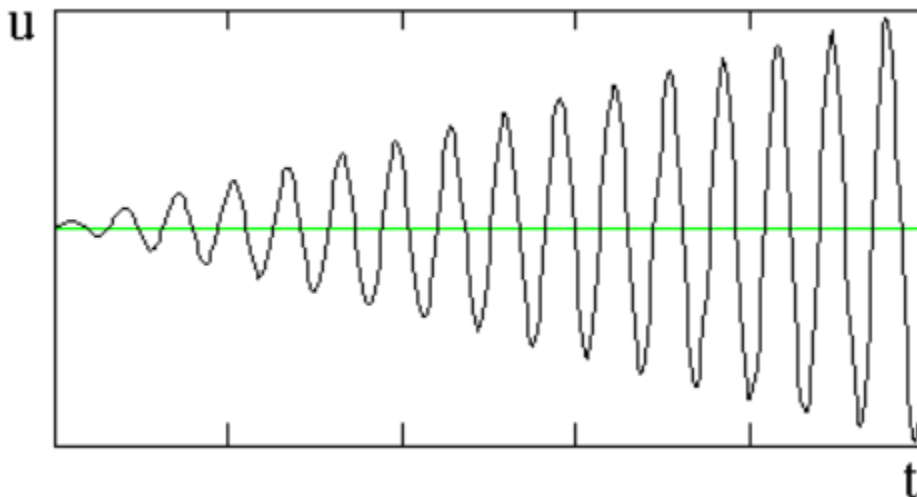


Imagen 27: Resonancia de una onda sin amortiguación.

7 Ubicación y Diseño de boya

7.1 Ubicación

El área seleccionada para la prueba del prototipo de boya es el sector de Punta Curaumilla en la localidad de Laguna Verde, Región de Valparaíso. Este sitio fue seleccionado dado las condiciones favorables del sector, ya que es una bahía por la cual ingresan olas en una dirección predominante y no se presenta un oleaje turbulento, lo cual puede perjudicar el objetivo del estudio.

Para poder dimensionar las dimensiones del prototipo de boya es necesario determinar algunos parámetros básicos del comportamiento del oleaje de la zona. Para esto se tomaron datos del proyecto “Evaluación de Energía Undimotriz en la Costa Centro Sur de Chile” (ECC) [10] y del Explorador de Energía Marina del Ministerio de Energía (EEM) [11] :

Tabla 2: Parámetros de oleaje.

Datos	Ubicación geográfica	Profundidad [m]	Periodo de medición	Altura significativa (Hs) [m]	Periodo [seg]	Potencia media [kW/m]
Evaluación de Energía Undimotriz en la Costa Centro Sur de Chile”	Lat.: 33.14 Long :71.71	21	24/04/2012 - 07/09/2013	1,68	10,53	16,58
Explorador de Energía Marina del Ministerio de Energía	Lat :33.09 Long: 71.72	21	2010	1,57	11,65	17

Al comparar los valores mostrados en la Tabla 2 , se observa que los valores a pesar de ser obtenidos en diferentes periodos y fuentes, el oleaje presenta un comportamiento regular. Con estos datos y mediante la teoría lineal es posible determinar en qué tipo de zona se clasifican estas aguas, para lo cual es necesario analizar la relación entre la longitud de onda con la profundidad de la zona de estudio, para esto se utilizarán las expresiones mostradas en la Tabla 1.

Tabla 3: Clasificación de zona según Longitud de onda y Profundidad con datos de ECC

Zona	Longitud de onda [m]	$h \leq L/20$	$L/2 \geq d \geq L/20$	$d \geq L/2$
Aguas someras	151,06	No cumple		
Aguas intermedias	131,68		Cumple	
Aguas profundas	172,94			No cumple

Tabla 4: Clasificación de zona según Longitud de onda y Profundidad con datos de EEM

Zona	Longitud de onda [m]	$h \leq L/20$	$L/2 \geq d \geq L/20$	$d \geq L/2$
Aguas someras	167,12	No cumple		
Aguas intermedias	161,18		Cumple	
Aguas profundas	211,68			No cumple

Aplicando el criterio mencionado anteriormente, para los datos obtenidos de ambas fuentes, el oleaje corresponde a una zona de aguas intermedias, es decir, en la transición de aguas profundas a aguas someras. Dado que para ambos periodos la clasificación es la misma se trabajará con los datos correspondiente a ECC ya que son más actuales. Con la zona ya clasificada y los tres parámetros básicos para modelar y comprender el comportamiento del oleaje (profundidad, altura y longitud de onda), es posible calcular otros parámetros que se utilizaran más adelante para la simulación numérica.

Tabla 5: Parámetros de olas de punta Curaumilla para aguas intermedias

Parámetro	Valor
Numero de onda (k)	0,0477
Celeridad (c)	12,51 [m/s]
Celeridad de Grupo (cg)	9,69 [m/s]
Frecuencia angular (w)	0,5970 [rad/s]

7.2 Diseño de boya

Para la creación de una boya que pueda extraer energía, nos basaremos en los principios de un absorbedor puntual, por lo tanto, el largo característico del cuerpo deber ser considerablemente menor en comparación a la longitud de onda incidente en la zona de estudio:

$$\frac{L_{car}}{\lambda} \ll 1 \quad (43)$$

En base a este criterio se seleccionan tres longitudes características:

Tabla 6: Diámetros característicos

Diámetro [m]	Longitud de onda [m]	$\frac{L_{car}}{\lambda}$
3	131,68	0,022
5	131,68	0,037
7	131,68	0,05

Como se observa en la Tabla 6, los diámetros son mucho menores es comparación a la longitud de onda incidente. Según los diámetros propuestos se proponen tres geometrías preliminares, las cuales serán figuras axisimetrica compuesta por dos partes. La parte superior de la geometría, es decir la parte de cuerpo que no estará sumergida, será un cilindro, en cambio para la parte inferior del cuerpo (zona sumergida) se estudiara tres geometrías distintas, las cuales serán: cilíndrica, cónica y semiesférica.

Para crear las geometrías propuestas se utiliza el programa Autodesk Inventor, donde se procede a seleccionar la opción de crear pieza. Una vez en la pantalla principal se procede a crear un boceto en 2D, donde se selecciona el plano YZ, con el fin de facilitar la interpretación del programa Ansys Aqwa que se utilizara más adelante. Una vez seleccionado el plano se procede a dibujar la figura en base a un eje de rotación, como se muestra en la Imagen 288.

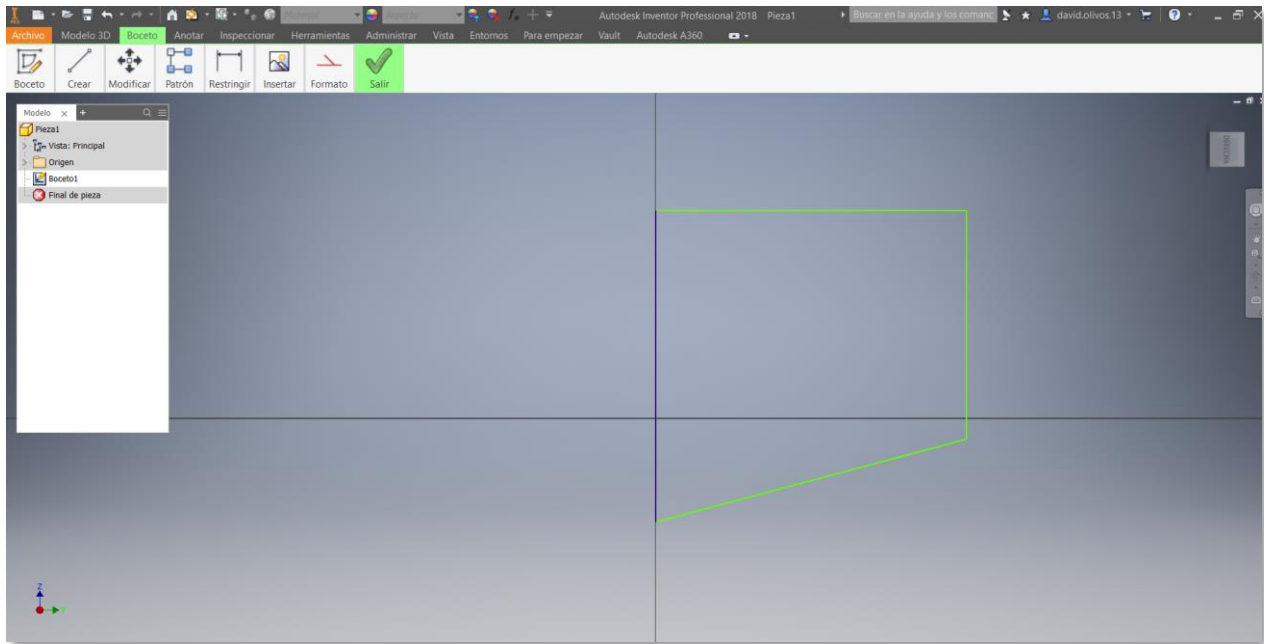


Imagen 28: Boceto de la geometría

Una vez creado el boceto, se procede a finalizar el plano. Luego se selecciona la parte superior de la pantalla la opción crear, donde está la operación revolución, la cual permite seleccionar el eje sobre el cual se generará el cuerpo deseado.

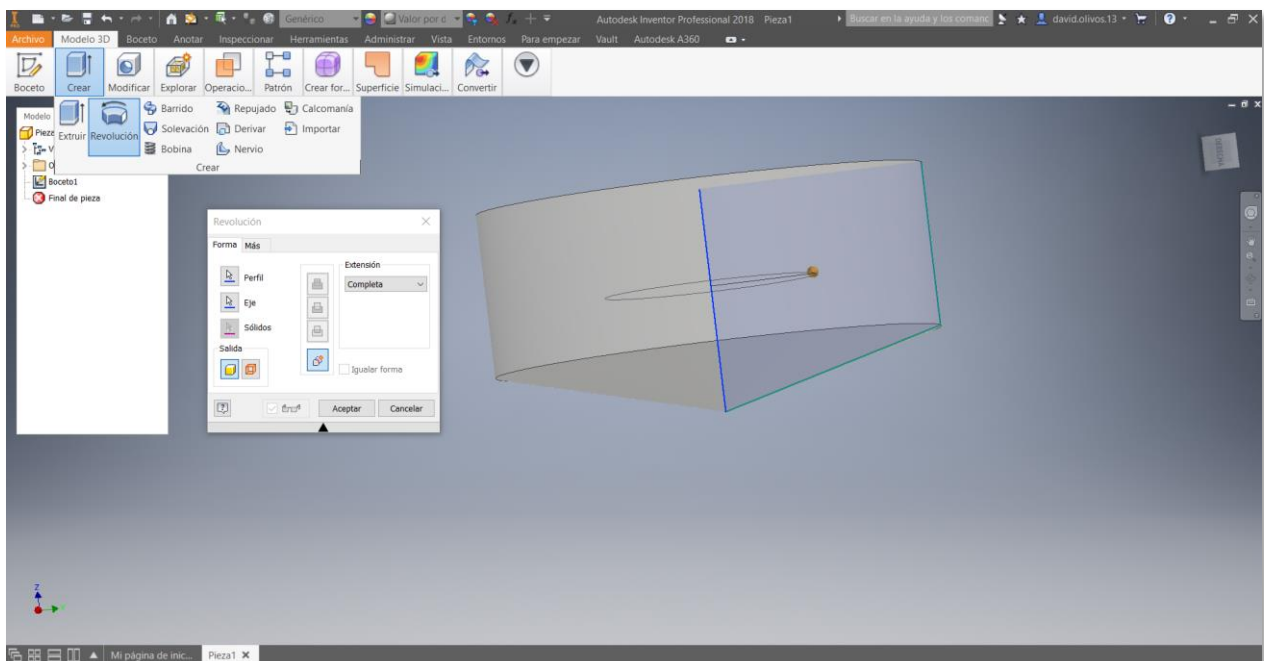


Imagen 29: Creación de la geometría por medio de revolución

Con el cuerpo ya creado, se procede a guardar el archivo, para esto se selecciona la opción exportar, luego se escoge Formato de Cad y se guarda como archivo STEP, esto

es necesario para poder cargar el archivo en el programa ANSYS. El proceso se repite para cada uno de los modelos de boyas, los cuales se muestran a continuación.

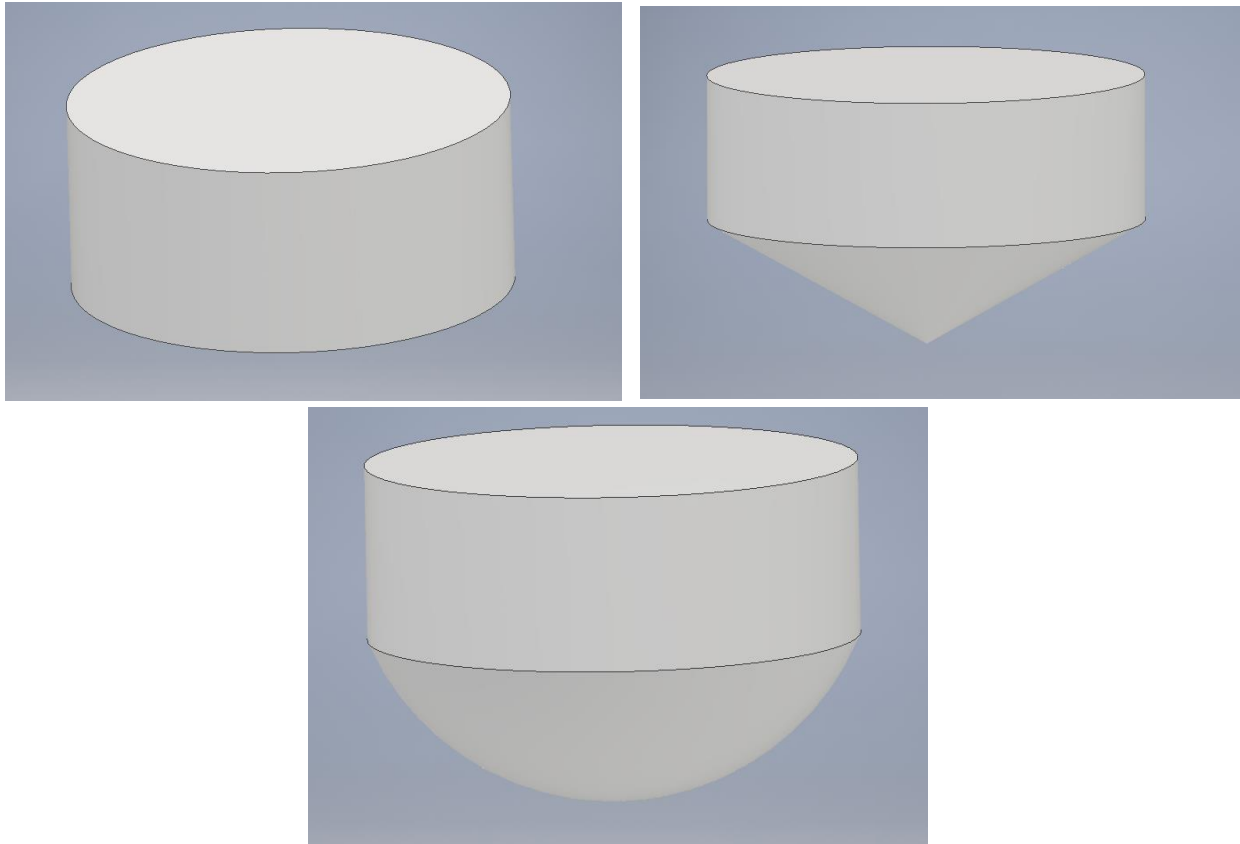


Imagen 30: Diseño de boyas.

Ya con todas las boyas creadas, se procede a obtener los datos que serán útiles para la simulación, para esto se ingresa en la pestaña archivos y se selecciona iProperties, en la ventana emergente se selecciona la pestaña propiedades físicas, en este apartado es posible elegir el tipo de material y en base a esto definir parámetros físicos del cuerpo.

El material escogido es plástico PC/ABS, debido a su baja densidad en comparación con los otros materiales disponibles. Entre sus cualidades se destaca que es un material muy resistente a los impactos, duro, rígido, y tiene una baja absorción de agua, por lo tanto, es un material que cumple con las condiciones para el medio donde será probado. Una vez seleccionado el material, se procede a obtener valores relevantes para el estudio como:

- Masa
- Volumen
- Centro de masa
- Momentos masicos (I_{xx} , I_{yy} , I_{zz})

Tabla 7: Dimensiones de las boyas.

Modelo de boya	Diámetro [m]	Volumen Total [m³]	Volumen Sumergido [m³]	Área Sumergida [m²]
Cilindro-Cono	3	9,09	3,16	9,66
Cilindro	3	9,09	3,16	11,29
Cilindro-Esfera	2,8	9,1	3,16	8,76
Cilindro-Cono	5	41,95	14,62	26,83
Cilindro	5	41,95	14,62	31,22
Cilindro-Esfera	4,6	41,93	14,62	24,68
Cilindro-Cono	7	115,96	40,39	52,70
Cilindro	7	115,99	40,39	61,57
Cilindro-Esfera	6,46	115,92	40,39	47,28

8 Simulación numérica en Ansys Aqwa

El estudio numérico se realizará con la herramienta ANSYS en su modulo AQWA, el cual es un software que permite simular las interacciones de estructuras en el mar, ya sea desde una pequeña estructura móvil a estructuras complejas fijas en el mar[12]. El programa utiliza la resolución de problemas mediante la teoría de elementos finitos, donde se descompone el volumen de estudio en una malla de elementos cuadrado o triangulares y se realiza un estudio de cargas sobre el cuerpo utilizando la teoría de flujo potencial, donde se integra el campo de presiones del cuerpo para obtener las fuerzas que interactúan entre una ola incidente y el objeto de estudio.

Para utilizar Aqwa se debe abrir Workbench y ubicar el módulo de hydrodynamic diffraction (HD) en el cuadro de herramientas (Toolbox) y arrastrarlo al esquema del proyecto, acto seguido se ubica el módulo hydrodynamic response (HR) sobre HD para enlazar los módulos.

Es importante enlazar los módulos como se ve en la imagen 31, ya que esto permite la interacción entre la información de cada módulo. HD se utiliza principalmente para obtener coeficientes hidrodinámicos entre la interacción de las olas y la geometría, en cambio en HR es posible observar la respuesta del objeto de estudio a través del tiempo

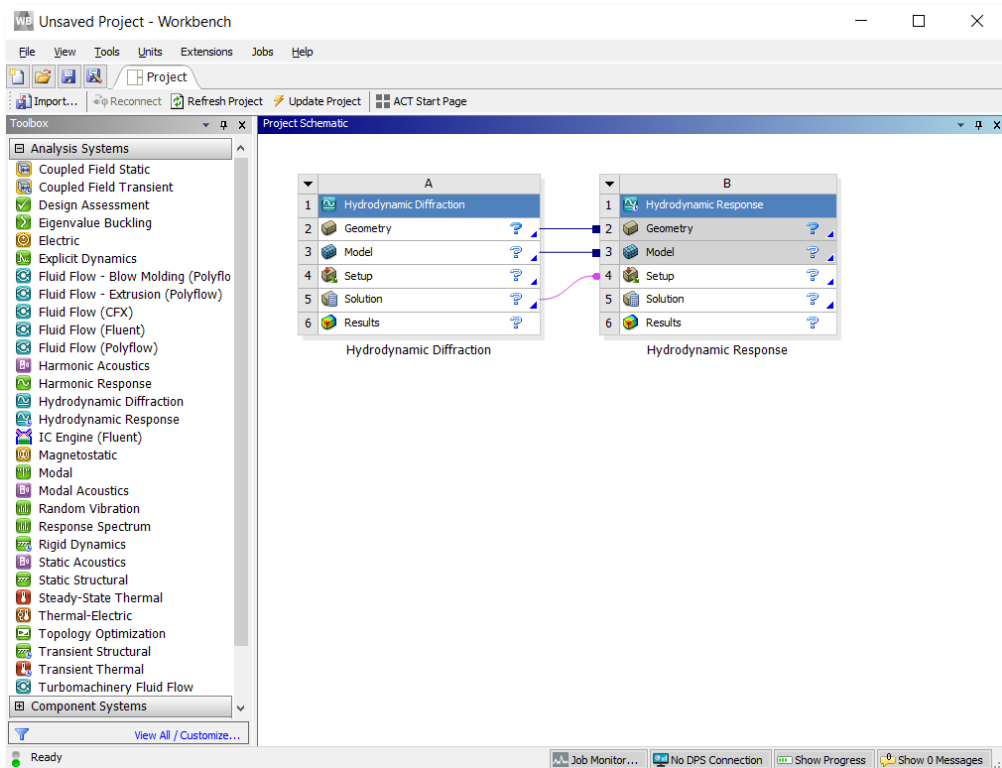


Imagen 31: Workbench con HD y HR enlazados.

8.1 Geometría (Geometry)

En esta sección se debe importar la geometría diseñada previamente en Autodesk Inventor, para esto se presiona clic derecho sobre el apartado Geometry -> Import Geometry y se selecciona el archivo previamente creado en formato STEP. Luego de cargar la geometría se abre Geometry en su versión DesignModeler. Una vez dentro lo primero es transformar el volumen del cuerpo en una superficie hueca, ya que Aqwa trabaja solo mediante el mallado superficial del cuerpo. Para realizar esta acción se utiliza el comando “Thin/Surface”, donde aparece un menú de las opciones del comando, lo primero es seleccionar el cuerpo, se procede a Direction y se escoge Inward, luego se establece el espesor del cuerpo en 0 (de esta forma solo quedara un cascaron) y finalmente se presiona Generate para completar la acción.

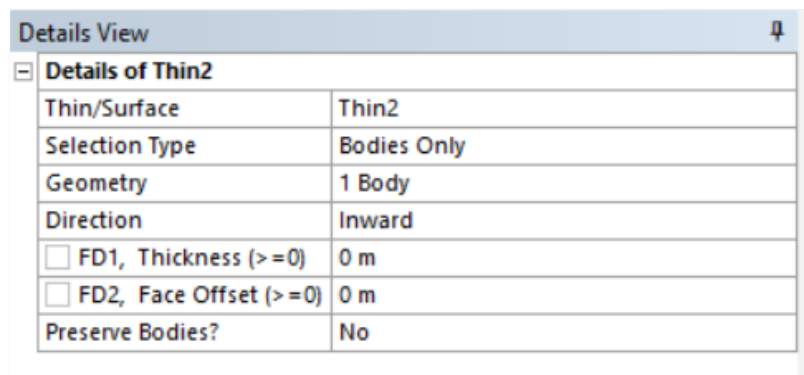


Imagen 32: Representación función Thin/Surface.

El programa por defecto ubica la superficie del mar en el plano XY, por lo cual, si se desea ubicar la geometría a una profundidad definida, es posible realizar acciones con la herramienta “body operation” para ajustar la posición del cuerpo. Otra forma de solucionar esto es diseñar previamente la geometría en base al origen como es nuestro caso, ya que al cargar la geometría el programa cargara la figura según las referencias de diseño ocupadas en Autodesk Inventor.

Para que el programa pueda analizar el cuerpo es necesario dividir la figura para diferenciar entre la parte sumergida (difractante) y la no sumergida (no difractante). Para esto se utiliza el comando “Slice”, donde se despliega un menú de opciones, en este se debe seleccionar la opción “Slice By Plane” y luego escoger el plano de corte, en este caso se escoge el plano XY, luego se presiona Generate para completar la acción y separar los cuerpos.

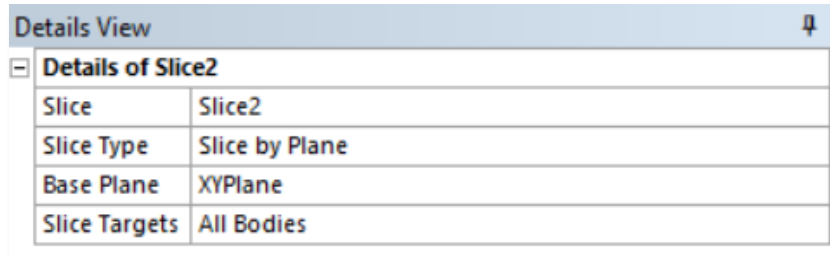


Imagen 33: Menú comando "Slice"

Una vez realizado esto es necesario reagrupar las partes cortadas en un solo cuerpo, para esto se seleccionan las partes creadas y luego con clic derecho aparece un menú de opciones donde se debe seleccionar "Form New Part", de esta forma el programa crea un solo cuerpo conformado por las partes seleccionadas.

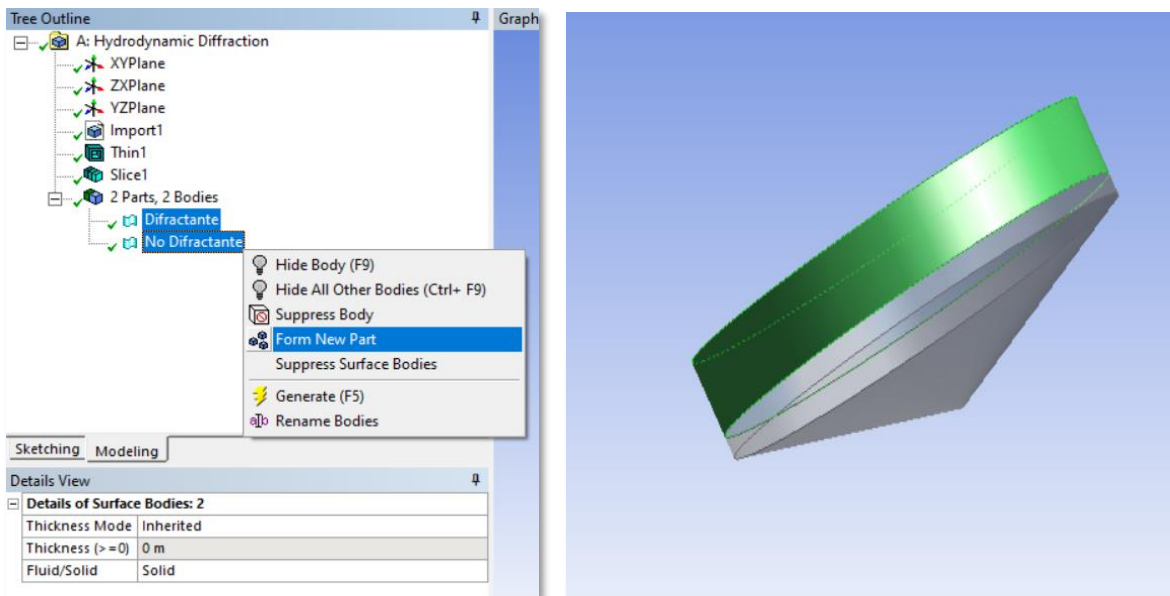


Imagen 34: Creación "Form New Part"

Con el cuerpo creado a partir de las partes seleccionadas, se finalizan las acciones a realizar en este módulo, por lo cual se cierra la ventana y se procede al módulo Model.

8.2 Modelo (Model)

En este módulo se ingresan todos los parámetros necesarios para realizar la simulación. Al abrir este módulo se carga el cuerpo creado en Geometry, una vez cargado aparece un esquema con las categorías disponibles definir las condiciones a simular.

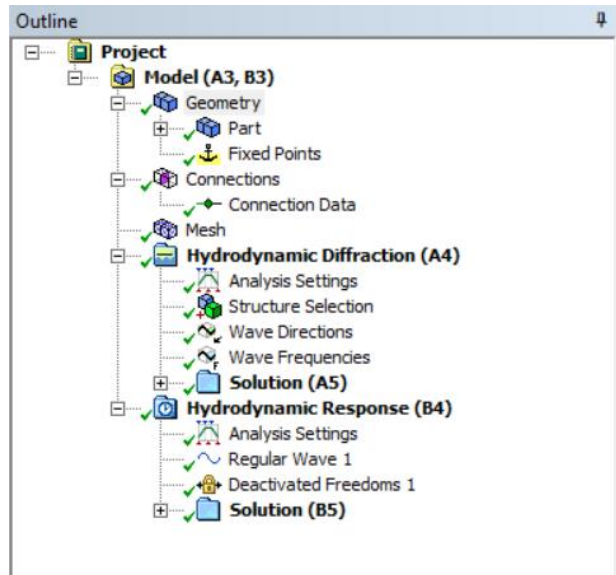


Imagen 35: Outline del Módulo Model

8.2.1 Model - Geometry

Para comenzar se define el espacio físico de estudio, el cual se modifica en Geometry, una vez seleccionado aparece un menú de opciones donde se especifica la profundidad del mar (Water Deep), densidad del agua (Water density), la gravedad (gravity) y las dimensiones del mar.

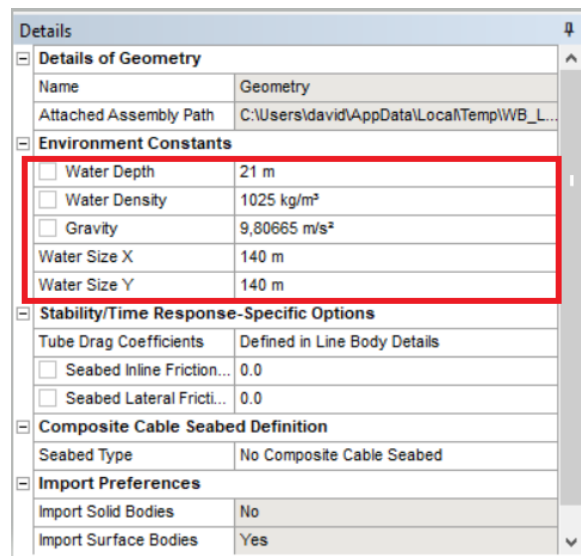


Imagen 36: Details of Geometry

Dentro de Geometry se encuentra Part, el cual contiene las partes del cuerpo creado anteriormente. Al hacer clic derecho se desprende un menú de opciones donde podemos agregarle al cuerpo distintos parámetros. El primero de ellos será “Point Mass”, en este ítem es posible definir la masa del cuerpo, ubicación del centro de masa y los valores de inercia en función de la dirección o del radio de giro. Los valores por utilizar pueden ser calculados por el programa o ser introducidos manualmente, en este caso se escoge la introducción manual, ya que los valores fueron obtenidos anteriormente de Autodesk Inventor. Dentro de esta categoría es importante que la opción Activity este en “Not Suppressed”, ya que de esta forma estos valores son tomados en cuenta para la simulación.

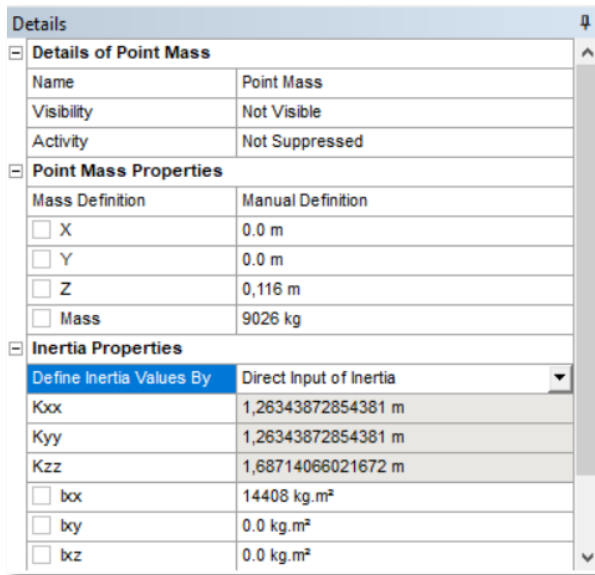


Imagen 37: Details of Point Mass

Una vez definido el “Point Mass”, se procede a agregar un “Point Buoyancy”, en el cual se agrega la ubicación del Punto de boyancia y el volumen sumergido.

8.2.2 Creación de malla (Mesh)

Ya ingresado los valores geométricos del cuerpo se procede a realizar el mallado de este. Para realizar esto se escoge la categoría Mesh, donde se define el tamaño máximo de los elementos y la tolerancia. Es importante recalcar que Ansys Aqwa puede dividir la superficie hasta un total de 400000 elementos, por lo cual se escogen dimensiones que no superen este límite, que en este caso será un tamaño máximo de 0,2 metros y una tolerancia de 0,1 metros, luego se selecciona “Generate Mesh” para crear la malla.

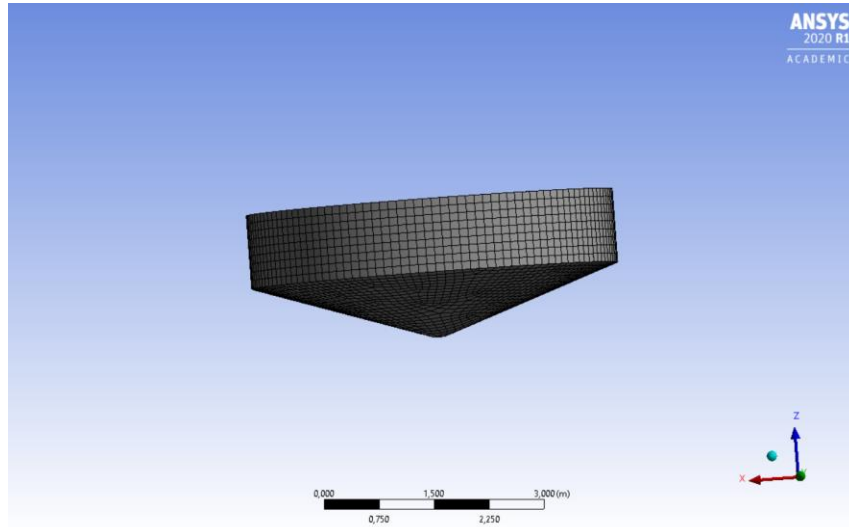


Imagen 38: Mallado de la geometría

Una vez creado el mallado el programa entrega la frecuencia máxima de oleaje que puede ser utilizado, el número de elementos del mallado y la cantidad de elementos difractante, los cuales son aquellos que están sumergidos.

Details	
[-] Details of Mesh	
[-] Defaults	
Control Type	Basic Controls
[-] Mesh Parameters	
Defeaturing Tolerance	0,1 m
Maximum Element Size	0,2 m
Maximum Allowed Frequ...	1,23 Hz
Meshing Type	Program Controlled
[-] Generated Mesh Information	
Total Nodes	4412
Total Elements	4410
Diffracting Nodes	1957
Diffracting Elements	1890
Line Body Nodes	0
Line Body Elements	0
Field Points	0

Imagen 39: Details of Mesh

8.2.3 Hydrodynamic Diffraction

En esta sección se introducen los valores numéricos del oleaje que se desea simular, para obtener coeficientes hidrodinámicos u otros valores de interés.

En la categoría “Analysis Settings” aparece un menú de opciones que pueden ser modificadas según las condiciones a estudiar, lo primero será definir el “Wave Grid Size Factor”, el cual determina el área de mar a mostrar. Este factor por defecto muestra el doble de área que el cuerpo a simular, por lo cual se modifica a un valor de 26 para poder observar todo el movimiento de la ola en el tiempo. La otra opción para modificar

es “Include Multi-Directional Wave Interacción” que se dejara en No, de esta forma el programa permite simular olas en una sola dirección.

Details	
[-] Details of Analysis Settings	
Name	Analysis Settings
External Operation before Solving	None
External Operation after Solving	None
Parallel Processing	Program Controlled
Generate Wave Grid Pressures	Yes
Wave Grid Size Factor	26
[-] Common Analysis Options	
Ignore Modelling Rule Violations	Yes
Calculate Extreme Low/High Frequen...	Yes
Include Multi-Directional Wave Interac...	No
Near Field Solution	Program Controlled
Linearized Morison Drag	No
[-] QTF Options	
Calculate Full QTF Matrix	Yes
[-] Output File Options	
Source Strengths	No
Potentials	No

Imagen 40: “Analysis Settings”.

La siguiente categoría por modificar es “Wave Directions”, donde se puede definir el rango de direcciones de las olas o la velocidad de avance del cuerpo en caso de que este en movimiento. Para este caso selecciona en Type “Range of directions, No forward speed”, con lo cual es posible definir el rango de direcciones deseado se establece que el cuerpo no tiene una velocidad de avance. Dado a la simetría del cuerpo es la misma en todos los sentidos, solo se establece dos direcciones en un intervalo de 180°, orientadas a las 0° y 180°, ya que el programa requiere al menos un rango de opciones.

Details	
[-] Details of Wave Directions	
Name	Wave Directions
Visibility	Visible
Type	Range of Directions, No Forward Speed
[-] Required Wave Input	
Wave Range	-180° to 180°
Interval	180°
Number of Intermediate Directions	1
[-] Optional Wave Directions A	
Additional Range	None
[-] Optional Wave Directions B	
Additional Range	None
[-] Optional Wave Directions C	
Additional Range	None
[-] Optional Wave Directions D	
Additional Range	None

Imagen 41: " Wave Directions".

La última categoría por modificar en este módulo es “Wave frequencies”, donde se establece un rango de frecuencias de la ola incidente. Este rango puede ser definido mediante una frecuencia máxima, mínima y el número de intervalos deseados. Según el valor de frecuencia de Punta Curaumilla, se establece un rango desde 0,06 – 0,12 Hz, con 5 intervalos, de esta forma será posible obtener datos para la frecuencia de oleaje de Punta Curaumilla y como varían en función de las frecuencias.

Details	
[-] Details of Wave Frequencies	
Name	Wave Frequencies
Intervals Based Upon	Frequency
[-] Incident Wave Frequency/Period Definition	
Range	Manual Definition
Definition Type	Range
Lowest Frequency Definition	Manual Definition
Lowest Frequency	0,06 Hz
Longest Period	16,66667 s
Highest Frequency Definition	Manual Definition
Highest Frequency	0,12 Hz
Shortest Period	8,33333 s
Number of Intermediate Values	5
Interval Frequency	0,01 Hz

Imagen 42: "Wave frequencies".

Ya con todos los parámetros ingresados se procede al módulo Solution para obtener los resultados deseados. Se hace clic derecho para seleccionar las múltiples opciones disponibles, donde se seleccionan las opciones de interés y luego se procede a “Solve” para que el programa realice la simulación con los parámetros ingresados y entregue los resultados pertinentes.

8.2.4 Hydrodynamic Response

En esta sección es posible simular la interacción que ocurre entre un oleaje definido y el cuerpo de interés.

Para comenzar se definen algunos parámetros básicos en la categoría Analysis Settings, donde se selecciona en Computation Type “Time Response Analysis” lo cual desplegara una serie de opciones. Dado que se estudiará la reacción de un cuerpo para un oleaje regular, se escoge esta opción en Analysis Type. Posteriormente aparecen las opciones de tiempo, para lo cual se define un paso de tiempo de 0,1 segundos. Es importante definir este paso de tiempo según el mallado escogido, ya que de ser muy grande la simulación puede no converger y arrojar resultados incorrectos.

Details	
[-] Details of Analysis Settings	
Name	Analysis Settings
Computation Type	Time Response Analysis
External Operation before Solving	None
External Operation after Solving	None
Parallel Processing	Program Controlled
Use Cable Dynamics	Yes
[-] Time Response Specific Options	
Analysis Type	Regular Wave Response
<input type="checkbox"/> Start Time	0.0 s
<input type="checkbox"/> Time Step	0,1 s
Output Step	0,1 s
<input type="checkbox"/> Duration	120 s
Number of Steps	1201
Finish Time	120 s
Starting Position	Based on Geometry

Imagen 43: "Analysis Settings" de HR.

Ya ingresados los valores de tiempo y tipo de oleaje se procede a definir el oleaje. Para esto se hace clic derecho en HR, donde se desplegará las opciones disponibles y se escoge Regular Wave.

En este módulo se introducen todos los parámetros necesarios para simular el oleaje deseado. Lo primero es seleccionar el tipo de teoría a utilizar, para lo cual se escoge la Teoría lineal o Teoría de Airy. Luego se ingresan los valores que aparecen en la Tabla 2.

De manera opcional puede agregarse otra opción llamada "Desactivate Freedoms", con la cual se puede limitar el comportamiento del cuerpo, dado que el estudio se enfoca en el movimiento oscilatorio ascendente y descendente se desactivan los demás grados para simplificar el trabajo numérico.

Finalmente, en el módulo Solution aparecen los diferentes resultados que pueden ser calculados, como las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, campo de velocidades, fuerza sobre estructuras, entre otros. Además, en este ítem modulo se puede obtener una animación de la reacción del cuerpo en el tiempo. Se seleccionan los resultados de interés y la animación y se procede a utilizar Solve para realizar la simulación.

9 Análisis y Resultados

Según la metodología propuesta se procedió a simular inicialmente un total de 9 geometrías, las cuales tienen una masa y volumen sumergido muy similar. Todas las boyas simuladas están sometidas a las mismas condiciones de oleaje, para poder comparar como interactúan las diferentes geometrías al mismo fenómeno. Para esto se obtienen los resultados de posición del centro de masa respecto a la posición inicial del mar en un lapso de 120 segundos y se compara con el movimiento sinusoidal de la ola.

9.1 Boyas preliminares

A continuación, se presenta los resultados obtenido de la posición en el tiempo en el eje z, para cada diseño de boyas.

9.1.1 Boyas Cilindro-Cono

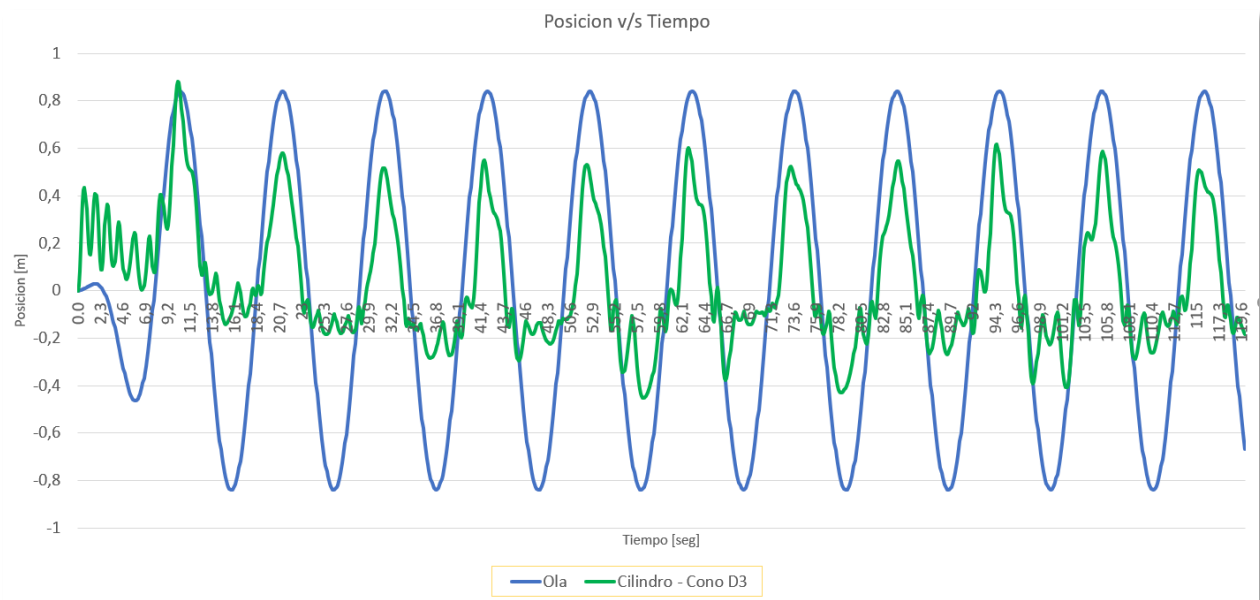


Imagen 44: Posición en el tiempo de Cilindro-cono de 3 metros.

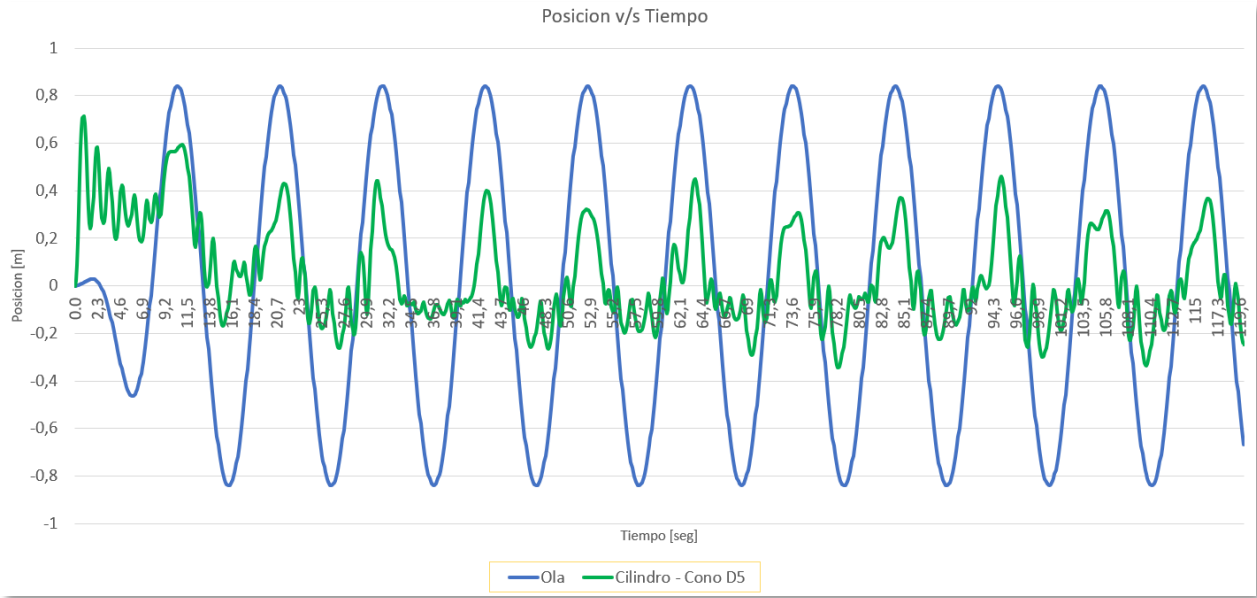


Imagen 45: Posición en el tiempo de Cilindro-cono de 5 metros.

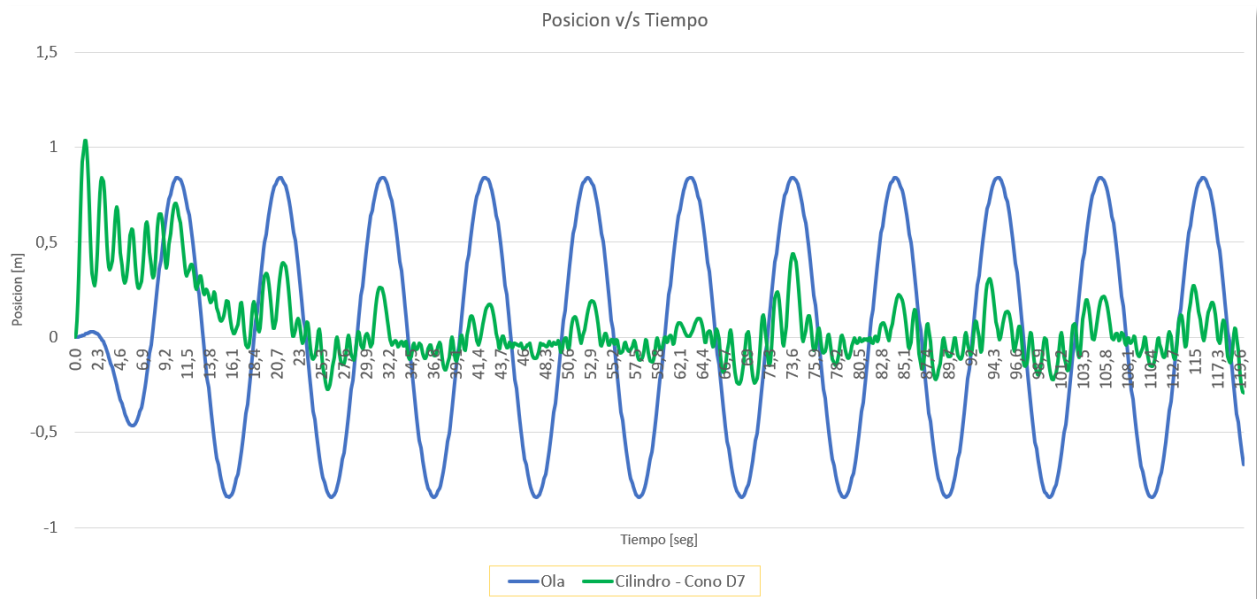


Imagen 46: Posición en el tiempo de Cilindro-cono de 7 metros.

Según lo mostrado en los tres casos, se aprecia un movimiento oscilatorio totalmente distinto según el volumen analizado. Inicialmente no se consideran los valores del primer periodo debido a que el programa estabiliza la simulación y esta comienza a tener un comportamiento regular posterior a este. Al observar las tres boyas se aprecia que están tienen su máxima amplitud en fase con la amplitud máxima de la ola incidente, pero posteriormente cada uno de los casos tiene un comportamiento diferente.

La boya de menor tamaño es la que presenta una mayor amplitud y menor oscilación, debido a que tiene un volumen y masa menor, por lo cual, es menor la cantidad de energía que se necesita para moverla de su posición de equilibrio. Las boyas de diámetro

5 y 7 metros posterior a alcanzar su máxima amplitud en cada periodo presentan una mayor cantidad de oscilaciones, lo que se traduce en un movimiento irregular y con mayores pérdidas de energías, dado que en cada oscilación se produce amortiguamiento, y la oscilación se reduce cada vez más.

9.1.2 Boyas Cilíndricas

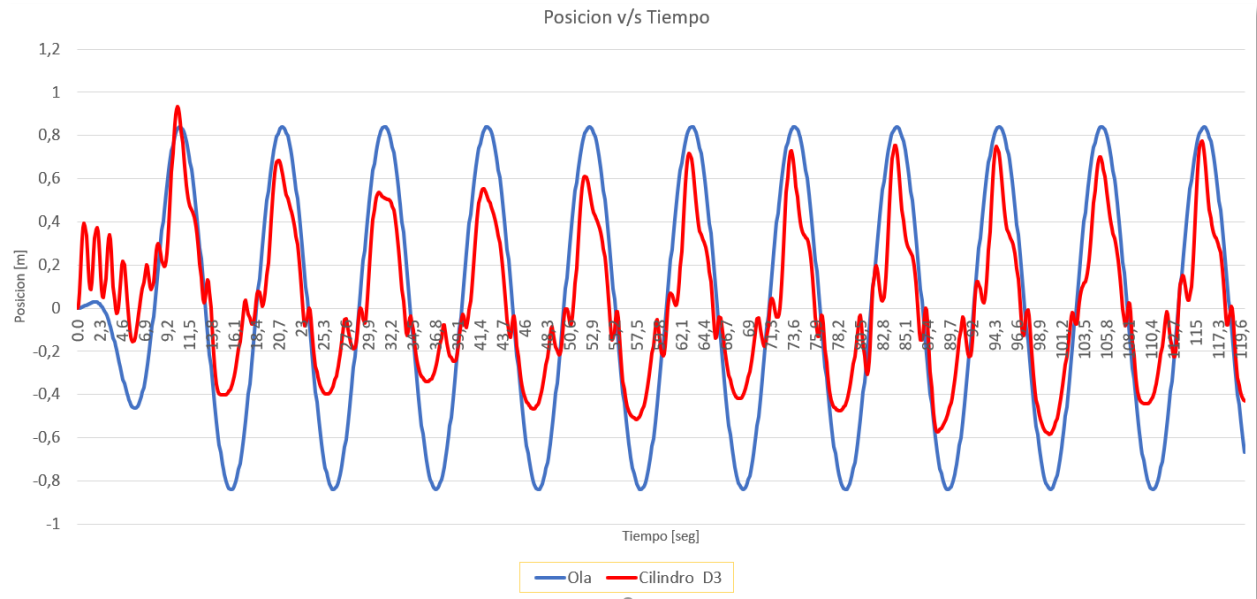


Imagen 47: Posición en el tiempo de Boya Cilíndrica de 3 metros.

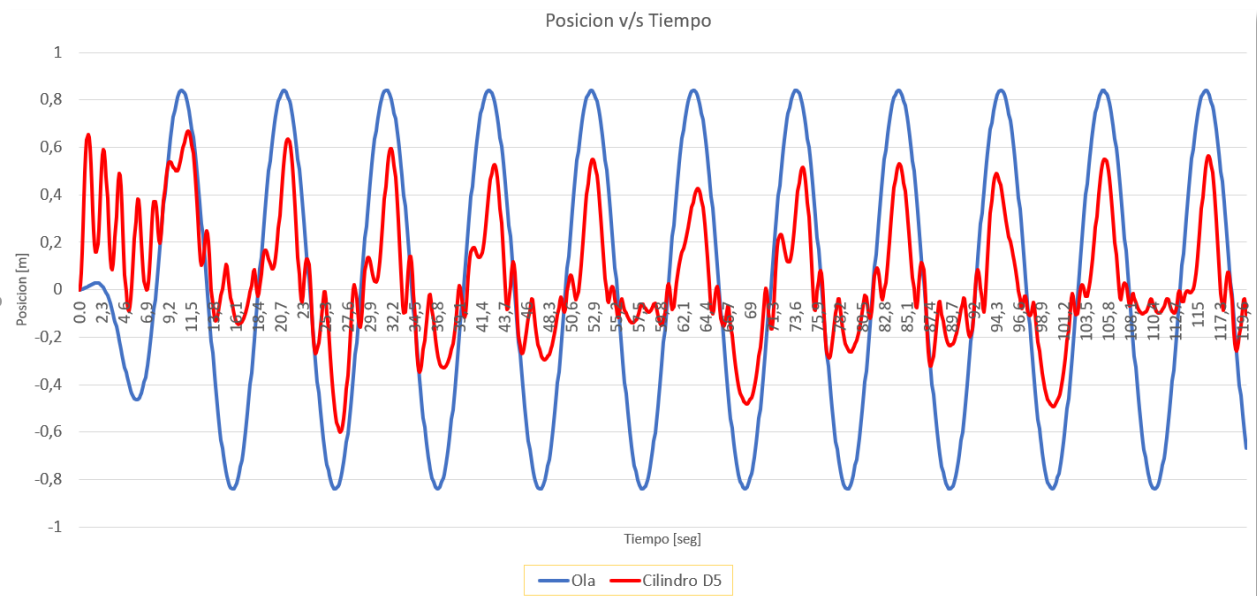


Imagen 48: Posición en el tiempo de Boya Cilíndrica de 5 metros.

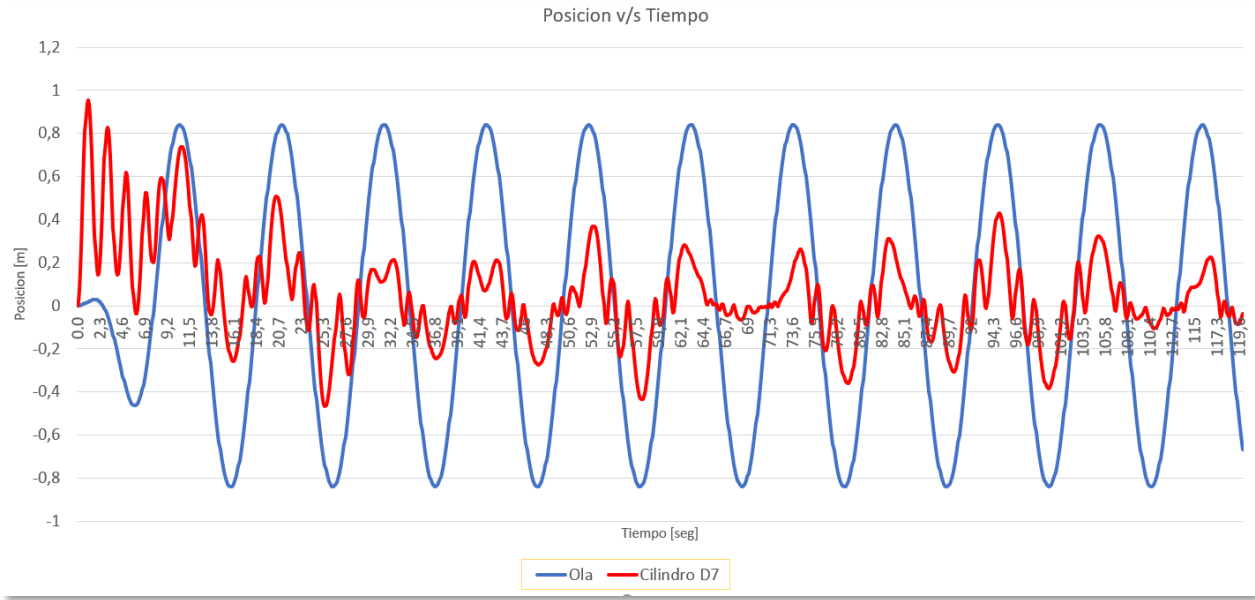


Imagen 49: Posición en el tiempo de Boya Cilíndrica de 7 metros.

Al igual que el caso de la boya cilindro-cono, los peaks de amplitud están en fase con la amplitud máxima de la ola. Considerando que las boyas diseñadas tienen aproximadamente la misma masa y volumen sumergido (para cada diámetro), se observa un comportamiento distinto. La boya más pequeña es la que alcanza una mayor altura, en algunos periodos llega a valores muy próximos al máximo de la ola y presenta muy poca oscilación, es decir, tiene un movimiento muy similar al de la ola incidente, por lo cual se producen interferencias constructivas en algunos puntos, lo que explicaría la mayor altura alcanzada. También se observa que los valles alcanzados por estas boyas son de mayor amplitud que el caso cilindro-cono, lo cual implica un menor amortiguamiento.

La boya de 5 metros posee un comportamiento irregular, a pesar de que alcanza una amplitud cercana a los 0,5 m en la mayoría de sus periodos, las oscilaciones posteriores son muy irregulares, teniendo un movimiento similar a la ola en algunos puntos y en otras mayores oscilaciones de menor amplitud.

Por último, la boya de 7 metros presenta el movimiento más irregular de las 3, alcanzando una mayor altura en algunos puntos, donde incluso hay oscilación mientras el cuerpo asciende.

9.1.3 Boya Cilindro- Esfera

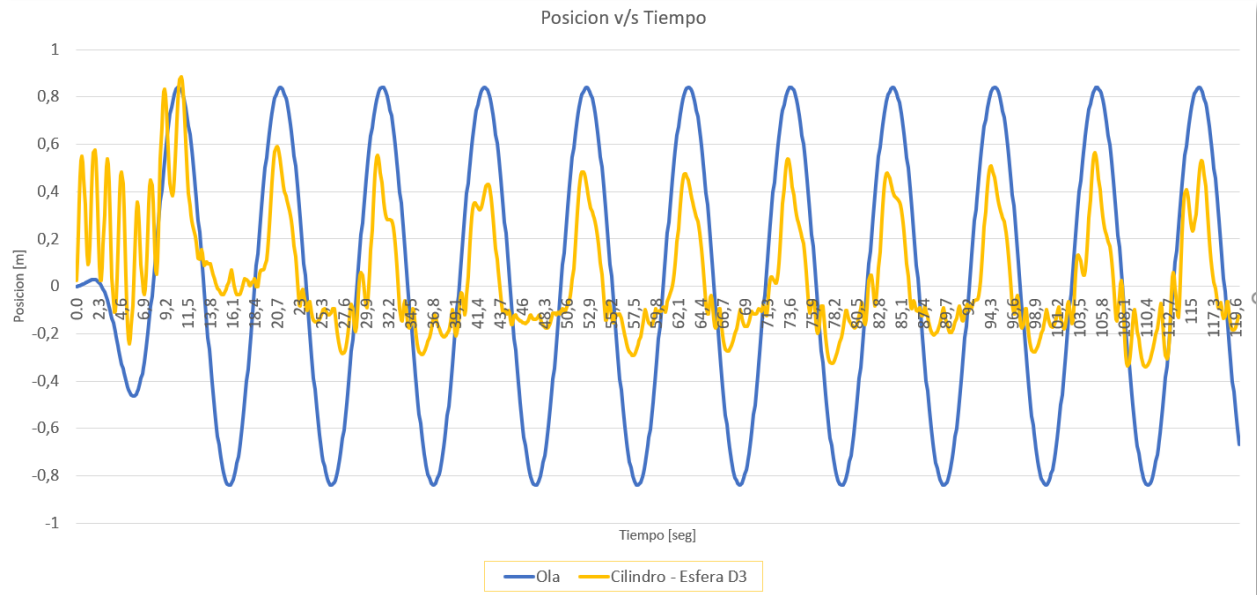


Imagen 50: Posición en el tiempo de Boya Cilindro-Esfera de 3 metros.

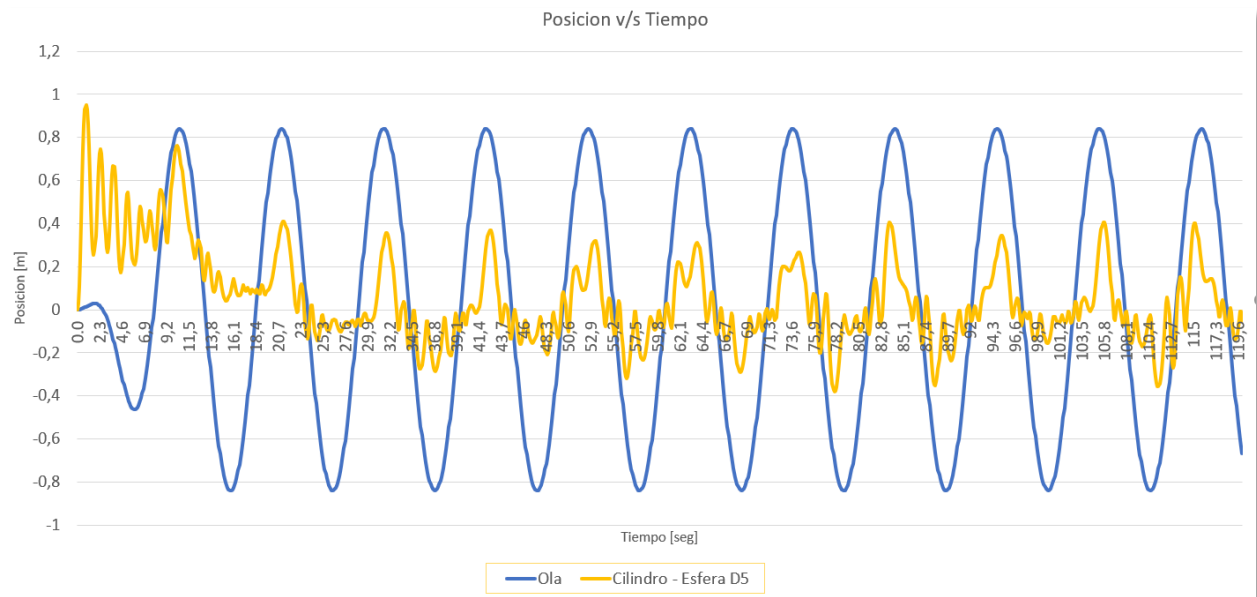


Imagen 51: Posición en el tiempo de Boya Cilindro-Esfera de 5 metros.

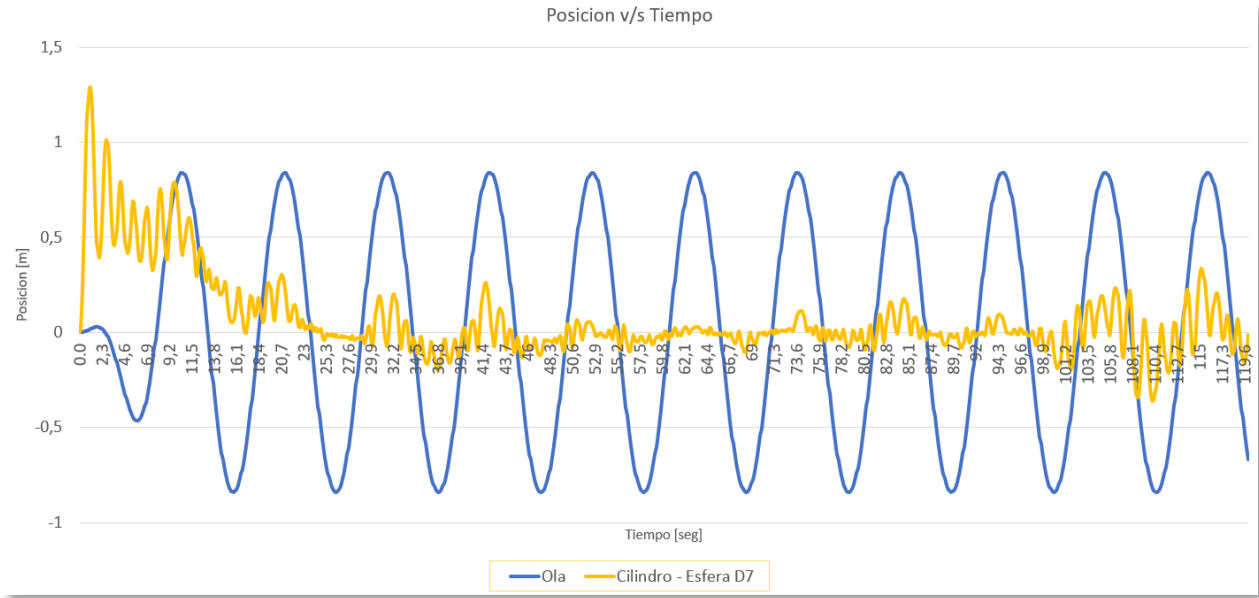


Imagen 52: Posición en el tiempo de Boya Cilindro-Esfera de 7 metros.

En comparación con las geometrías mostradas anteriormente, estas presentan una oscilación más repetitiva, la cual aumenta proporcionalmente al tamaño. A pesar de que alcanza los peaks de altura en fase con la onda incidente, su comportamiento posterior es de mucha amortiguación, ya que las oscilaciones tienen muy poca amplitud, teniendo un desplazamiento mínimo respecto a su posición de equilibrio.

Análogamente se simuló una boya de geométrica esférica de diámetro 5 metros, para poder verificar si el comportamiento oscilante es algo que se repite en este tipo de geometría. Según la imagen 53 se observa que este comportamiento ya es propio de la geometría, debido a que a pesar de que el comportamiento no es el mismo que la boya cilindro -esfera, esta tiene un comportamiento más irregular y posee oscilaciones incluso al elevarse con la ola, por lo tanto disipa energía constantemente en su movimiento, lo cual es lo contrario a lo que se busca.

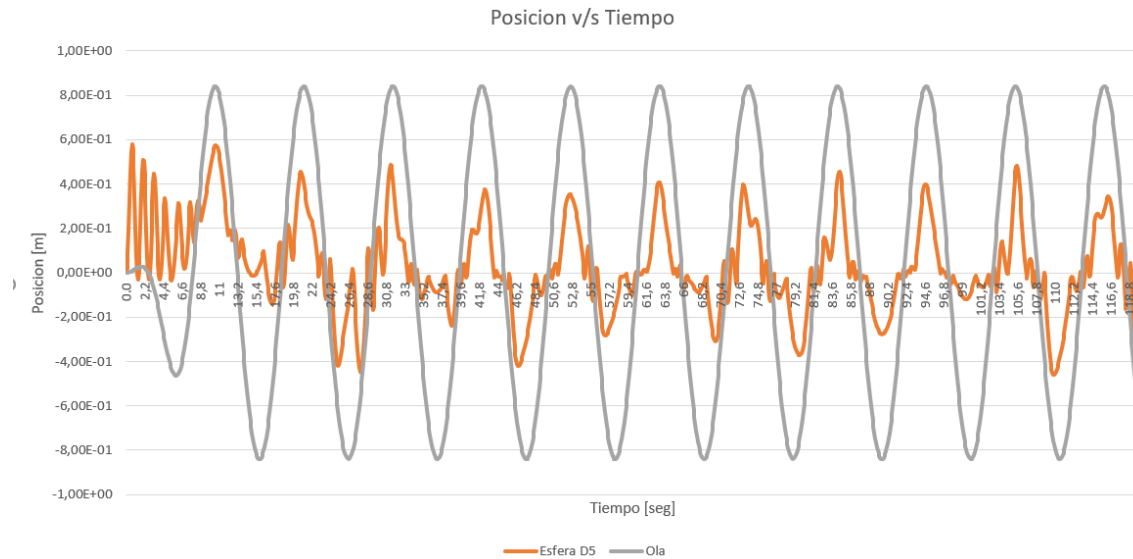


Imagen 53: Posición en el tiempo boya esférica de 5 metros.

En las tablas 8,9 y 10 se muestran los valores máximos alcanzados por cada una de las boyas, respecto al eje $Z=0$. Estos valores son el resultado de las máximas amplitudes alcanzadas en cada periodo, según la fase de la ola, es decir, la amplitud máxima alcanzada en el desarrollo de la cresta de la onda (0 a π), y la amplitud máxima al desarrollarse el valle de la onda (π a 2π).

Tabla 8: Amplitud máxima promedio para diámetro de 3 metros.

Diámetro 3 metros	Amplitud máxima promedio (0-π) [m]	Amplitud máxima promedio (π -2π) [m]
Cilindro- Cono	0,5928	0,3131
Cilindro	0,6941	0,4620
Cilindro - Esfera	0,5405	0,2499

Tabla 9: Amplitud máxima promedio para diámetro de 5 metros.

Diámetro 5 metros	Amplitud máxima promedio (0-π) [m]	Amplitud máxima promedio (π -2π) [m]
Cilindro- Cono	0,3988	0,255
Cilindro	0,5485	0,3224
Cilindro - Esfera	0,3993	0,2448

Tabla 10: Amplitud máxima promedio para diámetro de 7 metros.

Diámetro 7 metros	Amplitud máxima promedio (0-π) [m]	Amplitud máxima promedio (π -2π) [m]
Cilindro- Cono	0,3210	0,1731
Cilindro	0,3516	0,2901
Cilindro - Esfera	0,2064	0,1357

Según lo mostrado en la Tabla 8 las boyas de menor diámetro son las que alcanzan mayor amplitud tanto en la cresta como en el valle. Es en este diámetro donde se aprecia un menor desfase respecto a la onda. La mayor altura alcanzada se registra en la boya cilíndrica, alcanzando un valor promedio de 0,6941 metros, seguido por la boya cilindro-cono y por último la boya cilindro-esfera.

A pesar de que todas las geometrías poseen la misma masa según su diámetro, hay una diferencia significativa entre el desplazamiento de cada una. Al analizar el movimiento de los cuerpos en el desarrollo del valle de la onda, estas siguen el mismo orden, pero se observa una disminución en la amplitud del movimiento. Esto es producto de las fuerzas inerciales presentes en el movimiento, dado que el cuerpo disipa parte de la energía absorbida al mar a través de las oscilaciones. Esto se puede ver en la imagen 54, donde la boya cilíndrica es la que presenta un movimiento similar a la onda incidente y un menor número de oscilaciones que las demás, por lo tanto, esta almacena más energía y disipa menos que las otras dos.

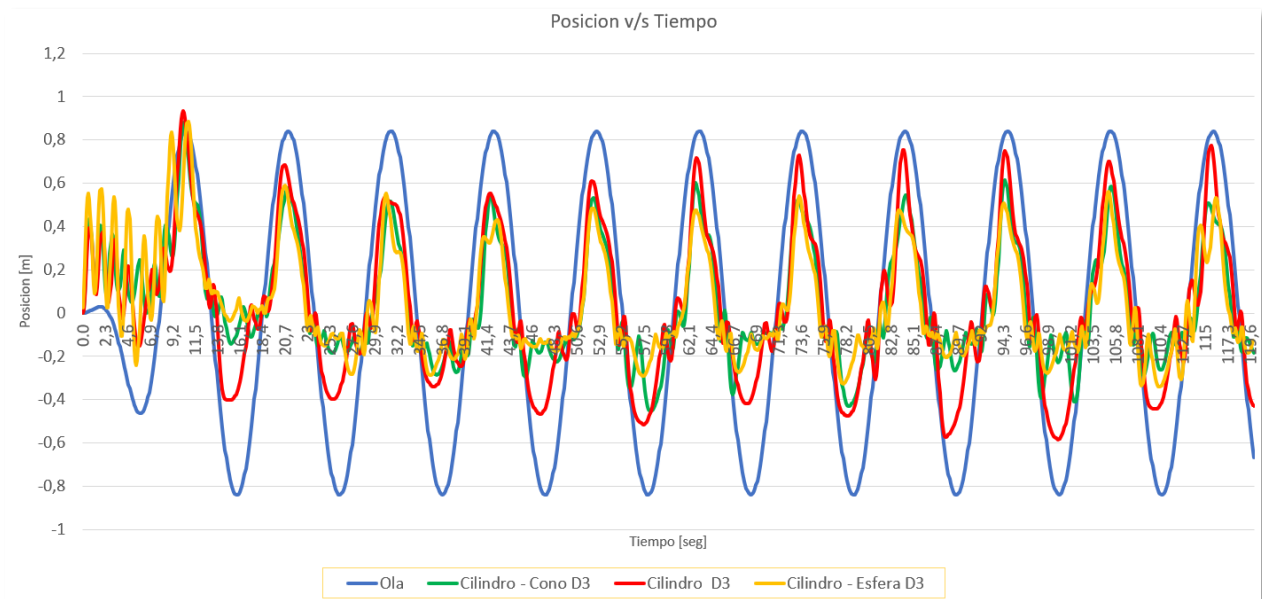


Imagen 54: Posición en el tiempo para boyas de Diámetro de 3 metros.

Analizando la Tabla 9 que muestra los datos de las boyas de 5 metros, se observa que los cuerpos tienen un menor desplazamiento, lo cual se atribuye al aumento de masa. A pesar de ser más grandes y enfrentarse a un mayor frente lineal de ola, lo cual implica una mayor fuerza incidente, la fuerza peso es mucho mayor que antes, lo cual dificulta al cuerpo seguir el movimiento del oleaje. A pesar de esto los cuerpos tienen un desplazamiento significativo, aunque ahora es más notorio el mayor desplazamiento de la boya cilíndrica, en cambio las otras dos boyas tienen un comportamiento muy similar a lo largo del tiempo.

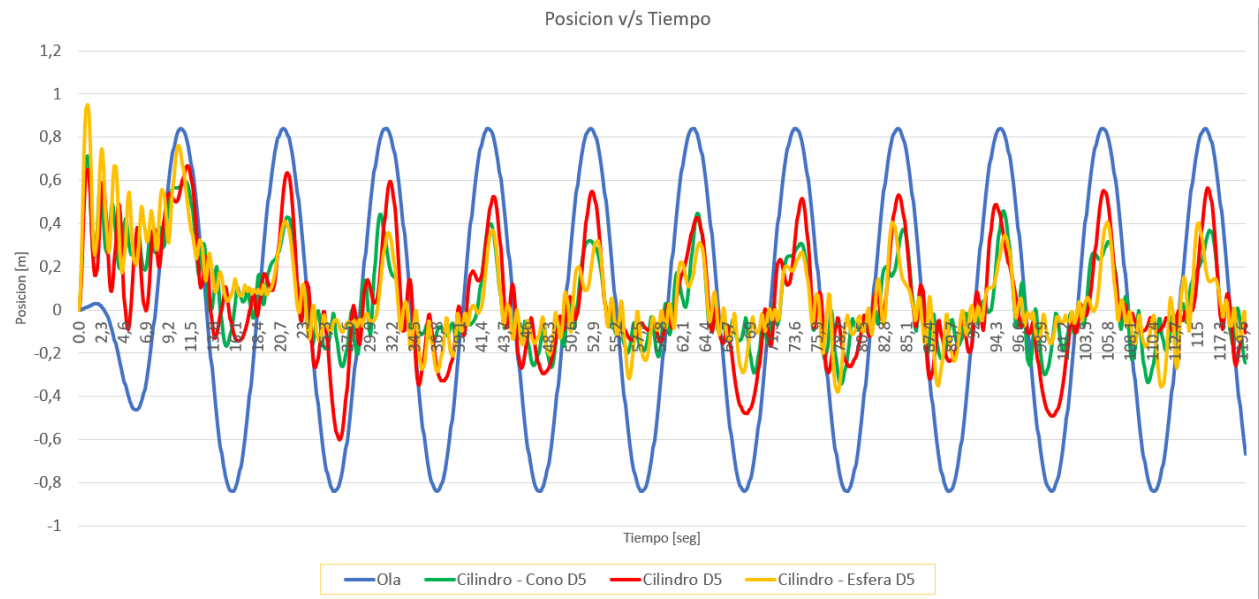


Imagen 55: Posición en el tiempo para Diámetro de 5 metros.

En la imagen 56 se muestra la comparación del movimiento de las boyas de 7 metros, donde se aprecia que las amplitudes decaen aún más y aumentan las oscilaciones pequeñas ya que el sistema intenta volver a una posición de equilibrio más rápidamente debido al menor desplazamiento.

Este pequeño desplazamiento se cuantifica en la Tabla 10, donde sigue interactuando de mejor manera la boya cilíndrica, aunque en otros puntos las tres tienen un comportamiento muy similar. Cabe destacar que la boya cilindro-esfera es la que presenta un peor aprovechamiento energético, ya que es la que tiene un menor desplazamiento y presenta un mayor número de oscilaciones, lo cual es una tendencia de esta geometría en los todos los casos.

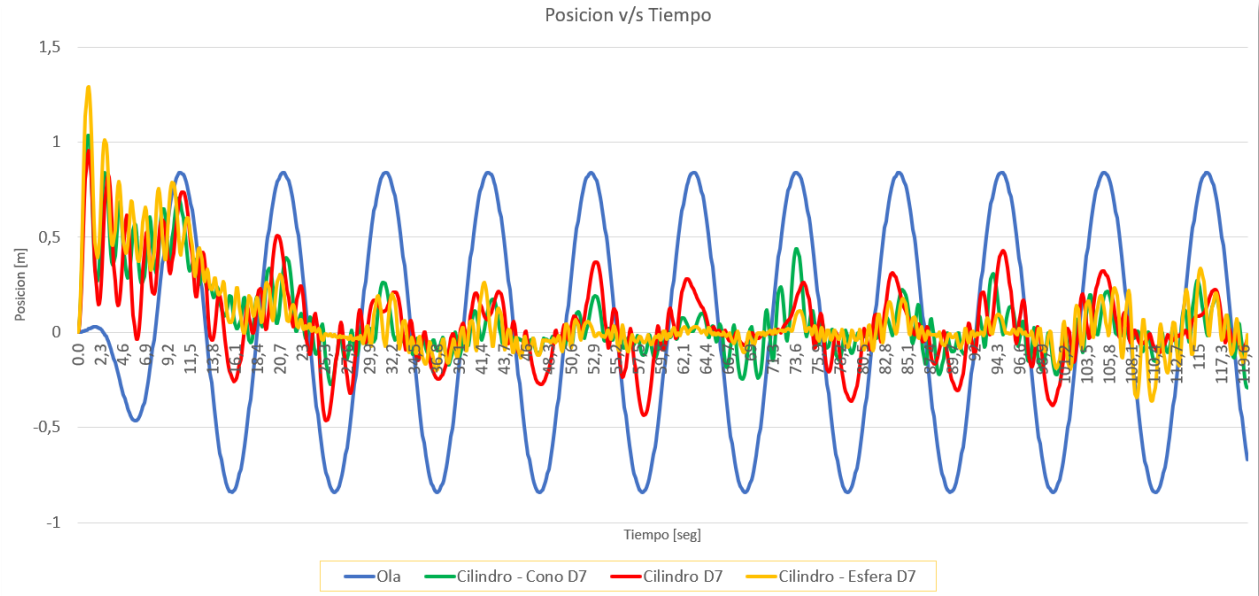


Imagen 56: Posición en el tiempo para Diámetro de 7 metros.

9.1.4 Masa agregada y Coeficiente de amortiguación

Para analizar de mejor manera el comportamiento de las boyas en los distintos casos, de las simulaciones realizadas se puede obtener los valores de masa agregada y el coeficiente de amortiguación, los cuales según la ecuación (36) están directamente relacionados con la fuerza de radiación.

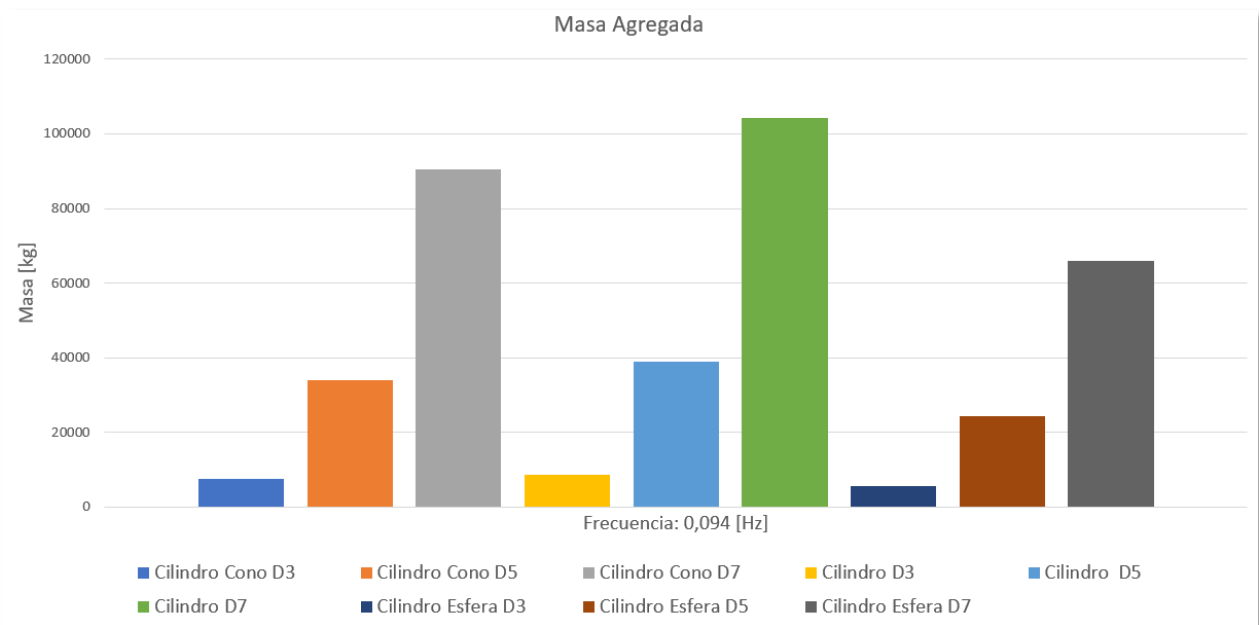


Imagen 57: Masa agregada a una frecuencia de 0,094 [Hz]

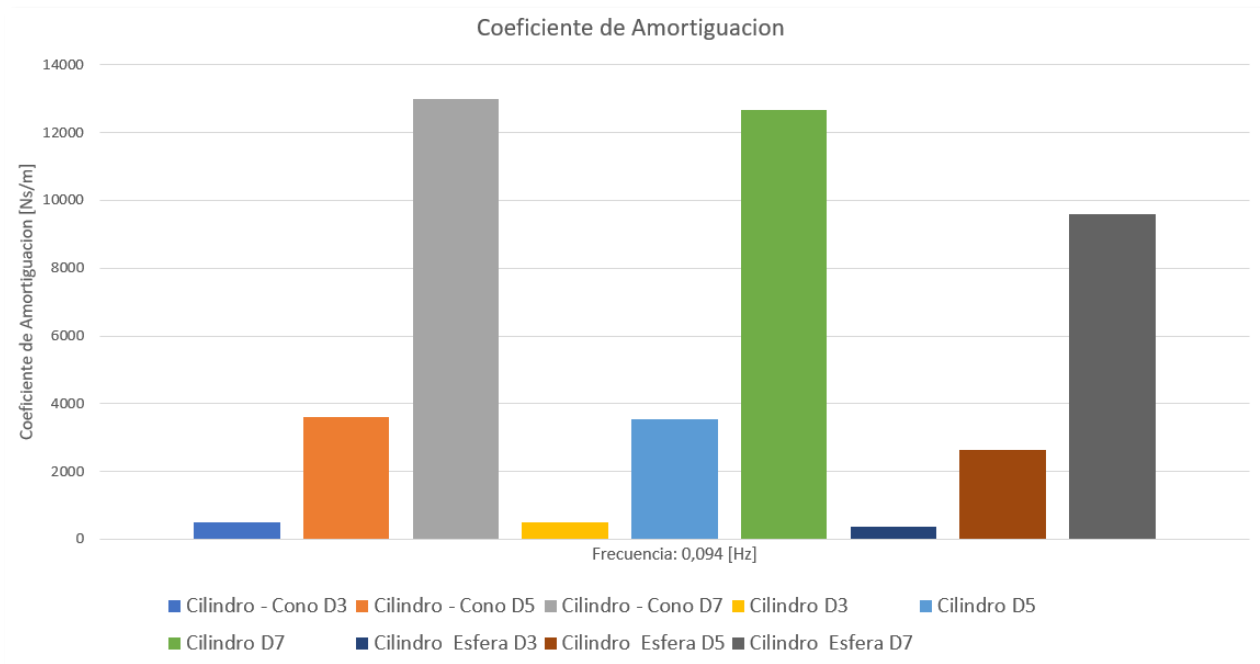


Imagen 58: Factor de Amortiguación a una frecuencia de 0,094 [Hz]

En estas imágenes se muestran los resultados obtenidos en el módulo Hydrodynamic Diffraction (HD), los cuales están agrupados por geometría. A simple vista se observa que estos factores están relacionados directamente con el tamaño del cuerpo, ya que a medida que se aumenta el diámetro estos valores aumentan.

La geometría que presenta una mayor masa agregada es el cilindro, el cual tiene el mayor valor para cada diámetro presentado, seguido del cilindro-cono y por último el cilindro-esfera. Estos valores pueden estar directamente relacionados con el área sumergida ya que a pesar de que todas tienen el mismo volumen sumergido, el área no es la misma. Al comparar los valores de las áreas sumergidas, estos siguen el mismo orden que los de la masa agregada por lo cual podríamos decir que son directamente proporcionales, lo cual tiene sentido, puesto que la masa agregada es la masa de agua que tiene que mover el cuerpo para poder desplazarse, por lo tanto, a mayor área de contacto mayor es la masa de agua que se mueve con el cuerpo.

Sobre el coeficiente de amortiguación se observa que el cilindro y el cilindro – cono tienen valores similares, pero la diferencia se hace más notoria a mayor diámetro. La figura cilindro-esfera es la que presenta un menor factor de amortiguación, lo cual podría explicar la mayor cantidad de oscilaciones que esta presenta. Según los movimientos descritos se puede deducir que el tener un factor de amortiguamiento bajo no necesariamente es lo mejor, dado que a pesar de que la amortiguación es menor en la boya cilindro-esfera, esta tiene mucha oscilación lo cual implica una disipación de

energía al crear constantemente olas por su movimiento, además de ser un sistema más inestable y difícil de controlar.

9.2 Optimización de Geometría

En base a lo expuesto y analizado en las boyas preliminares, se escoge la boya cilíndrica de diámetro 3 metros como la mejor opción para optimizar, dado que presenta una oscilación más similar a la ola incidente. A pesar de que la boya cilindro-cono tiene un comportamiento similar, una masa agregada y coeficiente de amortiguación muy parecidos a los del modelo escogido, esta tiene un comportamiento irregular en el tiempo, por lo tanto, la boya cilíndrica es un modelo más estable.

Para optimizar el modelo, se utilizará el diámetro como parámetro principal de diseño. Debido a que la boya escogida tiene un comportamiento aceptable con un diámetro de 3 metros, se diseñan dos boyas más, las cuales tienen un diámetro de 2,5 y 3,5 metros, para verificar si es mejor variar este diámetro, ya sea en una boya de mayor tamaño o una más pequeña.

Siguiendo mismo procedimiento que se utilizó para las boyas preliminares, se procede a crear las boyas en Autodesk Inventor, para luego simular la interacción de las nuevas boyas con el mismo oleaje utilizado anteriormente. De estas simulaciones se obtuvieron los siguientes resultados de posición:

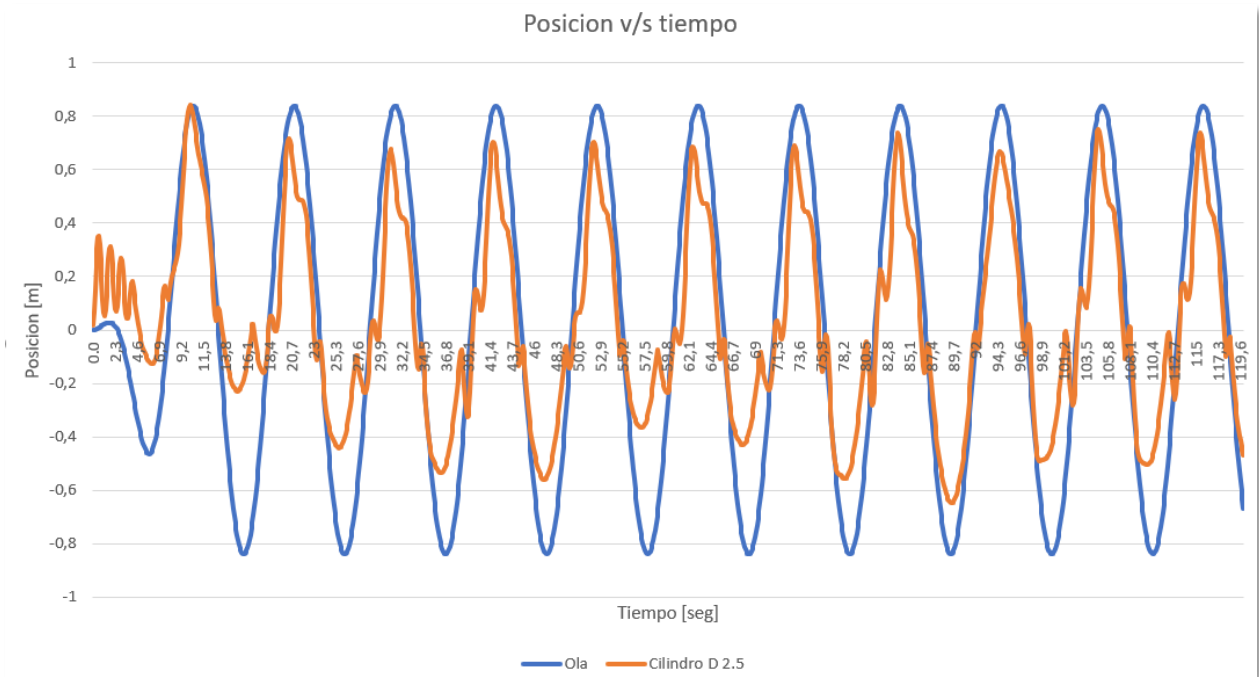
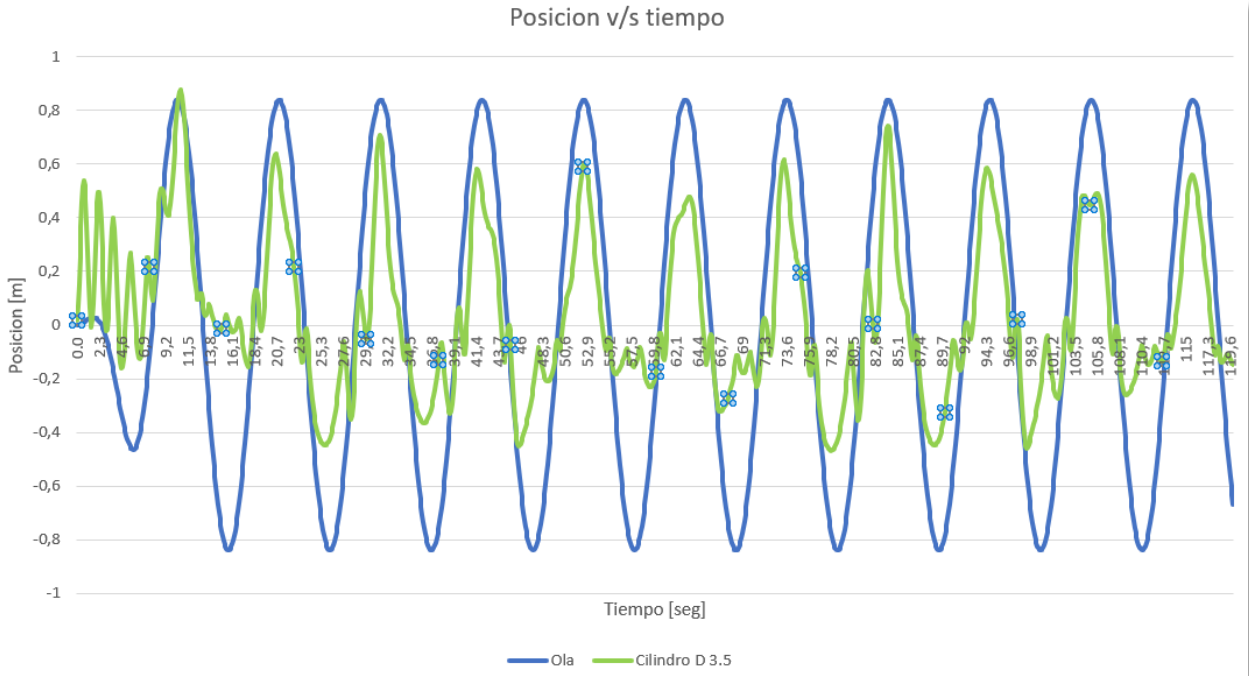


Imagen 59: Posición en el tiempo para diámetro de 2,5 metros.



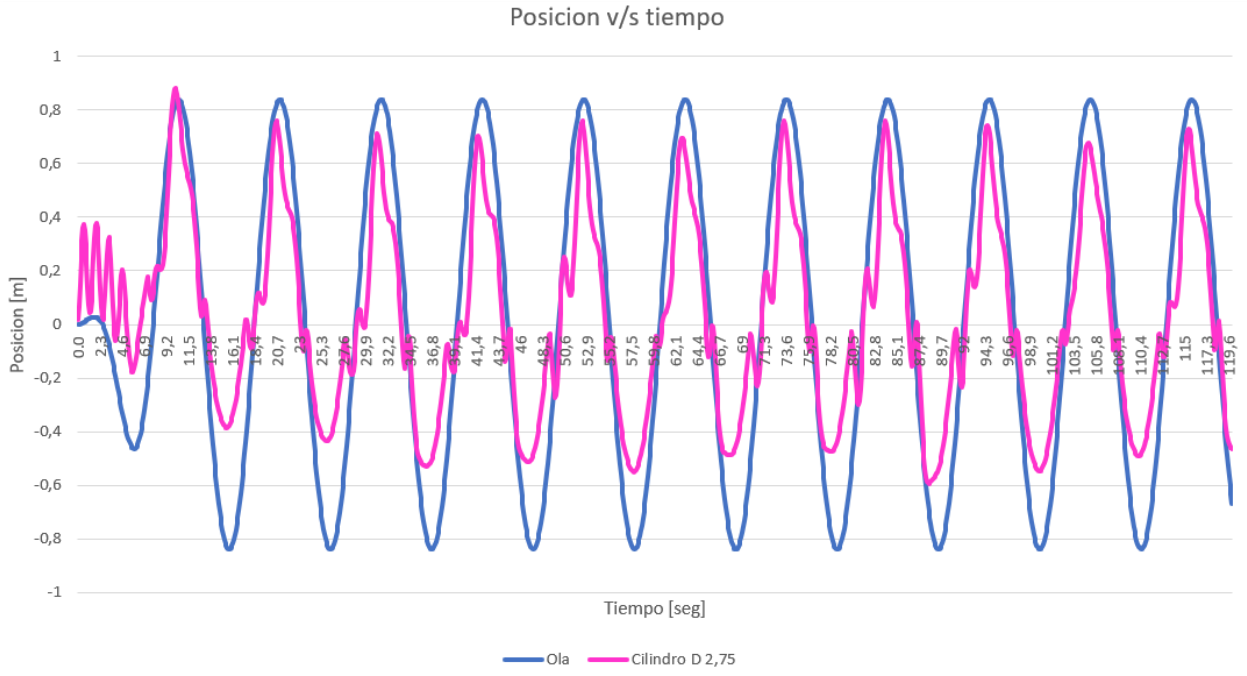


Imagen 61: Posición en el tiempo para un diámetro de 2,75 metros.

Ya con el último modelo simulado se procede a realizar una comparación en detalle de los nuevos diámetros escogidos como se ve a continuación:

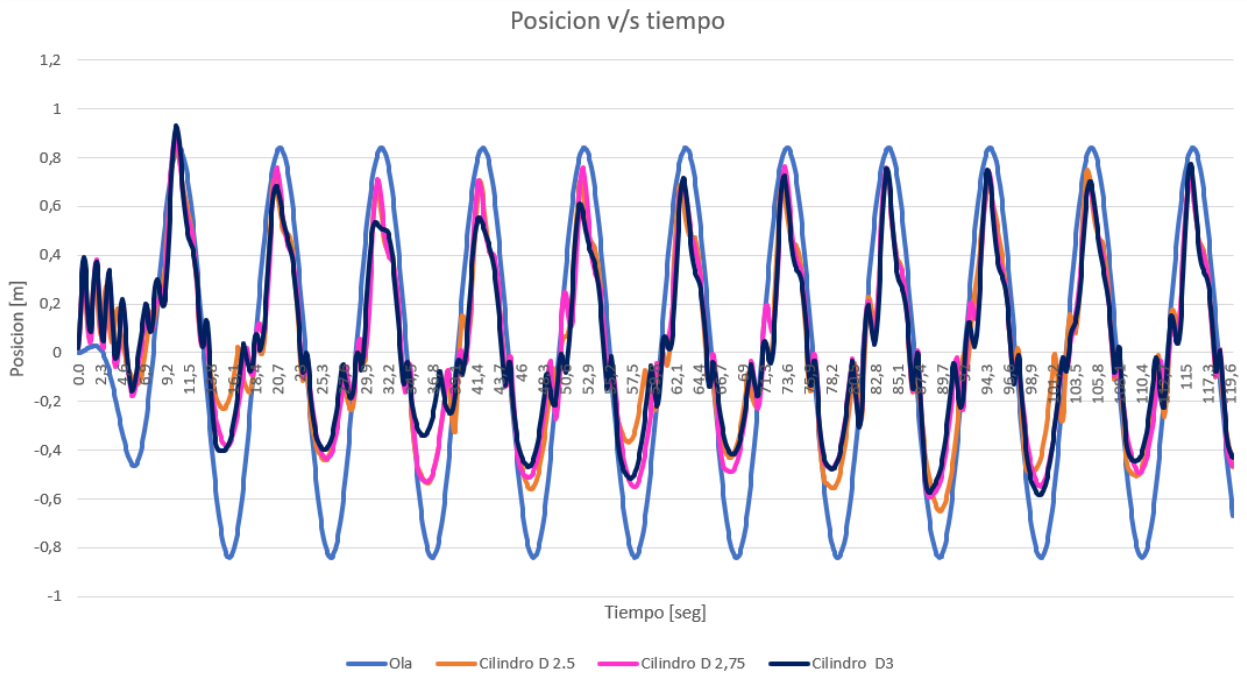


Imagen 62: Posición en el tiempo para diámetros de 2,5; 2,75 y 3 metros

En la imagen 61 se muestra la comparación de la posición en el tiempo para los diámetros de 2,5; 2,75 y 3 metros. Como se observa las tres boyas presentan un comportamiento

casi idéntico en el tiempo, donde se aprecian diferencias puntuales en ciertos puntos. Al comparar la altura máxima alcanzada se puede ver que todas alcanzan un valor similar, a pesar de que hay una diferencia de un 25% de masa entre cada una de ellas y un 40% entre la de 2,5 y 3 metros. Los valores máximos alcanzados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11: Valores de Amplitud máximos.

Diámetro [m]	Masa [Kg]	Amplitud máxima promedio (0-π) [m]	Amplitud máxima promedio (π -2π) [m]
2,5	1880	0,70	0,47
2,75	2499	0,73	0,50
3	3250	0,69	0,46

En la Tabla 11 se muestran los valores máximos promedio por periodo alcanzados en cada fase de la ola. Según estos valores se observa que las boyas de 2,5 y 3 metros tienen valores casi idénticos, lo cual es muy relevante, ya que a pesar de tener una diferencia de masa de un 40% estos se mueven de manera similar. La boya de 2,75 metros es la que presenta los mayores valores a lo largo del tiempo, de lo cual es posible deducir que es un mejor absorbedor que las otras boyas, ya que almacena mayor energía y disipa menos. Esto se observa en las pequeñas oscilaciones intermedias que presenta esta boya, ya que todas al momento de ascender y descender con la ola tienen pequeñas oscilaciones, donde esta es la que presenta un movimiento más fino y parecido a la onda.

Los valores de masa agregada y coeficiente de amortiguación siguen la tendencia mostrada anteriormente, donde a mayor volumen estos aumentan, por lo cual no presentan información nueva que se pueda analizar. Estos resultados pueden ser consultados en los anexos.

Para comprender de mejor manera el comportamiento de los cuerpos, podemos analizar las fuerzas externas que perciben las boyas al interactuar con la ola. Esta información es posible obtenerla del módulo HR de Ansys Aqwa, donde se muestra la variación de las fuerzas externas involucradas: Froude – Krylov, Difracción y Radiación. También es posible mostrar la fuerza de restauración hidrostática. A continuación, se muestra los resultados obtenidos de las fuerzas mencionadas:

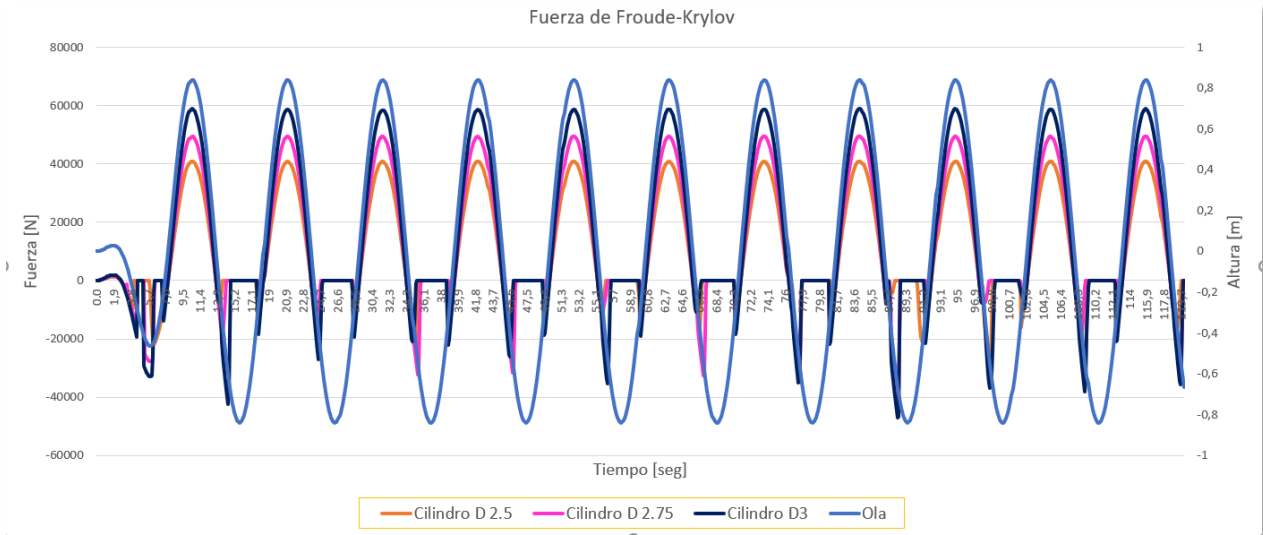


Imagen 63: Comparación de Fuerza de Froude-Krylov

En la imagen 63 se muestra la fuerza de Froude-Krylov en el eje Z. Esta es la fuerza de mayor magnitud de las mencionadas. Según lo mostrado esta fuerza alcanza su máximo a medida que crece la ola, posteriormente esta fuerza actúa en dirección del movimiento de la ola, hasta cierto punto en que se hace nula.

Al comparar las boyas se observa que la magnitud de esta fuerza varía según el volumen de estas, donde la fuerza más pequeña la percibe la boya de 2,5 metros y la mayor la boya más grande de 3 metros. Esto se debe a que la fuerza percibida por la boya es proporcional al área, ya que a mayor diámetro mayor es el frente de ola que percibe la boya, por lo tanto, capta una fuerza mayor. En todos los casos esta fuerza tiene un comportamiento regular en el tiempo, de lo cual según el gráfico la mayor absorción de energía de parte de las boyas es durante el inicio del periodo de la ola hasta segundos antes de alcanzar el valle, ya que posteriormente esta fuerza es nula.

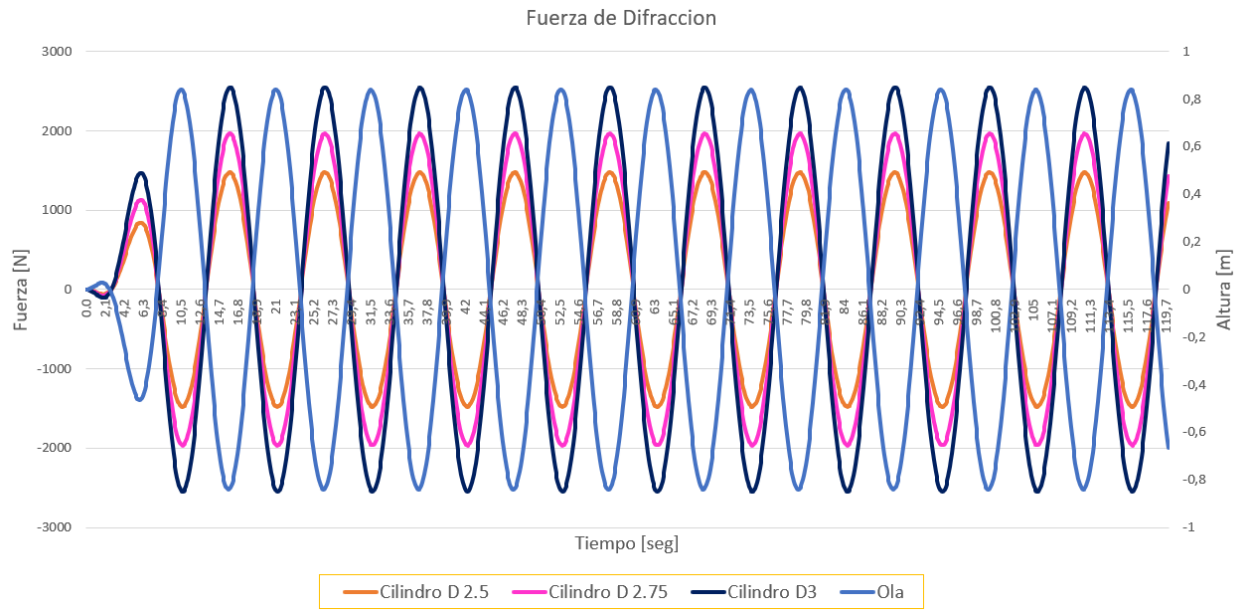


Imagen 64: Comparación de Fuerza de Difracción

La imagen 64 se muestra la variación en el tiempo de la fuerza de difracción. Esta fuerza se produce por el choque entre la ola incidente y la boya. Según los resultados obtenidos la fuerza sentida por la boya es siempre en sentido contrario al movimiento de la onda. Cabe mencionar que esta fuerza tiene una magnitud mucho menor a la Froude – Krylov, debido a que esta fuerza se origina por la presencia de la boya, que difracta la onda incidente, la cual al ser de un tamaño mucho menor que la onda, no tiene un impacto muy significativo.

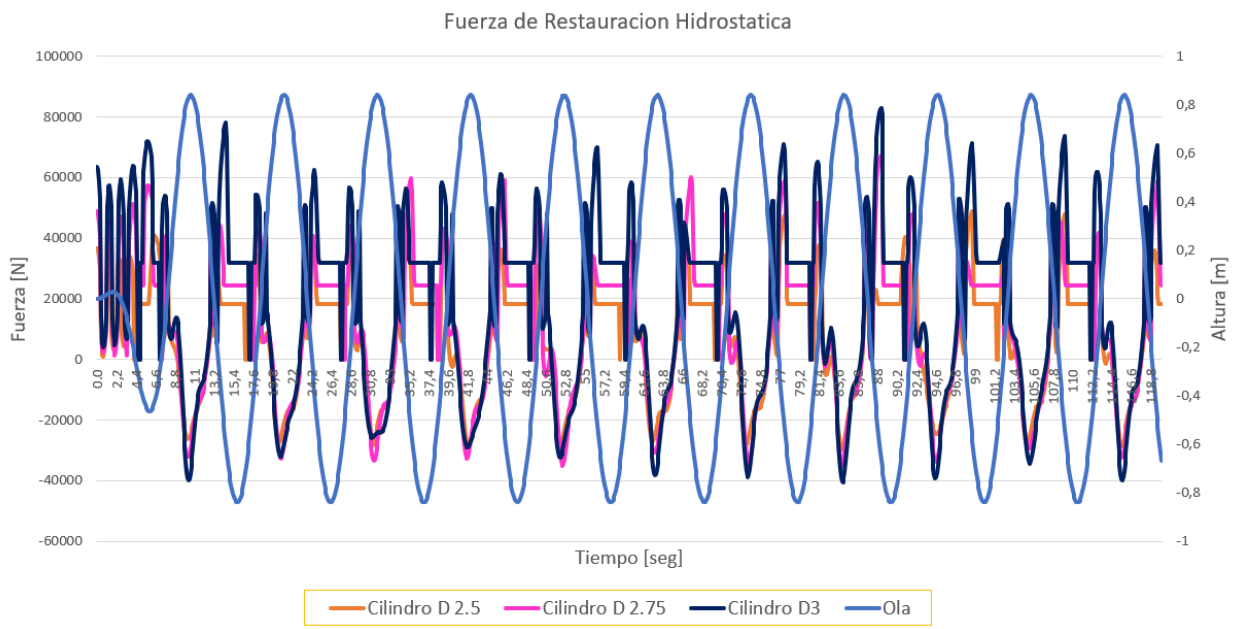


Imagen 65: Comparación Fuerza de Restauración Hidrostatica.

La fuerza de restauración hidrostática se puede expresar según la ecuación (37) como: $F_{res} = -kz$, la cual está en función de la posición de la boya. Esta fuerza se encarga de devolver al cuerpo a su posición de equilibrio, lo cual se observa en la Imagen 65, ya que al desplazarse el cuerpo en dirección positiva del eje Z esta fuerza se ejerce en dirección contraria. Lo mismo ocurre cuando la boya se desplaza en dirección Z negativo, esta fuerza es contraria, para devolver el cuerpo al equilibrio.

Dado que las boyas tienen un movimiento casi idéntico, la fuerza de restauración actúa de manera muy similar, donde se aprecian diferencias de magnitudes. Estas diferencias se producen por los distintos desplazamientos alcanzados por cada una de ellas. Otro factor que hay que considerar es el factor de restauración hidrostática (k_d), el cual es distinto para cada uno de los casos, ya que esta queda en función del área sumergida, la cual depende de la posición instantánea del cuerpo.

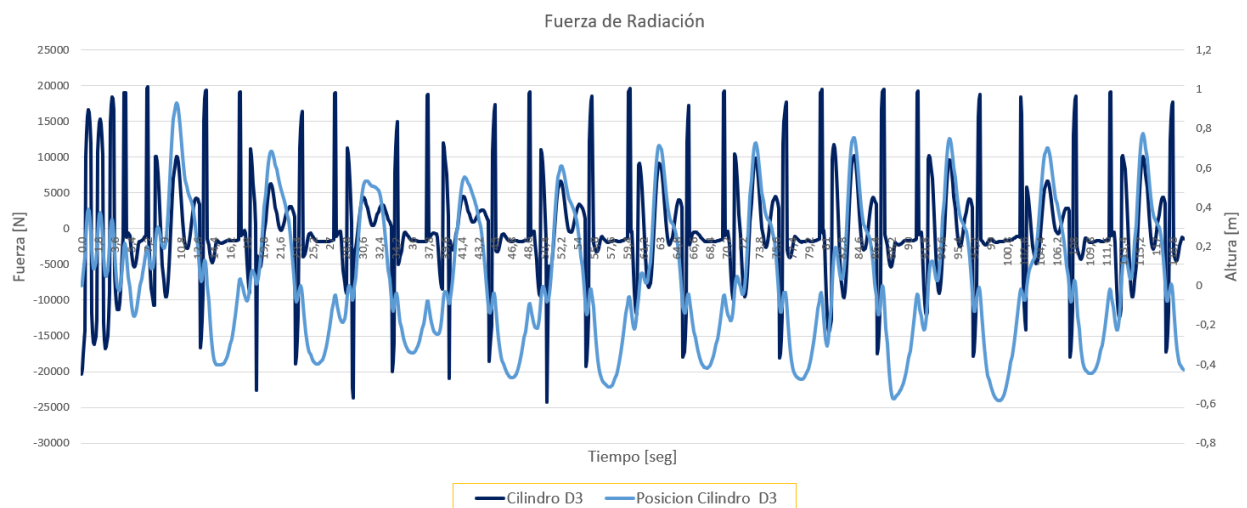


Imagen 66: Comparación entre la fuerza de radiación y el movimiento de la boya.

En la Imagen 666 se muestra el comportamiento de la fuerza de radiación de la boya de diámetro 3 metros en función de su movimiento. Como se dijo en capítulos anteriores, esta fuerza se origina por las oscilaciones producidas por la boya, la cual se determina por la masa agregada y el coeficiente de amortiguación. Según los mostrado por la imagen, esta fuerza se presenta en respuesta a las oscilaciones que tiene la boya al seguir el movimiento de la onda incidente, la cual tiene una magnitud directamente proporcional a la amplitud de la oscilación. Otro fenómeno apreciable es que esta fuerza se presenta con mayor frecuencia durante el ascenso de la boya, teniendo un comportamiento similar al movimiento de la boya, lo cual puede ser atribuible a la masa agregada que debe mover la boya para poder desplazarse junto a la ola.

10. Conclusiones

Según las simulaciones y análisis realizados, es posible describir el comportamiento de una boya sometida a un oleaje de parámetros definidos. Esto es posible tras el estudio de los múltiples factores que están involucrados entre la interacción de un cuerpo sometido a una fuerza externa que se aplica de manera cíclica.

A través de las suposiciones y modelos analizados, se estableció que una boya basada en un modelo de absorbedor puntual, sometida a un oleaje, se puede modelar como un sistema masa- resorte. De esta forma es posible abarcar el problema con una base que permite predecir la interacción entre la boya y la ola.

Mediante la simulación de las diversas geometrías propuestas, las cuales fueron sometidas a una misma condición de oleaje y con parámetros geométricos similares, se obtienen resultados totalmente distintos. Esto se evidencia al comparar los desplazamientos realizados por las boyas, de las cuales se observa que una boya de geometría uniforme es mejor absorbedor de energía que una de geometría mixta.

De los resultados obtenidos se observa que la geometría sumergida tiene una influencia a considerar en factores relevantes de estudio, tal como la masa agregada y el coeficiente de amortiguación. Según los resultados obtenidos, el tamaño de las boyas está directamente relacionados con ellos, donde se observa una diferencia entre los valores para cada geometría, la cual se incrementa a medida que se trabaja con boyas de mayor tamaño, donde la diferencia se hace más notoria. Estos valores también varían según la frecuencia de oleaje que se establece, lo cual es un factor que considerar al momento de compararlo con la realidad, ya que un oleaje real está compuesto por un espectro de frecuencias, pero mediante los valores obtenidos es posible obtener una estimación de estos valores.

Otra implicancia derivada de la variación de geometría es el movimiento que describen estos cuerpos al interactuar con la ola. Uno de los objetivos de este trabajo era estudiar la resonancia, con el fin de determinar una boya que pudiera absorber una mayor cantidad de energía. A través de las boyas estudiadas se determinó que para el oleaje simulado lo más óptimo son las boyas de menor tamaño, dado que estas son las que presentaron un movimiento similar a la ola incidente, lo cual permite captar más energía de esta. A medida que se aumentaba el diámetro de las boyas diseñadas, el comportamiento de estas se hace más irregular, lo cual dificulta producir el fenómeno de resonancia, dado que la frecuencia de oscilación aumenta, lo cual produce pérdidas de energía por la generación de ondas por parte de la boya, lo cual genera interferencias con la onda incidente.

De las boyas estudiadas la que presento un comportamiento más cercano a lo buscado fue la boya cilíndrica de 3 metros de diámetro, con lo cual, al probar con diámetros

menores a este, estas se comportaban de manera muy similar. A pesar de esto se aprecian pequeñas diferencias a lo largo del tiempo, donde la boya de diámetro 2,75 metros, es la que presenta un movimiento más cercano a la ola, por lo que podría captar más energía de esta. Además, esta es la que tiene oscilaciones de menor amplitud, por lo que se espera que disipe menor cantidad de energía que las otras.

Además de estudiar el movimiento de las boyas, también se obtuvieron resultados de las fuerzas que actúan sobre estas. De estas la más influyente es la fuerza de Froude-Krylov, la cual actúa en el mismo sentido que el movimiento de la ola, lo cual concuerda con la búsqueda de la resonancia, ya que a medida que la boya se desplace en fase con la ola podrá captar más energía de esta.

Por el contrario la fuerza de difracción actúa de manera contraria al movimiento dado que esta se produce por la interferencia de la ola con el cuerpo, lo cual indica que mientras menor sea la interferencia entre la boya y la ola, esta fuerza se verá disminuida, lo cual se corrobora con la Imagen 64, donde la boya de menor diámetro es la que percibe una menor magnitud de esta fuerza.

Para concluir es posible afirmar que el estudio de un modelo geométrico basado en la simulación numérica permite tener una vista preliminar del comportamiento de una boya sometida a un oleaje regular. Hay que tener en consideración que estos resultados no son exactos y están sujetos al error, dado que se realizaron una serie de simplificaciones y supuestos. Aun así, estos resultados permiten lograr un primer avance a un futuro prototipo de extracción de energía undimotriz, lo cual implica una serie de investigaciones que pueden continuar este trabajo, tales como:

- Validación de datos mediante un prototipo a escala en un canal de olas
- Optimización de geometría para diferentes condiciones de oleaje.
- Creación de un mecanismo de extracción de energía.

11. Bibliografía

- [1] M. & E. C. McCormick, “Renewable Power. Renewable Energy,” 2008.
- [2] Centre for Renewable Energy Sources, “Ocean Energy Conversion in Europe: Recent advancements and prospects,” *Cent. Renew. Energy Sources*, p. 36, 2006.
- [3] ACERA, “El 2020 será el año de las ERNC, adelantándose cinco años a la meta del 20%,” 2019.
- [4] P. Ibáñez Ereño, “Energías de las olas: Situación y Futuro,” pp. 1–70, 2008, [Online]. Available: [www.ptmaritima.org/renovables/documentos/Aprovechamiento de las olas_2? Jornada internacional_Tecnalia.pdf%5Cn %5Cn](http://www.ptmaritima.org/renovables/documentos/Aprovechamiento_de_las_olas_2?Jornada_internacional_Tecnalia.pdf%5Cn%5Cn).
- [5] Universidad de Sevilla, “Generacion de energia Undimotriz o de las Olas,” *Base datos - Bibl. Ing.*, no. Cres, p. 25, 2006, [Online]. Available: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70175/fichero/1_CapituloI.pdf.
- [6] O. Las, “Meteorología.”
- [7] J. J. Muñoz Pérez, “Ondas regulares y su aplicación a la ingeniería de costas,” pp. 1–99, 2011, [Online]. Available: <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/20998#.X001ipc0Pwx.mendeley%0A> <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/20998>.
- [8] X. Huang and Y. Chen, “Multiobjective risk decision model of transit flood resources utilization,” *WIT Trans. Inf. Commun. Technol.*, vol. 59, pp. 247–253, 2014, doi: 10.2495/ICACC130341.
- [9] “Tratamiento de la acción debida al oleaje en puentes flotantes.,” no. 10, pp. 34–52.
- [10] W. energy assessment in the central-south coast of Chile, “Características fundamentales de las olas de aguas someras de Valparaíso. Costa de baja

profundidad de Punta Curaumilla (Laguna Verde).,” no. 0, pp. 20–23.

- [11] E. de energia Marina, “Informe de Evaluación del Recurso Marino,” 2016.
- [12] T. D. Canonsburg, “AQWA User Manual,” *Knowl. Creat. Diffus. Util.*, vol. 15317, no. October, pp. 724–746, 2012.