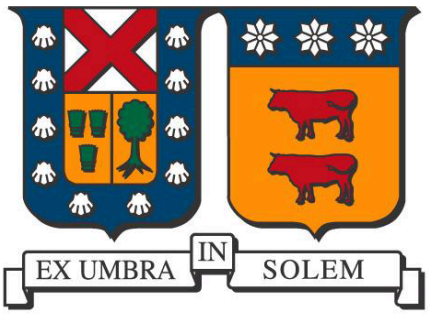


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE

Diseño, prueba y prototipo experimental de dos macroestructuras flotantes geométricamente diferentes semi-sumergidas con múltiples turbinas eólicas

Memoria de Título presentada por
Carlos Ándres Cortés Sarabia

Memoria para optar al título de
Ingeniero Mecánico Industrial

Alex Flores Maradiaga - profesor guía
Udo Reinschmidt - profesor correferente
Patricio Winckler - profesor invitado de la UV

Marzo 2024

Agradecimientos

Quiero dedicar este trabajo a las personas más importantes en mi vida: mis padres y mi hermana. Su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios han sido la piedra angular de mi éxito académico y personal.

A mis padres, les agradezco profundamente por su infinita paciencia, sabiduría y aliento durante todos estos años. Desde mi infancia hasta el día de hoy, han sido mi fuente de inspiración y mi ejemplo a seguir. Mi padre en especial por su dedicación para proporcionarme las mejores oportunidades y recursos ha sido inigualable. No tengo palabras suficientes para expresar mi gratitud por todo lo que han hecho por mí.

A mi querida hermana, le agradezco por ser mi confidente, mi amiga y mi compañera en esta travesía de la vida. Su apoyo incondicional y su comprensión han sido un faro de luz en los momentos difíciles. A través de nuestras conversaciones y risas, has sido mi roca en la que apoyarme.

Agradezco profundamente al profesor Alex cuya orientación, apoyo y dedicación fueron fundamentales en la realización de esta tesis. Al profesor Patricio cuya experiencia, perspectivas y comentarios críticos contribuyeron significativamente a la amplitud y profundidad de este trabajo, y principalmente a Pablo por su disposición para compartir su conocimiento y tiempo desinteresadamente que han sido vitales para el desarrollo de este proceso.

Resumen

Este estudio se centra en la comparación de dos macroestructuras flotantes semi-sumergidas, una pentagonal y otra triangular, diseñadas con múltiples turbinas eólicas, frente a una plataforma estándar mono-turbina. Las pruebas se realizaron en condiciones de oleaje regular característico de la zona de Punta Galera, al sur de Chile. La metodología empleada implicó la creación de modelos a escala de las plataformas semi-sumergibles mediante impresión 3D, seguidas de pruebas bajo diferentes condiciones de oleaje monocromático para evaluar su estabilidad frente al volcamiento en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso.

Los resultados obtenidos indican que la plataforma semisumergible triangular demostró una mayor estabilidad en comparación con la plataforma pentagonal. Además, ambas macroestructuras flotantes resultaron ser más estables que la plataforma mono-turbina estándar. Estas conclusiones se respaldan con el análisis de los gráficos de adrizamiento y momento de adrizamiento, que mostraron consistentemente un mejor desempeño de las estructuras semi-sumergibles en comparación con la plataforma mono-turbina.

En resumen, este estudio proporciona información valiosa sobre la estabilidad de diferentes diseños de macroestructuras flotantes con múltiples turbinas eólicas bajo condiciones de oleaje específicas. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para el diseño y la implementación de plataformas eólicas en zonas costeras, contribuyendo así al avance en el campo de la energía renovable marina.

Abstract

This study focuses on comparing two semi-submerged floating macrostructures, one pentagonal and one triangular, designed with multiple wind turbines, against a standard mono-turbine platform. Tests were conducted under characteristic regular wave conditions in the Punta Galera area, located in southern Chile. The methodology involved creating scale models of the semi-submerged platforms using 3D printing, followed by testing under different monochromatic wave conditions to assess their stability against capsizing.

The results indicate that the triangular semi-submerged platform demonstrated greater stability compared to the pentagonal platform. Furthermore, both floating macrostructures proved to be more stable than the standard mono-turbine platform. These conclusions are supported by the analysis of the heeling and heeling moment graphs, which consistently showed better performance of the semi-submerged structures compared to the mono-turbine platform.

In summary, this study provides valuable insights into the stability of different designs of floating macrostructures with multiple wind turbines under specific wave conditions. These findings have significant implications for the design and implementation of offshore wind platforms, thereby contributing to advancements in the field of marine renewable energy.

Tabla de contenido

Agradecimientos **2**
Resumen **3**
Abstract **3**
1. Introducción **7**
2. Contexto y problemática **8**
2.1. Consumo de la energía mundial 8
2.2. Combustibles fósiles 8
2.3. Cambio climático 9
2.4. Política energética en Chile 9
2.5. Energía eolica flotante marina 10
2.6. Desafios Tecnicos 11
3. Estado del Arte **12**
3.1. Clasificación de turbinas eólicas marinas 12
3.1.1. Cimientos de las turbinas eólicas marítimas 12
3.1.2. Tipos de plataformas flotantes para turbinas eólicas 12
3.2. Proyectos industriales de plataformas semisumergibles 14
3.2.1. Iberdrola 14
3.2.2. DeepCwind Company 14
3.2.3. Mainstream y Aker 15
3.2.4. Hexicon 16
3.3. Estudios académicos de plataformas semisumergibles 17
3.4. Patentes 19
3.5. Geometrías desechadas para plataformas semi-sumergibles 23
4. Marco Teórico **25**
4.1. Energía eólica marina flotante 25
4.2. Olas 25
4.3. Características de la ola 26
4.4. Teoría lineal de olas 29
4.5. Movimiento de un cuerpo en el mar 30
4.6. Modelación física 31
4.7. Armaduras 33
4.8. Esfuerzo 34
4.8.1. Condiciones de inestabilidad 34
4.8.2. Esfuerzo admisible y de trabajo por tensión 35
4.9. Modelo de pérdida de estela 36
4.9.1. Modelo de estela de Larsen 36
4.10. Principio de arquímedes 38
4.11. Equilibrio de cuerpos flotantes 38
4.11.1. Centro de Gravedad 39
4.11.2. Centro de Boyantes o Carena 40
4.11.3. Estabilidad Transversal 40
4.11.4. Metacentro 41

4.11.5. Altura Metacéntrica....41
4.11.6. Determinación de “BM”....42
4.11.7. Brazo adrizante (GZ)....44
4.11.8. Estabilidad para grandes inclinaciones (escora > 10º)....46
4.11.9. Incidencia de la Posición de “G” en la Estabilidad....48
4.11.10. Curva de Estabilidad Estática....49
5. Objetivo general....51
5.1. Objetivo Específicos....51
6. Metodología....51
6.1. Descripción general....51
6.2. Calado....52
6.3. Presentación de las variables de los casos de estudio....53
6.3.1. Ubicación....53
6.3.2. Data marítima....54
6.3.3. Data eólica....55
6.4. Casos de estudio....56
6.5. Datos de la Turbina eólica....57
6.6. Prototipos....57
6.7. Modelos....60
6.8. Propiedades de masa....62
6.8.1. Modelo P4....62
6.8.2. Modelo T3....66
6.8.3. Modelo Mono-Turbina....67
6.9. Pruebas de medición....69
6.9.1. T01 - Prueba de Plataforma Seca....69
6.9.2. T02 - Prueba de Plataforma Húmeda - Estabilidad Estática....70
6.9.3. T03 - Prueba de Estabilidad Residual....70
6.10. Canal de Olas....73
6.10.1. Distribución general....73
6.10.2. Sistema de Generación....74
6.10.3. Cualidades de la paleta y plataforma disipadora....75
6.10.4. Resistores de monitoreo....76
6.10.5. Registro Digital....77
6.11. Proceso de Fabricación....77
6.11.1. Diseño y Fabricación:....78
6.12. Pruebas y objetivos de medición....86
6.12.1. T01 - Prueba de plataforma seca....86
6.12.2. T02 - Prueba de plataforma húmeda....89
6.12.3. T03 - Prueba de Estabilidad Residual....95
6.13. Procesamiento de datos....98
6.13.1. Descripción de software de análisis Tracker....98
6.14. Postproceso de datos....102
6.14.1. Descripción de software MATLAB....102
7. Resultados....103

7.1. T01 - Prueba de plataforma seca....103
7.2. T02 - Prueba de plataforma húmeda....104
7.3. T03 - Prueba de Estabilidad Residual....107
8. Análisis de Resultados....111
8.1. Validación de propiedades de masa....111
8.1.1. Modelo P4....111
8.1.2. Modelo T3....113
8.1.3. Modelo Mono-Turbina....113
8.2. T03 - Estabilidad Residual....114
8.2.1. Modelo P4....115
8.2.2. Modelo T3....121
8.2.3. Modelo Mono-Turbina....126
8.3. Comparación de plataformas....129
9. Extrapolación de resultados....133
9.1. Modelo P4....134
9.2. Modelo T3....134
9.3. Modelo mono-turbina....134
9.4. Comparación de plataformas....134
10. Conclusión....135
Referencia....137
Anexo....140

1. Introducción

El crecimiento continuo de la demanda mundial de energía ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles para la generación de electricidad. En este contexto, las energías renovables han emergido como una respuesta crucial para abordar los desafíos ambientales y económicos asociados con las fuentes de energía convencionales. Entre las diversas opciones, la energía eólica se presenta como una fuente prometedora, aprovechando la fuerza del viento para generar electricidad de manera limpia y eficiente.

La presente tesis se enfoca en el diseño, prueba y prototipo experimental de dos macroestructuras flotantes geométricamente diferentes semi-sumergidas, cada una equipada con múltiples turbinas eólicas. El propósito central de este estudio es comparar la estabilidad de estas dos plataformas bajo diferentes estados de oleaje regular, utilizando un canal de olas ubicado en la Universidad de Valparaíso como entorno experimental.

Este enfoque no solo busca maximizar la captura de energía eólica, sino también abordar los desafíos específicos asociados con la instalación de turbinas en entornos acuáticos. La elección de una estructura flotante semi-sumergida pretende aprovechar las ventajas de la estabilidad proporcionada por el agua, al mismo tiempo que minimiza los impactos ambientales, al igual que los costes de cableado submarino y las limitaciones geográficas de las instalaciones en tierra.

La elección de evaluar la estabilidad bajo condiciones específicas de oleaje se fundamenta en la necesidad de comprender cómo estas plataformas responderán en condiciones marítimas variables naturales para una sección del sur de Chile. La variabilidad en la geometría de cada plataforma introduce un elemento adicional, permitiendo no solo analizar la respuesta frente a diferentes estados de oleaje, sino también discernir la influencia de la configuración específica de las plataformas en la estabilidad global del sistema.

Además, para contextualizar y validar los resultados obtenidos con las plataformas multi-turbinas, se incluye en el estudio una plataforma mono-turbina genérica. Esta plataforma se somete al mismo estado de oleaje regular que las macroestructuras para establecer comparaciones fundamentales y extraer conclusiones sobre la eficacia relativa de los diseños propuestos.

Este enfoque experimental se lleva a cabo en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso, proporcionando un entorno controlado y representativo de las condiciones marítimas que estas plataformas podrían enfrentar en situaciones del mundo real. La comparación de la estabilidad entre las diferentes configuraciones de las macroestructuras semi-sumergidas y la plataforma mono-turbina constituye el núcleo de la investigación, con el objetivo último de contribuir al desarrollo de tecnologías más robustas y eficientes en el ámbito de la energía eólica offshore.

En los capítulos subsecuentes, se presentará detalladamente el marco teórico, el estado del arte, la metodología experimental y los resultados obtenidos, proporcionando una visión integral del proceso de diseño, prueba y prototipo experimental en el contexto específico de la

estabilidad bajo condiciones de oleaje regular en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso.

2. Contexto y problemática

2.1. Consumo de la energía mundial

Todas las fuentes de energía tienen algún porcentaje de impacto ambiental, pero las fuentes de energía que más preocupan a la gente son los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), así como la energía nuclear, mientras que las fuentes de energía renovables ("verdes") se consideran mucho más benignas, aunque también tienen algunos impactos dañinos [1]. Además, el impacto ambiental del uso de combustibles fósiles y energía nuclear ha empeorado con el tiempo, a medida que la población humana ha crecido y el uso de energía per cápita también ha crecido, una consecuencia inevitable del aumento del nivel de vida en todo el mundo. Esto no quiere decir que una mayor riqueza per cápita requiere invariablemente un mayor uso de energía per cápita, pero los dos están fuertemente correlacionados [2].

La energía utilizada puede tener distintos orígenes. La FIgura 1 muestra un reporte anual estadístico energético en el que revela el aporte de cada fuente de energía a la producción mundial de energía [3]. Como se puede apreciar, el carbón, el gas natural y el petróleo, son los de mayor aporte histórico.

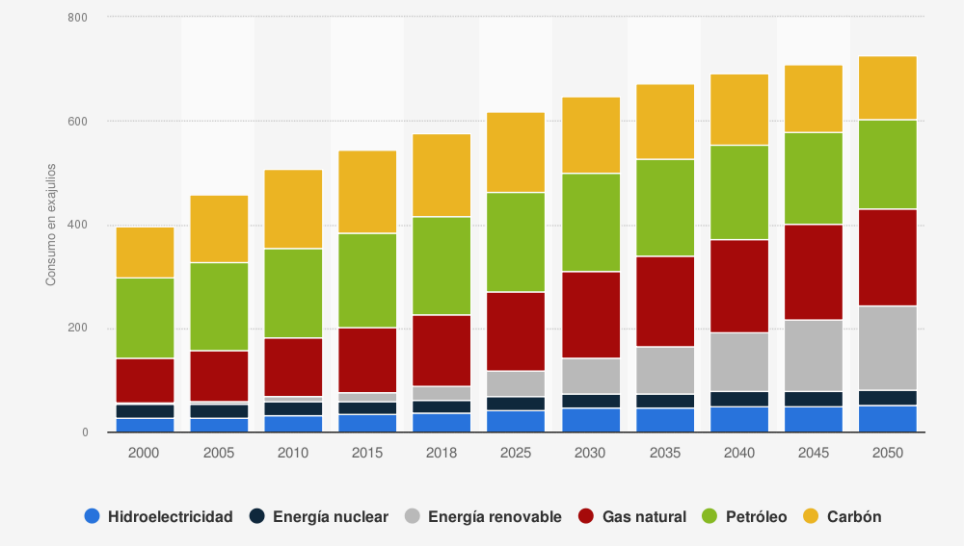


Figura 1: Consumo mundial de energía de 2000 a 2050 [3].

2.2. Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son combustibles fabricados por procesos geológicos que actúan sobre antiguos organismos muertos. Estos organismos muertos fueron enterrados hace cientos de millones de años. La mayor parte de la energía empleada hasta ahora en el mundo proviene de los combustibles fósiles, y este uso conduce al cambio climático.

Los combustibles fósiles son cuatro: petróleo, carbón, gas natural y gas licuado del petróleo. Estos cuatro elementos tienen una alta densidad energética, pero al ser conformados principalmente por moléculas de carbono, al utilizarlos en combustión, liberan grandes cantidades de CO_2, lo que termina aumentando su concentración en la atmósfera [4].

2.3. Cambio climático

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos. Estos cambios pueden ser naturales, por ejemplo, a través de las variaciones del ciclo solar. Pero desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas [4].

La quema de combustibles fósiles genera emisiones de gases de efecto invernadero que actúan como una manta que envuelve a la Tierra, atrapando el calor del sol y elevando las temperaturas [4].

Y las emisiones siguen aumentando. Como resultado, la temperatura de la Tierra es ahora 1,1 [°C] más elevada que a finales del siglo XIX y para el 2050 se pronostica se subirá hasta 2 [°C] [4]. La última década (2011-2020) fue la más cálida registrada.

2.4. Política energética en Chile

En febrero del 2022 se actualizó la política energética nacional considerando los cambios en el contexto nacional y global de los últimos años y revalidando visiones y consensos. Propone una visión del sector energético al 2050 que corresponde a un sector contable, sostenible, inclusivo y competitivo, con el fin de avanzar hacia una energía sustentable en todas sus dimensiones [5].

Para alcanzar la visión de descarbonización, la política energética ha propuesto una serie de metas que servirán para cumplir con los acuerdos de París en su lucha contra el cambio climático [5].

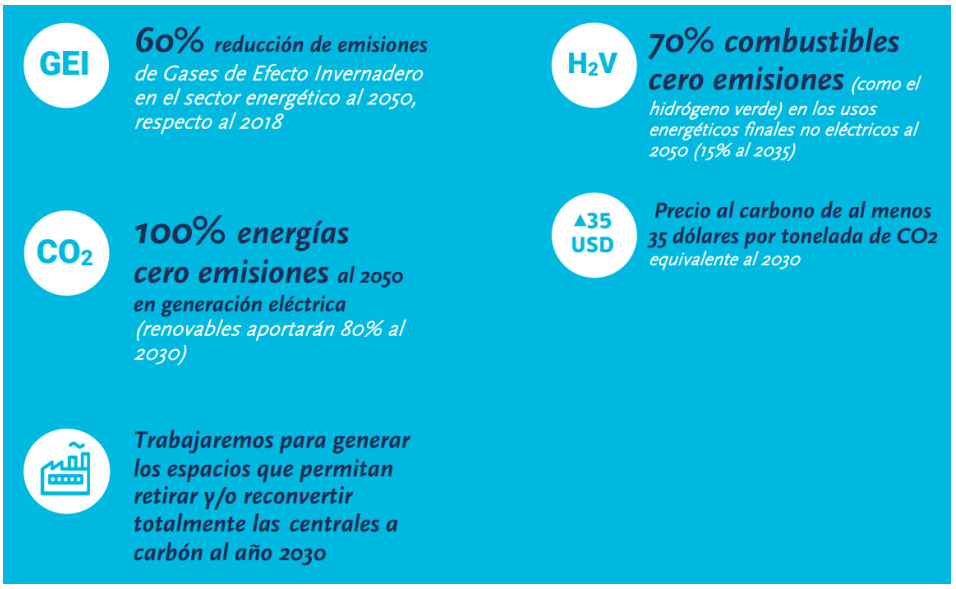


Figura 2: Metas destacadas [5].

Dentro de estas metas existe un objetivo de interés el cual es el número tres, ya que este objetivo promueve la penetración de tecnologías de energías renovables. Es tal el apoyo a las tecnologías que según la figura 3, las proyecciones de generación eléctrica en los siguientes años son muy altas para los generadores eólicos y fotovoltaicos, por lo que es un buen momento para desarrollar proyectos eólicos [5].

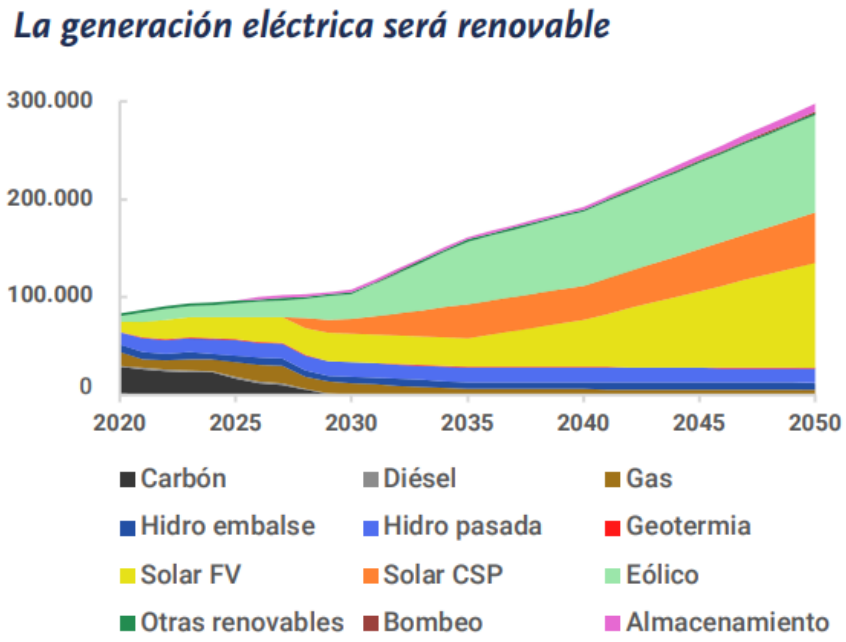


Figura 3: Proyección de generación eléctrica por tipo de fuente [GWh] [5].

2.5. Energía eolica flotante marina

El impacto ambiental que ha creado la humanidad en aras del progreso y teniendo en cuenta las alternativas, ya no es justificable. Sin una acción decisiva, las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía podrían aumentar más del

doble para el 2050, y el aumento de la demanda de petróleo aumentará el interés por la seguridad de los suministros. Por esta razón, se necesita una revolución energética para lograr una reducción del 50% de las emisiones globales de CO_2 en relación con los niveles actuales para 2050. En esta revolución, la eficiencia energética, las tecnologías energéticas sostenibles y bajas en carbono juegan un papel crucial en el sector energético. Además, las energías renovables desempeñan un papel importante a la hora de abordar los desafíos ambientales y energéticos mundiales. Entre las fuentes de energía renovable, el viento es la más avanzada de las nuevas tecnologías de energía renovable.

La energía eólica marina es mucho más eficiente que la energía eólica común, ya que al aprovechar la fuerza del viento que se produce en alta mar, esta alcanza una velocidad mayor y más constante que en tierra debido a la ausencia de barreras. Para aprovechar al máximo este recurso, se instalan estructuras asentadas sobre el fondo marino y dotadas de las últimas innovaciones técnicas. La mayoría de los parques eólicos marinos emplean turbinas eólicas de base fija en aguas relativamente poco profundas.

Las plataformas flotantes de aguas profundas para turbinas eólicas marinas son sistemas integrados que combinan generadores de turbinas eólicas, plataformas flotantes y sistemas de mantenimiento de estaciones (amarres y/o ataduras) que responden a cargas de viento, olas y corrientes de una manera compleja.

Entre las ventajas de la energía eólica marina flotante se encuentran el impacto ambiental potencialmente bajo y la facilidad de fabricación e instalación, ya que las turbinas y plataformas flotantes se pueden construir y ensamblar en tierra y luego remolcarse al sitio de instalación en alta mar. Además, como se ha señalado anteriormente, pueden aprovechar los fuertes vientos que soplan en las zonas más profundas, lo que mejora la eficiencia energética.

En este proyecto se diseñará una plataforma flotante semisumergible con el fin de optimizar la obtención de energía eléctrica a través del viento que se produce en alta mar y acercarnos a la descarbonización que tanto necesita la gente.

2.6. Desafios Tecnicos

La plataforma podría tener algunos desafíos en su fabricación, instalación y mantención, como la salinidad del mar que produciría corrosión, la resonancia que produce el mar y el rotor de la turbina, la proliferación de la vida marina sobre la plataforma y el esfuerzo o fatiga que se tienen que ver sometidos los materiales de la plataforma. La importancia del diseño de la plataforma es que tiene que extraerse la mayor cantidad de energía eficientemente y para lograr esto se necesita encontrar la manera de que la amortiguación sea lo suficiente para contrarrestar el movimiento de la resonancia del mar y del rotor. Con lo anterior se realizará un estudio de prototipo experimental para determinar los parámetros de diseño tales como forma, dimensiones, peso, masa, etc. con el fin de maximizar la extracción energética del dispositivo.

3. Estado del Arte

3.1. Clasificación de turbinas eólicas marinas

3.1.1. Cimientos de las turbinas eólicas marítimas

La mayor forma de categorización de las turbinas marinas es por su forma de anclaje al suelo marino. Las primeras y más utilizadas son las de fondo fijo, ya que estas se utilizan en superficies de hasta 60 metros de profundidad, de estos el más común es el monopilote y para mayor profundidad se utiliza un soporte tipo cercha [6]. A partir de 60 metros la viabilidad del fondo fijo sería demasiado costoso por lo que aparece la clasificación flotante. Donde diferentes tipos de plataformas ocupan la capacidad de resistir una turbina eólica en el mar siempre que estén ancladas con cables de acero al fondo marino.

3.1.2. Tipos de plataformas flotantes para turbinas eólicas

La energía eólica marina flotante se basa en plataformas flotantes para aerogeneradores. La elección de un tipo u otro dependerá de las condiciones del mar y del fondo marino, los vientos de la zona, el tamaño del aerogenerador, la profundidad de los puertos, las instalaciones de fabricación o la disponibilidad y precio de los materiales y equipos. Algunos de ellos se describen a continuación:

Semisumergible

Este diseño busca minimizar la superficie expuesta al agua, pero siempre maximizando el volumen, que es lo que realmente desplaza la masa de agua y proporciona flotabilidad. Geométricamente, lo ideal sería una esfera (máximo volumen con la menor superficie), pero una esfera no es práctica de fabricar, por lo que los volúmenes que proporcionan flotabilidad se dividen en varios cilindros verticales (o paralelepípedos), que se unen mediante vigas y tirantes para crear una superficie donde se pueda instalar la turbina. Su tamaño y la distancia entre ellos determinan su estabilidad [7].

Plataforma Spar

En este modelo, la mayor parte del peso se coloca en el punto más bajo posible para proporcionar estabilidad. Por ejemplo, si arrojamos al agua un cilindro hueco y estanco, flotará si la relación entre la altura y la superficie de la base es suficiente para que el volumen de agua desplazado compense su peso. Si el cilindro es homogéneo, no será estable flotando verticalmente y se volcará para flotar horizontalmente. Para evitar esto, se dota al cilindro de mucha masa en el extremo opuesto a donde está instalada la turbina para

mantener la verticalidad. En resumen, la flotabilidad la proporciona la geometría del cilindro, mientras que la estabilidad la proporciona el peso en el punto más bajo. A medida que las turbinas se vuelven cada vez más grandes, se requieren cilindros muy largos para compensar los pesos, lo que hace que esta solución sea muy difícil de fabricar, transportar e instalar [7].

Plataforma de Piernas Tensadas

El concepto más nuevo y técnicamente más arriesgado actualmente: la plataforma en realidad no flota como tal una vez que se instala la turbina en ella. El objetivo es reducir al máximo las dimensiones para abaratar los costes de fabricación. La geometría en estrella de tres, cuatro o cinco brazos reduce al mínimo los volúmenes de cada brazo para que la plataforma flote sin carga, es decir, sin el aerogenerador instalado. Antes de la instalación, para evitar que el conjunto se vuelque a medida que sube el centro de gravedad, se fijan flotadores reutilizables temporales a la plataforma TLP, que a su vez permite que sea remolcado al sitio de anclaje en alta mar. Una vez allí, se conectan los cables o tendones de acero tensados y se desconectan los flotadores temporales para su reutilización en la próxima plataforma TLP a instalar [7].



Figura 4: Ejemplos de plataformas flotantes para aerogeneradores [8]

También se han desarrollado plataformas flotantes de turbinas eólicas múltiples, las cuales se construyen con el objetivo de disminuir los costos de conexión entre las turbinas, ya que se crea una red entre sí y produce un ahorro de energía que se expresa como una sola conexión o cable de electricidad que sale de la plataforma. Estas plataformas son solo de tipo semisumergible, y pueden ser calculadas de la misma manera pero a una escala mayor.

3.2. Proyectos industriales de plataformas semisumergibles

En este trabajo revisaremos el contexto de la tecnología de plataformas semisumergibles para una o varias turbinas eólicas.

3.2.1. Iberdrola

Iberdrola, S. A. es una empresa española que tiene su sede en Bilbao, en el País Vasco, España. Es un grupo empresarial dedicado a la producción, distribución y comercialización de energía.
El tipo de tecnología ocupada es el de un semisumergible convencional con tres cilindros conectados en la base de la plataforma y sujetados al suelo marino con cables. El proyecto de esta empresa es llamada Flagship y contempla el desarrollo de una turbina eólica de 10 megavatios (MW) y la estructura flotante semisumergible de hormigón. Ambas se diseñaron para operar en condiciones del Mar del Norte. La razón de que sea construida con estas especificaciones es que se comprobará si es factible instalarlas en otras localizaciones del Mediterráneo, el Báltico, el Atlántico y el Pacífico, y se evaluará el costo y la viabilidad logística de la tecnología de hormigón frente a la de acero [9].



Figura 5: Proyecto Flagship [9]

3.2.2. DeepCwind Company

La compañía DeepCwind (DCW) fue creada en 2016 para funcionar como un mecanismo mediante el cual la Universidad de Maine (UMaine) puede comercializar y brindar soporte de diseño para sus tecnologías de energía eólica flotante en todo el mundo. En la Figura 6 se muestra un modelo de turbina eólica la cual es la Turbina Eólica Baseline de 5 MW del NREL (Instituto Nacional de Energía Renovable de EE. UU.) . La plataforma flotante es un semi-sumergible de tres patas, compuesto principalmente por tres columnas principales desplazadas que inducen flotabilidad y fuerza

restauradora, una columna central que sostiene la turbina eólica, así como una serie de componentes diagonales cruzados y horizontales de refuerzo. Para lograr un excelente rendimiento de estabilidad, se instala un pontón en la parte inferior de cada columna principal desplazada [10].



Figura 6: Turbina eólica flotante semi-sumergible OC4-DeepCwind [10]

3.2.3. Mainstream y Aker

Aker Horizons desarrolla proyectos industriales verdes y tecnologías de energías renovables y captura de carbono. Mainstream Renewable Power es una empresa líder en energía renovable pura. Estas empresas llegaron a un acuerdo para combinar las dos empresas para crear una empresa renovable más fuerte. Estas empresas juntas fueron seleccionadas para adquirir una participación inicial del 50 por ciento en el proyecto eólico marino flotante de 800 MW de Progression Energy en Japón. La tecnología es de un semisumergible con la torre conectada sobre uno de los cilindros de modo que el resto de los cilindros produzcan el contrapeso y aumenten la inercia de la plataforma [11].



Figura 7: Floating wind turbine using WindFloat technology [11]

3.2.4. Hexicon

Hexicon es un desarrollador de proyectos y proveedor de tecnología Sueco líder en el mundo en el sector emergente de la energía eólica marina flotante. La plataforma Twin Wind™ se instaló en la costa suroeste de Corea del Sur. Al utilizar dos turbinas en una base, permite producir más energía por área de mar en comparación con el sistema de una sola turbina. Esto reduce aún más el costo nivelado de la energía proporcionando precios de electricidad más bajos para los consumidores mientras minimiza el impacto en el medio ambiente y las actividades circundantes. El diseño de esta plataforma se adapta a todos los principales diseños de turbinas eólicas marinas y pueden soportar turbinas que van desde 3 MW a 16 MW [12].



Figura 8: Tecnología flotante Twin Wind™ [12]

Hexicon también solía tener un proyecto en el 2010 que presentó ante las autoridades maltesas para un intrigante parque eólico marino con 36 turbinas instaladas en una plataforma hexagonal de 460 metros de ancho. La plataforma contaba con un sistema de estabilización al redirigir el oleaje por una especie de conductos de escape descendentes que mantienen estable la plataforma, también contaba con hélices mareomotrices bajo la plataforma para generación extra de electricidad, y contaba con un helipuerto. Sin embargo el proyecto parece haber desaparecido después del 2012, no se encontró ningún artículo respecto a su avance o rechazo, simplemente desapareció [13].



Figura 9: Plataforma flotante con capacidad de generar hasta 40 MW de energía renovable [13]

3.3. Estudios académicos de plataformas semisumergibles

En este texto se tratará el tema de las plataformas semisumergibles para una o varias turbinas. Con esto en mente se quiere investigar los avances de diseño de las plataformas para conocer las ventajas y desventajas de sus proyectos. Es decir, se quiere lograr diseñar un prototipo de plataforma que considere todas las variables positivas y negativas de la literatura encontrada.

En total se encontraron 8 estudios relacionados con el tema de investigación. Estos textos pueden ser agrupados, con base en las características de cada documento, según las siguientes dos temáticas: Turbina Única y Multi-Turbina [14-21].

Los textos de “turbina única” se caracterizan por la dificultad en predecir los aerogeneradores debido a la complejidad en el acoplamiento de la hidrodinámica, la aerodinámica y la dinámica estructural. En estos se muestra que debido a los efectos hidrodinámicos, los rotores de las turbinas eólicas marinas están sometidos a movimientos de rotación inducidos por la plataforma. La aerodinámica no lineal y la inestabilidad en las turbinas en funcionamiento son inducidas por el movimiento

acoplado del rotor giratorio y el cabeceo de la plataforma. Esto tiene un fuerte impacto en el rendimiento del rotor, la generación de energía y el empuje.

En función de los desafíos tecnológicos, se puede resumir una evaluación cualitativa de las ventajas y desventajas de las plataformas flotantes primarias como se indica en la Tabla 1, siendo 1 una ventaja relativa, -1 una desventaja relativa y 0 neutral [14]. Esta evaluación es subjetiva y depende de los detalles de diseño y el lugar de instalación.

	Semi-sumergible	TLP	Spar
Peso de la turbina	1	0	-1
Amarre	-1	1	-1
Anclaje	1	-1	1
Construccion e instalacion	1	-1	-1
Operación y mantenimiento	1	1	0
Sensibilidad al oleaje	-1	0	1
movimiento acoplado	-1	1	0
Periodos naturales	-1	1	0
Costo nivelado de energía	1	-1	1

Tabla 1: Evaluación de plataformas flotantes primarias [14]

De parte de los textos con “multi-turbinas", la técnica de contorno no era la misma que la utilizada en estructuras marinas comunes. El análisis preciso de la resistencia a la fatiga era importante porque el parque eólico marino utilizaba la estructura ligera en lugar de la estructura marina común. El análisis hidroelástico forma la base para el diseño de las estructuras de estas grandes turbinas eólicas marinas. Se realizaron experimentos con modelos a escala para comparar la simulación numérica. Estas demostraron que las placas de oleaje con un aumento mínimo de masa pueden reducir los movimientos de cabeceo y oleaje y también cambiar sus frecuencias naturales. También se demostró que el análisis del efecto de estela llevado a cabo en las etapas iniciales del diseño redujo en gran medida el déficit de energía en las turbinas eólicas aguas abajo. Las ventajas y desventajas de las plataformas flotantes de uno o varios aerogeneradores se resumen en la Tabla 2 [14].

	Ventajas	Desventajas
Plataforma flotante con turbina única	➢ Bajo requisito en cuanto a la estructura. ➢ Opciones de control estándar para guiñada.	➢ Costo individual para anclas. ➢ Menos estable. ➢ Baja posibilidad para optimización de masa. ➢ Costos de transmisión relativamente más altos
Plataforma flotante con multi-turbina	➢ Estabilidad debido a las cargas de las olas. ➢ Anclas comunes. ➢ Posibilidad de optimización de la masa. ➢ Menor costo de transmisión.	➢ La estructura de soporte es relativamente costosa. ➢ El control de guiñada es complejo

Tabla 2: Comparación de plataformas flotantes con turbinas únicas y múltiples [14]

3.4. Patentes

Título: Plataforma semisumergible para aplicaciones en mar abierto. [22]
Resumen:
Una plataforma semisumergible (26) que comprende: una columna interior (15) y al menos cuatro columnas exteriores (14), donde cada una de dichas columnas interior y exteriores (14, 15) comprenden una base resistente (12) y un tronco (5a, 5b; 6a, 6b), y donde cada columna (14, 15) comprende una sección de mayor resistencia (7) a una determinada altura y una pluralidad de vigas (8) que unen cada columna exterior (14) con la columna interior (15) y cada columna exterior (14) con cada columna exterior adyacente. Un método de construcción de una plataforma semisumergible.

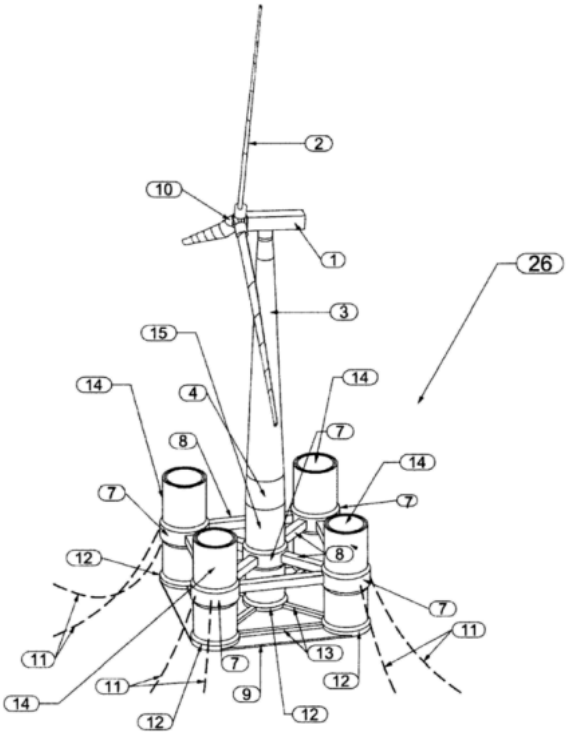


Figura 10: Imagen de la Plataforma a representar en la patente [22]

Título: Plataforma flotante de turbina eólica con control de lastre y sistema de amarre. [23]

Resumen:

Una plataforma de turbina eólica flotante incluye columnas estabilizadoras, una torre, placas de atrapamiento de agua conectadas a las columnas estabilizadoras y un sistema de control de lastre. La torre está montada sobre una de las columnas. Las columnas estabilizadoras incluyen volúmenes internos para contener un lastre. El sistema de control de lastre incluye un sensor de alineación y un controlador. El sensor de alineación está configurado para detectar una rotación de la torre. El controlador está configurado para dirigir una transferencia de lastre de una columna a otra para ajustar una alineación de la torre.

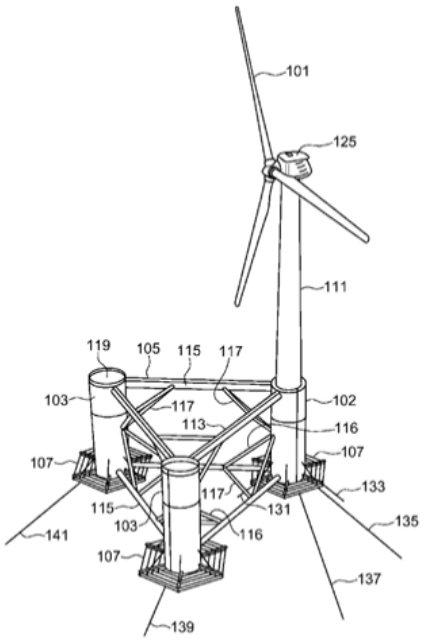


Figura 11: Plataforma flotante para turbina presentada en la patente [23]

Título: aerogenerador marino [24]
Resumen:
Un sistema de conversión de energía eólica optimizado para aplicaciones en alta mar. Cada aerogenerador incluye un casco semisumergible con peso de lastre que se puede mover para aumentar la estabilidad del sistema. Cada aerogenerador tiene una serie de rotores distribuidos en una torre para distribuir el peso y las cargas y mejorar el rendimiento de la producción de energía donde la cizalladura del viento es alta. La mayor parte posible del equipo asociado con cada rotor se ubica en la base de la torre para reducir la altura metacéntrica. El equipo que puede colocarse en la parte inferior de la torre puede incluir un convertidor electrónico de potencia, un convertidor de DC a AC o el generador completo con un enlace mecánico que transmite potencia desde cada rotor hasta la base de la torre. En lugar de transmitir energía eléctrica de regreso a la costa, se contempla crear productos basados en hidrógeno de uso intensivo de energía en la base de la turbina eólica. Alternativamente, podría haber un buque factoría central que utilice la energía producida por una pluralidad de turbinas eólicas para crear un combustible a base de hidrógeno que se transporte a tierra y se venda en los mercados existentes como un producto "verde" de valor agregado.

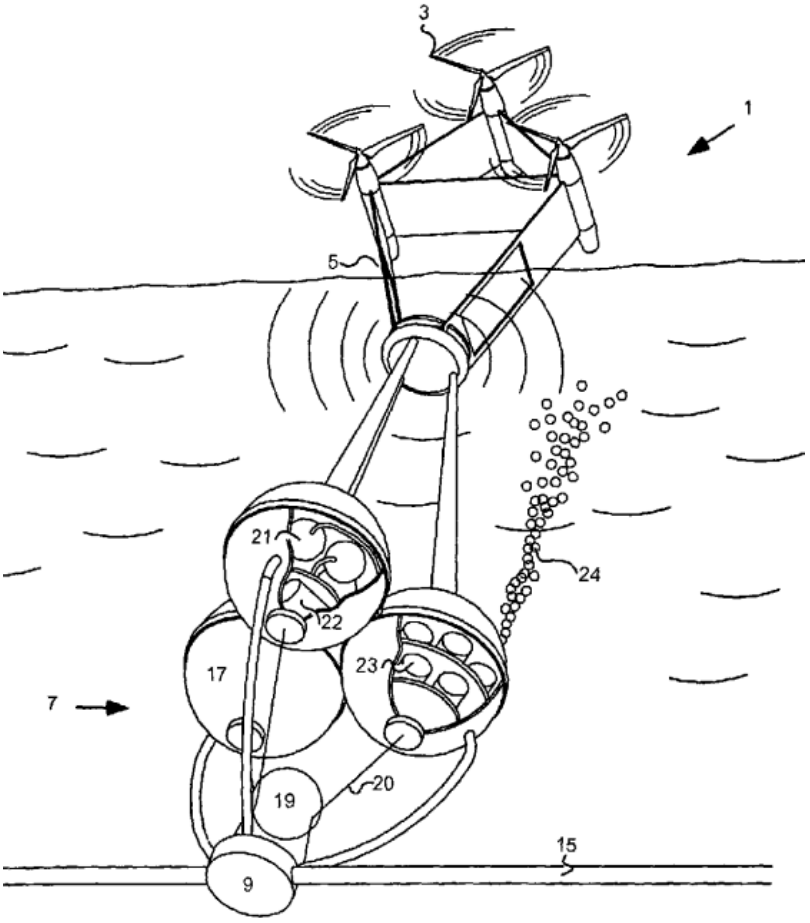


Figura 12: Aerogenerador semisumergible con peso de lastre [24]

Título: Plataforma de energía eólica multiturbina para aplicaciones marinas [25]
Resumen:
Una plataforma flotante de energía eólica multiturbina (1) para producción de energía marina, donde dicha plataforma (1) tiene una forma sustancialmente alargada con una dirección de extensión y está sujeta a al menos dos puntos de amarre (41, 42, 43, 44, 45, 46) diseñados para asegurar la plataforma en su sitio de operación en una posición original en relación con dichos puntos de amarre (41, 42, 43, 44, 45, 46). Dicha plataforma (1) comprende medios para la rotación de la plataforma (MR1) alrededor de un primer eje esencialmente vertical (z1) y además comprende al menos dos turbinas eólicas (3) dispuestas sustancialmente en línea recta correspondiente a la dirección de extensión de la plataforma y dichas al menos dos turbinas eólicas (3) cada una comprende un componente de soporte estructural (Ó) y un componente rotor (4). Dicho componente rotor (4) está unido a una góndola (S) que está dispuesta para girar utilizando medios para la rotación de la góndola (MR2). La plataforma (1) además comprende un arreglo de control (C) dispuesto para controlar los medios para la rotación de la plataforma (MR) para girar la plataforma solo durante ciertas direcciones de viento detectadas que se desvíen de una dirección de viento original (WDO) y para limitar la rotación de la plataforma (1) a como máximo 90° desde la posición original, preferiblemente como máximo +45°. La invención también se relaciona con un método y sistema para alinear componentes rotor de turbinas eólicas

dispuestas en una plataforma flotante multiturbina de acuerdo con lo anterior para ser esencialmente perpendiculares a una dirección del viento.

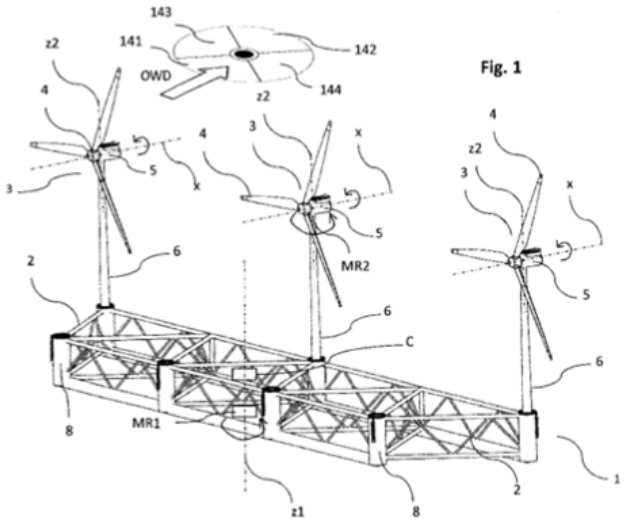


Figura 13: Plataforma eólica para multiturbina [25]

3.5. Geometrías desechadas para plataformas semi-sumergibles

A continuación se mencionan diferentes geometrías de plataformas semi-sumergibles que se desecharon por diferentes razones:

En un principio la idea original de la plataforma es que fuera hexagonal por las grandes ventajas de inercia que tiene esta geometría, pero despues unos estudios mas detallados revelaron que esta geometría provoca que la estela que dejan las turbinas frontales se encuentran con las turbinas traseras provocando vibraciones peligrosas que bajan la eficiencia del sistema multiturbina y pone en peligro la estructura flotante.



Figura 14: Ejemplo de plataforma hexagonal [13]

La plataforma pentagonal es una de las ideas que se están utilizando, sin embargo no se está ubicando una turbina en una de las puntas por la misma razón que la plataforma anterior, la estela golpea la turbina de atrás ocasionando vibraciones peligrosas e ineficiencia de producción eléctrica

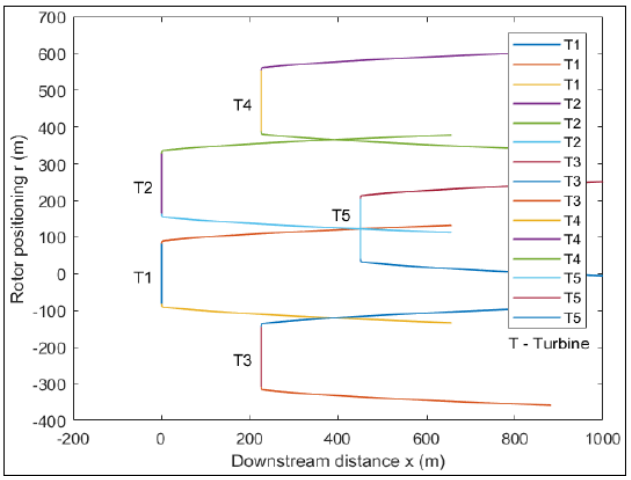


Gráfico 1: Ejemplo de la interferencia de estela por modelo de Larsen [26]

La plataforma flotante de geometría cuadrada se descartó en seguida por las mismas razones anteriores cuyos problemas fueron más evidentes por la directa interferencia que provoca. También se pensó cómo sería si la dirección del viento incidiera de forma romboide en la plataforma, pero la desventaja es la misma como en las otras plataformas.

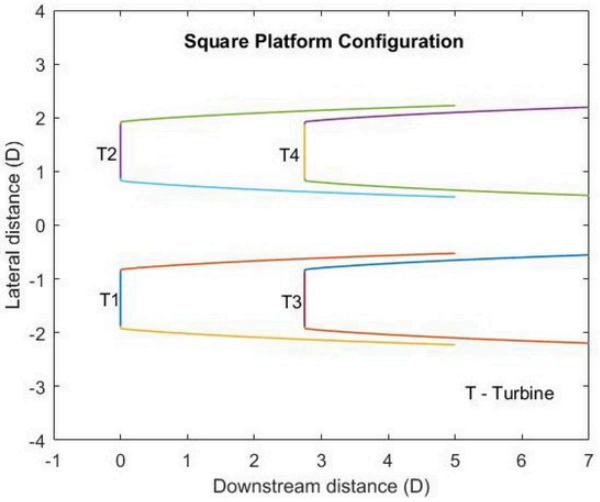


Grafico 2: Ejemplo de la interferencia de estela por modelo de Larsen [26]

Las figuras triangulares de plataformas son las más utilizadas y la razón es que son más eficientes que muchas mencionadas anteriormente, pero también existen diferentes tipos de formación o conexión de estas geometrías triangulares, en este proyecto se utilizara la que se creyo como la mas eficiente y estable entre las otras formas de conexión de plataforma triangular.

4. Marco Teórico

4.1. Energía eólica marina flotante

Una turbina eólica flotante semisumergible (TEFS) está sobre una subestructura de hormigón, acero o híbrida sobre la que se instala el aerogenerador, dotándolo de flotabilidad y estabilidad. Algunos lo llaman "cimentación flotante", pero este término no es correcto porque las plataformas flotantes no se cimentan sobre el fondo marino, sino que se anclan y amarran.
Los parques eólicos flotantes están compuestos por aerogeneradores que se colocan sobre estructuras flotantes y se estabilizan mediante amarres y anclas, y de paso el diseño de la estructura distribuye las masas y pesos. A partir de ahí, el proceso es el habitual: la fuerza del viento hace girar las palas y el aerogenerador convierte la energía cinética en electricidad, que es transportada por cables submarinos hasta una subestación marina y de allí a una subestación terrestre en la costa y finalmente a los hogares a través de las líneas eléctricas.

Además de flotar, los aerogeneradores deben producir la mayor cantidad de energía posible, y para ello es fundamental que se mantengan estables, minimizando cualquier movimiento y asegurando que funcionen en condiciones óptimas [14].

4.2. Olas

El oleaje corresponde a la manifestación de la propagación de energía mecánica a lo largo de la interfase agua-atmósfera, correspondiente a la superficie del mar. Estas ondas poseen distintos orígenes, pero, predominantemente, las olas de gravedad, generadas a partir del viento, con períodos entre 3 y 30 s, son las de mayor interés en la práctica ingenieril, principalmente debido a que este oleaje concentra un porcentaje importante de la energía de un estado de mar, así como constituye una de las principales solicitaciones estructurales, de operación y morfología costera. [27]

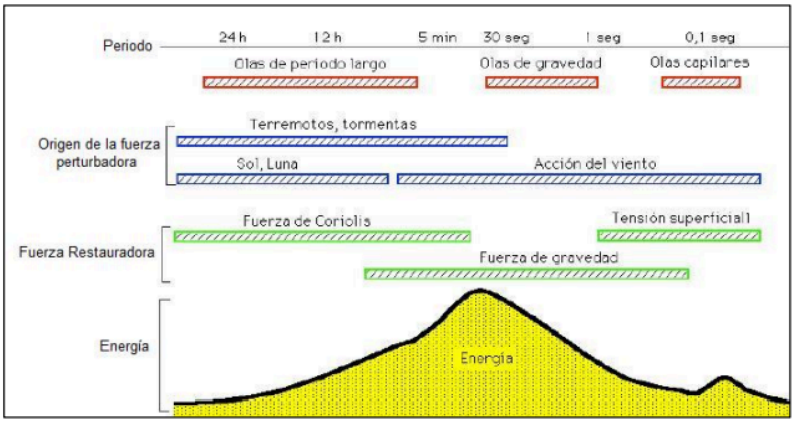


Gráfico 3: Periodos y energía contenida en los diferentes tipos de olas [27]

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.

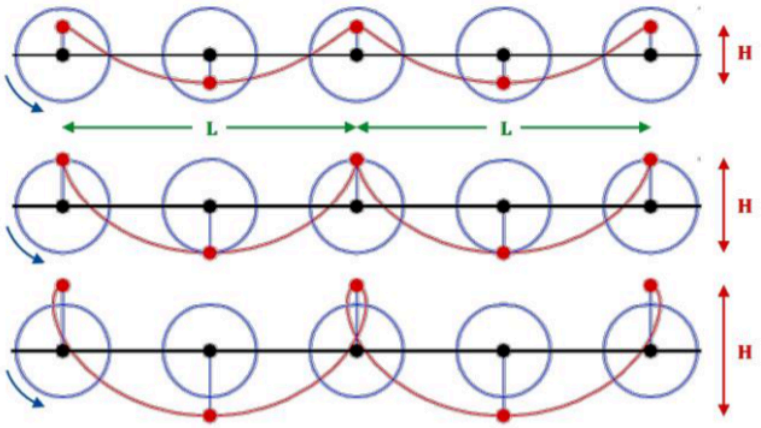


Figura 15: Movimiento descrito por las partículas marinas [28]

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. [28]

4.3. Características de la ola

El oleaje puede ser considerado como una secuencia de pulsos sucesivos, los cuales se distinguen por el paso a través de la superficie libre, desde una elevación máxima relativa (cresta) a una mínima relativa (seno o valle) [28]. La ola en su comportamiento como onda puede ser descrita con los siguientes parámetros presentados en la figura 16:

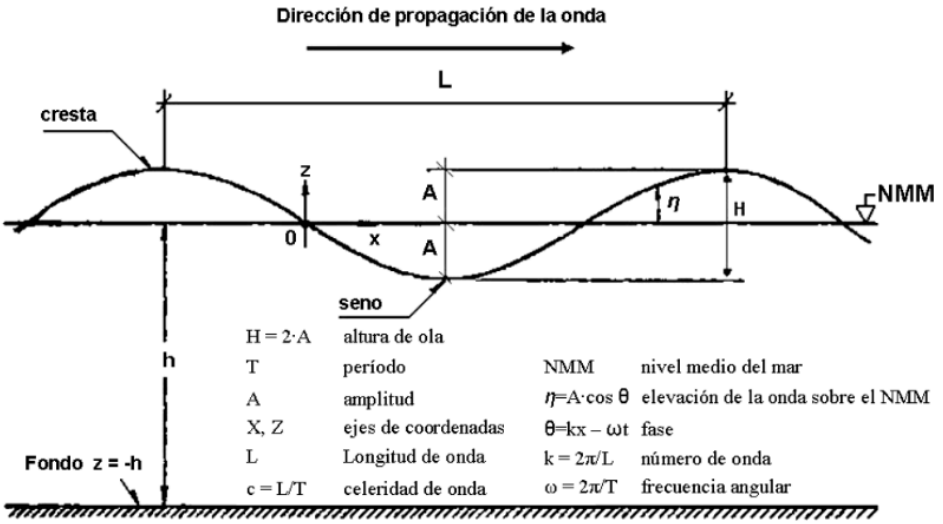


Figura 16: Parámetros de una ola. [28]

- Desplazamiento de la superficie libre (η): Corresponde al desplazamiento vertical de la superficie del agua con respecto al nivel medio del mar NMM
- Periodo de la onda (T): Corresponde al tiempo que transcurre hasta que se observa un punto indéntico en la superficie libre de la onda al observar su paso con respecto de un puto de referencia fijo.
- Longitud de onda (L): Distancia horizontal más corta entre dos puntos idénticos de la superficie libre en un instante determinado.
- Amplitud de la cresta (A_C): Distancia vertical máxima entre el nivel del mar y la cresta.
- Amplitud del Seno (A_S): Distancia vertical máxima entre el nivel del mar y el seno de la onda.
- Altura de onda (H): Distancia vertical entre la cresta y el seno de la onda. Se puede obtener como las suma de la amplitud de las cresta A_C más la amplitud del seno A_S.
- Número de onda (k): Es una magnitud de frecuencia que indica el número de veces que vibra una onda en una unidad de distancia.

$$k = \frac{2\pi}{L}[1/m] \quad (1)$$

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

$$w = \frac{2\pi}{T}[1/s] \quad (2)$$

- Frecuencia cíclica (f):

$$f = \frac{1}{T}[Hz] \quad (3)$$

- Celeridad o Velocidad de fase (c): Es la velocidad a la que se desplaza o propaga la onda.

$$c = \frac{L}{T} = \frac{w}{k}\,[m/s] \tag{4}$$

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

$$\theta = kx - wt\,[rad] \tag{5}$$

- El peralte (ε): o steepness es un parámetro que relaciona la altura con la longitud de onda, dando una idea de la pendiente de esta.

$$\varepsilon = \frac{H}{L} \tag{6}$$

- Altura relativa (δ): Indica la importancia de la variación vertical de la onda respecto a la profundidad.

$$\delta = \frac{H}{h} \tag{7}$$

- Profundidad relativa (μ): Muestra la penetración del movimiento de la onda con la profundidad. Sirve como medida de la dispersividad de la ondas pues, indica si la celeridad está afectada o no por el periodo de las ondas.

$$\mu = \frac{h}{L} \tag{8}$$

Se denomina onda de pequeña amplitud, amplitud infinitesimal o lineal, cuando la altura de la onda H es pequeña respecto de L o h, es decir:

$$\varepsilon = \frac{H}{L} << 1 \; o \; \delta = \frac{H}{h} << 1 \tag{9}$$

El comportamiento del oleaje se ve afectado al acercarse a la costa debido a su interacción con el fondo marino, tal como se visualiza en la Figura xx. Se distinguen tres zonas en función de la profundidad relativa (μ).

- **Aguas profundas**: el oleaje se propaga sin interacción con el fondo, la velocidad del tren de olas (*c*) es independiente de la profundidad. La órbita que describen las partículas es de tipo circular y cumple la relación

$$\mu > \frac{1}{2} \tag{10}$$

- **Aguas intermedias**: las olas empiezan a notar el fondo y la velocidad del tren de olas pasa a depender de la profundidad. Ésta zona se encuentra en el siguiente intervalo de profundidad relativa.

$$\frac{1}{20} < \mu < \frac{1}{2} \tag{11}$$

- **Aguas someras**: las partículas de agua notan la existencia próxima del lecho marino. En el caso extremo, el movimiento vertical quedaría totalmente impedido, teniendo una trayectoria recta horizontal. Se cumple que:

$$\mu < \frac{1}{20} \tag{12}$$

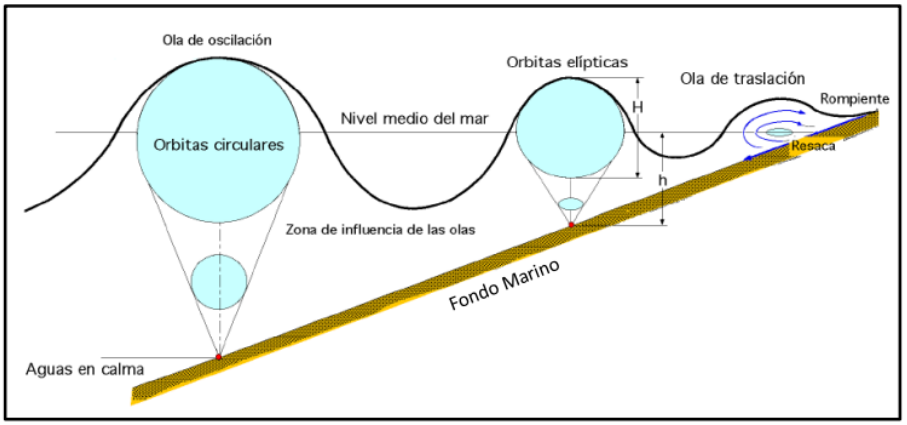


Figura 17: Modificación del perfil de una ola en su acercamiento a la orilla. [27]

4.4. Teoría lineal de olas

Los supuestos básicos son el uso de la teoría de ondas lineales también conocida como teoría de Airy. La teoría de la onda lineal adopta la continuidad para un fluido ideal, combinada con la definición de un flujo potencial. Cualquier solución para el potencial Φ debe satisfacer la conocida ecuación de Laplace [29].

$$\frac{\delta\Phi}{\delta x^2} + \frac{\delta\Phi}{\delta z^2} = 0 \tag{13}$$

Para poder resolver la ecuación de Laplace-Eq. la propagación de las ondas se reduce a un problema bidimensional. Además, es necesario establecer varias condiciones de contorno, que son la "condición de contorno inferior", la "condición de contorno cinemática", la "condición de contorno dinámica", así como el hecho de que el lecho marino es paralelo al nivel del agua tranquila. Resolviendo para los rendimientos de potencial correspondiente a una onda propagándose en el sentido positivo del eje x [30]:

$$\Phi = -\frac{Ag}{\omega}\frac{\cosh k\,(h+z)}{\cosh k\,h}\,sin\,(kx - \omega t) \tag{14}$$

Donde:

- A = amplitud de la onda
- ω = frecuencia angular
- k = número de onda
- g = aceleración de gravedad.

El valor de la longitud de onda L se puede obtener de una aproximación de la ecuación de dispersión de Fenton y Mckee, (1990) [30]:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}\left[tanh\left(2\pi\frac{\sqrt{(h/g)}}{T}\right)^{3/2}\right]^{2/3} \tag{15}$$

Esta aproximación es exacta en profundidades reducidas e indefinidas y en profundidades intermedias da resultados con un error menor de 1.7%.

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

Tabla 3: Ecuaciones para determinar los parámetros de una ola en función de la profundidad (h o d). [28]

4.5. Movimiento de un cuerpo en el mar

Como se muestra en la Figura 18 este tipo de sistemas cuentan con seis grados de libertad de los cuales tres de ellos son movimientos traslacionales (avance-retroceso, deriva y arfada) y los tres restantes son movimientos rotacionales (balanceo, cabeceo y guiñada).

La contribución del sistema de amarre a la respuesta global es bien reconocida. Sin embargo, los tres grados de libertad (es decir, oscilación, balanceo y cabeceo) considerados dentro de la respuesta de la plataforma están dominados por la geometría del casco, mientras que los tres grados de libertad restantes (es decir, guiñada, oleaje y balanceo) son dominado por el sistema de amarre [29].

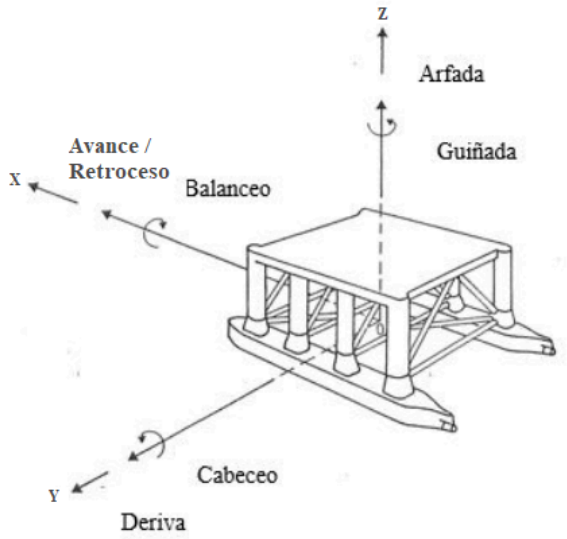


Figura 18: Grados de libertad de un sistema flotante [29]

4.6. Modelación física

La teoría de los modelos físicos se basa en que a partir de las magnitudes fundamentales -longitud (L), tiempo (t) y masa (M)-, las restantes que intervienen en la mecánica de fluidos quedan predeterminadas (magnitudes derivadas) y en que en este sistema (L-t-M) las ecuaciones hidrodinámicas del fluido son adimensionales y por lo tanto se mantienen invariantes frente a una transformación del tipo [31]:

$$L_P = \lambda L_m \; ; \; t_P = \lambda_t t_m \; ; \; M_P = \lambda_m M_m \quad [m\text{: } Modelo,\ P\text{: } Prototipo]$$

De esta manera, si se conoce el comportamiento en el modelo (sistema L_m - t_m - M_m) de un determinado fenómeno, teóricamente es posible deducir el de dicho fenómeno en el prototipo (sistema L_P - t_P - M_P), sin más que utilizar para cada magnitud el cambio de escala según los valores de los parámetros λ, λ_t y λ_m adoptados en la transformación anterior.

En dicha transformación cada ecuación representa lo que en la teoría de modelos físicos se conoce como “semejanzas modelo-prototipo”. La primera de ellas es la “semejanza geométrica”, la segunda la “semejanza cinemática” y la tercera la “dinámica” [31].

La “semejanza geométrica” determina que la relación de dimensiones homólogas modelo-prototipo es constante, denominándose a dicha relación “escala geométrica” o

simplemente "escala" (λ). En esta semejanza sólo influyen aspectos de forma, destacándose los detalles geométricos y la rugosidad superficial, los cuales representan una primera dificultad para que la semejanza modelo-prototipo sea completa [31].

La "semejanza cinemática" implica la similitud de movimientos modelo-prototipo, lo que junto a la semejanza geométrica determina que las trayectorias de partículas homólogas modelo-prototipo sean semejantes. En este caso, la relación de semejanza (λ_t) se conoce como "escala de tiempos" [31].

La "semejanza dinámica" entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente semejantes supone la constancia de la relación de masas y, por lo tanto, de fuerzas en elementos homólogos. La relación entre masas es la "escala de masas (λ_m) [31]"

Como se ha indicado, las ecuaciones de la hidrodinámica permanecen invariantes en la transformación modelo-prototipo, pero no ocurre lo mismo con el fluido, que no se puede reproducir a escala. Sus características físicas (densidad, viscosidad, etc.), a efectos del modelo, cambian respecto a las que tiene en el prototipo de acuerdo con las escalas elegidas (λ, λ_t, λ_m).

Anteriormente, ya se indicó la imposibilidad de lograr una semejanza geométrica completa por la dificultad de reproducir plenamente forma y rugosidad. Con la semejanza dinámica este problema aumenta, pues la relación entre las fuerzas que actúan en el prototipo (gravedad, viscosidad, tensión superficial, elásticas y de presión) y en el modelo no se mantiene constante, ni su importancia en ambos sistemas es la misma.

Sin embargo, en la práctica, una "semejanza dinámica parcial", basada en las fuerzas predominantes en cada caso es suficiente para que el modelo facilite la solución del problema que con el ensayo se busca, surgen así los diversos criterios de "semejanza dinámica parcial" o simplemente de "semejanza parcial" existentes [31].

En esta semejanza parcial dos de sus escalas, tiempo y masa (λ_t, λ_m), quedan prefijadas al determinar la fuerza preponderante en el fenómeno y el fluido a utilizar, por lo que la única escala a elegir es la geométrica (λ). Ello se realiza de forma que el modelo tenga las dimensiones necesarias para que los ensayos sean representativos de la realidad, habida cuenta, entre otros factores, del tamaño del prototipo, del espacio disponible, de las prestaciones de los equipos [31].

Por lo tanto, una vez elegida la escala geométrica (λ) y la semejanza parcial, utilizando el análisis dimensional, pueden determinarse las otras dos escalas (λ_t, λ_m) así como con las magnitudes derivadas.

Las semejanzas parciales, según lo indicado, se establecen analizando cuál es la fuerza dominante en el fenómeno a estudiar, a fin de su reproducción fidedigna en el

modelo. Ello determina en el resto de fuerzas desviaciones con el prototipo, aparecen así los "efectos escala", que, en cada caso, han de ser analizados para asegurar la validez de los resultados del ensayo. Para ello conviene que la escala sea la mayor posible [31].

En la mayoría de los ensayos hidráulicos las fuerzas de tensión superficial o elásticas son pequeñas, por lo que pueden obviarse sin errores significativos. En cambio, predominan las de gravedad y viscosidad, en especial las primeras, por ello la semejanza que adopta esta fuerza como principal -"semejanza de Froude"- es la de mayor aplicación en hidráulica, mostrándose en la tabla 4 las escalas de tiempo y de masa (λ_t, λ_m) y de las magnitudes derivadas en función de la escala geométrica [31].

Parámetro	Dimensión	Froude
Geometria		
Largo	[L]	λ
Área	$[L^2]$	λ^2
Volumen	$[L^3]$	λ^3
Rotación	$[L^0]$	–
Cinemática		
Tiempo	[T]	$\sqrt{\lambda}$
Velocidad	$[LT^{-1}]$	$\sqrt{\lambda}$
Aceleración	$[LT^{-2}]$	–
Volumen de flujo	$[L^3T^{-1}]$	$\lambda^{5/2}$
Dinámica		
Masa	[M]	λ^3
Fuerza	$[MLT^{-2}]$	λ^3
Presión	$[ML^{-1}T^{-2}]$	λ
Potencia	$[ML^2T^{-3}]$	$\lambda^{7/2}$

Tabla 4: Proporciones de escala de similitud. Criterio de semejanza de Froude. [30]

4.7. Armaduras

Es un montaje de elementos delgados y rectos que soportan cargas principalmente axiales (de tensión y compresión) en estos elementos. Los elementos que conforman la armadura, se unen en sus puntos extremos por medio de pasadores lisos sin fricción localizados en una placa llamada "Placa de Unión", o por medio de soldadura, remaches, tornillos, etc. para formar un armazón rígido. [32]

Como los elementos o miembros son delgados e incapaces de soportar cargas laterales, todas las cargas deben estar aplicadas en las uniones o nodos. Se dice que una armadura es rígida si está diseñada de modo que se deformará mucho bajo la acción de una carga pequeña.

Análisis de una armadura por el método de nodos

El método de los nodos nos permite determinar las fuerzas en los distintos elementos de una armadura simple. Consiste en [32]:

- Obtener las reacciones en los apoyos a partir del DCL de la armadura completa.
- Determinar las fuerzas en cada uno de los elementos haciendo el DCL de cada uno de los nodos o uniones. Se recomienda empezar analizando aquellos nodos que tengan no más de dos incógnitas.

Si la fuerza ejercida por un elemento sobre un perno está dirigida hacia el perno, dicho elemento está en compresión; si la fuerza ejercida por un elemento sobre el perno está dirigida hacia fuera de éste, dicho elemento está en tensión.

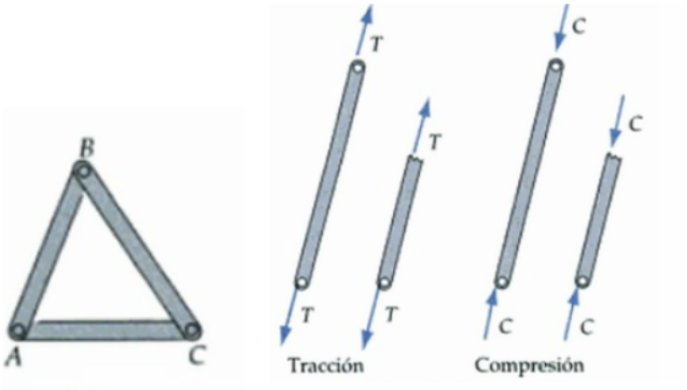


Figura 19: Ejemplo de armadura simple y el estado de la fuerza interna de la armadura [32]

4.8. Esfuerzo

4.8.1. Condiciones de inestabilidad

La normativa actual la emplea como base para el diseño "seguro" frente a pandeo de estructuras metálicas [33].

$$\sigma_t \leq \sigma_{adm,\,c} = \frac{\sigma_{cr}}{FS} \tag{16}$$

Donde:
σ_t = Esfuerzo de trabajo
$\sigma_{adm,\,c}$ = Esfuerzo admisible por compresión
σ_{cr} = Esfuerzo crítico
FS = Factor de seguridad

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2} \tag{17}$$

Donde:
E = Límite de elasticidad

λ = esbeltez

$$\lambda = \frac{\beta * L}{i} \tag{18}$$

Donde:
β = Coeficiente de pandeo
L = Largo de la viga
i = Radio de giro según el momento flector

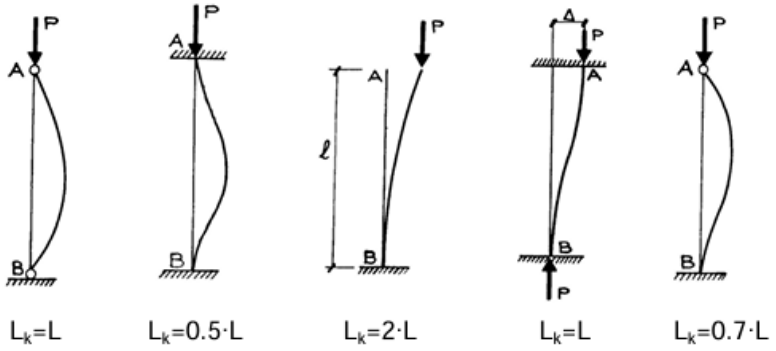


Figura 20: Longitudes de pandeo [33]

$$i = \sqrt{\frac{I_{eje}}{A}} \tag{19}$$

Donde:
I_{eje} = Segundo momento de área
A = área transversal

4.8.2. Esfuerzo admisible y de trabajo por tensión

Esfuerzo de trabajo por tensión [33]:

$$\sigma_{t,t} = \frac{T}{A} \tag{20}$$

Donde:
T = Fuerza interna
A = Área transversal

Esfuerzo admisible por tensión:

$$\sigma_{adm,\,t} = \frac{\sigma_y}{FS} \tag{21}$$

σ_y = Límite elástico del acero
FS = Factor de seguridad

4.9. Modelo de pérdida de estela

El efecto estela entre los aerogeneradores es un fenómeno no deseado que reduce la energía de producción y aumenta la carga mecánica en las turbinas aguas abajo. El modelado de estelas es importante para reducir los efectos negativos de la estela. El modelo que se utilizará en este trabajo es el de Larsen. [26]

4.9.1. Modelo de estela de Larsen

El modelo de Larsen es un modelo de pérdida por estela basado en las ecuaciones de la capa límite turbulenta de Prandtl y se presenta de la siguiente manera [26]:

$$u_2 = \frac{8u_1}{9}\left[C_F A_{rotor}\left(x + x_0\right)^{-2}\right]^{\frac{1}{3}} \left[r^{\frac{3}{2}}\left(3c_1^2 C_F A_{rotor}\left(x + x_0\right)\right)^{-\frac{1}{2}} - \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{3}{10}}\left(3c_1^2\right)^{-\frac{1}{5}}\right]^2 \tag{22}$$

$$D_\omega = 2\left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{1}{5}}\left(3c_1^2\right)^{\frac{1}{5}}\left[C_F A_{rotor}\left(x + x_0\right)\right]^{\frac{1}{3}} \tag{23}$$

Donde D_ω es el diámetro de estela, u_2 y u_1 son las velocidades medias del viento aguas abajo y aguas arriba del aerogenerador respectivamente en función de la distancia axial x (es la distancia axial aguas abajo entre los aerogeneradores) y distancia radial r, C_F es el coeficiente de fuerza de empuje del aerogenerador aguas arriba, A_{rotor} es el área del disco del rotor. La estimación de parámetros adimensionales c_1 y x_0 está dada por [26]:

$$c_1 = \left[\frac{Deff}{2}\right]^{\frac{5}{2}}\left(\frac{105}{2\pi}\right)^{-\frac{1}{2}}\left[C_F A_{rotor}\, x_0\right]^{-\frac{5}{6}} \tag{24}$$

$$x_0 = \frac{9{,}5\,D_r}{\left(\frac{D_{9,5}}{Deff}\right)^3 - 1} \tag{25}$$

donde Deff es el diámetro efectivo del rotor dado por:

$$Deff = D_r \sqrt{\frac{1+\sqrt{1-C_F}}{2\sqrt{1-CF}}} \tag{26}$$

Donde D_r es el diámetro del rotor, y $D_{9,5}$ es el diámetro de la estela a una distancia de 9.5 diámetros del rotor aguas abajo de la turbina dado por [26]:

$$D_{9,5} = \left[D_{nb} + min\left(H, D_{nb}\right)\right] \tag{27}$$

donde H es la altura del buje del aerogenerador aguas arriba y D_{nb} viene dada por:

$$D_{nb} = max\left[1{,}08D_r, 1{,}08D_r + 21{,}7D_r\left(I_t - 0{,}05\right)\right] \tag{28}$$

donde I_t es la intensidad de turbulencia total dada por:

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_\omega^2} \tag{29}$$

donde I_a [15] es la intensidad de la turbulencia atmosférica, que no es más que la desviación estándar en m/s de la velocidad horizontal dividida entre la velocidad media del viento a la altura del buje de la máquina, también en m/s, esta intensidad se supone siempre superior al 5 %, e I_ω es la turbulencia añadida por la estela (para espaciamientos superiores a 2D) dada por [26]:

$$I_a = \left(\frac{\sigma}{\bar{u}}\right) * 100\% \tag{30}$$

$$I_\omega = 0{,}29\left(\frac{x}{D_r}\right)^{-\frac{1}{3}}\sqrt{1-\sqrt{1-C_F}} \tag{31}$$

4.10. Principio de arquímedes

El principio de Arquímedes es un principio físico que afirma que: «Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desaloja». Esta fuerza recibe el nombre de empuje hidrostático o de Arquímedes, y se mide en newtons (en el SIU). El principio de Arquímedes se formula así [34]:

$$P = mg = \rho_f g \, V_S = E \tag{32}$$

Donde P es la fuerza peso del modelo, E es la fuerza de empuje ejercida por el fluido sobre el cuerpo, ρ_f es la densidad del fluido, V_S es el «volumen de fluido desplazado» por algún cuerpo sumergido parcial o totalmente en el mismo, g es la aceleración de la gravedad y m la masa.

Para que un cuerpo flote tiene que estar en equilibrio las fuerzas gravitatorias con las fuerzas de flotación y empuje.

$$P_{ap} = P_r - E \approx 0 \tag{33}$$

$$P_r = E \tag{34}$$

$$mg = \rho_f g \, V_S \tag{35}$$

$$m = \rho_f A_S L_S \tag{36}$$

Donde P_{ap} es el peso aparente que tiende a cero, P_r es el peso real, A_S es el área plana de agua, L_S es el largo del fluido desplazado.

4.11. Equilibrio de cuerpos flotantes

Un cuerpo sumergido o flotante se encuentra en equilibrio cuando el peso iguala al empuje. Este equilibrio puede ser estable, inestable o indiferente. Para ejemplificar estos equilibrios consideremos el bloque de madera de la Figura 21.a, el que inicialmente está en equilibrio. Si el bloque es desplazado horizontalmente, como en la Figura 21.b, el bloque se desplazará en la dirección de la fuerza, hasta que ella deje de actuar, sin cambiar su nivel de equilibrio en la vertical, resultando así en un equilibrio indiferente. Si el bloque es perturbado por una fuerza vertical, horizontal o giratoria como se ve en la Figura 21.c y al dejar de actuar dicha fuerza, el bloque

vuelve a su posición de equilibrio original, este equilibrio corresponde a un equilibrio estable. En cambio si después de que dicha fuerza ha dejado de actuar y el bloque se mantiene en una posición diferente o se vuelque como se ve en la Figura 21.d, adoptando una nueva posición de equilibrio, este equilibrio corresponde a un equilibrio inestable [35].

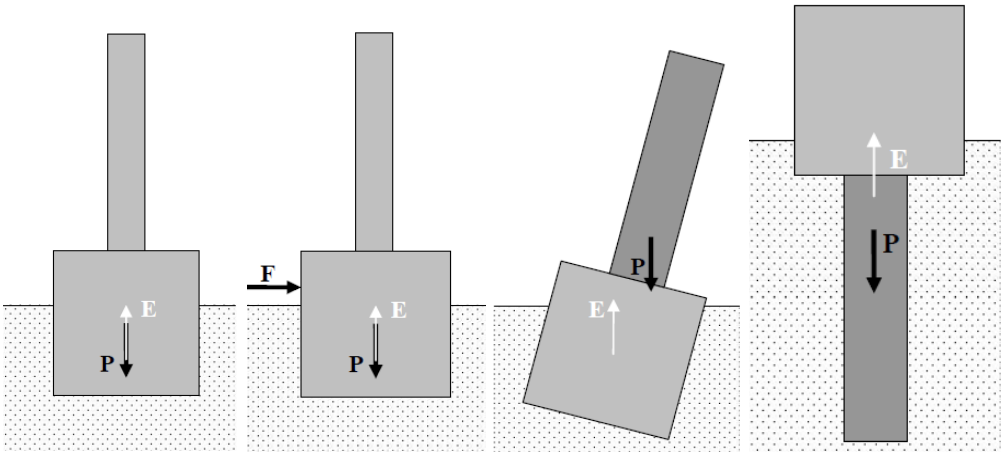


Fig. 21.a *Fig. 21.b* *Fig. 21.c* *Fig. 21.d*

4.11.1. Centro de Gravedad

El Centro de Gravedad es el punto de un cuerpo en el cual se considera ejercida la fuerza de gravedad que afecta a la masa de dicho cuerpo, es decir, donde se considera ejercido el peso. También se conoce como centro de balance o centro de equilibrio.

Una medida imprecisa del mismo puede generar momentos de fuerza no deseados convirtiendo equipos en incontrolables.

La posición del Centro de Gravedad es extremadamente importante en aeronáutica, ingeniería naval y cualquier otra aplicación en la que el equilibrio es necesario. Es por ello que la medida del centro gravedad es parte imprescindible del proceso de fabricación o modificación de muchos equipos.

La diferencia entre el centro de gravedad y el centro de masa es que el centro de gravedad es el punto de aplicación de la fuerza de gravedad, en cambio, el centro de masa es el punto de aplicación de todas las fuerzas externas.

Es decir, el centro de gravedad es el punto en el que se considera que actúa la fuerza resultante de sustituir todas las fuerzas de gravedad de un sistema, mientras que el centro de masa es el punto en el que se considera que actúa la fuerza resultante que sustituye a todas las fuerzas exteriores del sistema.

Sin embargo, cuando el campo gravitatorio es uniforme, el centro de gravedad coincide con el centro de masa. Por lo tanto, como la gravedad en la

Tierra es casi uniforme, a efectos prácticos se considera que el centro de masa y el centro de gravedad son el mismo punto. [36]

$$CDG_X = CDM_X = \frac{\Sigma Ai * Xi}{\Sigma Ai} = \frac{\Sigma mi * Xi}{\Sigma mi} \quad (37)$$

$$CDG_Y = CDM_Y = \frac{\Sigma Ai * Yi}{\Sigma Ai} = \frac{\Sigma mi * Yi}{\Sigma mi} \quad (38)$$

4.11.2. Centro de Boyantes o Carena

Es el punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de boyantes, (o empuje, o de flotación, o de carena), que actúan sobre el casco sumergido, u obra viva. Estas fuerzas son ejercidas perpendicularmente a las superficies del casco, pero se considera que las componentes horizontales se anulan entre sí, por lo que quedan sólo componentes verticales, hacia arriba.

La ubicación del centro de boyantes está en el 'centro geométrico del volumen sumergido'. Este concepto es muy importante, como veremos cuando analicemos la generación del "momento de adrizamiento". [37]

La forma de calcular este centro de boyantes es la misma forma con la que se calcula el centro de gravedad, con la única diferencia en que se utilizan solo las superficies sumergidas.

4.11.3. Estabilidad Transversal

Cuando una embarcación se halla en equilibrio (adrizado) en aguas serenas, el punto donde se origina la fuerza ascendente, conocido como centro de carena, y el punto donde actúa la fuerza descendente, denominado centro de gravedad, coinciden en una línea vertical directamente por encima de la quilla (K) el cual es el punto más bajo del cuerpo flotante, como se ilustra en la Figura 22. [38]

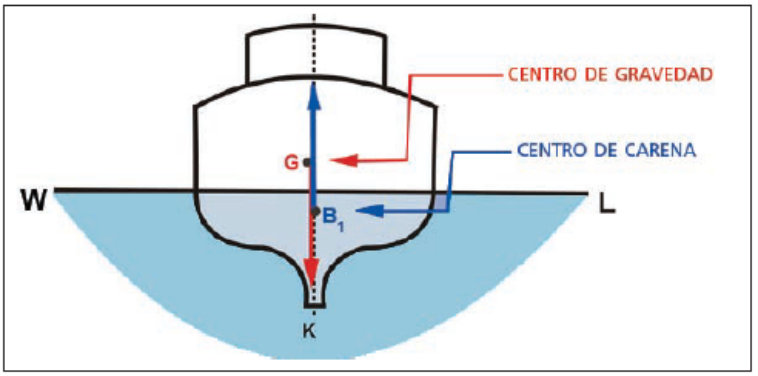


Figura 22: Buque en estabilidad Transversal

En el caso de que la embarcación se incline (escora) debido a una influencia externa, sin que se registre movimiento en la distribución interna del peso, se originará una elevación de un lado de la embarcación y una sumersión equivalente en el lado opuesto. En consecuencia, el centro de carena, que es el centro de la sección sumergida de la embarcación, cambiará su ubicación del punto B al B1, como se ve en la Figura 23. [38]

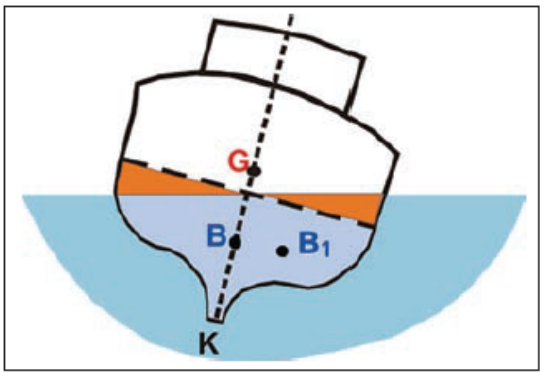


Figura 23: Buque escorado

4.11.4. Metacentro

El metacentro (M) es el punto de intersección de las líneas verticales trazadas desde el centro de carena a pequeños ángulos de escora consecutivos, y se puede equiparar a un eje central cuando el buque está inclinado a pequeños ángulos de escora. Su altura se mide desde la quilla (K) y, por consiguiente, se denomina KM. [38]

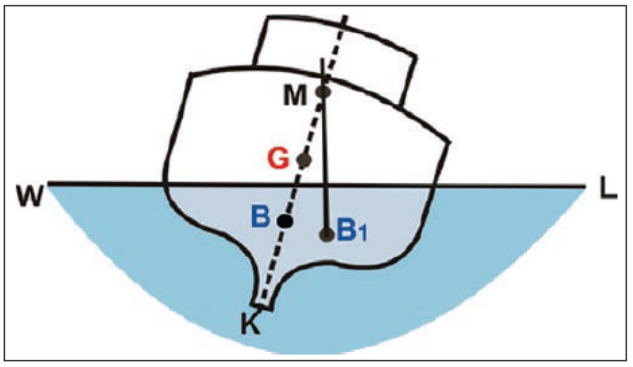


Figura 24: Buque escorado con intersección metacéntrica

4.11.5. Altura Metacéntrica

La distancia entre G y M se conoce como la altura metacéntrica (GM). Un buque estable en posición de adrizado tiene una altura metacéntrica (GM) positiva, es decir, el metacentro (M) se encuentra por encima del centro de gravedad (G). Por lo general, esta magnitud se denomina altura GM positiva o estabilidad inicial positiva, como se ve en la Figura 25.a. Cuando (G) se

encuentra por debajo de (M) se dice que éste tiene una altura (GM) negativa o una estabilidad inicial negativa, como se ve en la Figura 25.b, lo que lo pone en peligro de inclinarse y volcarse por la fuerza del viento u otro factor. Cuando la posición del centro de gravedad (G) de un buque coincide con el metacentro (M), se dice que éste se encuentra en equilibrio neutro (GM0), como se ve en la Figura 25.c y, si la embarcación se inclinara a un ángulo pequeño de escora, tenderá a mantenerse en esta posición. [38]

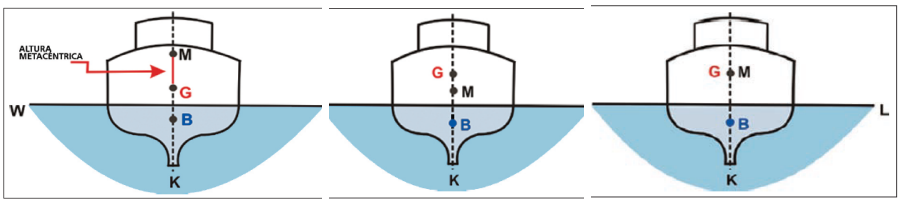


Fig. 25.a *Fig. 25.b* *Fig. 25.c*

Algunas fórmulas simples para el cálculo de la altura metacéntrica son [39]:

$$GM = BM - BG \tag{39}$$

$$BG = KG - KB \tag{40}$$

$$Sen\,\theta = \frac{Cateto\ opuesto}{Hipotenusa} = \frac{GZ}{GM}$$

$$Cos\,\theta = \frac{Cateto\ adyacente}{Hipotenusa} = \frac{MZ}{GM}$$

$$Tan\,\theta = \frac{Cateto\ opuesto}{Cateto\ Adyacente} = \frac{GZ}{MZ}$$

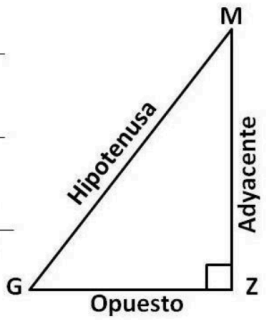


Figura 26: Pitágoras entre G, M y brazo adrizante [40]

4.11.6. Determinación de "BM"

Se observará que es importante conocer la ubicación del metacentro para la determinación del brazo adrizante y la curva de estabilidad estática, en específico la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro (GM), el cual es de interés para conocer la estabilidad de la embarcación. La variable principal para determinar este valor es la distancia del centro de boyantes hasta el metacentro (BM), el cual es obtenido por las curvas o tablas hidrostáticas de una embarcación que proporciona el proveedor, sin embargo, las plataformas al ser fabricadas desde cero es necesario utilizar los cálculos que permitirán determinar la posición de M. [37]

$$B_0M_0 = \frac{I_X}{V_S} \tag{41}$$

Donde:
I_X = es el momento de inercia del área del plano de flotación con respecto a la línea de crujía de dicho plano [cm^4]
V_S = valor del volumen sumergido de la embarcación [cm^3]

El valor del volumen sumergido es relativamente sencillo de obtener, pero el momento de inercia es ligeramente más complicado.

El momento de inercia como se indicó antes es el área con respecto a la línea de crujía, esta es la línea que va de proa a popa, si realizamos el ejemplo con un cuerpo flotante con forma de caja, tendremos que el plano de flotación es un rectángulo.
El momento de inercia de un rectángulo con respecto a uno de sus eje de simetría está dado por la expresión:

Iy-y = 1/12 (*lado paralelo al eje*) x $(lado\ perpendicular\ a\ eje)^3$

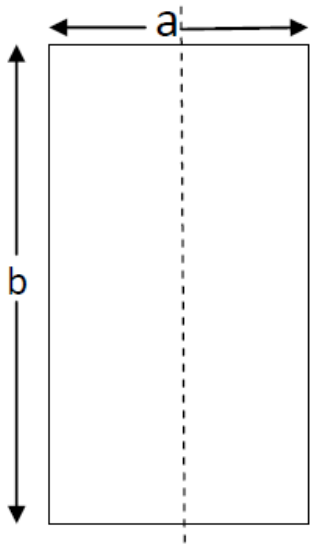


Figura 27: Vista superior de una caja flotante [37]

Qué es lo mismo que decir [37]:

$$I = \frac{1}{12} a^3 * b \tag{42}$$

y al ser un buque es igual que decir:

$$I = \frac{1}{12} manga^3 * eslora \quad (43)$$

4.11.7. Brazo adrizante (GZ)

El brazo adrizante es el parámetro más importante de la estabilidad pues representa el valor de la separación del par de fuerzas que va a adrizar al buque, en el instante que desaparezca el "**momento escorante"**.
Solamente tiene utilidad práctica el GM inicial (GM0) pues a partir de una determinada escora, el metacentro cambia drásticamente de posición y deja de ser una referencia adecuada. Podemos considerar entre 0º y 10º el rango de la estabilidad inicial, pues entre estos valores la posición del metacentro es prácticamente invariante.

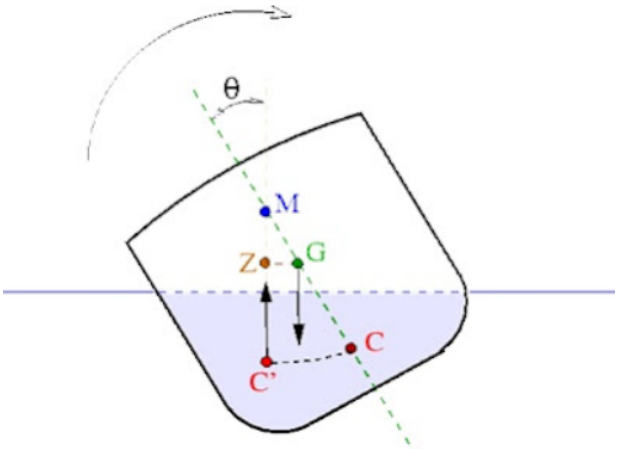


Figura 28: Brazo adrizante para pequeñas escoras [41]

En el ámbito de la estabilidad inicial, al quedarse el metacentro prácticamente en la posición de M0 se genera una relación geométrica en la que podemos sacar la siguiente razón [41]:

$$GZ = GM0 \cdot \text{sen}(\theta) \quad (44)$$

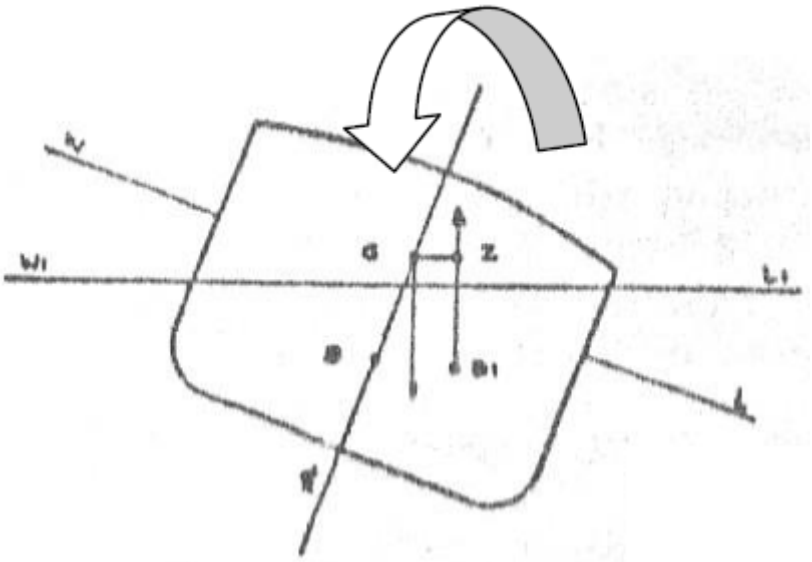


Figura 29: Buque escorado con alta estabilidad por momento de adrizamiento [37]

Observamos que a medida que B se desplace hacia su nueva ubicación B1, se **incrementará la longitud del brazo de adrizamiento GZ, y consecuentemente, aumentará el momento de adrizamiento**, **incrementando así la estabilidad de la embarcación. [37]**

Cuando evaluamos un casco de diseño muy esbelto, es decir, con una relación baja entre su ancho y su altura, observamos una reducción en el momento de adrizamiento, pudiendo llegar a un valor negativo, lo que significa un momento de "volcamiento", como se ilustra en la Figura 30 que se muestra a continuación. [37]

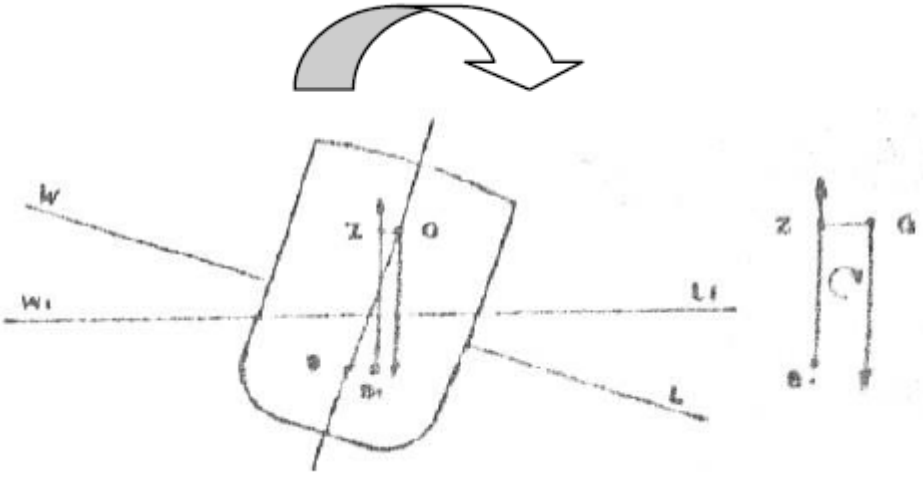


Figura 30: Buque escorado con baja estabilidad por momento de adrizamiento [37]

4.11.8. Estabilidad para grandes inclinaciones *(escora > 10º)*

Cuando la inclinación supera los 10 grados, el metacentro ya no se halla en el plano diametral (crujía).
Para estas inclinaciones la posición del metacentro varía sustancialmente, por lo que no puede ser considerado constante. A medida que este punto se modifica, GM pierde su utilidad como indicador de estabilidad. La movilidad del metacentro no debería sorprender, dado que su nombre proviene del griego y se traduce al español como "centro móvil", lo cual revela su naturaleza intrínsecamente cambiante. Esto se debe a que el metacentro es generado por el centro de flotación, el cual se modifica con cada grado de inclinación de la nave. [41]

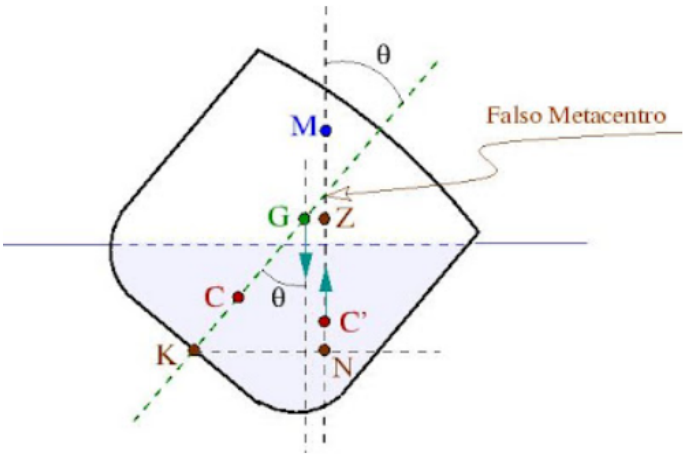


Figura 31: Ejemplo de metacentro móvil [41]

En general cuando éste es inclinado un cierto ángulo θ que no es pequeño, la intercepción de las líneas de aguas correspondientes a la parte que emerge y a la parte que inmerge, no se dará en la línea de centro sino en un punto arbitrario *s*. [42]

GZ entonces se calcula mediante la siguiente fórmula que puede entenderse gracias a la Figura 32 [42]:

$$GZ = B_0R - B_0G\,sen(\theta) \qquad (45)$$

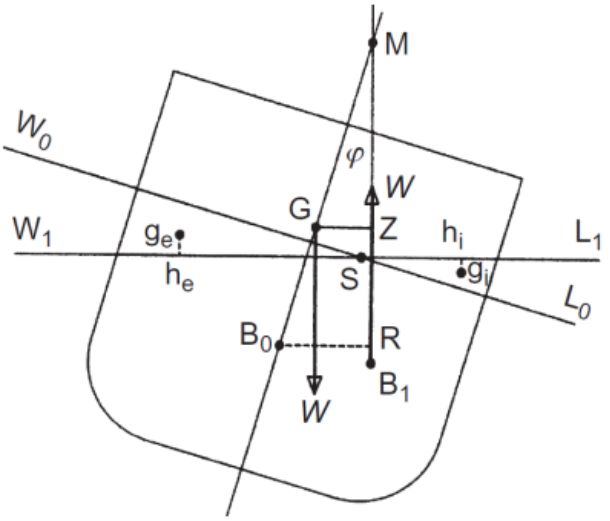


Figura 32: Brazo adrizante GZ para grandes escoras [42]

En la imagen anterior el volumen representado por *W*0*SW*1 es el que emerge y es igual al volumen representado por *L*0*SL*1 que es el que se inmerge. Suponiendo que dichos volúmenes se denotan por *v*, el cambio horizontal del centro de flotación estaría dado por [42]:

$$B_0R = \frac{(v)(h_e h_i)}{\nabla} \tag{46}$$

Donde:
B_0R = La distancia horizontal entre el punto de aplicación original de la fuerza de flotabilidad y el punto R que se encuentra en la nueva línea de acción de la fuerza de flotabilidad.
$h_e h_i$ = distancia horizontal del centroide del volumen que emerge al volumen que inmerge
∇ = volumen desplazado por el buque.

Determinar la ubicación de *S* para identificar la posición de los centros del volumen de agua que se eleva y se sumerge, junto con el valor correspondiente de dicho volumen y el consiguiente valor de B_0R, no resulta sencillo. Un enfoque utilizado para llevar a cabo esta tarea se fundamenta por la Figura 33. [42]

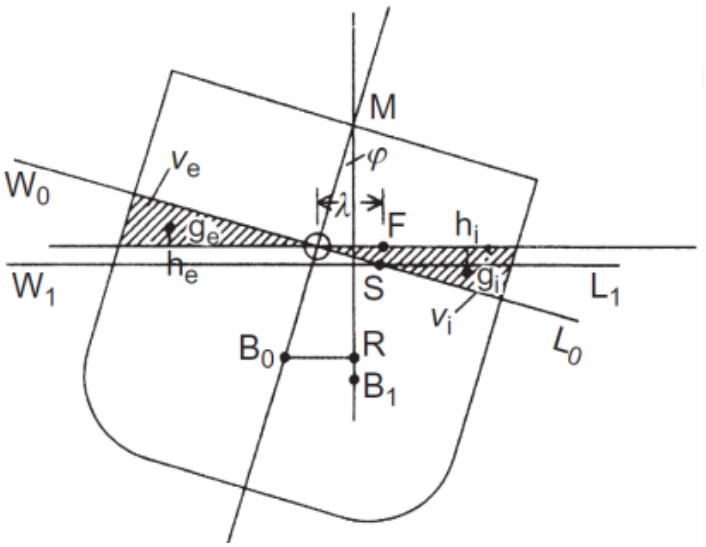


Figura 33: Brazo BR para obtener brazo adrizante de grandes escoras [42]

Con lo que se obtiene:

$$B_0R = \frac{v_e(h_eO + \lambda) + v_i(h_iO - \lambda)}{\nabla} \quad (47)$$

$$B_0R = \frac{v_e(h_eO) + v_i(h_iO) - \lambda(v_i - v_e)}{\nabla} \quad (48)$$

Donde:
El subíndice *e* se refiere al volumen emergido, y el subíndice *i* al volumen inmergido.
λ = Es la distancia horizontal de la línea de centro (punto *O*) al punto *F* en que originalmente se encontraba *S*.

Es muy importante tener en consideración hacia qué lado está orientado S y cual es el lado que emerge y el lado que inmerge, dependiendo de esto, la fórmula puede variar.

4.11.9. Incidencia de la Posición de "G" en la Estabilidad

De manera de resumen, para evidenciar la importancia de la ubicación del centro de gravedad, a continuación se presenta un ejemplo.
Supongamos que la embarcación representada en la Figura 34 tiene su centro de flotación en el punto B. Contemplaremos tres distintas ubicaciones del centro de gravedad G. En su posición más alta, generará un brazo de adrizamiento de color rojo. En la posición intermedia, dará lugar a un brazo de adrizamiento de color verde, y en su posición más baja, producirá un brazo de adrizamiento de color azul. Es claro que a medida que la posición del centro de gravedad descienda, aumentará la longitud del brazo de

adrizamiento, y, en consecuencia, el "momento de adrizamiento" será mayor (y con ello, la estabilidad). [37]

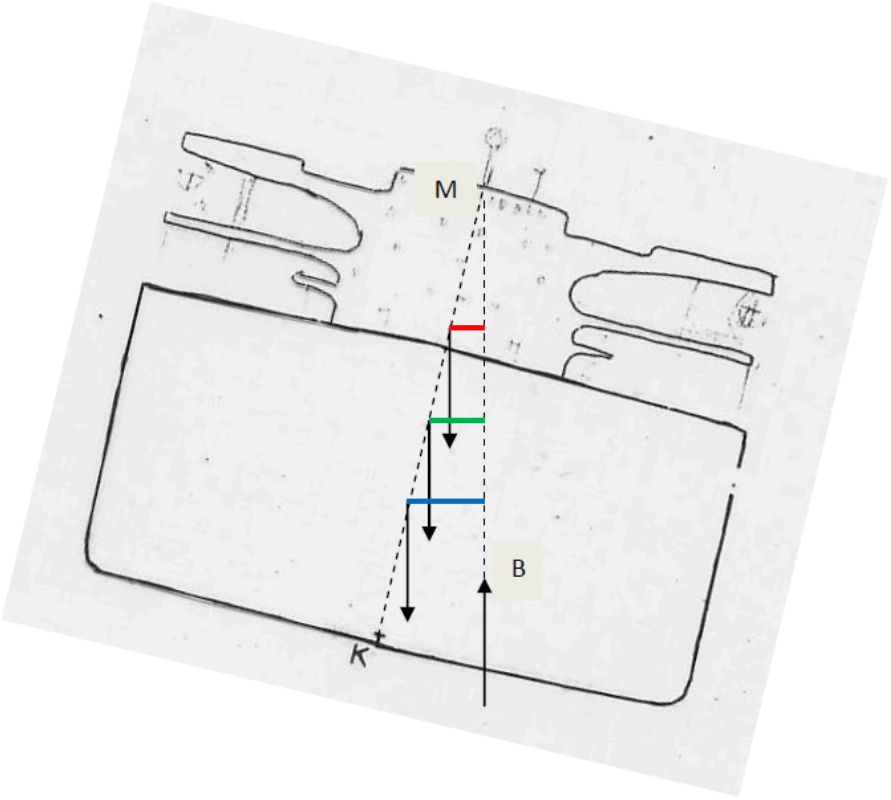


Figura 34: Buque con 3 brazos de adrizamiento por posición de G [37]

En teoría, si el centro de gravedad G coincidiera con el metacentro M, no existiría brazo de adrizamiento, lo que llevaría a una estabilidad nula. No obstante, más adelante veremos que, debido al movimiento de M, se generarán brazos de adrizamiento positivos. [37]

4.11.10. Curva de Estabilidad Estática

Se ha resaltado la relevancia de los conceptos de "brazo de adrizamiento" y "momento de adrizamiento" como indicadores de la estabilidad de la embarcación. No obstante, es imperativo cuantificar de manera objetiva el nivel de estabilidad de la nave y determinar si esta es grande, mediana, pequeña, suficiente o insuficiente. Para alcanzar este objetivo, se requiere el análisis de la **Curva de Estabilidad Estática Final**, que representa simbólicamente una fotografía de la estabilidad. [37]

A través del examen de esta curva, es posible concluir si la embarcación cuenta con la estabilidad necesaria para llevar a cabo su navegación, o si se deben efectuar ajustes para garantizar la seguridad de la tripulación, la carga y la embarcación en sí.

Es esencial destacar que la magnitud de la estabilidad debe mantenerse en límites específicos. En caso de que sea escasa, la embarcación podría carecer de seguridad, mientras que si es excesiva, podría ocasionar daños en la estructura de la nave, deficiencias en maquinaria y equipos, perjuicios en la carga (como el colapso de contenedores) y causar incomodidades o mareos a la tripulación y/o los pasajeros. [37]

Es evidente que a medida que aumenta la escora, también se incrementa la amplitud del brazo de adrizamiento.

Para una determinada condición de carga y su correspondiente desplazamiento, la magnitud del brazo de adrizamiento GZ dependerá de la posición vertical del centro de gravedad al metacentro, GM, y del ángulo de escora. La solución a esta cuestión se obtendrá mediante la creación de un gráfico que indique el valor de GZ para la altura metacéntrica sobre el centro de gravedad (GM) y para los diversos ángulos de escora que la embarcación pueda experimentar. Este gráfico es conocido como la **Curva de Estabilidad Estática**. [37]

Ha de recordarse que para ángulos bastante pequeños $GZ = GM \sin\theta \cong GM\theta$, y consecuentemente [42]:

$$dGZ\ \theta \rightarrow 0 = d\ GM\theta = GMd\theta \tag{49}$$

$$\frac{dGZ}{d\theta}\ \theta \rightarrow 0 = \mathrm{GM} \tag{50}$$

Por lo tanto la pendiente del gráfico que se expresa en el Gráfico 4 en $\theta = 0$ es igual a la altura metacéntrica. En el siguiente gráfico puede apreciarse mejor. Se suele marcar una ordenada en $\theta = 1\ rad = 57.3°$, para determinar la pendiente en el origen, la cuál como se dijo será *GM*. [42]

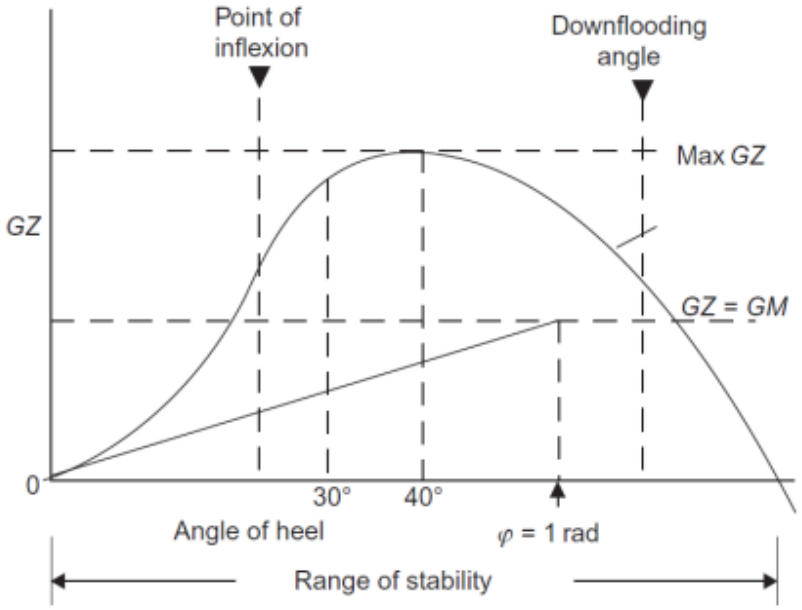


Gráfico 4: Gráfica Genérica de curva de estabilidad [42]

5. Objetivo general

- Diseñar, prototipar y probar experimentalmente dos plataformas semisumergibles con anclaje articulado para soportar múltiples turbinas eólicas flotantes en oleaje de mar profundo.

5.1. Objetivo Específicos

- Investigar el estado del arte y marco teórico relacionado con la Energía eólica explotada con aerogeneradores marinos flotantes.
- Proponer diseños de macroestructuras flotantes y estimar preliminarmente su estabilidad al interactuar con oleaje regular de mar profundo.
- Prototipar con método de fabricación aditiva las plataformas flotantes semisumergibles de varias turbinas eólicas .
- Probar experimentalmente las plataformas semisumergibles con múltiples turbinas en un canal hidráulico con oleajes regulares de aguas someras.
- Aplicar análisis de sensibilidad multifactorial para discernir entre las plataformas más estables entre sí y entre una convencional.

6. Metodología

6.1. Descripción general

Parte de la metodología es influenciada por los documentos referenciados de “Design and Stability Analysis of an Offshore Floating Multi-Turbine Platform” [26] y “Review on Dynamics of Offshore Floating Wind Turbine Platforms” [14] para el estudio de distancia por estela y estudio hidrodinámico, y el resto se utilizará una metodología experimental a desarrollar en torno a la evaluación de un modelo a

escala de la estabilidad de una plataforma semisumergible multi-turbina frente a oleaje característico de la localidad de Punta Galera, simulado en el canal de olas artificial de la Universidad de Valparaíso.

Se trabajará con 2 modelos de plataforma, la Plataforma Pentagonal y la Plataforma Triangular, con un factor de escala de 1:50 basado en el principio de similitud de Froude explicado anteriormente. El modelo Pentagonal se refiere a su geometría, la cual estará en dirección de frente al viento sus dos turbinas al igual que la plataforma triangular. Para las pruebas se le realizara una combinación alterna de 3 alturas significativas de oleaje y 3 periodos de oleaje (H1, H2, H3, T1, T2, T3), mientras que al mismo tiempo se evaluará la incidencia de estos estados de mar junto con la altura del calado con la que las plataformas estarán sumergidas. Teniendo en cuenta que los cilindros de ambas plataformas son iguales, el calado de ambas también serán iguales en una sumersión del 50% y 65% respectivamente.

Antes de probar los modelos, primero se realizará la **Prueba de Plataforma Seca (T01)**, con el fin de verificar o reajustar la fabricación de la plataforma. Posteriormente se realizará la **Prueba de Plataforma Húmeda (T02)**, cuya finalidad se enfocará en la estabilidad estática, flotabilidad estática y verificación final de la integridad de las plataformas. Finalmente se realizará la **Prueba de Estabilidad Residual (T03)**, donde se analizará cada modelo de plataforma enfrentándose a diferentes condiciones de oleaje regular en variación de altura significativa y periodo de oscilación, con el fin de evaluar las capacidades de las plataformas para recuperarse después de ser sometidas a fuerzas externas, como olas fuertes.

Los análisis de las mediciones que se realizarán en el canal de olas de la Universidad de Valparaíso se harán a través del software tracker en el que se analizará el resultado del movimiento vertical y horizontal de las plataformas de modo que se pueda evaluar sus estabilidades y compararlas entre sí.

6.2. Calado

Los valores de calado que se ocupan se representan en porcentaje, porque se transmite la proporción del calado de otras plataformas ya creadas.
El 65% es utilizado porque se toma como referencia a la Plataforma semisumergible DeepCwind [43], que ha sido ampliamente estudiada a través de modelado experimental y numérico y se considera como una plataforma flotante de referencia para albergar turbinas de viento. Esta plataforma tiene un calado que ronda el 65% en comparación a sus cilindros flotantes, por lo que se usará la misma proporción en el análisis de las plataformas evaluadas. El 50% es utilizado porque aunque sea menor de lo que se explicó anteriormente, no solo nos dará una forma de comparación con la sumersión anterior, sino que como se verá más adelante, una de las plataformas llegará muy cerca del 50% de calado sin peso extra, por esta razón se tomó la decisión de dejar a ambas plataformas en este porcentaje más manejable para la medición de comparación.

6.3. Presentación de las variables de los casos de estudio

La siguiente información es extraída de una Data llamada Anexo 10 [44] que fue utilizado en un proyecto de CORFO sobre energía undimotriz [45], este anexo recaba información de oleaje de diferentes sectores de Chile donde se utilizaron distintas formas de medición con boyas con la finalidad de realizar proyectos de recursos energéticos asociados al oleaje. la realización de este trabajo, se presentan a continuación:

6.3.1. Ubicación

En la figura 35 se muestra el sector Punta Galera en la Región de Los Ríos. El acceso al sector es preferentemente desde Valdivia y Corral, para luego dirigirse al sur siguiendo la Ruta T-47 hasta el poblado de Chaihuín, continuando luego hacia el sur por el camino a Hueillaco. [44]

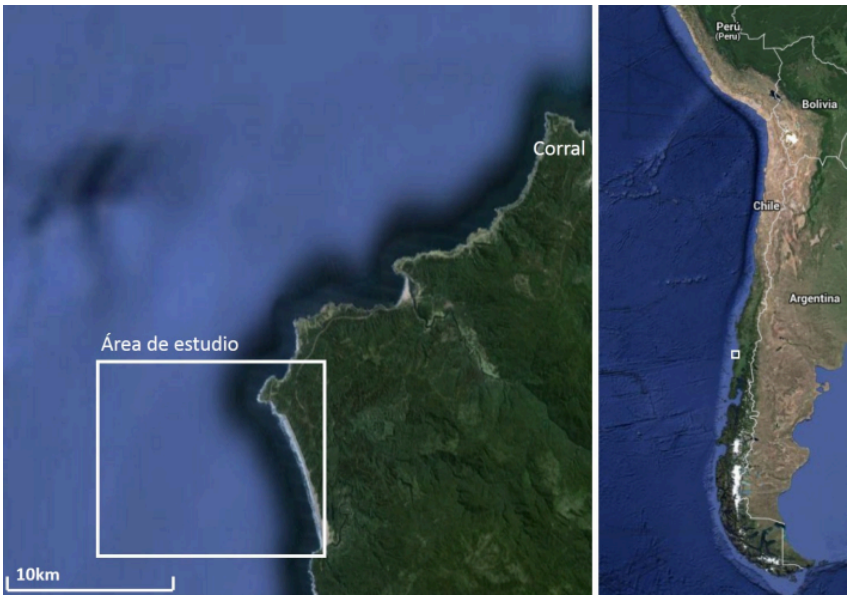


Figura 35: Ubicación general del sector

Como se observa en la Figura 36, el fondo marino frente a la playa presenta isobatas sinuosas, lo que se puede deber al uso de dos distintas fuentes de información, siendo la porción norte la de más veracidad (levantamiento específico). Los 20 [m] de profundidad se encuentran a 1.200 [m] de la playa (esta es la profundidad que se utilizará para las pruebas). [44]

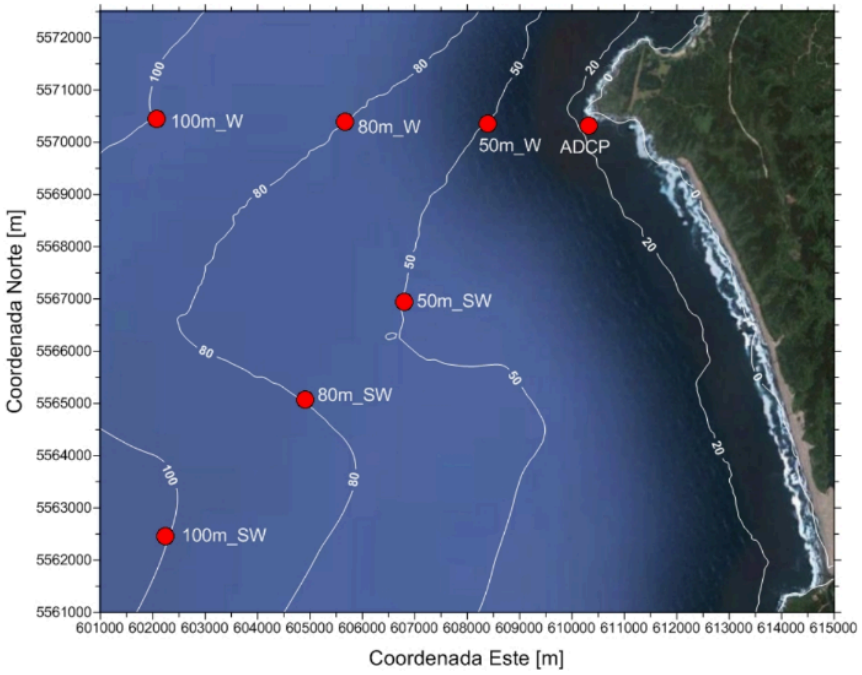


Figura 36: Batimetría de Sector Punta Galera. Sistema de coordenadas UTM, datum WGS 854, zona -18H.

6.3.2. Data marítima

Las condiciones de oleaje local fueron obtenidas mediante el uso de un ADCP fondeado a 140 [m] al SW de Punta Galera y 450 [m] al S del Faro Punta Galera, a una profundidad aproximada de 20 [m]. Los 20 [m] de profundidad se encuentran a 1.200 [m] de la playa (y algo menos en la misma Punta Galera). [44]

La base de funciones de transferencia es obtenida mediante el software SWAN, que presenta resultados levemente mejores que las otras técnicas.

Por otra parte, se obtuvo un valor de oleaje para aguas profundas desde el Atlas de oleaje de Chile de la Universidad de Valparaíso. Este dato se utilizará también en la medición con el fin de ampliar la incertidumbre a las plataformas. El Nodo más cercano a Punta Galera en el que se extrajo esta información marítima es el de Puerto Saavedra

Estadística Comparada de la Potencia en Punto ADCP

A continuación se presenta la descripción estadística de la potencia del oleaje para el punto denominado ADCP, de acuerdo con todas las técnicas de modelado utilizadas en el estudio, indicando los valores para los percentiles 10 %, 50 %. [44]

Parámetro Estadístico	Estadígrafo	SWAN
$H_{m0}\ [m]$	P 10%	3,9
	P 50%	2,5
$T_e\ [s]$	P 10%	12,7
	P 50%	10,9

Tabla 5: Potencia del oleaje en punto ADCP [44]

A continuación se presenta la descripción estadística del oleaje en aguas profundas para clima extremo en el Puerto Saavedra, donde se utiliza la altura y periodo de un periodo de retorno de 5 años. [46]

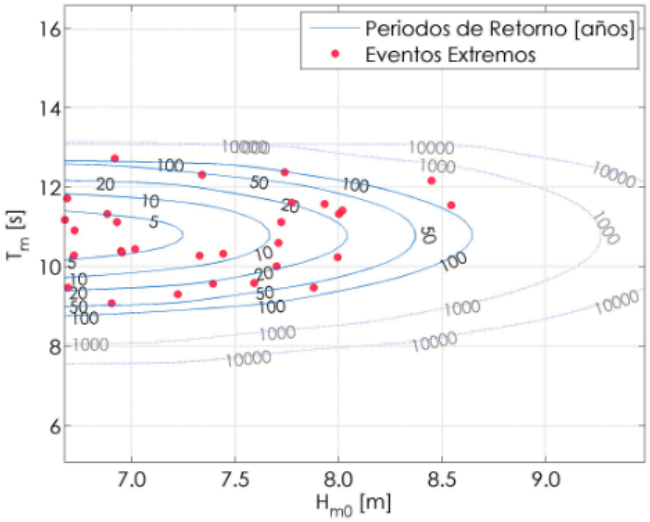


Gráfico 5: Periodo de Retorno (clima extremo) [46]

De esta información se puede extraer que para altura significativa se utilizará el valor de 7,2 [m] y un periodo de 10 [s].

6.3.3. Data eólica

Para hacer un análisis correcto sobre la fuerza que produce la velocidad del viento, debemos usar la ubicación geográfica con la que podamos tener noción de la variación de la velocidad del viento en alta mar. A continuación se presenta un gráfico de la velocidad del viento vs el tiempo que se estuvo realizando las mediciones que son desde 1980 hasta el 2017 en el explorador eólico del ministerio de energía. [47]

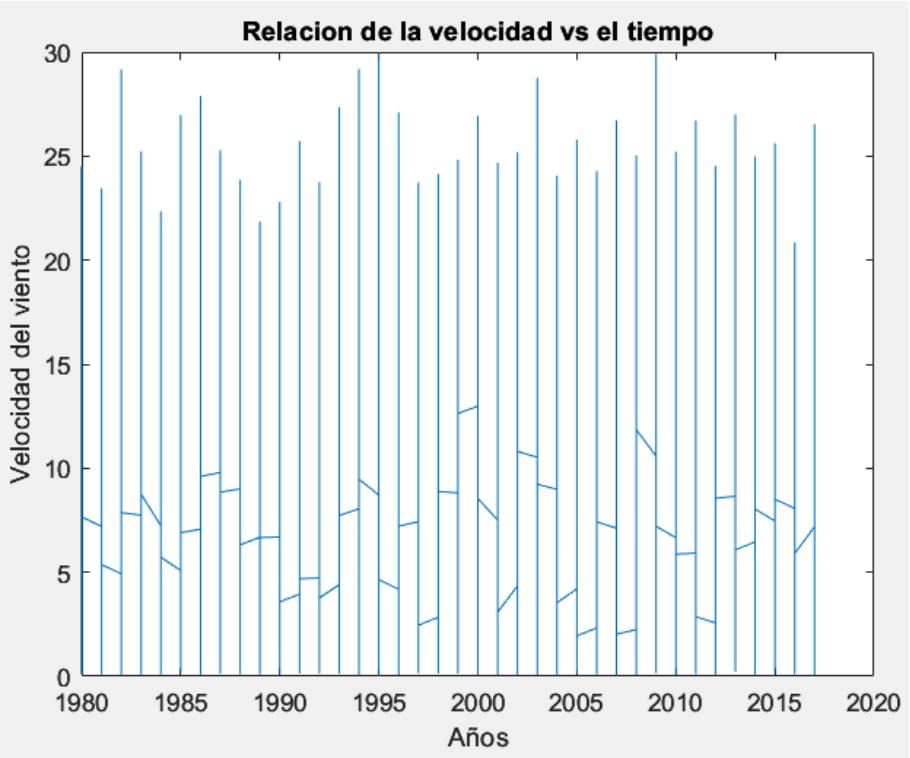


Gráfico 6: velocidad del viento vs tiempo

Las líneas entre medio se desarrollan por la mayor cantidad de valores que hay entre esos intervalos.
De estos datos se extrae que la velocidad de viento que más se repite es 6,4 [m/s], la media de la velocidad es de 7,45 [m/s], la velocidad a la mitad de estos datos es 7,06 [m/s] y la desviación estándar es 3,63.

6.4. Casos de estudio

Para efectos de condensación de datos, a continuación se presentan dos tablas con los valores de amplitud de oleaje y periodo de oleaje que serán empleados para cada caso a simular. Los datos siguientes son las alturas significativas y periodos expuestos anteriormente, después de ser escalados. En cada una de estas tablas se emplean las geometrías respectivas de las bases de las turbinas.

Plataforma Pentagonal y Plataforma Triangular		Periodos		
		1,41 [s]	1,56 [s]	1,79 [s]
Alturas	5 [cm]	H1T1	H1T2	H1T3
	7,8 [cm]	H2T1	H2T2	H2T3
	14,4 [cm]	H3T1	H3T2	H3T3

Tabla 6: Diferentes casos de estados de oleaje para 50% y 65% de calado

6.5. Datos de la Turbina eólica

Fabricante : ACSA Aerogeneradores Canarios, S.A. [48]
Turbina eólica : LMW-10.000
Potencia : 10 [kW]
Diámetro de rotor : 7 [m]
Altura de la torre: 15 [m]

6.6. Prototipos

A continuación se muestran los prototipos de las plataformas multi-turbina a través del programa inventor. Las puntas de las plataformas están separadas a tal distancia que la estela de las turbinas no interfieren con el funcionamiento entre ellas según se demuestra en el gráfico de Larsen en el Gráfico 7.

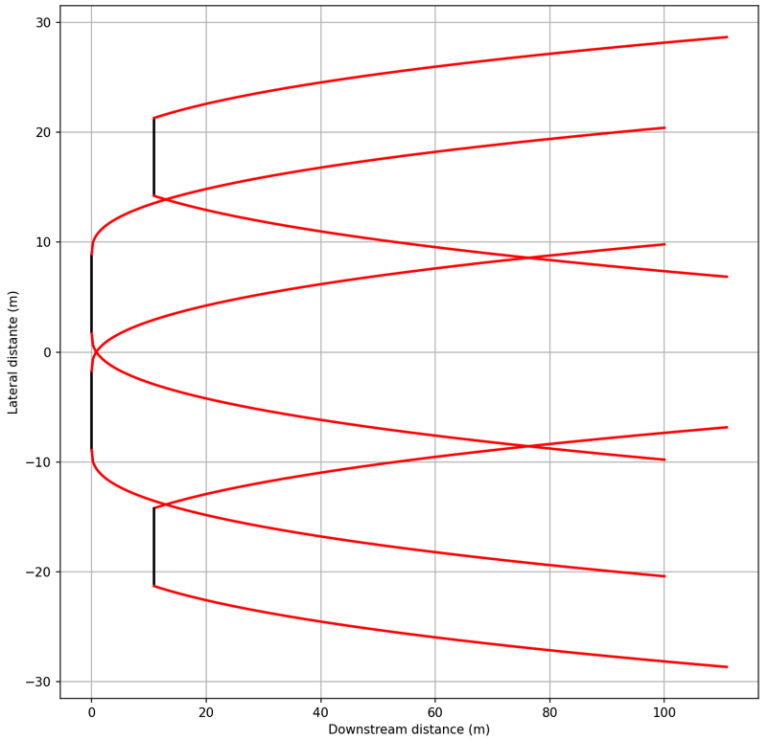


Gráfico 7: Gráfico de Larsen

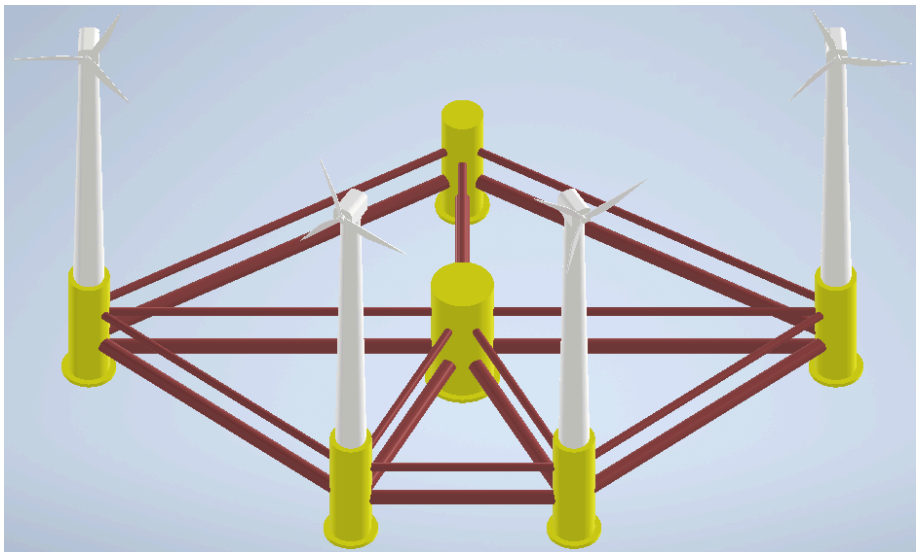


Figura 37: Diseño del nuevo prototipo de plataforma multi-turbina pentagonal.

La distancia central desde un álabe del extremo izquierdo hasta el fin del álabe del extremo derecho es de 42,5 [m] y desde el extremo de la quilla posterior hasta el extremo de la quilla frontal la distancia es de 24,37 [m].
Lamentablemente, ya que se redujo las dimensiones de la plataforma en comparación del prototipo original (que se explicará más adelante), como consecuencia, la potencia de la turbina se redujo considerablemente y el tamaño de la plataforma ya no es viable para implantar un centro de producción de hidrógeno verde.

La segunda plataforma utiliza las mismas dimensiones de cilindros y turbinas que la plataforma anterior con tal de que las mediciones solo tomen como variable la geometría y tamaño de la plataforma.

Las puntas de las plataformas están separadas a tal distancia que la estela de las turbinas no interfieren con el funcionamiento entre ellas según se demuestra en el gráfico de Larsen en el Gráfico 8.

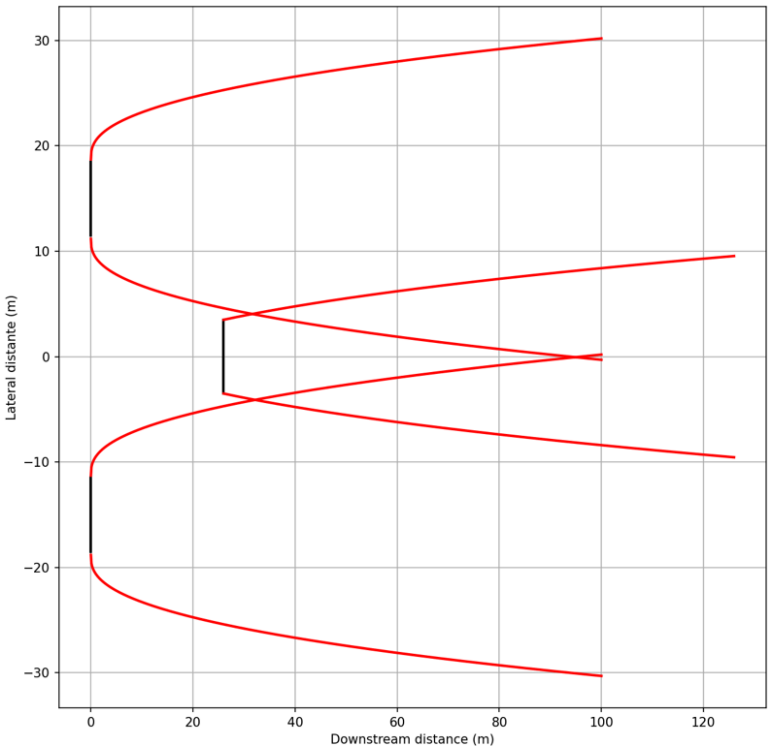


Gráfico 8: Gráfico de Larsen



Figura 38: Diseño del nuevo prototipo de plataforma multi-turbina triangular

Desde la punta del álabe izquierdo hasta la punta del álabe derecho del otro extremo de la plataforma hay una distancia de 37 [m], mientras que desde el extremo de la quilla posterior hasta el extremo de la quilla frontal la distancia es de 32,22 [m].

Las dimensiones de estas plataformas son adecuadas para las dimensiones del canal de olas con el escalamiento utilizado 1:50.

6.7. Modelos

A continuación se presentan los diseños de los modelos de las plataformas semi-sumergibles multi-turbinas. Después de realizar el escalamiento y después de algunos errores en su diseño (que serán mencionados posteriormente), se diseñó un modelo que es de fácil desarme y firme agarre entre sus piezas.

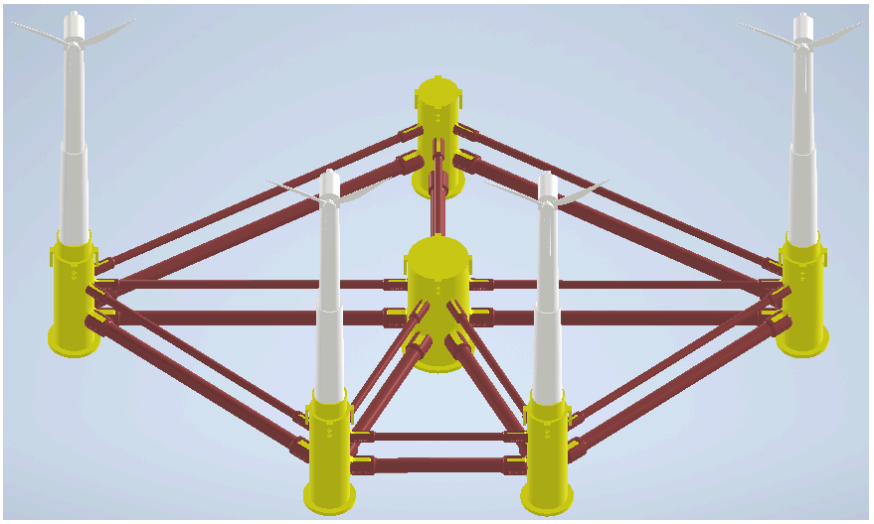


Figura 39: Nuevo Modelo de Plataforma Semi-sumergible Pentagonal Multi-turbina (P4)

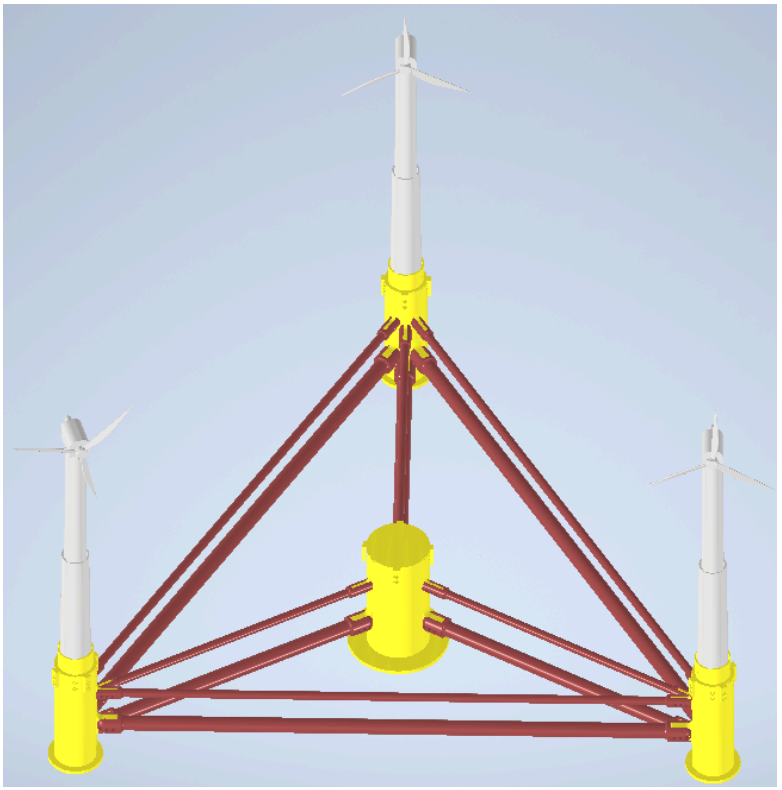


Figura 40: Nuevo Modelo de Plataforma Semi-sumergible Triangular Multi-turbina (T3)

Los nuevos diseños si bien pierden la igualdad visual con el prototipo, generan seguridad en las conexiones con los cilindros como se muestra en la Figura 41 y deja el espacio dentro del cilindro libre como se muestra en la Figura 42, de tal forma que el volumen relativo es superior al volumen real.

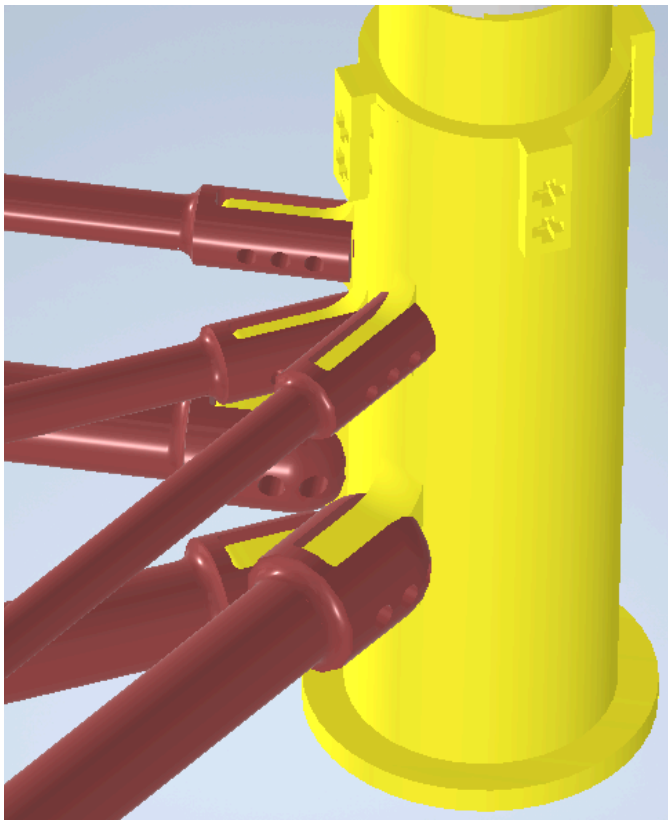


Figura 41: Conexiones entre cilindros y pontones

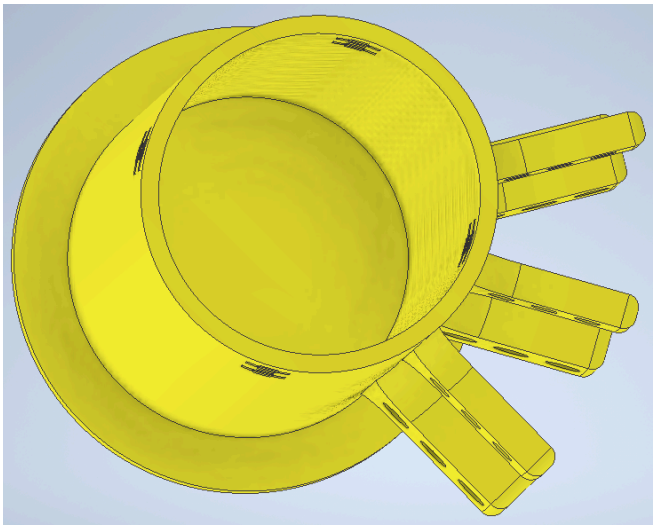


Figura 42: Espacio dentro del cilindro

6.8. Propiedades de masa

6.8.1. Modelo P4

La primera variable necesaria antes de avanzar en las pruebas posteriores es el valor del centro de gravedad, el cual es solo en el eje Z o eje vertical, que también puede denominarse como la distancia entre la quilla y el centro de gravedad (KG).

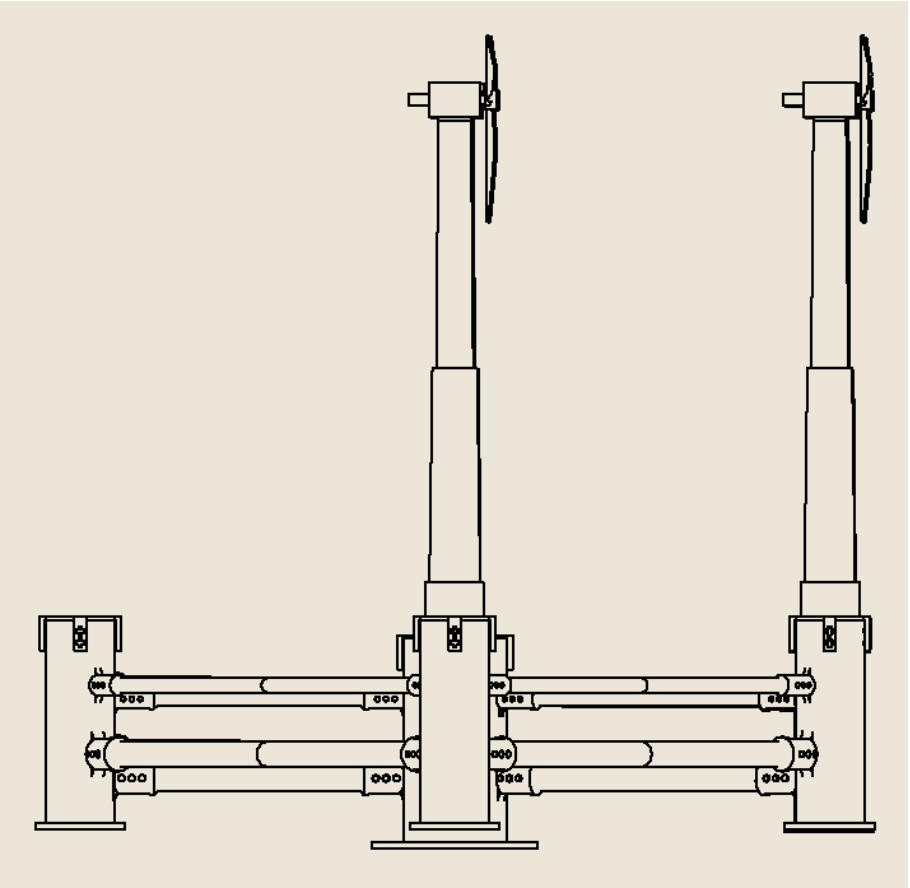


Figura 43: Vista lateral de la plataforma

Esta será la vista de operación, en la cual se evaluará la estabilidad de la plataforma, para obtener el KG general de la plataforma, primero se tiene que obtener el KG de diferentes secciones que se puedan evaluar geométricamente más fácilmente. Se puede ejemplificar una de estas secciones al mostrar la figura 44, donde se separó el ensamble a solo la turbina y el cilindro, de la misma manera se separa el cilindro posterior, los pontones superiores, los pontones inferiores, y la turbina del medio con su cilindro junto con el cilindro central.

La fórmula se encuentra en la sección 4.11.1, la número 38, donde se optó por usar la fórmula que depende del área del plano de operación. Después de usar la ecuación del centro de gravedad en cada sección, se vuelve utilizar solo que con toda la plataforma para obtener el KG general.

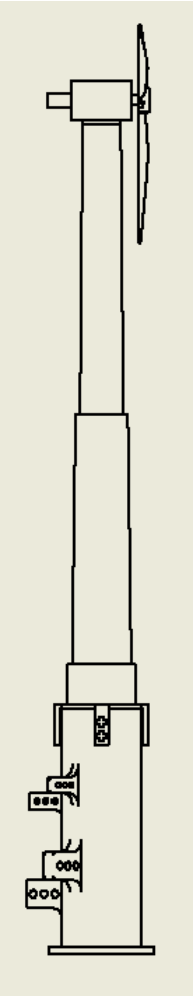


Figura 44: Sección de turbina con cilindro

La segunda variable necesaria para avanzar es el centro de boyantes, y este se obtiene de la misma manera con la que se realizó el cálculo anterior, pero con la diferencia que se utiliza el área del volumen sumergido en vez de la plataforma completa. Las siguientes figuras muestran cuales son esas áreas a medir.

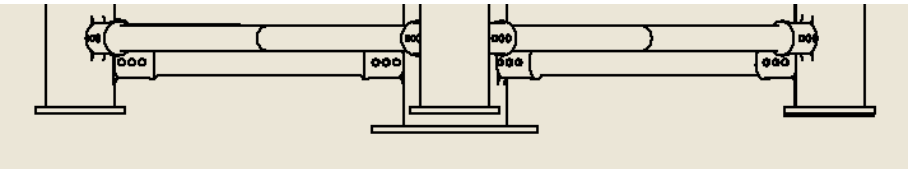


Figura 45: Área sumergida al 50% de calado

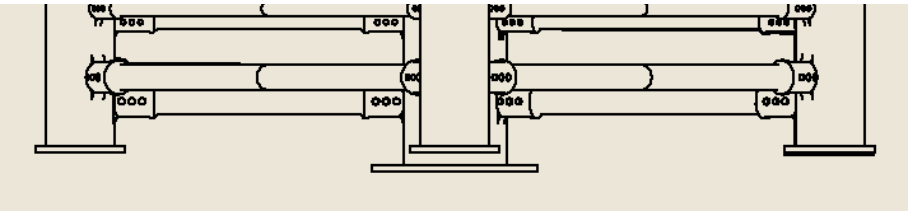


Figura 46: Área sumergida al 65% de calado

Teniendo en cuenta los calados y partes de las secciones que están bajo la superficie, también se obtiene el volumen sumergido de ambos calados para el cálculo posterior de lo que es la distancia del centro de boyantes al metacentro (BM).

El BM es la tercera variable importante que se debe obtener, y cómo se retrata en la sección 4.11.6 se necesita el volumen sumergido y el momento de inercia. Este último se puede adquirir solo después de calcular el centro de gravedad del plano de flotación de la plataforma.

Ya que se tiene el centro de gravedad, se procede a calcular el momento de inercia con respecto al eje x, esto se debe a que ese es el eje de oscilación.

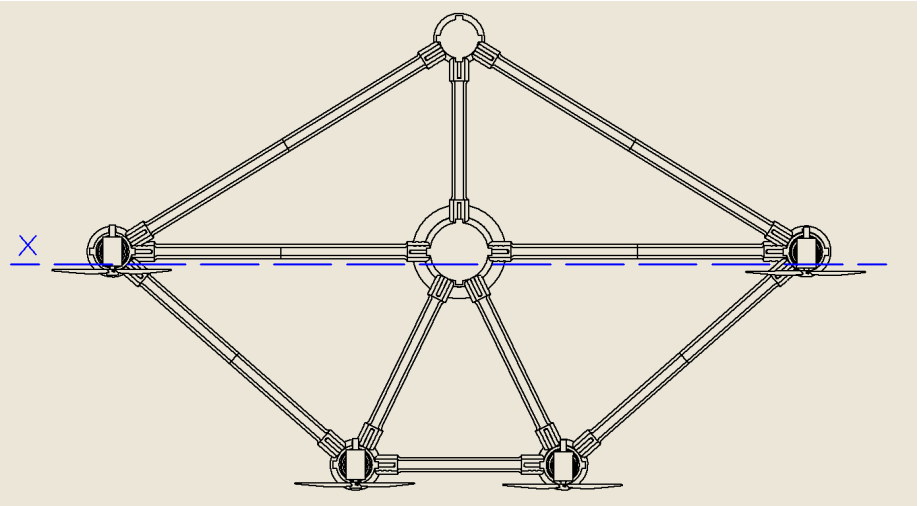


Figura 47: Plano de flotación de plataforma con centro de gravedad respecto al eje x

Para el cálculo del momento de inercia de la plataforma completa, primero se debe sacar el momento de inercia de diferentes secciones de la plataforma que se puedan separar en formas de figuras geométricas, como en rectángulos los pontones, círculos los cilindros y triángulos los pontones inclinados. Todo esto se debe hacer para luego ocupar el Teorema de Steiner cuyo cálculo es el siguiente:

$$I_x = I_{0x} + A * d_y^2 \tag{51}$$

$$I_y = I_{0y} + A * d_x^2 \tag{52}$$

Donde:

I = Momento de inercia de la figura con respecto a la plataforma

I_0 = momento de inercia conocida de figuras geométricas simples, como triángulos, círculos, cuadrados, etc.

A = Área de cada figura

d = distancia del centro de gravedad de cada figura hasta el centro de gravedad de la plataforma.

6.8.2. Modelo T3

A esta plataforma también se le realizan los mismos tratamientos con las mismas ecuaciones, para descubrir las variables necesarias que servirán más adelante.

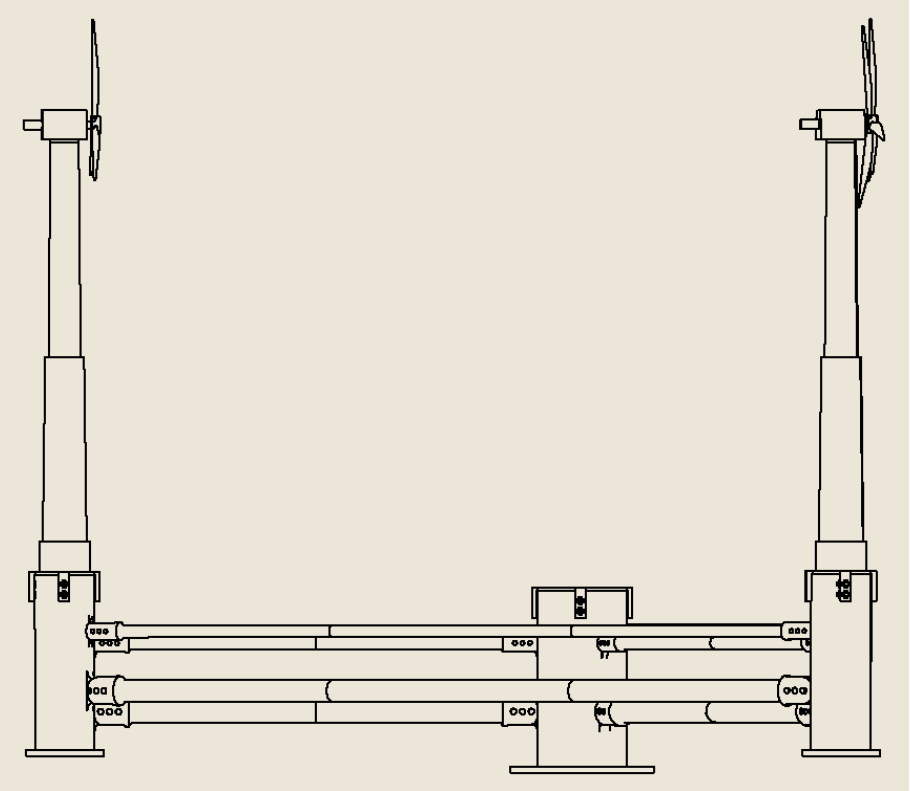


Figura 48: Vista lateral de la plataforma

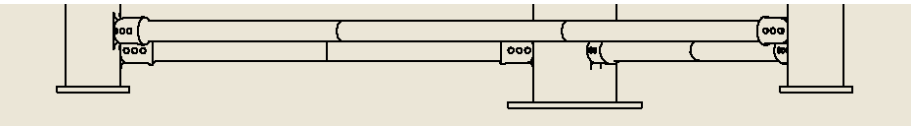


Figura 49: Área sumergida al 50% de calado

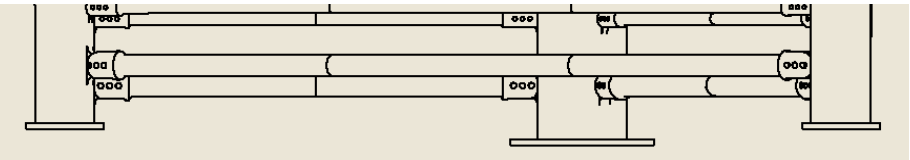


Figura 50: Área sumergida al 65% de calado

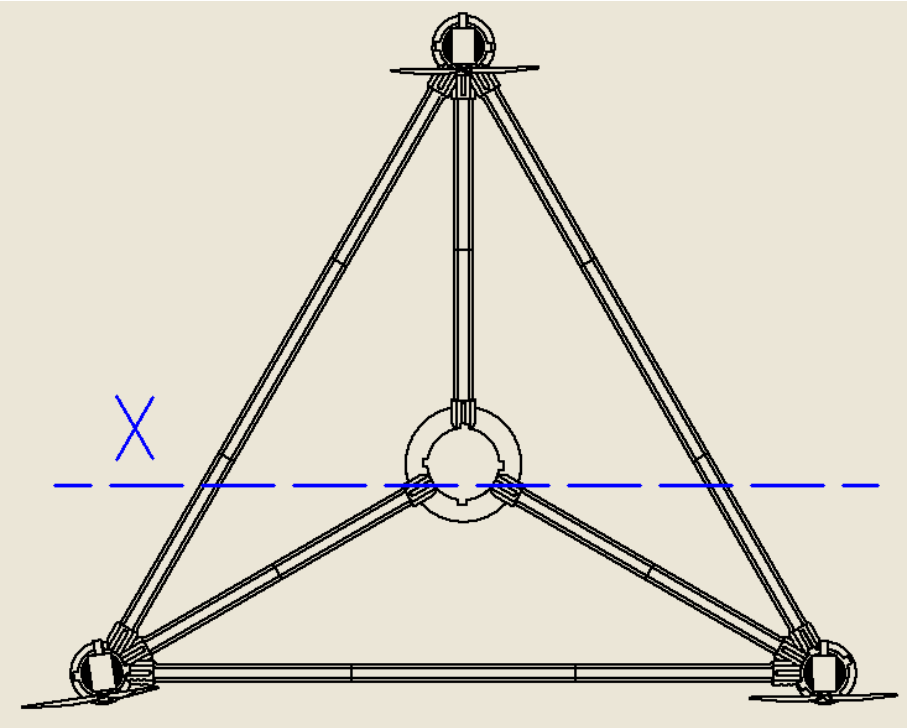


Figura 51: Plano de flotación de plataforma con centro de gravedad respecto al eje x

6.8.3. Modelo Mono-Turbina

Para comparar los resultados de ambas plataformas se probará una plataforma mono-turbina que es frecuentemente utilizada en las granjas de turbinas marinas. Este modelo fue creado por la alumna de intercambio Audrey para su informe de tesis *Energía Eólicas Marina en Chile*, por lo que será muy útil en el desarrollo de las conclusiones de esta tesis.

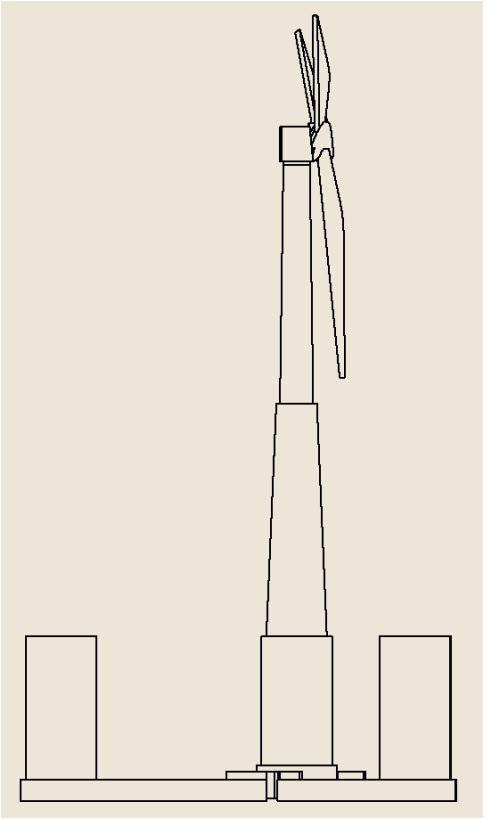


Figura 52: Visión lateral de la plataforma

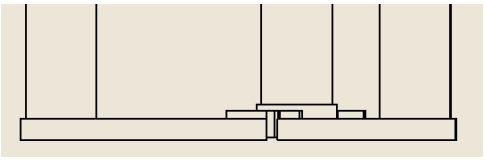


Figura 53: Área sumergida al 65% de calado

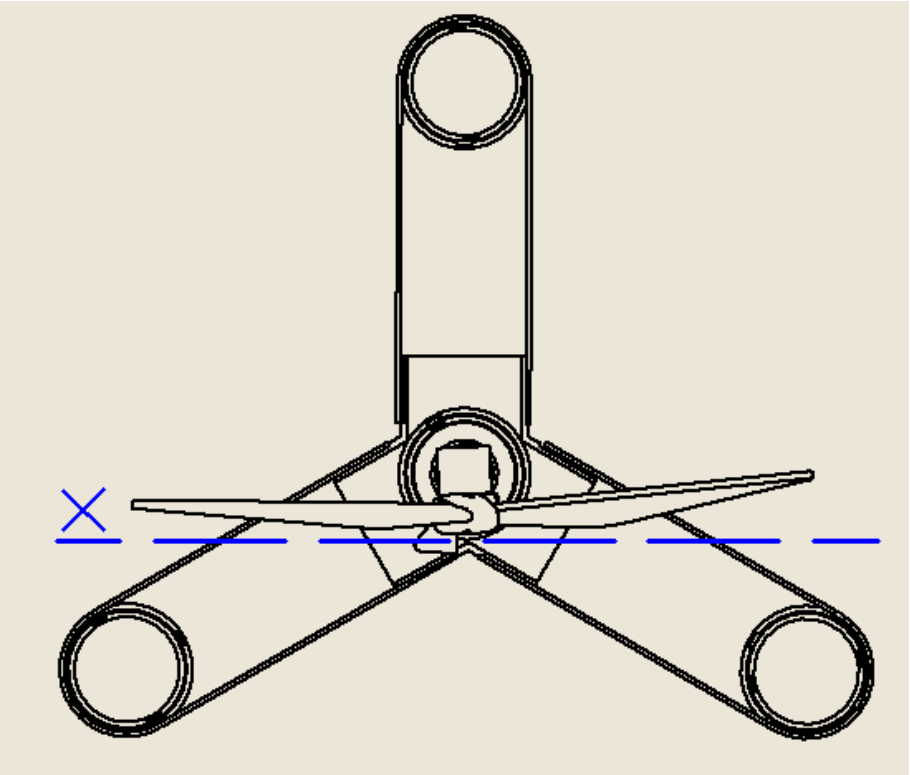


Figura 54: Plano de flotación de plataforma con centro de gravedad respecto al eje x

6.9. Pruebas de medición

6.9.1. T01 - Prueba de Plataforma Seca

Objetivo

Esta prueba tiene como objetivo encontrar la estabilidad de la plataforma nivelando el peso de sus extremidades con respecto al centro de la plataforma. También tiene por objetivo revisar, rediseñar o reconstruir las piezas que son defectuosas o tuvieron algún problema en el ensamblaje.

Procedimientos de prueba

La plataforma fue diseñada para mantener el centro de gravedad horizontal en el cilindro central y así preservar la estabilidad, con el fin de obtener una buena medición de las pruebas, es necesario realizar los siguientes pasos:

- Se ensamblará la plataforma y se revisará su capacidad de funcionamiento conjunto, además de si es necesario rediseñar, reconstruir o reparar una pieza.
- Se utilizará una gramera para obtener la masa de cada cilindro y pontón, por las irregularidades de masa que podría dejar la impresión 3d y la pintura. Se utilizará el cilindro con mayor masa como referencia de los otros cilindros en donde se incluirá arena para cubrir la masa faltante. En cuanto a los pontones ya pesados, teniendo en

cuenta las diferencias de tamaño que tienen entre sí, se nivelara la masa únicamente los que tienen un homólogo de acuerdo a su largo y grosor, excepto los de la plataforma triangular de la cual todos sus pontones tienen el mismo largo.

- Una vez obtenida la masa de cada pieza por separado, se obtendrá la masa de la parte frontal de la plataforma, y sabiendo que será mayor a la parte posterior se le agregará arena al cilindro posterior para completar la masa faltante y de esa manera estabilizar la plataforma.
- Ahora que la masa real ha sido obtenida, se comparará o se corregirá con los resultados que se obtengan de la siguiente prueba.

6.9.2. T02 - Prueba de Plataforma Húmeda - Estabilidad Estática

Objetivo

Esta prueba tiene por objetivo determinar la cantidad de masa necesaria para sumergir los cilindros de los modelos (calado) correspondientes al 50% de la altura del cilindro y al 65% de la misma, con los cuales se determinarán las posiciones de los centros de boyantes (carena). Estos parámetros serán utilizados posteriormente en el análisis para determinar los valores de centro de gravedad, altura metacéntrica y posición del metacentro de cada modelo.

Procedimientos de prueba

- Se deposita arena en el interior de los cilindros de acuerdo a las especificaciones de masa que anteriormente se habían utilizado, los valores se verifican con la gramera digital y se modifican si es necesario.
- Una vez conseguido el valor de masa requerido para cada modelo se pega sobre el manto de cada cilindro franjas de papel milimetrado para observar el valor del calado.
- Luego se deposita suavemente el modelo en el canal de olas que previamente fue llenado con agua.
- Posteriormente se sacan fotos de los cilindros para conocer sus calados al observar la porción de papel milimetrado que se sumergió. Se registran los valores medidos y se obtiene un valor promedio que corresponde al calado de cada plataforma.

6.9.3. T03 - Prueba de Estabilidad Residual

Objetivos

Esta prueba tiene por objetivo determinar el desplazamiento, velocidad vertical y Fuerza neta asociados al movimiento de la plataforma inducido por oleaje regular monocromático en el canal de olas, mientras esta se encuentra flotando en el agua y anclado al fondo del canal, para conocer la capacidad de restauración a la inclinación que poseen las plataformas. Todo esto es posible

por la recopilación y análisis de datos procedentes de las grabaciones en vídeo.

Variables a medir

Altura Significativa [cm].
Periodo de oscilación [s].
Velocidad eje z [m/s]
Fuerza neta [N]
Videos de plataformas en movimiento.

Procedimientos de prueba

Se registran las condiciones ambientales antes de comenzar cada una de las pruebas de oleaje de acuerdo a la siguiente tabla:

Código prueba	Hora	T° ambiental	% Humedad	Presión atmosférica

Tabla 7: Condiciones ambientales de laboratorio para prueba 04

- Calibración de oleaje: Se determinan los parámetros de voltaje necesarios para inducir el oleaje deseado de acuerdo a la tabla 6.
- Para cada cilindro de cada modelo se le depositara arena o fragmentos de metal en su interior para tener el calado deseado.
- Una vez realizadas las pruebas de calibración de oleaje, se sitúa la plataforma libremente en agua inicialmente quieta de acuerdo a la configuración experimental detallada en la sección 6.10.1.
- Una vez situado el modelo en el canal se induce un tren de oleaje monocromático de acuerdo a los parámetros señalados en la tabla 4 para cada estado de mar durante un tiempo de 2 minutos. El movimiento de la boya se registra con una cámara de video en la parte frontal del canal, para luego ser analizado con el software de rastreo Tracker. Este procedimiento se repite para cada modelo antes de cambiar al siguiente estado de mar, para lo cual es necesario esperar un tiempo aproximado de 1 minuto para que el agua retorne a su estado de equilibrio.

El orden en el que se realizan las pruebas para cada modelo y el correspondiente estado de mar se detalla a continuación:

Orden de Ejecución	Estado de Mar	Modelo	Tiempo de Duración
1°	H1T1	Oleaje sin Plataforma	1 [min]
2°	H1T1	PSPM	2 [min]
3°	H1T2	PSPM	2 [min]
4°	H1T3	PSPM	2 [min]
5°	H2T1	Oleaje sin Plataforma	1 [min]
6°	H2T1	PSPM	2 [min]
7°	H2T2	PSPM	2 [min]
8°	H2T3	PSPM	2 [min]
9°	H3T1	Oleaje sin Plataforma	1 [min]
10°	H3T1	PSPM	2 [min]
11°	H3T2	PSPM	2 [min]
12°	H3T3	PSPM	2 [min]
13°	H1T1	Oleaje sin Plataforma	1 [min]
14°	H1T1	PSTM	2 [min]
15°	H1T2	PSTM	2 [min]
16°	H1T3	PSTM	2 [min]
17°	H2T1	Oleaje sin Plataforma	1 [min]
18°	H2T1	PSTM	2 [min]
19°	H2T2	PSTM	2 [min]
20°	H2T3	PSTM	2 [min]
21°	H3T1	Oleaje sin Plataforma	1 [min]
22°	H3T1	PSTM	2 [min]
23°	H3T2	PSTM	2 [min]
24°	H3T3	PSTM	2 [min]

Tabla 8: Orden en que se realizan las pruebas para cada modelo en diferentes estados de oleaje

Todas las mediciones que aparecen en la Tabla 8 son desarrolladas con un calado del 50% y 65%, con todas las demás variables de medición iguales o similares, lo que nos deja con una cantidad de 48 mediciones.

6.10. Canal de Olas

6.10.1. Distribución general

Con el propósito de llevar a cabo la experimentación física, específicamente la prueba P03, que consiste en la oscilación forzada sobre cada uno de los diversos modelos a analizar, se empleó principalmente el canal de oleaje artificial de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso. Este canal, con dimensiones de 15 metros de longitud, 1,2 metros de altura y 1 metro de ancho, se caracteriza por contar con una paleta generadora de olas ubicada en uno de sus extremos. Esta paleta tiene la capacidad de simular el oleaje regular específico requerido para el experimento.

Una vez que el oleaje es generado por la paleta, se propaga de derecha a izquierda a lo largo del canal hasta llegar al extremo opuesto. Con el objetivo de mitigar la perturbación originada por la reflexión del oleaje en la pared del extremo durante las subsiguientes olas generadas, se instala un disipador de piedras y bloques de cemento al final del canal.

En la parte central del canal, situada a una distancia de 4,5 metros de la paleta generadora, se encuentra una pantalla de luz led en la pared posterior. Su finalidad es crear contraste con las plataformas para simplificar el registro de su trayectoria, y se documenta su movimiento generado durante un periodo total de 2 minutos debido a la interacción que tiene con el oleaje regular inducido.

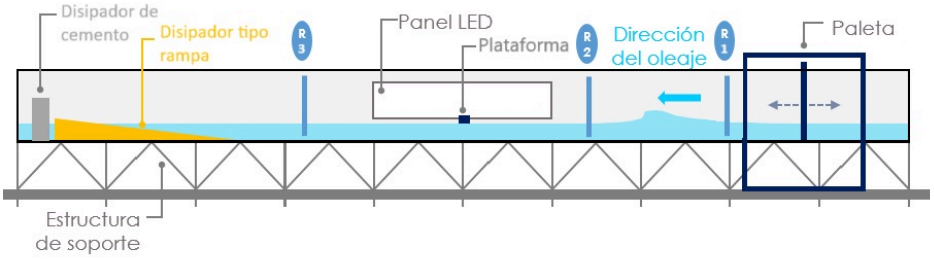


Figura 55: Distribución general del canal de olas para la prueba de estabilidad residual

Se utilizaron 3 sondas de medición tipo resistivas de la empresa HR Wallingford. Como se muestra en la Figura anterior, la primera fue puesta al lado de la paleta generadora de olas, para medir el oleaje y periodo inicial, y

así evitar posibles sobreesfuerzos de la paleta. El segundo y más importante resistor fue colocado en el principio del panel LED, el cual tiene por función medir la altura y periodo del oleaje que se utilizara para la medición de las plataformas. El tercer resistor se ubica al final del panel LED y será usado para conocer el decaimiento del oleaje en el espacio entre el segundo resistor y el tercero, con la finalidad de saber si es un porcentaje de decaimiento significativo.

6.10.2. Sistema de Generación

El mecanismo generador de olas opera mediante un motor lineal Linmot P10-70x320, posicionado en la parte superior del canal sobre dos rieles apoyados en las paredes laterales. Este motor se encarga de desplazar la paleta generadora para provocar la formación de oleaje en la masa de agua contenida en el tanque. Adicionalmente, se emplea un Servo drive E-1400-GP-QN-1S, cuyas especificaciones se describen a continuación:

Motor lineal Linmot P10-70x320: Stroke 1530[mm], fuerza peak 2162[N], fuerza continua 673[N] (con sistema de enfriamiento de agua), máxima velocidad 5, 9[m/s], máxima aceleración 939[m/s2].

Servo drive E-1400-GP-QN-1S: Marca Linmot, alimentación trifásica, comunicación por protocolos CANopen y LinRS, configuración por Ethernet.

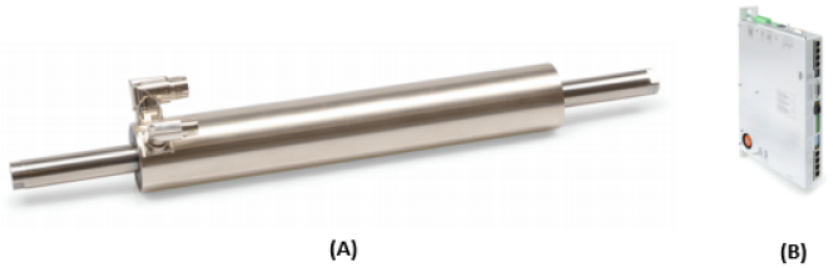


Figura 56: (A) Motor lineal Linmot P10-70x320, (B)Servo drive E-1400-GP-QN-1S.

Para su funcionamiento, se emplea una interfaz desarrollada mediante el software LabVIEW, encargada de generar y controlar una señal de voltaje analógica en el rango de 0 a 5[V]. Esta señal se utiliza para determinar la posición del motor. Se opera en el modo de señal regular, donde se transmite una señal sinusoidal con amplitud ajustable (entre 0 y 5[V]), frecuencia ajustable (entre 0 y 1[Hz]) y un tiempo de simulación en minutos.

En base a lo anterior, se logra generar, bajo condiciones estándar de prueba con una profundidad de agua de 15 [cm], olas con períodos que varían de 1 a 3 segundos y alturas que oscilan entre 1 y 15 [cm]. Para el experimento realizado, se superó la altura levemente hasta 16,5 [cm] para que la altura llegue a la plataforma con 14,4 [cm] de altura, ya que la profundidad

seleccionada fue de 40 [cm], con el objetivo de mantener la coherencia con los principios de similitud del modelo en relación a los parámetros establecidos en la realidad.

6.10.3. Cualidades de la paleta y plataforma disipadora

La paleta generadora de olas consiste en una lámina de acrílico con un espesor de 1[cm], una anchura de 1[m] y una altura de 1,2[m]. Esta lámina se encuentra dispuesta de manera perpendicular al plano horizontal y está instalada sobre una estructura metálica apoyada en dos rieles de 550[mm] de longitud. Estos rieles, a su vez, están fijados a las paredes laterales del canal y tienen una carrera máxima permitida de 2[m]. Se adjuntan los planos correspondientes para referencia.

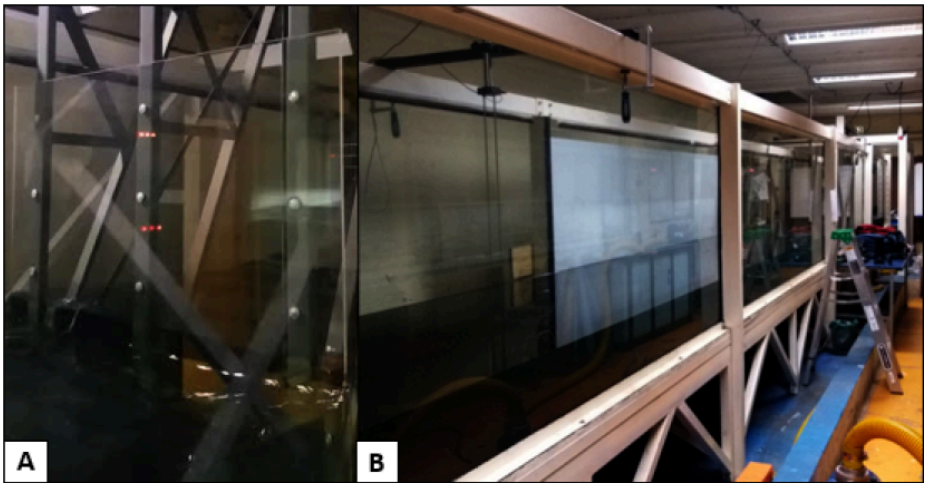


Figura 57: (A)Paleta generadora de olas, (B) Vista general del canal de olas.

La plataforma disipadora de oleaje consiste en una rampa de madera contrachapada con dimensiones de 3,93[m] de longitud, 0,44[m] de altura y 1[m] de ancho, presentando un ángulo de inclinación de 6[°]. Además, se colocó una alfombra sobre la superficie de madera para amplificar el efecto disipador en la zona de la rompiente.

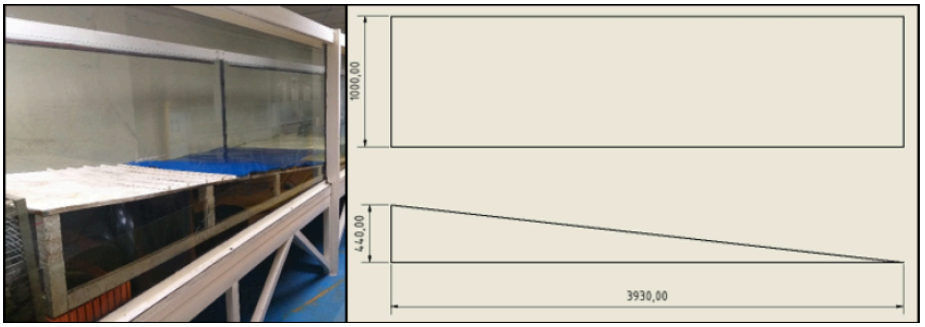


Figura 58: Plataforma disipadora de madera

Además de la función disipadora de la plataforma, se cuenta con un disipador adicional que se configura como un paralelepípedo recto con soportes de

metal y caras de malla de alambre rellenas de piedras y bloques de cemento que se muestra en la Figura 59. Sus medidas son: 0,4[m] de ancho, 0,5[m] de alto y 0,8[m] de profundidad.



Figura 59: Disipador de oleaje por piedras y bloques de cemento

6.10.4. Resistores de monitoreo

Para evaluar la altura y el periodo de las olas, se emplearon 3 sondas de medición de tipo resistivo suministradas por la empresa HRWallingford, en conjunto con un adquisidor de señales NI USB-6008. Las especificaciones técnicas de este último son las siguientes: resolución de 12 bits, 8 entradas análogas individuales equivalentes a 4 entradas análogas diferenciales (10 V), tasa de muestreo máxima de 10000 muestras/s, nivel de ruido de 5mV, 2 salidas análogas de 0-5 V, tasa de actualización de 150 Hz y un error de 36.4 mV.



Figura 60: Sonda de medición resistiva.

6.10.5. Registro Digital

Para registrar el desplazamiento de las plataformas y sus interacciones con los oleajes planificados, se empleó como recurso principal una cámara de video digital GoPro HERO 5, cuyas características técnicas se detallan a continuación:

Característica	Especificación
Dimensiones	62 x 44,6 x 33,7 [mm]
Peso	117 [gramos]
Batería	Batería 1220 [mAh]
Video	4K a 30fps nativo 1080p a 120fps

Tabla 9: Especificaciones técnicas Gopro Hero 5.

La cámara digital fue dispuesta de tal forma que se obtuviese un vista lateral del fenómeno de estudio. Específicamente fue ubicada en línea con el centro de la plataforma pentagonal y en línea con el frente de la plataforma triangular.

6.11. Proceso de Fabricación

La fabricación del trabajo fue planificada para ser desarrollada en dos partes. La primera parte es donde no fue requerido el uso del canal de olas o necesariamente su uso (Se explicará más adelante).

6.11.1. Diseño y Fabricación:

A continuación se presentará los diseños originales de los prototipos de las plataformas semi-sumergibles

Prototipos originales

A continuación se presentan los prototipos originales de las plataformas multi-turbina a través del programa inventor. En la Figura 61 se muestra el diseño de prototipo original de plataforma multi-turbina pentagonal. Las puntas de las plataformas están separadas a tal distancia que la estela de las turbinas no interfieren con el funcionamiento entre ellas según se demuestra en el gráfico de Larsen en el Gráfico 9.

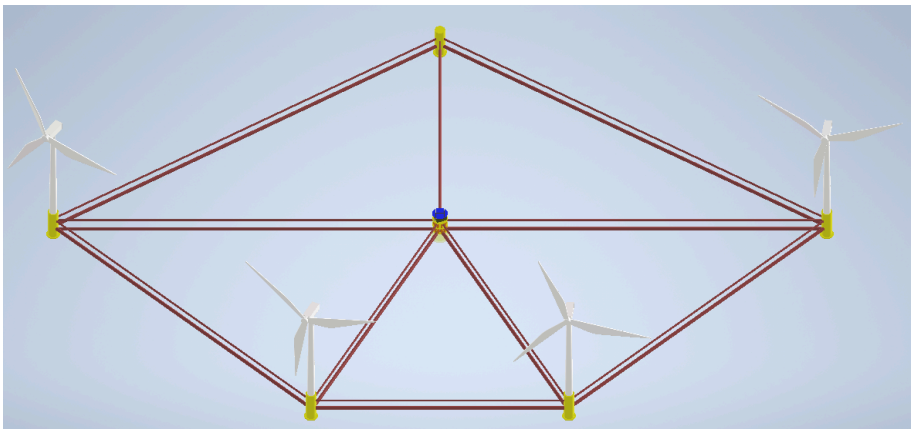


Figura 61: Diseño de prototipo original de plataforma multi-turbina pentagonal

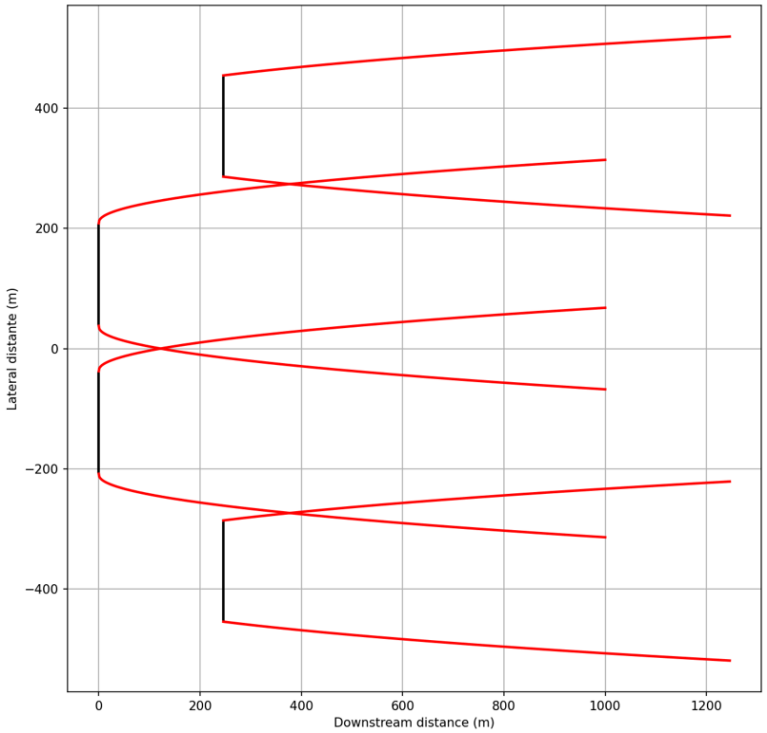


Gráfico 9: Gráfico de Larsen

En el centro de la plataforma desde la punta de un álabe hasta el otro alabe del otro extremo es de alrededor de 880 [m].
Considerando la gran magnitud de esta plataforma y su geometría, también se desarrolló otra plataforma multi-turbina pero de geometría triangular como muestra la Figura 61. Esta plataforma es más proporcional y de menor tamaño, de esta manera tenemos dos ideas que se comparan para descubrir cuál es la más estable y eficiente.



Figura 62: Diseño de prototipo original de plataforma multi-turbina triangular

Desde la punta de un álabe hasta el otro alabe del otro extremo de la plataforma es de alrededor de 485 [m]
El gran tamaño de esta plataforma no es un problema para la flotabilidad ya que su densidad relativa es equivalente a 498,7 [kg/m^3], la cual la deja por debajo de la densidad del agua y eso le otorga la capacidad de flotar.
La ventaja de una estructura tan grande y con tanta electricidad es que se puede utilizar el sobrante de energía para fabricar y almacenar hidrógeno verde, al igual que una oficina integrada y puerto de helicóptero. Aun con la oficina, un helicóptero, una central desalinizadora, una central de hidrógeno verde y un grupo de tanques de almacenaje de hidrógeno en el centro de esta plataforma como aparece en la Figura 62, la masa es de 30.625 [Ton], lo cual deja una densidad relativa igual a 551,6 [kg/m^3]. La plataforma no solo es más productiva aun con este peso, sino que el peso natural de esta central produce que se concentre el centro de masa de la plataforma más abajo, generando estabilidad.

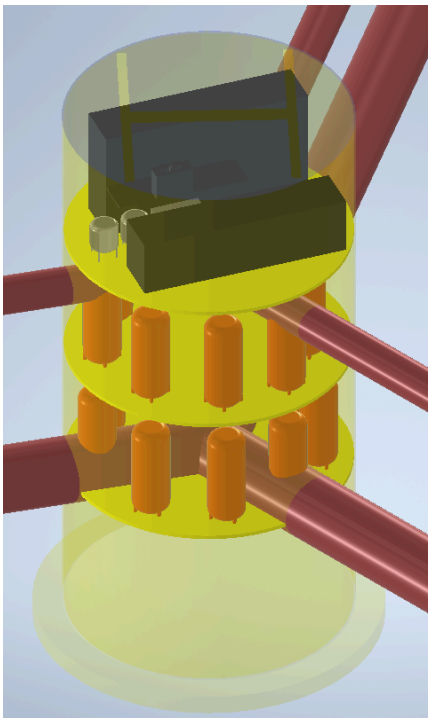


Figura 63: Modelo planta desalinizadora y planta electrolizadora de hidrógeno

Para realizar el modelo de estas plantas de tratamiento de agua se utilizó el sistema de tratamiento de desalinización de la empresa Guangzhou Kai Yuan Water Treatment Equipment Co., Ltd. que se muestra en la *Figura 64*, y la generadora de hidrógeno EX-2125D Electrolyzer de la empresa Plug que se muestra en la *Figura 65*.



Figura 64: Stainless Steel 304 / 316 Desalination Plant Drinking Water Treatment System



Figura 65: Plug EX-2125D Electrolyzer

Problema:

Aun con estas buenas características con las cuales se podría generar mucha eficiencia y ganancia tanto económico como eléctrico, en el momento de empezar a crear el modelo a escala de esta plataforma, las limitaciones de las dimensiones del canal de olas en donde se desarrollarán las mediciones no permiten que el modelo entre por su gran tamaño. Por lo que teniendo en cuenta las dimensiones del canal de olas y la mínima de altura significativa en el oleaje, se presentó un nuevo prototipo de plataforma que satisfacía los requerimientos del canal de olas en el momento en que se realizó el escalamiento a un modelo. Este nuevo prototipo ya fue mencionado anteriormente como el utilizado.

Modelos originales

En un principio los diseños de los modelos de las plataformas no tenían una gran diferencia visual con los prototipos. Se utilizó una forma de anclaje entre los cilindros y los pontones en la parte interior de los cilindros como se ve en la Figura 66 y la Figura 67.

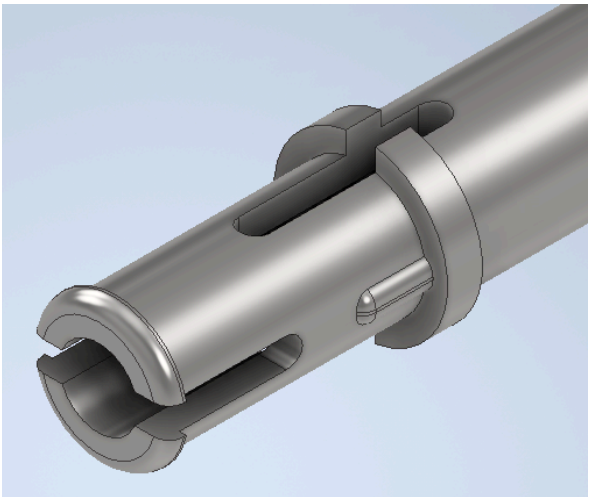


Figura 66: conector macho de punta de pontón

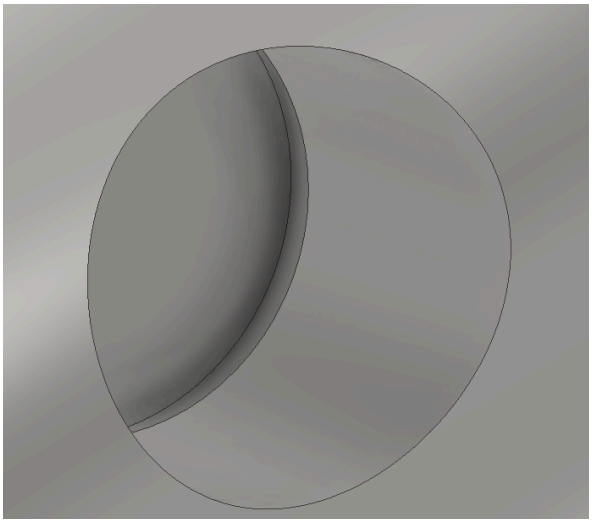


Figura 67: Conector hembra de cilindro

Problema:

En el momento de la impresión, los detalles del conector macho en la punta del pontón superior son tan pequeños que no son impresos de la manera correcta, también la parte de pontón que entra en el cilindro es muy pequeña en comparación con el largo de estos, generando que la unión sea poco confiable, y otro problema es que la construcción interior del cilindro como se ve en la figura 68 y 69, provoca que su volumen interior aumente y su ventaja de flotabilidad es considerablemente disminuida.

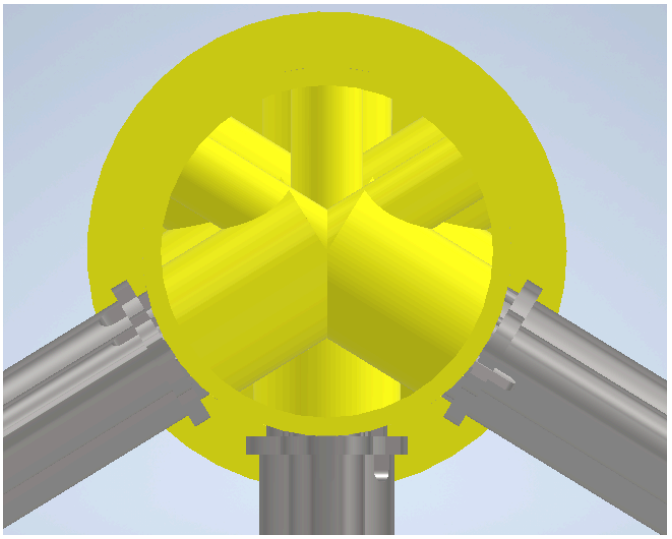


Figura 68: Interior de cilindro



Figura 69: interior de cilindro impreso

Impresión 3D

Los modelos fueron creados por impresión 3D en su mayoría por una impresora Creality Ender 3 y utilizando filamento PLA el cual se destaca por su alta resistencia mecánica y resolución de acabado. La densidad de este material es de 1,29 [g/cm3] lo cual fue muy útil para calcular la masa teórica de la plataforma, pero difiere con la masa real de la plataforma impresa en un 22 % debido que el relleno no es macizo sino que es rellenado por giroide, lo que quiere decir que hay espacios con aire dentro de lo que debería ser macizo, esto es por ahorro de material de PLC, de parte de la impresora.



Figura 70: Cilindro frontal izquierdo PSPM recién impreso en 3D

Pintura

Se utilizó una pintura epóxica llamada Rethane HB 555 que se combina con Catalizador HB 555, dando como resultado una pintura hidrofóbica que se utiliza en barcos y se escogió para cubrir la plataforma. Es necesario el uso de la pintura porque cuando se realizó una prueba con algunas piezas ya impresas de PLA en agua, se pudo visualizar agua filtrándose por los poros de las piezas, esto hizo que se buscará una solución que concluyó en el uso de pintura hidrofobica.

Problema:

Las piezas fueron diseñadas para que se conectaran entre sí con decimales de milímetro de diferencia, esto de tal manera que no existieran movimientos no deseados en la estabilidad o que sea fácil el desprendimiento de los pasadores o encajes. Al momento de la implementación de la pintura, se generó una capa que rellenaba unos decimales de milímetro suficientes para hacer que las piezas no encajen entre sí, por lo que se debio lijar estas secciones de las piezas para sacar la pintura y que se ensamble de manera satisfactoria.

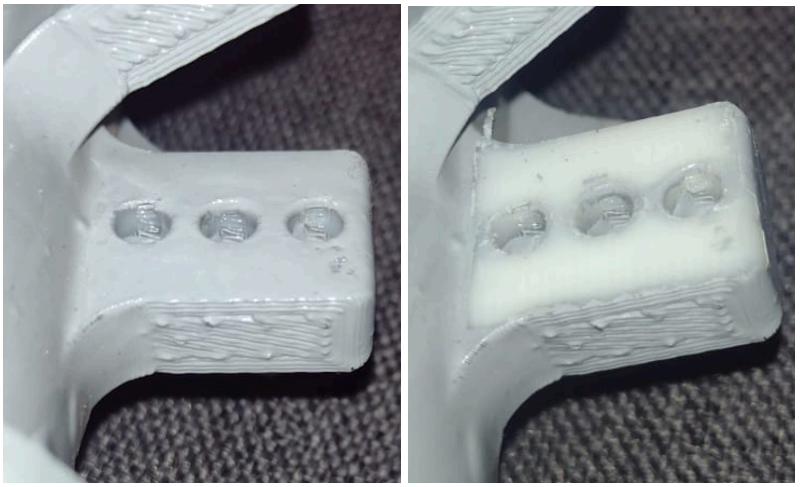


Figura 71: Encaje macho con pintura lijada

Una posible desventaja es que por el hecho de que hay partes sin pintura, existe la probabilidad de que el agua se pueda filtrar por las secciones lijadas y el volumen, la masa como la densidad se vean afectados. Se hicieron pruebas con las piezas de sección lijada de tal manera que primero fueron pesadas para saber cual era sus masas antes de la prueba, después fueron sumergidas en agua por un periodo de tiempo de 4 minutos, posteriormente se volvieron a pesar y se encontró que en todas las piezas, ya sean cilindros o pontones no subían en masa a más de 3 [gr], por lo que se concluyó que se puede despreciar sus implicaciones en la medición.

Debajo de cada cilindro se pegó una argolla que también fue impresa en 3D, cuya función es sostener un gancho que esté amarrado con un hilo de 3 [mm] de grosor al peso en el fondo del canal y servir como un anclaje.



Figura 72: Argolla en la base del cilindro

6.12. Pruebas y objetivos de medición

6.12.1. T01 - Prueba de plataforma seca

Se pesaron todos los cilindros y los pontones. Para los pontones que son gemelos se les agregó cinta masking para aumentar la masa de los pontones que eran más livianos y de esa manera pesar lo mismo que sus homólogos.
La plataforma pentagonal se separó en dos cuadrantes, el cuadrante frontal y el cuadrante posterior. La masa del cuadrante posterior tenía que igualar la masa del cuadrante frontal, así que se utilizó piezas de metal y arena para igualar la masa faltante, también se pegó en los cilindros papel milimetrado para mostrar cuánto se hunde la plataforma. El peso del cuadrante izquierdo y el peso del cuadrante derecho eran iguales, el peso del cuadrante frontal y el peso del cuadrante posterior se volvieron iguales. Todos los extremos estaban balanceados.

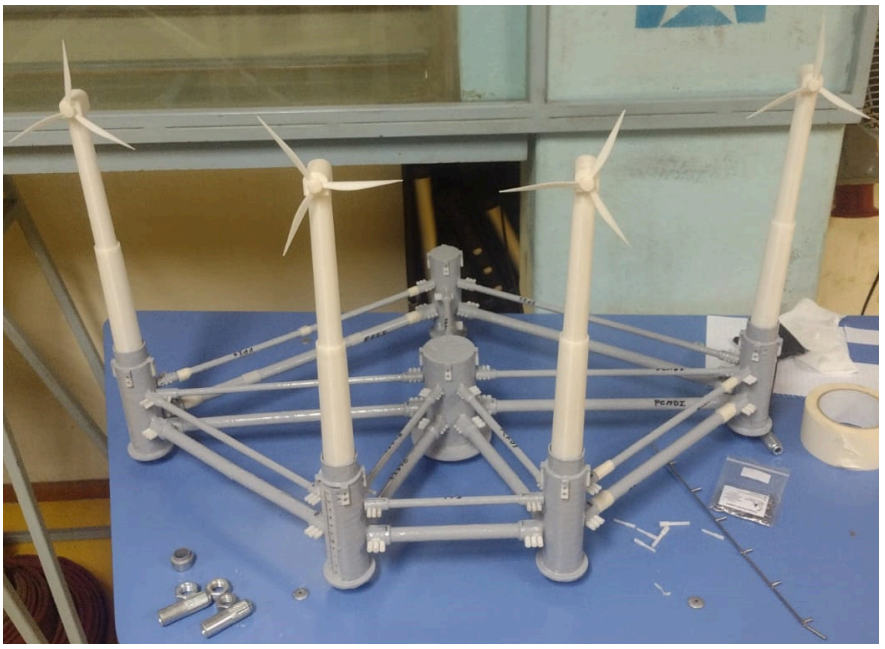


Figura 73: Modelo físico de plataforma pentagonal semi-sumergible multi-turbina

Considerando que la plataforma triangular tiene todos sus lados iguales, no se le puso peso en los cilindros, fuera de unos pocos gramos para igualar el peso de todos y los pontones, ya que la pintura se concentró más en algunas piezas que en otras.

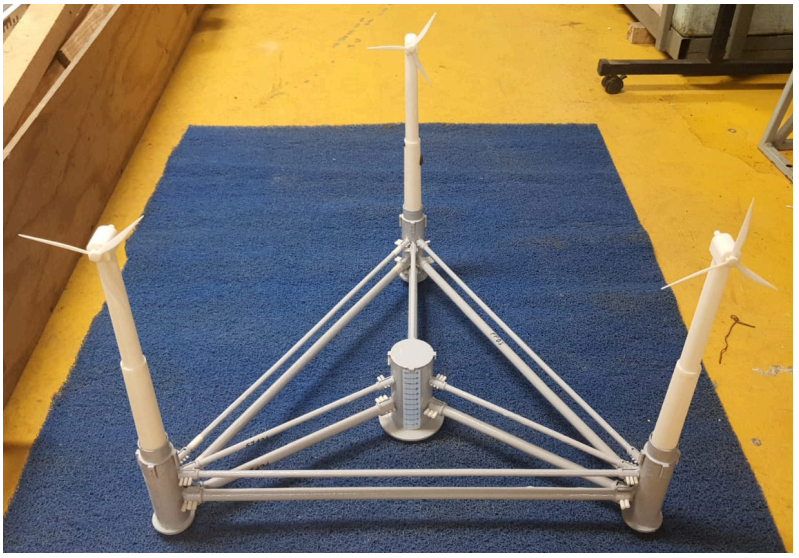


Figura 74: Modelo físico de plataforma Triangular semi-sumergible multi-turbina

La plataforma mono-turbina al igual que la plataforma triangular tiene extensiones simétricas con lo cual no se le puso peso al principio para saber también cuál es su sumersión.



Figura 75: Modelo mono-aerogenerador semi-sumergible

Problema

La unión entre la turbina y el cilindro es realizada por una pieza (Figura 76) en la que se encaja la turbina al girar, pero no se encaja en el cilindro al girar. En un principio se tenía previsto que dos barras atravesaran el cilindro y la pieza de unión para dejarlas fijas, pero como había un agujero en el cilindro (Figura 77), el agua habría entrado dentro del cilindro, así que se optó por tapar estos agujeros en los cilindros con la pintura.



Figura 76: Pieza de unión cilindro-turbina con barras de fijación.



Figura 77: Agujero de cilindro para unión de turbina

El problema siguiente sería cómo hacer que las turbinas se quedarán fijas en los cilindros. La solución fue bastante simple, se usó plastilina, por muy sorprendente que parezca, la plastilina negra era lo suficientemente pegajosa para que resistiera el movimiento del oleaje fuerte y lo suficientemente hidrofóbica para que el agua no entrara al cilindro.



Figura 78: Plastilina adherida a la base de la pieza de unión cilindro-turbina

Cabe destacar una pequeña advertencia extra. Al intentar utilizar plastilina de la misma caja pero de diferentes colores, algunas de estas barras se desintegraron con el agua, por lo que se recomienda que para su manipulación en proyectos similares se prueben en las condiciones de laboratorio antes de usar.

6.12.2. T02 - Prueba de plataforma húmeda

En esta sección no era estrictamente necesario el uso del canal de olas, ya que se podía realizar en un contenedor grande y profundo, sin embargo teniendo

en cuenta que no se pudo encontrar un contenedor grande se utilizó el canal de olas.

Plataforma Pentagonal (P4)

Una vez que se introdujo la plataforma en el canal de olas como se muestra en la Figura 79, se hundió la parte posterior casi en su totalidad, por lo que se tuvo que replantear la forma de balancear la plataforma. En vez de igualar masas se igualó las densidades relativas. Con el método teórico de la densidad relativa se llegó a un aproximado de la cantidad de arena que se necesitaba, esto se sabe porque cuando se volvió a probar la plataforma esta estaba casi balanceada. Se observó que se necesitaba más arena en el cilindro posterior y casi nada de arena en el cilindro central, así que con pequeñas dosis de arena se llegó a un balanceo de un error de 3 [mm] como se puede apreciar al comparar los datos de la Tabla 10. En la Figura 80 se muestra el cilindro frontal derecho y en la Figura 81 se muestra el cilindro posterior. Estas Figuras están para que se observe la diferencia entre ellas, sin embargo, hay que agregarles 4 milímetros, ya que en el papel milimetrado no se está contando la altura de la quilla.
El cilindro central como se mencionó anteriormente esta 11 [mm] más abajo que el resto de los cilindros, con la finalidad de bajar el centro de gravedad y alejarlo del metacentro. En el modelo físico hay una diferencia con los cilindros frontales de 9 [mm] y con los cilindros medios y posterior una diferencia de 12 [mm].

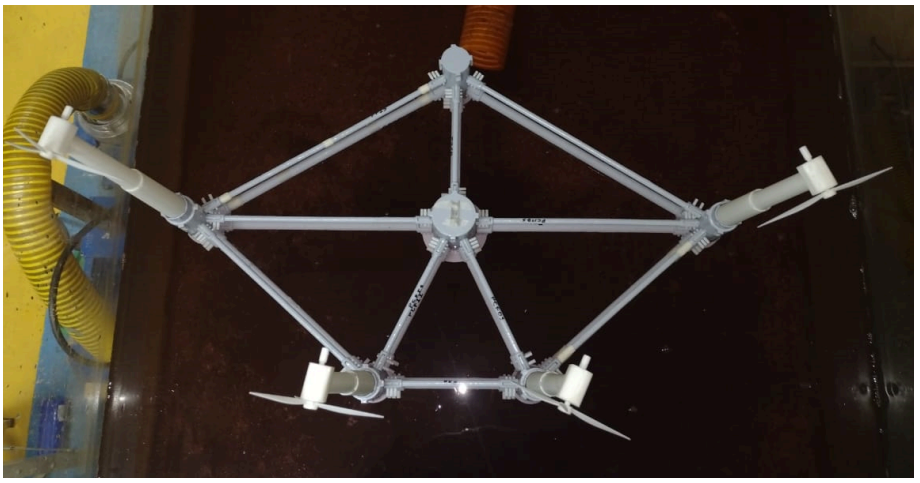


Figura 79: Modelo físico de plataforma pentagonal semi-sumergible multi-turbina dentro del canal de olas

Calado de Cilindro				
Frontal Derecho	Frontal Izquierdo	Medio Derecho	Medio Izquierdo	Posterior
61 [mm]	61 [mm]	58 [mm]	58 [mm]	58 [mm]

Tabla 10: Calado natural de PSPM balanceada

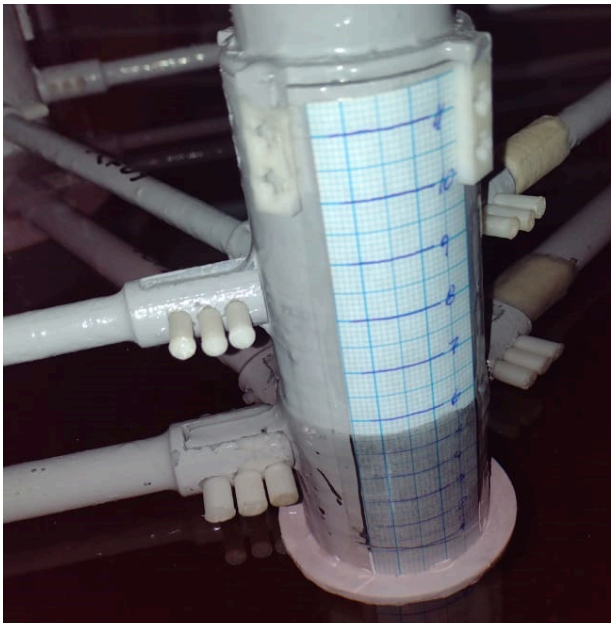


Figura 80: Vista de cilindro frontal derecho de la plataforma pentagonal en prueba de flotabilidad dentro del canal de olas.

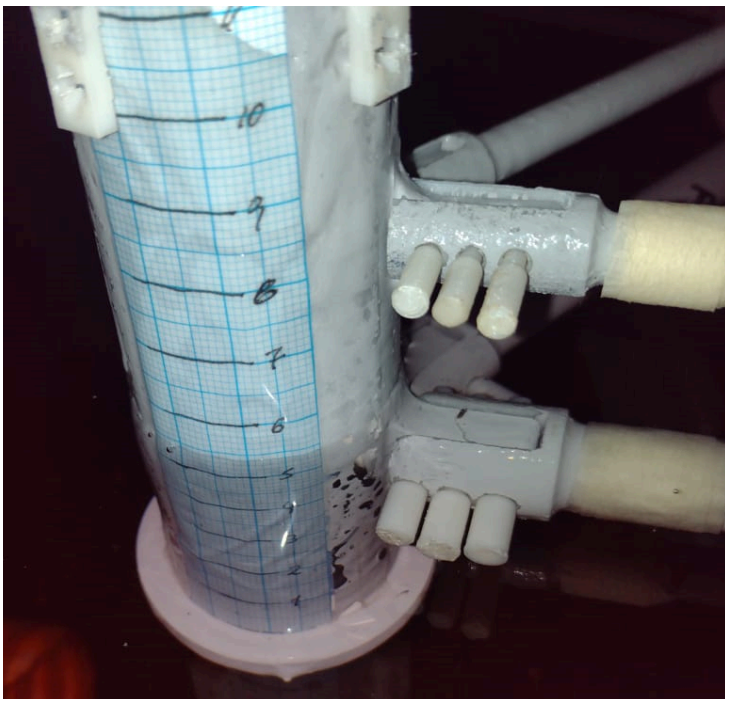


Figura 81: Vista de cilindro posterior de la plataforma pentagonal en prueba de flotabilidad dentro del canal de olas.

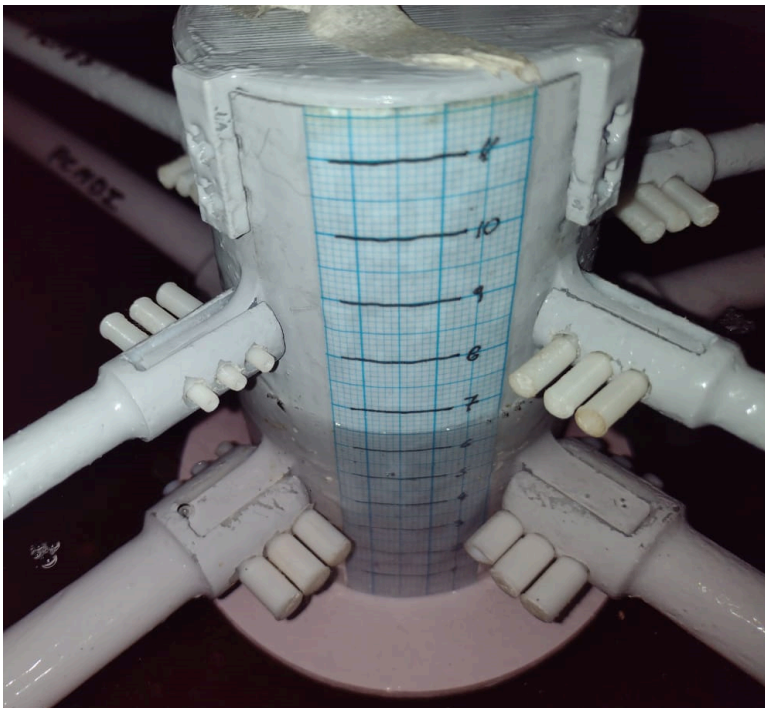


Figura 82: Vista de cilindro central de la plataforma pentagonal en prueba de flotabilidad dentro del canal de olas

Plataforma Triangular (T3)

Una vez que se introdujo la plataforma en el canal de olas como se muestra en la Figura 83 se pudo observar lo uniforme que flotaba, ya que después de haber fallado en la flotabilidad de la plataforma anterior, se pudo corregir la forma de entender la relación del peso y el volumen, lo que hizo que se pudiera dejar de lado cualquier pensamiento sobre agregar arena en un cilindro más que en otro, dejando como resultado el calado que se muestra en la Tabla 11.

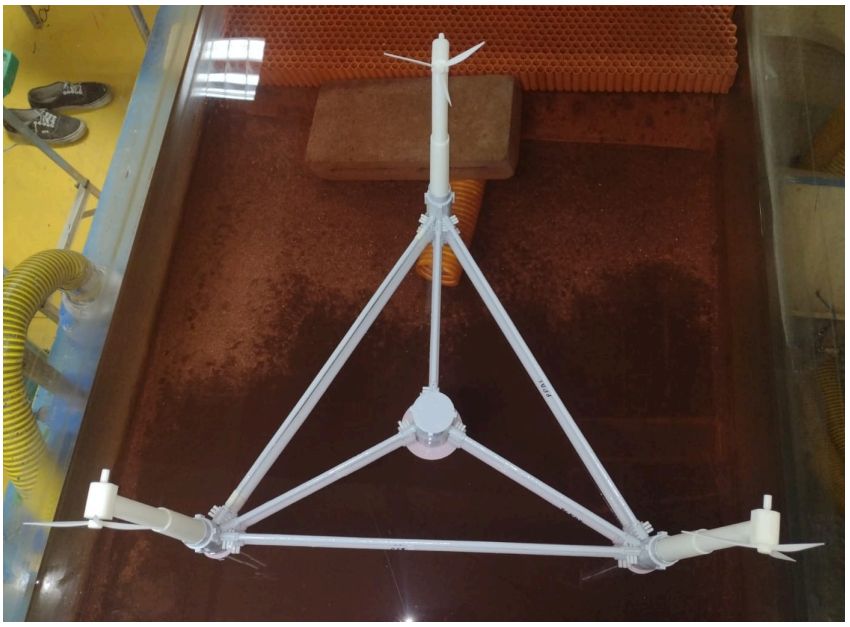


Figura 83: Modelo físico de plataforma triangular semi-sumergible multi-turbina dentro del canal de olas

Calado de Cilindro			
Frontal Derecho	Frontal Izquierdo	Posterior	Central
48 [mm]	48 [mm]	47 [mm]	55 [mm]

Tabla 11: Calado natural de PSTM balanceada

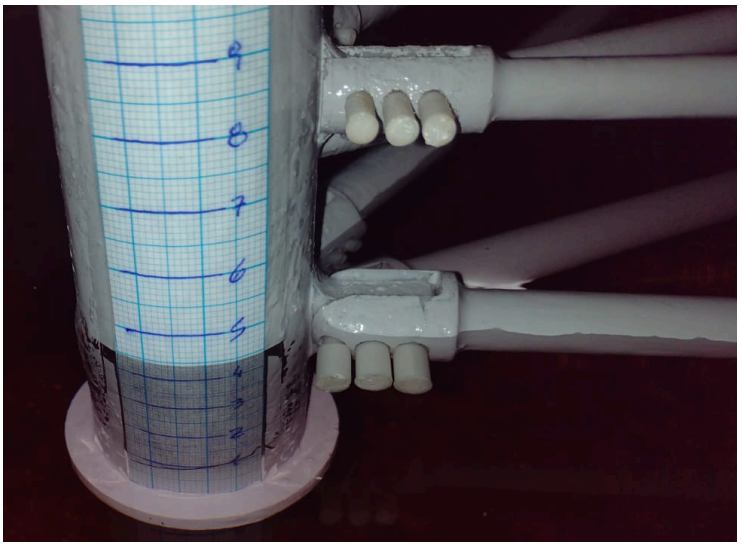


Figura 84: Vista de cilindro frontal de la plataforma pentagonal en prueba de flotabilidad dentro del canal de olas.

La plataforma mono-turbina tenía un peso natural suficiente para tener una profundidad de solo el 65% del calado de sus cilindros, por lo que ese es el único calado que se utilizó para la comparación con las otras plataformas.

Calado de Cilindro			
Frontal Derecho	Frontal Izquierdo	Posterior	Central
50 [mm]	50 [mm]	49 [mm]	49 [mm]

Tabla 12: Calado natural de mono-aerogenerador balanceada

Utilizando el principio de Arquimedes se intentó obtener la masa requerida para cada calado, pero no se obtuvieron valores precisos, por lo que con ayuda de una gramera digital, se procedió a estudiar manualmente la cantidad adecuada de arena y piedras que se debía utilizar, de tal manera que el cilindro central tuviera al menos la misma cantidad de arena como la suma de los cilindros exteriores. Posteriormente debido a pequeñas variaciones de peso se fueron modificando las cantidades de arena y piedras añadidas en los cilindros, ya que para probar si se mantenían los calados correspondientes, las plataformas fueron hundidas hasta el borde superior de los cilindros por un periodo de tiempo y se movieron simulando que estaban en oleaje, para saber si había fugas de agua, ya que como se explicó anteriormente por efecto de la pintura lijada, era probable que se filtrara agua.

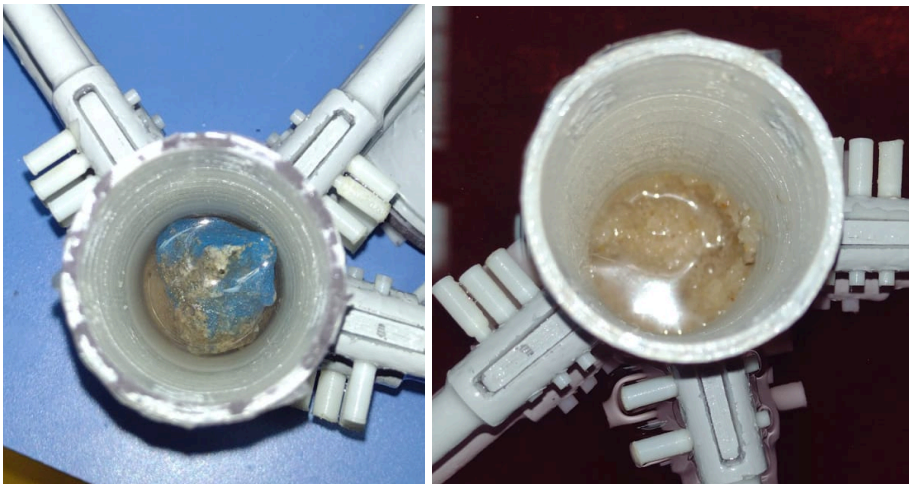


Figura 85: Filtración de agua en cilindros debido a movimientos de la plataforma

Como se puede ver en la Figura 85 efectivamente se filtró agua en algunos cilindros no solo por efecto de la pintura sino que por algunos errores en la impresión de algunos cilindros, sin embargo por efecto de la unión de los pontones produjo que se hundiera ligeramente toda la sección de la plataforma y no un solo cilindro. De esta manera se pudo corregir con arena para que se mantuviera en el calado adecuado en el momento del movimiento, y esto se pudo corroborar al medir el calado al inicio del experimento y al final de este mismo.

El agua filtrada era constante, no entraba más agua de la que ya le había entrado aún después de someterla a diferentes movimientos y hundimientos, por lo que se pudo trabajar bien en el calado que se deseaba después de encontrar la cantidad de arena y piedras requeridas. Los resultados serán expuestos en la sección 7.2.

6.12.3. T03 - Prueba de Estabilidad Residual

Para esta prueba es necesaria la completa disposición y preparación del canal de olas, donde se realizarán los siguientes pasos y procesos:

- En el extremo final opuesto de la paleta generadora del canal de olas se debe instalar el disipador de oleaje a fin de mitigar el efecto la interferencia de las olas reflejadas en la pared posterior del canal.
- Se realizará una revisión y mantención a la paleta generadora antes de su utilización verificando el depósito de grasa y añadiendo lubricante WD40 en el eje del pistón.
- Se llenará con agua el canal de olas hasta conseguir la profundidad deseada de 40 [cm].
- Se instalarán pesos en el fondo del canal y se amarraran hilos de tela en la base de los cilindros conectados a estos pesos para funcionar como anclajes.
- Se instalará una cámara Gopro a la mitad del canal para el registro de las pruebas que serán conducidas de acuerdo a la configuración que se detalla en la sección 6.10.5.
- Se limpiará el vidrio del canal donde se realizará la prueba para una mejor observación.
- Se instalarán los resistores de monitoreo de oleaje de acuerdo a lo especificado en la sección 6.10.4, y se calibran de acuerdo a las normas del laboratorio.

Al iniciar las pruebas se identificaron ciertos contratiempos, como que el amarre del anclaje de la plataforma pentagonal solo se pudo desarrollar en 3 cilindros y no en todos como se pensó en un inicio, la razón es que el ancho del canal de olas no era lo suficientemente grande como para extender los amarres de los cilindros medios hacia los costados como se ilustra en la Figura 86.

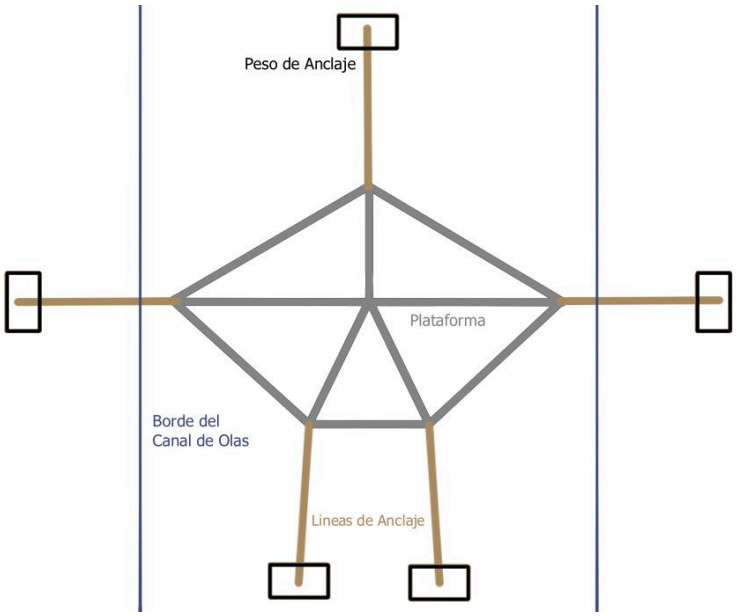


Figura 86: Ilustración de cómo deberían ir las líneas de anclaje

Se intentó ajustar los amarres laterales hacia al frente junto a los amarres frontales, pero cuando se probó el oleaje, se desarrolló una interferencia de tirón entre los amarres frontales con los laterales, provocando que la plataforma se moviera inestablemente, por lo que se optó por usar solo tres líneas de anclaje como se ve en la ilustración de la figura 87:

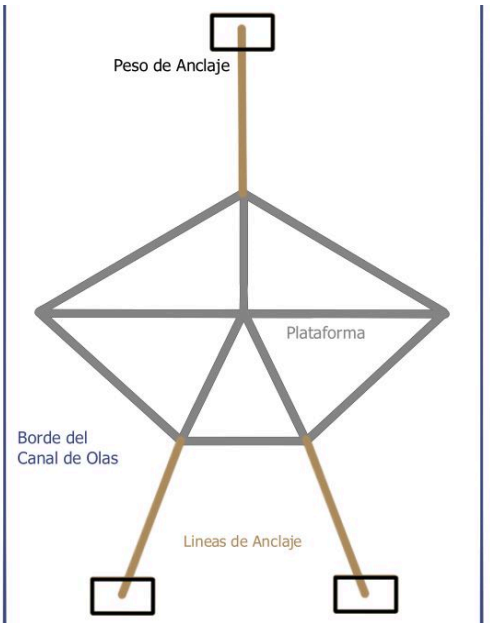


Figura 87: Ilustración de las líneas de anclaje finales

Los pesos utilizados como anclaje en el canal de olas eran pequeñas vigas rectangulares que se movían cuando la pala creaba el oleaje, por lo que se utilizó pesas de 10 [kg] que no se movieron en ninguna dirección incluso con el oleaje más desfavorable.

Se comienzan las pruebas en el canal de olas, con los estados de mar especificados en la Tabla 4 y el orden de prueba de la tabla 7.

Para ejemplificar como quedó el modelo de la Plataforma Pentagonal a un calado del 65% en el video donde se realizaron todas las mediciones de imagen, se tiene la Figura 88.

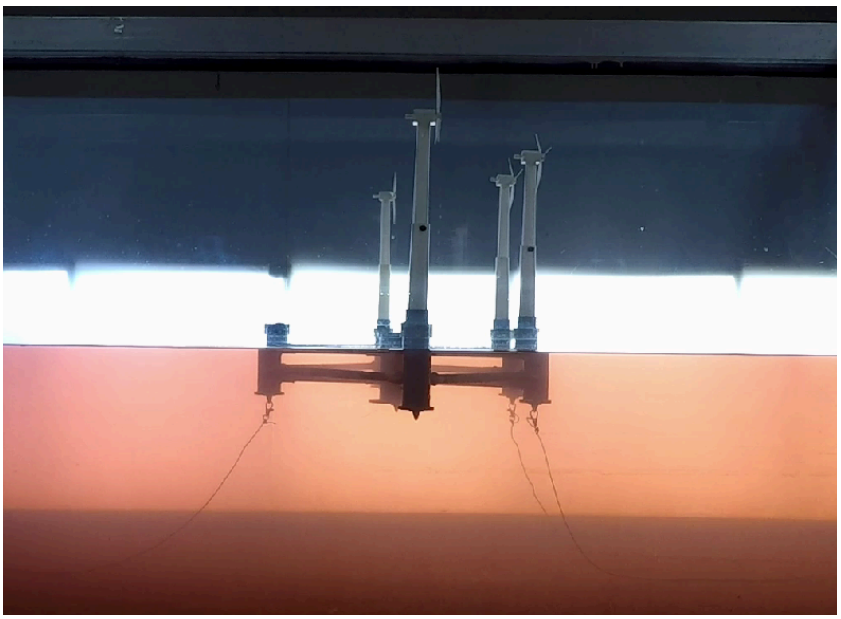


Figura 88: Modelo de P4 65% de calado preparada para prueba de oleaje

Para ejemplificar cómo quedó el modelo de la Plataforma Triangular a un calado del 65% en el video donde se realizaron todas las mediciones de imagen, se tiene la Figura 89.

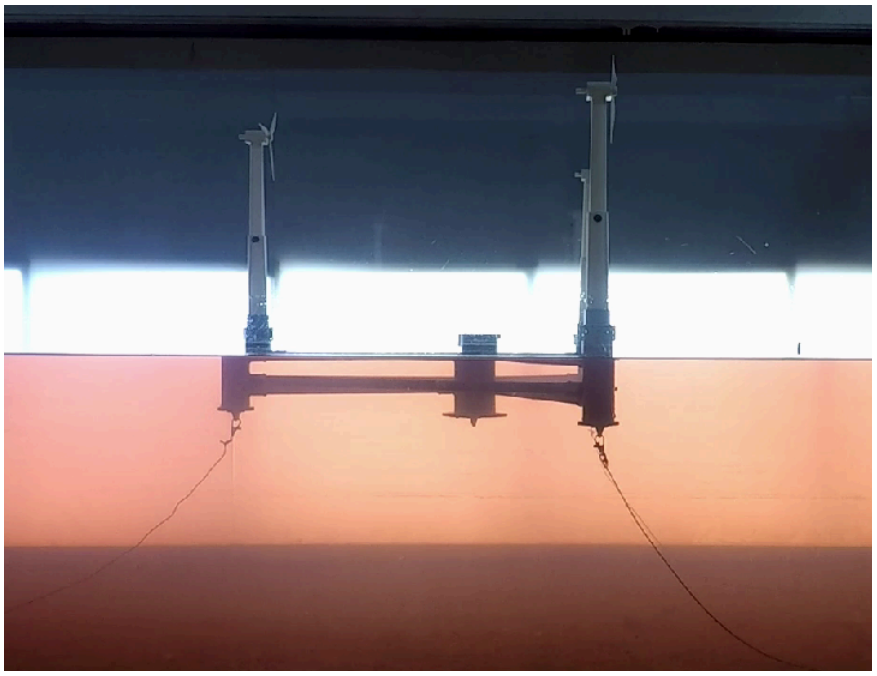


Figura 89: Modelo de T3 65% de calado preparada para prueba de oleaje

Para ejemplificar cómo quedó el modelo Mono-Turbina a un calado del 65% en el video donde se realizaron todas las mediciones de imagen, se tiene la Figura 90.

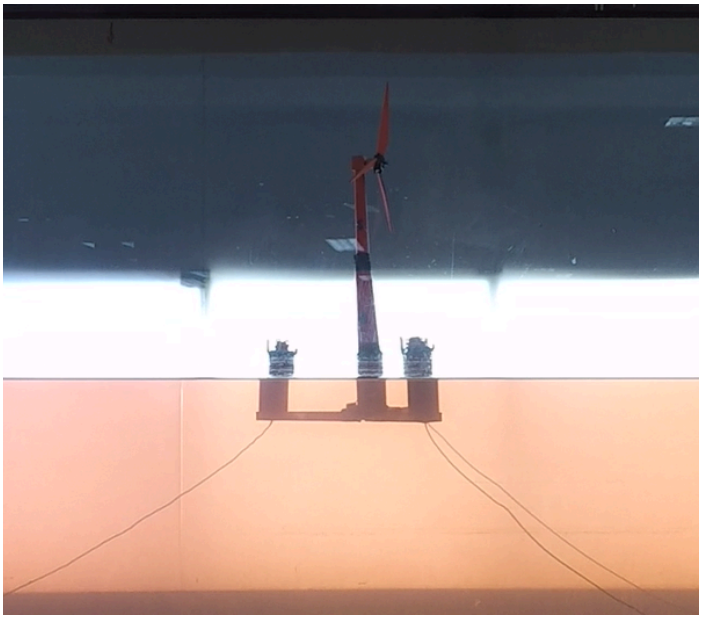


Figura 90: Modelo de mono-aerogenerador 65% de calado preparada para prueba de oleaje

6.13. Procesamiento de datos

6.13.1. Descripción de software de análisis Tracker

Para analizar los desplazamientos de los modelos, se optó por emplear el software gratuito Tracker 6.1.x. Este programa constituye una herramienta de análisis y modelación de videos creada en Open Source Physics (OPS) JAVA, con el propósito de facilitar estudios físicos. Este software posibilita el seguimiento, ya sea manual o automático, de un objeto claramente identificable en un archivo de video. Para llevar a cabo un seguimiento automático (AutoTracker), es fundamental que las características del objeto de interés sean constantes en forma, tamaño, color y orientación en todos los cuadros del video. De este modo, AutoTracker genera una imagen temporal (template) que luego compara con los fotogramas subsiguientes para identificar el objeto que mejor concuerde (Match) con la imagen inicial. A partir de este análisis, se obtienen los datos necesarios.
Se optó por emplear este enfoque en lugar del análisis manual, ya que proporciona un proceso de evaluación más ágil y una mayor coherencia en la información.

¿Cómo hacer el análisis de video?

- Abrir un archivo de video.

- Identificar los pixeles de interés que se desea analizar
- Calibrar la escala del video con ayuda de dos lineas situada en la pared frontal del canal de olas de longitud igual a 10 [cm].
- Establecer Ejes de coordenadas. Visualizar ejes establecidos. Situar origen del sistema de coordenadas. Determinar el ángulo del sistema de coordenadas. Asegurar ejes.
- Identificar el objeto del video al cual se le quiere hacer seguimiento en modo Autotracker. En este paso se genera la máscara que será rastreada en los cuadros de videos siguientes.
- Ejecutar la búsqueda en los cuadros de video sucesivos.

Gráficos y análisis de trayectorias:

Los parámetros cinemáticos y dinámicos que se analizarán en las pruebas T03 (Prueba de oscilación forzada) se derivan después de seguir las trayectorias de las plataformas en el canal de olas, sujeta a la influencia del oleaje regular definido para cada uno de los estados del mar. El proceso de seguimiento se explica a continuación:

1. Se utilizaron los filtros que están disponibles en el programa que permiten modificar la imagen del video para resaltar las plataformas y facilitar así el rastreo del software (cabe destacar que no fue necesario utilizar filtros en algunos videos con baja altura y periodo). Para lo anterior se despliega la pestaña Video de la barra de herramientas y se selecciona la opción Filters para aplicar los filtros correspondientes, tal como se muestra en la figura 91.

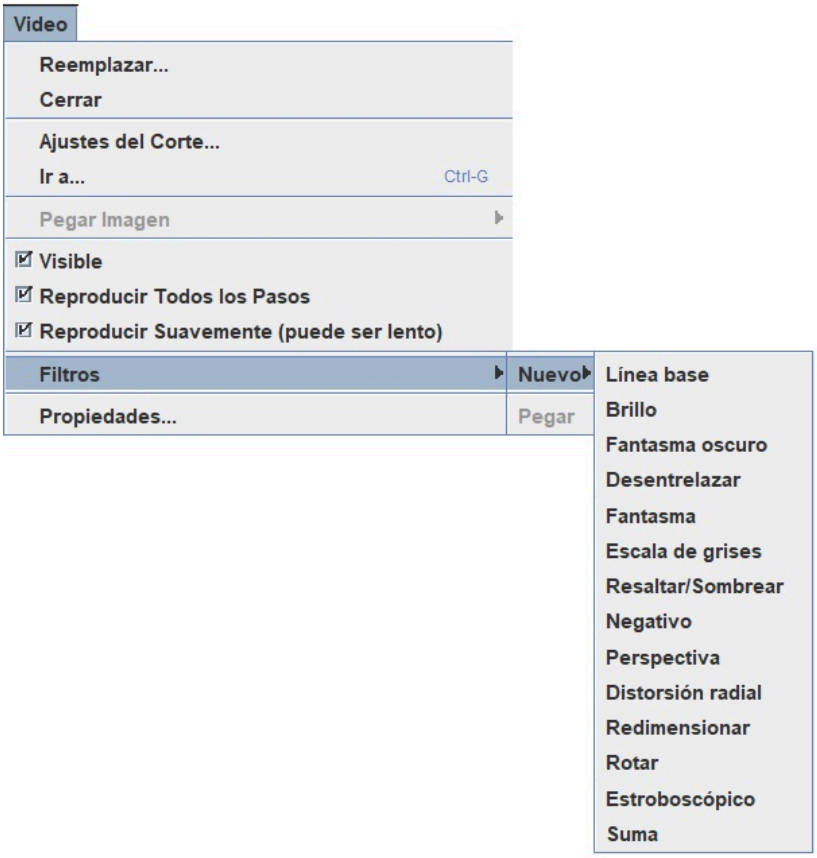


Figura 91: Aplicación de filtros software tracker.

Un filtro utilizado es el **Negativo**, el cual produce una imagen negativa que deja la plataforma con un color grisáceo y en contraste con un fondo negro. De igual forma, se puede seguir el punto negro que en negativo es blanco y este contrasta con la plataforma y el fondo, al mismo tiempo permite visualizar la linea de agua en color blanco, cada vez que pasa una ola.

El otro filtro usado es el **Brillo**, el cual se utiliza para complementar el efecto Negativo, este filtro tiene ajustes tanto para brillo como para contraste, Las propiedades del filtro son ajustadas tal que el brillo toma un valor de −35, y el contraste de 85, como se muestra en la figura 92.



Figura 92: Aplicación de filtro de Brillo/Contraste software tracker.

2. Se sitúa el eje de coordenadas tal que el eje horizontal calza con la línea de agua quieta y el eje vertical con el centro de la plataforma

3. Luego de situar el origen de coordenadas se procede a activar la vara de calibración de tal forma que se ajusta la longitud a 10[cm] con ayuda de 2 líneas negras en el vidrio frontal del canal que tienen dicha longitud de separación.

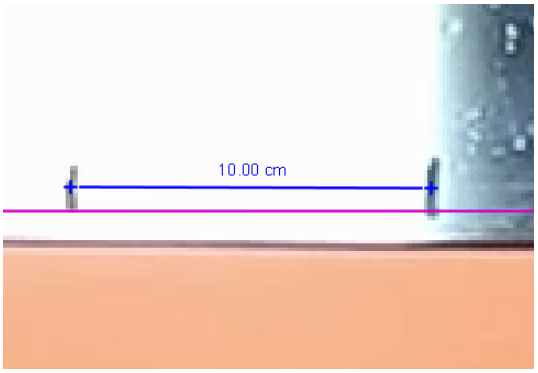


Figura 93: Vara de calibración en líneas separadas

A continuación se muestra el ejemplo de configuración inicial de rastreo para el modelo de plataforma pentagonal al 65% de calado con un estado de mar H3T3

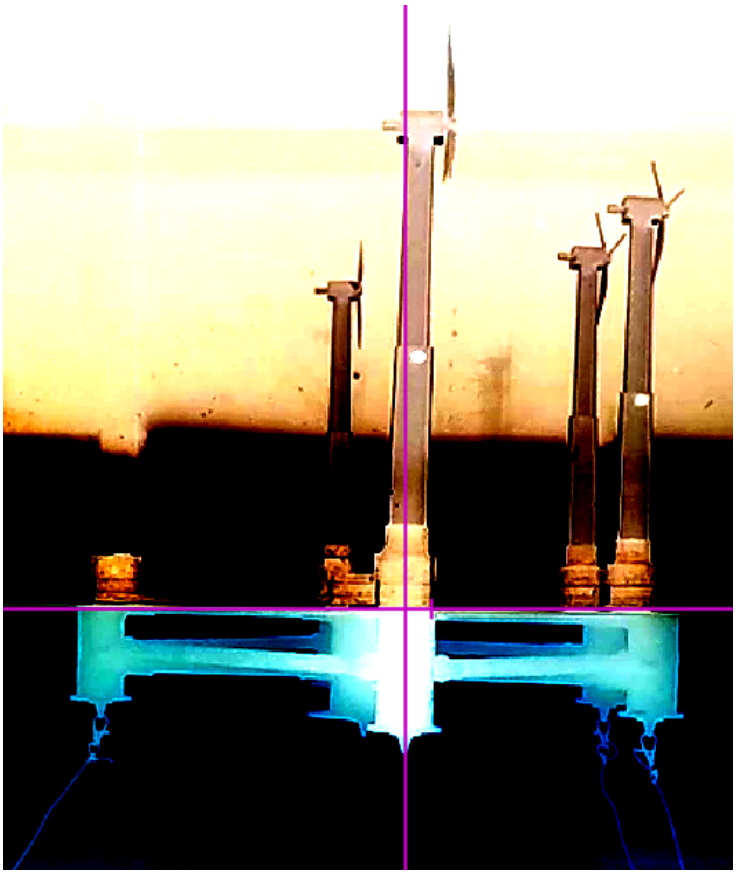


Figura 94: Configuración inicial de rastreo modelo PSPM 65%, H3T3

4. Después de efectuar las adaptaciones previas mencionadas, se procede a realizar la función de autotracker. Para llevar a cabo este proceso, se establece el punto inicial de seguimiento (Rastreo) en el

punto negro (o blanco en negativo) de la turbina dispuesta para este propósito (Figura 95) y en la quilla de la misma turbina (Figura 96). Se elige una Tasa de evolución del 10% y una Automarca de 4.

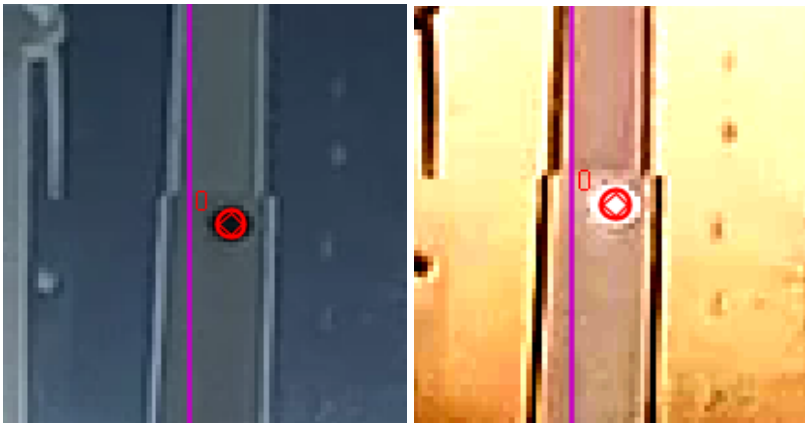


Figura 95: Rastreo de trayectoria en turbina



Figura 96: Rastreo de trayectoria en quilla de turbina

5. Utilizando la información recopilada durante el seguimiento, se generan las curvas de desplazamiento vertical (y) y horizontal (x). Con el propósito de eliminar la distorsión originada por la paleta generadora en el análisis estadístico, se elige una ventana de tiempo que depende del análisis de los resistores al evaluar en qué momento se produjeron las alturas significativas y periodos que sirven para la medición.

6.14. Postproceso de datos

6.14.1. Descripción de software MATLAB

MATLAB es una herramienta computacional ampliamente utilizada en diversas disciplinas científicas e ingenieriles. Desarrollado por MathWorks, este software proporciona un entorno interactivo para la programación, visualización y análisis de datos, así como para la implementación de algoritmos y modelos matemáticos.

Algunas características destacadas de MATLAB:

Lenguaje de Programación: MATLAB utiliza su propio lenguaje de programación, que se centra en la manipulación de matrices y matrices multidimensionales. Este enfoque facilita la implementación eficiente de algoritmos y operaciones matriciales.

Entorno Interactivo: MATLAB ofrece un entorno de desarrollo interactivo que permite a los usuarios ejecutar comandos y scripts paso a paso, facilitando la exploración y el análisis de datos de manera dinámica.

Visualización Avanzada: La plataforma incluye herramientas poderosas para la visualización de datos en forma de gráficos, diagramas y animaciones. Esto facilita la comprensión y presentación efectiva de resultados.

Amplia Biblioteca de Funciones: MATLAB cuenta con una amplia biblioteca de funciones incorporadas que abarcan áreas como álgebra lineal, estadísticas, procesamiento de señales, optimización y más. Esto simplifica la implementación de algoritmos complejos sin necesidad de escribir código desde cero.

Aplicaciones Especializadas: Además de sus capacidades generales, MATLAB también ofrece soluciones específicas para áreas como procesamiento de imágenes, aprendizaje automático, visión por computadora, bioinformática, entre otras.

En resumen, MATLAB es una herramienta versátil que se ha convertido en un estándar en la academia y la industria para el análisis numérico, la simulación y el desarrollo de algoritmos en una amplia gama de disciplinas científicas e ingenieriles. Su flexibilidad y potencia lo hacen indispensable para investigadores y profesionales que buscan una plataforma integral para abordar problemas complejos.

7. Resultados

7.1. T01 - Prueba de plataforma seca

En esta sección se exponen los resultados derivados de la T01 - prueba de plataforma seca. Se explica el resultado de la revisión y corrección de la plataforma, así como su nivelación con una distribución uniforme de peso siguiendo la metodología sugerida en la sección 6.9.1.

Después de la impresión completa de las piezas de las plataformas se probó su impermeabilidad, lo cual fue muy deficiente, así que se tomó la decisión de pintar con pintura epoxica las piezas para que fueran impermeables, sin embargo como se detalla en la sección 6.11.1 Diseño y Fabricación, la pintura trajo problemas en el ensamblaje, que posteriormente fueron solucionados. Al mismo tiempo se soluciono el problema que se detalla en la sección 6.12.1 con respecto a los agujeros que fueron tapados con la pintura y la unión de las piezas cilindro-turbina.

El resultado de la nivelación uniforme de peso fue insatisfactorio, ya que como se detalla en la sección 6.12.2, el peso realizado por piedras y arena sobrepasaba la capacidad de la plataforma para flotar.

7.2. T02 - Prueba de plataforma húmeda

En esta sección se exponen los resultados derivados de la T02 - Prueba de plataforma húmeda. En las tablas siguientes se muestran las masas que cada plataforma necesitaba tener para poder sumergirse al calado deseado, siguiendo la metodología sugerida en la sección 6.9.2.

La tabla de valores de la Plataforma Pentagonal es la siguiente:

Alto de Calado en Cilindro	Calado [cm]	Volumen Sumergido [cm^3]	Vol Sumergido / Vol total [%]	Masa Total [g]
Natural Estable	5,8	1153,8	45	1125
50 %	6,2	1190,3	46	1148
65 %	8,1	1473,5	57	1422

Tabla 13: Parámetros característicos de flotabilidad de Plataforma Pentagonal

Las figuras siguientes muestran al cilindro medio central que resultó después de realizar el ajuste de masa en los diferentes calados, este cilindro es importante ya que las mediciones de movimiento en el video son a partir de este cilindro. ***Se debe recordar que se le agrega 4 [mm] al número que se ve en la Figura por la altura de la quilla.***

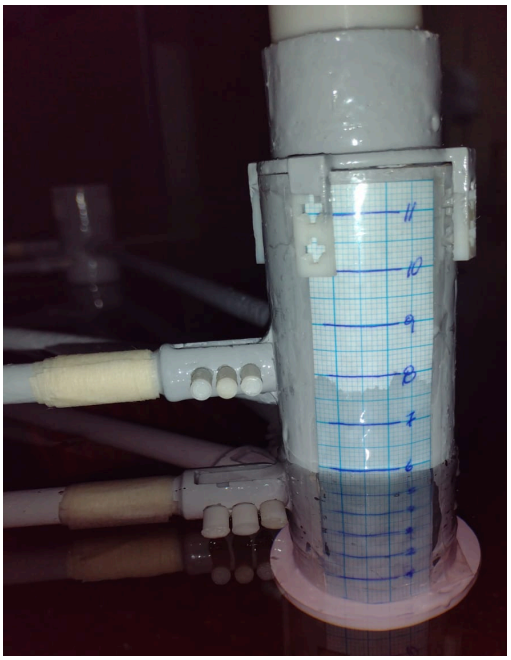


Figura 97: Cilindro medio central 50% de calado P4

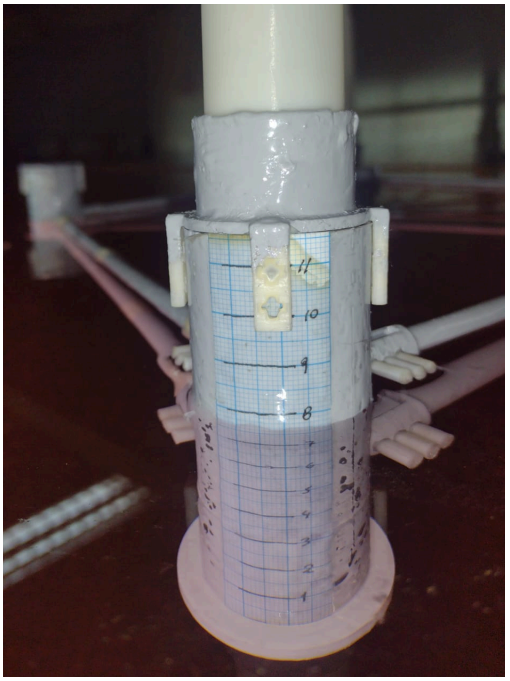


Figura 98: Cilindro medio central 65% de calado P4

La tabla de valores de la Plataforma Triangular es la siguiente:

Alto de Calado en Cilindro	Calado [cm]	Volumen Sumergido [cm^3]	Vol Sumergido/Vol total [%]	Masa Total [g]
Natural Estable	4,8	938,5	47	841
50 %	6,2	964,9	48	918
65 %	8,1	1163,9	58	1121

Tabla 14: Parámetros característicos de flotabilidad de Plataforma Triangular

Similar a como se señaló anteriormente, las figuras siguientes muestran al cilindro frontal que resultó después de realizar el ajuste de masa en los diferentes calados, y no usará el cilindro central, ya que no nos presentaría una medición tan detallada. ***Se debe recordar que se le agrega 4 [mm] al número que se ve en la Figura por la altura de la quilla.***

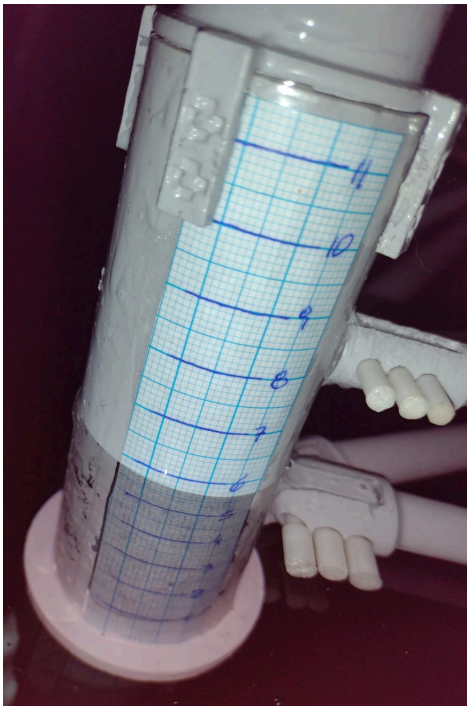


Figura 99: Cilindro medio central 50% de calado T3

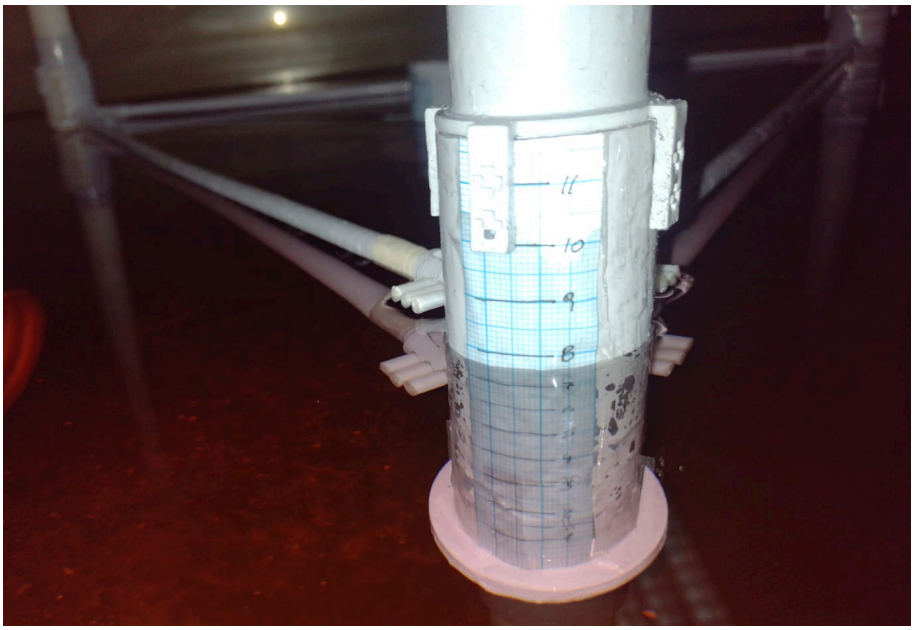


Figura 100: Cilindro medio central 65% de calado T3

7.3. T03 - Prueba de Estabilidad Residual

En esta sección, se exponen los resultados clave obtenidos de la T03 - Prueba de Estabilidad Residual después de seguir los puntos de las plataformas en los ejes horizontal y vertical durante los 2 [min] en los que se realizó la prueba.

A continuación se presentará los resultados obtenidos de la Plataforma Pentagonal en condiciones del estado de oleaje H1T1 con un calado del 50%, esto es para mostrar la primera medición que se realizó en el canal de olas, el resto de resultados de mediciones obtenidas serán plasmadas en la sección de Anexo de la manera que se detalla a continuación:

Se define en un principio el modelo a usar, porcentaje de calado, el estado de mar, las condiciones del laboratorio, la conversión de oleaje ideal y la conversión de oleaje real con sus respectivos gráficos de resistores mostrando la amplitud de onda [V] y frecuencia [Hz], además de los parámetros de altura significativa [Hs] y periodo significativo [Ts]. Posteriormente se presentan las curvas de trayectoria, posición vertical (Z), posición horizontal (X), velocidad en eje vertical (Vz) y fuerza neta (Fn), más adelante se explicara el post proceso de estos datos. En la leyenda de los gráficos se ve el código del estado de oleaje junto a la letra “C” que significa que se rastreó un punto a la mitad de la turbina, y la letra “CB” que significa que se rastreó la quilla que está bajo el agua. En la leyenda de velocidad se compara el movimiento vertical entre la plataforma y el oleaje.

La diferencia entre los parámetros ideales y reales que se utilizaron y que se ilustran con las tablas y gráficos del ejemplo posterior, radica en que los parámetros ideales son la conversión directa de los estados de mar a prototipar junto con la conversión de sus parámetros que utilizará el motor de la paleta. Los parámetros reales son los estados de mar y parámetros de motor que fueron utilizados, ya que al momento de

ser medidos por los resistores, en especifico el resistor N° 2 que es el que se encuentra antes de las plataformas, fue capaz de medir un estado de mar similar al que se pedía para el modelo después de escalar el estado de mar del prototipo.

7.3.1. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H1T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19, 2	19,4	18%

Tabla 15: Condiciones de laboratorio P4 50%, HIT1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10	5	1.41	0.092197	0.70711

Tabla 16: Conversión de oleaje ideal

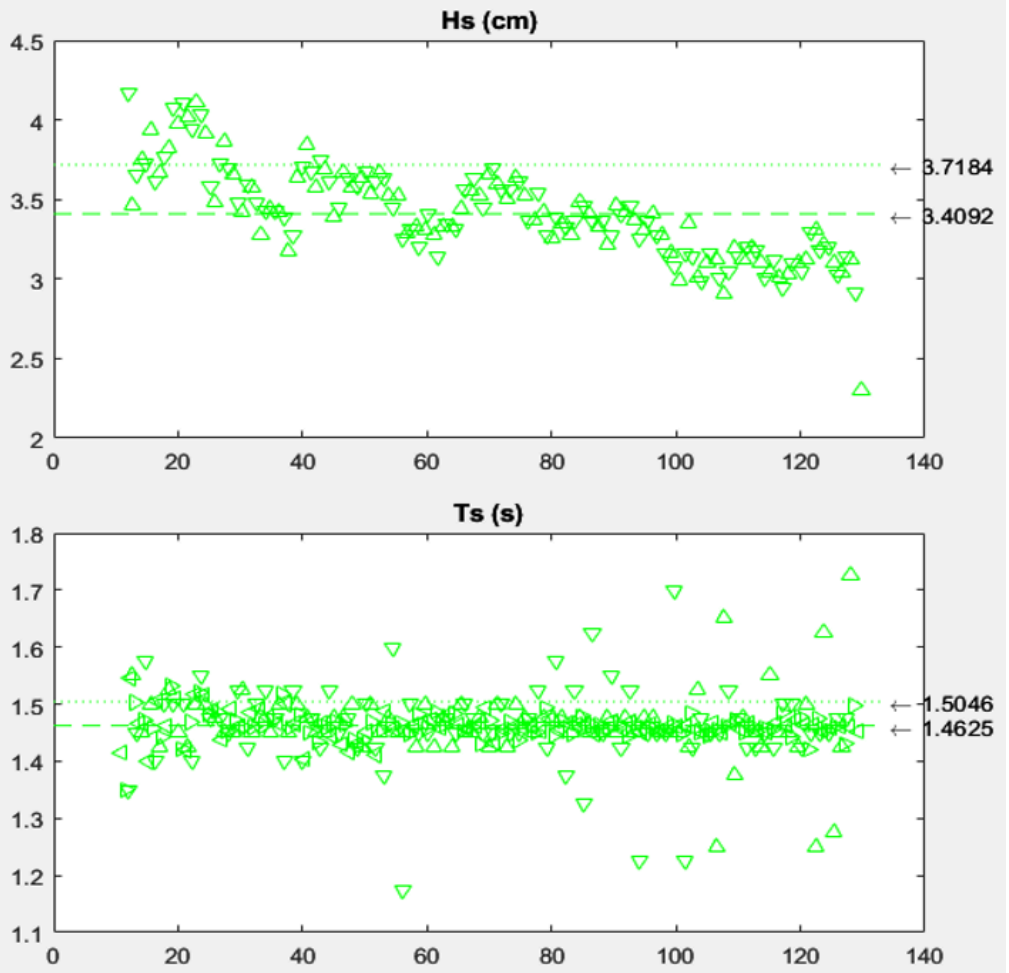


Gráfico 10: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.2	9.7	6.4	1.37	0.11335	0.72898

Tabla 17: Conversión de oleaje real

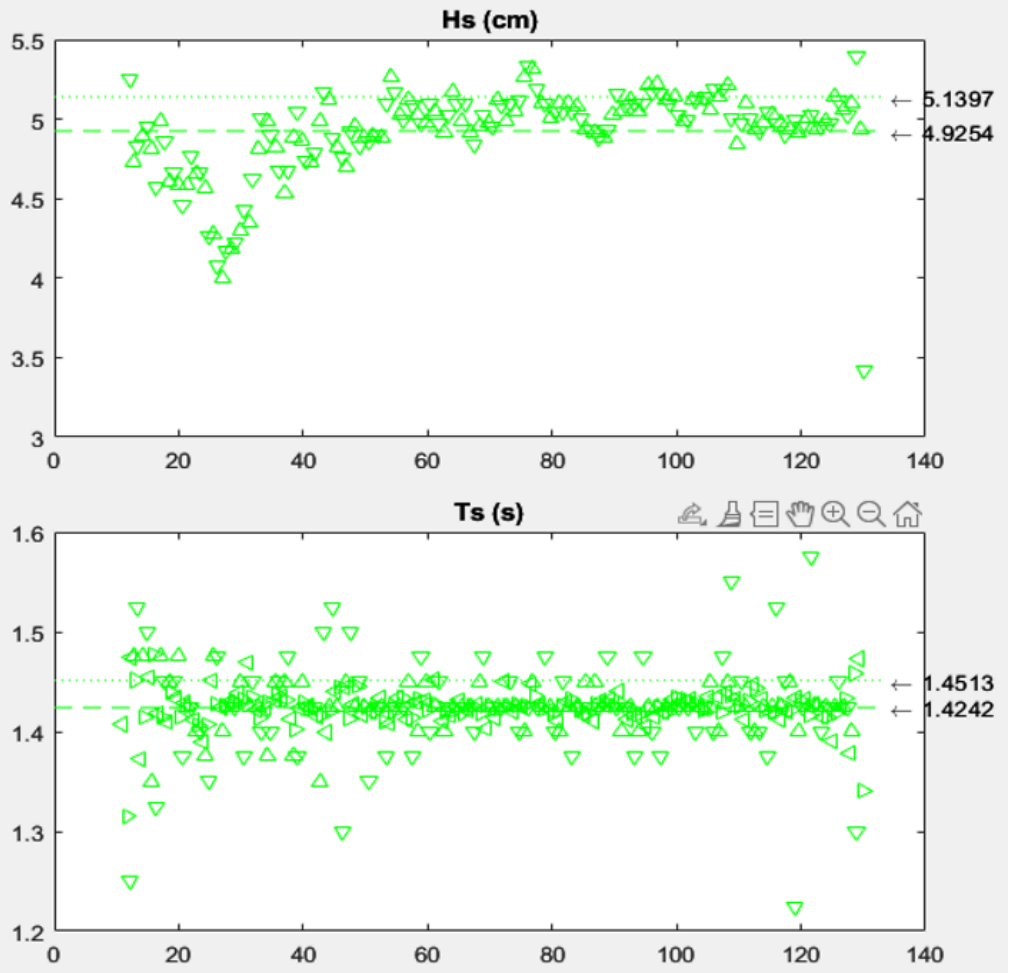


Gráfico 11: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

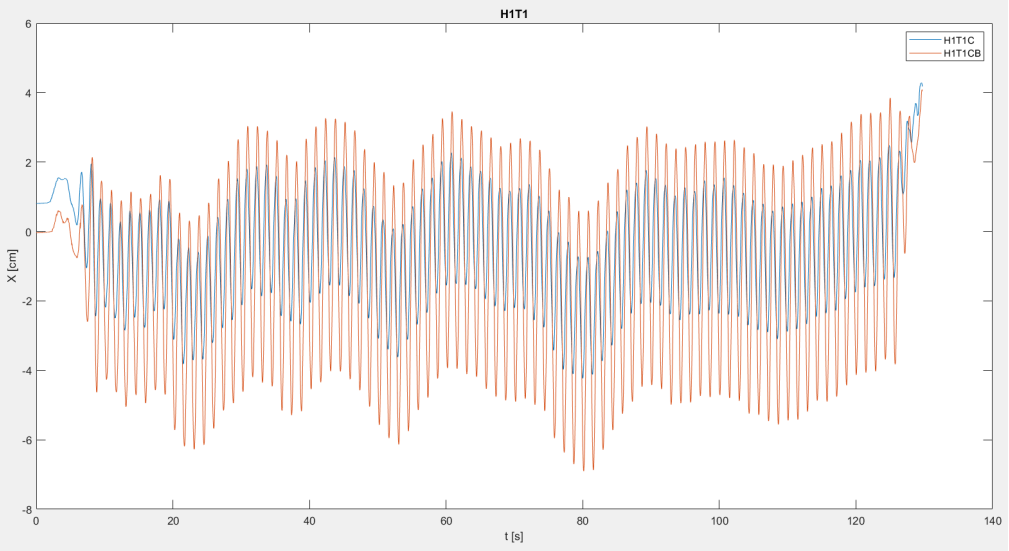


Gráfico 12: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

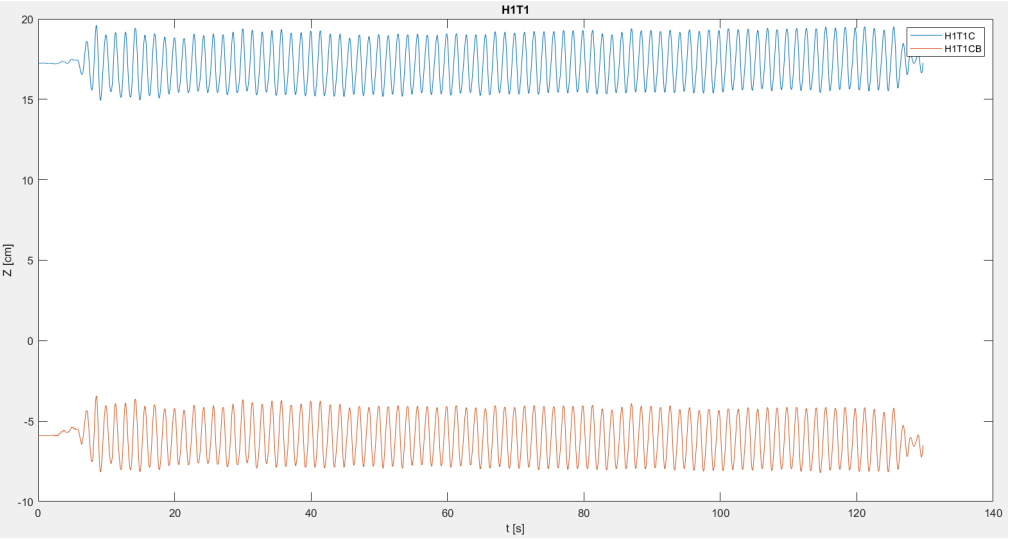


Gráfico 13: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

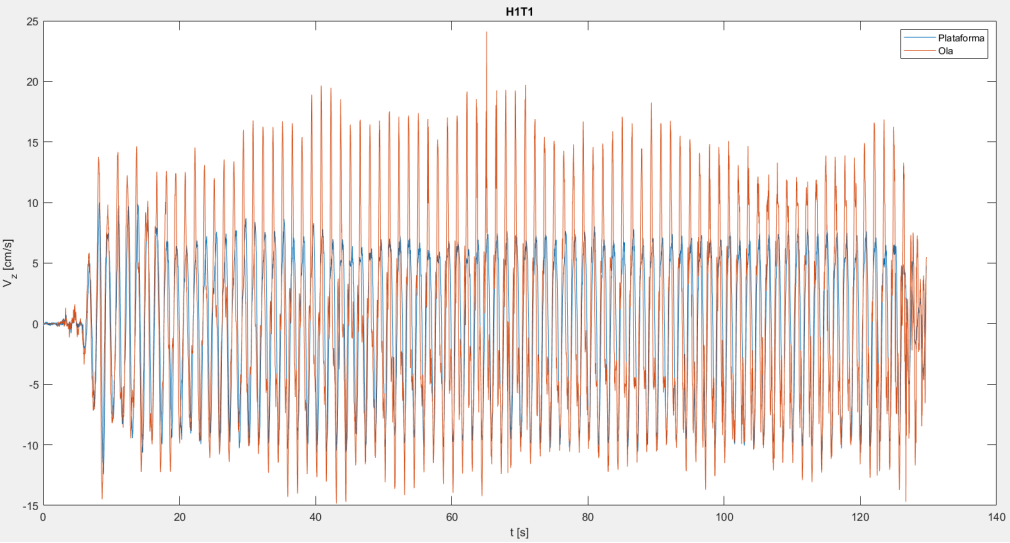


Gráfico 14: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

8. Análisis de Resultados

8.1. Validación de propiedades de masa

En esta sección se presentan los resultados de propiedades de masa y flotabilidad en condiciones estáticas de las plataformas, siendo más específico el valor de GM.

8.1.1. Modelo P4

En la sección 6.8.1 se describió la forma en que se obtuvo el valor del centro de gravedad para esta plataforma y para un calado del 50% de sumersión, la cual dio como resultado KG = 13,91 [cm]. De la misma manera el centro de boyantes a este calado es de KB = 4,44 [cm]. El volumen desplazado por la

sumersión a este calado fue de V_S = 1190,3 [cm^3]. También se pudo obtener el momento de inercia de la plataforma el cual es I_X = 70249,19 [cm^4]. De acuerdo a la fórmula 41 de la sección 4.11.6, se pudo obtener la distancia entre el centro de boyantes y el metacentro dando como resultado, BM = 59,02 [cm]. Y ahora si se considera esta distancia, es posible calcular la altura metacéntrica del modelo, tal como se muestra en la sección 4.11.7:

$$GM = BM - BG = BM - (KG - KB) = 49,55 \text{ [cm]} \qquad (53)$$

Para esta misma plataforma pero con un calado del 65% de sumersión, el centro de gravedad es igual que en el calado anterior, ya que el área de la plataforma no cambia, mientras que el centro de boyantes si cambia y tiene un valor de KB = 5,37 [cm]. Lo anterior sucede porque el volumen desplazado por la sumersión a este otro calado tiene un valor de V_S = 1473,5 [cm^3]. Al igual que no cambia el área de la plataforma tampoco lo hace su momento de inercia, por lo que este será igual que el anterior. Con estos datos se obtiene que el valor de BM = 47,65 [cm]. Y de la misma manera el cálculo de GM se ve de la siguiente forma:

$$GM = BM - BG = BM - (KG - KB) = 39,14 \text{ [cm]} \qquad (54)$$

Un ejemplo de los diagramas que se presentan con estas fórmulas se muestra a continuación:

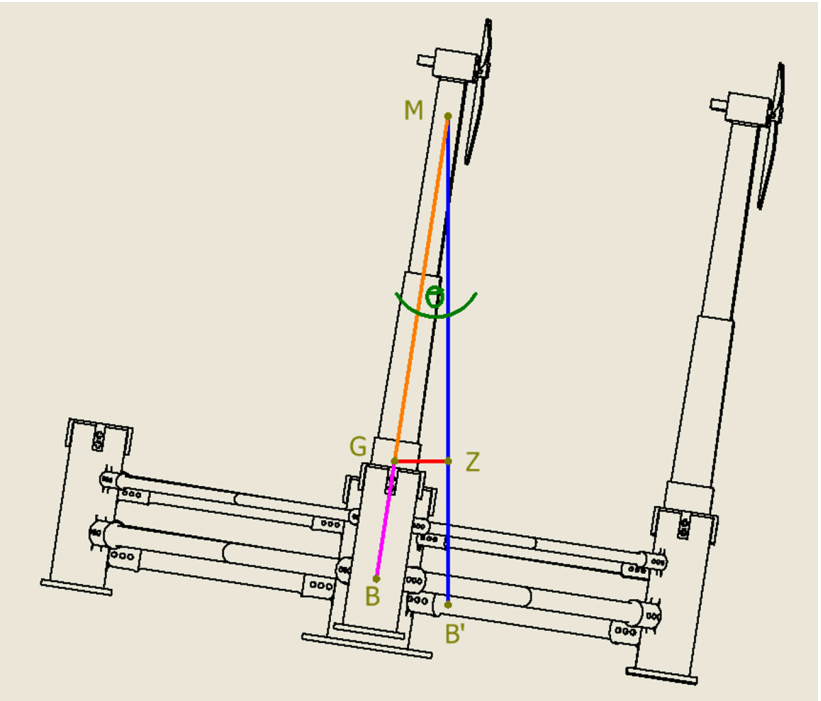


Figura 101: Diagrama de adrizamiento modelo P4, 65% calado

8.1.2. Modelo T3

Para este otro modelo también en la sección 6.8.1 se explicó el método empleado para determinar el centro de gravedad de esta plataforma, resultando en un valor de KG = 13,41 [cm] para un calado del 50% de inmersión. Del mismo modo, el centro de boyantes para este nivel de calado es de KB = 4,49 [cm]. El volumen desplazado debido a la inmersión en este calado se estableció en V_S = 964,9 [cm^3]. Se logró también determinar el momento de inercia de la plataforma, representado por I_X = 111194,83 [cm^4]. Siguiendo la fórmula 41 de la sección 4.11.6, se derivó la distancia entre el centro de boyantes y el metacentro, obteniendo BM = 115,24 [cm]. Considerando esta distancia, es viable calcular la altura metacéntrica del modelo, como se detalla en la sección 4.11.7:

$$GM = BM - BG = BM - (KG - KB) = 106{,}32 \text{ [cm]} \qquad (55)$$

En el caso de esta plataforma pero con un calado del 65% de inmersión, el centro de gravedad también permanece igual como el del calado anterior, ya que el área de la plataforma no varía. Sin embargo, el centro de boyantes sí experimenta un cambio y se establece en KB = 5,44 [cm]. Este ajuste se debe al volumen desplazado por la inmersión en este nuevo calado, que tiene un valor de V_S = 1163,88 [cm^3]. Al igual que el área de la plataforma, su momento de inercia permanece constante. Con estos datos, se determina que el valor de BM = 47,65 [cm]. De manera análoga, el cálculo de GM se expone de la siguiente manera:

$$GM = BM - BG = BM - (KG - KB) = 87{,}57 \text{ [cm]} \qquad (56)$$

8.1.3. Modelo Mono-Turbina

De igual manera que en los modelos anteriores en la sección 6.8.1 se explicó cómo se determinó el centro de gravedad de esta plataforma con un calado del 65% de inmersión, resultando en KG = 11,92 [cm]. De manera similar, el centro de boyantes en este calado se estableció en KB = 2,63 [cm]. El volumen desplazado por la inmersión en este calado fue de V_S = 323,7 [cm^3]. Asimismo, se obtuvo el momento de inercia de la plataforma, representado por I_X = 6602,8 [cm^4]. Aplicando la fórmula 41 de la sección 4.11.6, se determinó la distancia entre el centro de boyantes y el metacentro, resultando en BM = 20,4 [cm]. Considerando esta distancia, es factible calcular la altura metacéntrica del modelo, como se detalla en la sección 4.11.7:

$$GM = BM - BG = BM - (KG - KB) = 11{,}11 \text{ [cm]} \quad (57)$$

8.2. T03 - Estabilidad Residual

En este siguiente paso en el procesamiento de la información experimental, consiste en obtener el ángulo de adrizamiento, el cual se logra al restar las distancias de todos los puntos obtenidos de la turbina y la quilla en el eje x, esto se hace después de pasar la información del movimiento de las plataformas desde el Tracker al Matlab. ya que se sabe la altura que hay entre la quilla y la turbina, se puede calcular todos los ángulos de adrizamiento a los que se le fue sometido a la plataforma y se extrajo el ángulo más grande o en otras palabras el más desfavorable. Cabe destacar que varias veces se acortó el intervalo de datos a procesar, ya que como se explicó anteriormente, el resistor en el canal de olas detectó algunas perturbaciones en el oleaje que se alejaban de los casos de estudio deseados, estos se pueden ver en los gráficos del resistor. Así que se extrajo el ángulo más desfavorable que estaba dentro del intervalo de oleajes coincidentes con la altura y periodo introducido.
Como se ve en la Figura 102, (a) es el valor que se obtiene con el análisis del Tracker, (c) es una distancia conocida y el valor de theta es el ángulo de adrizamiento.

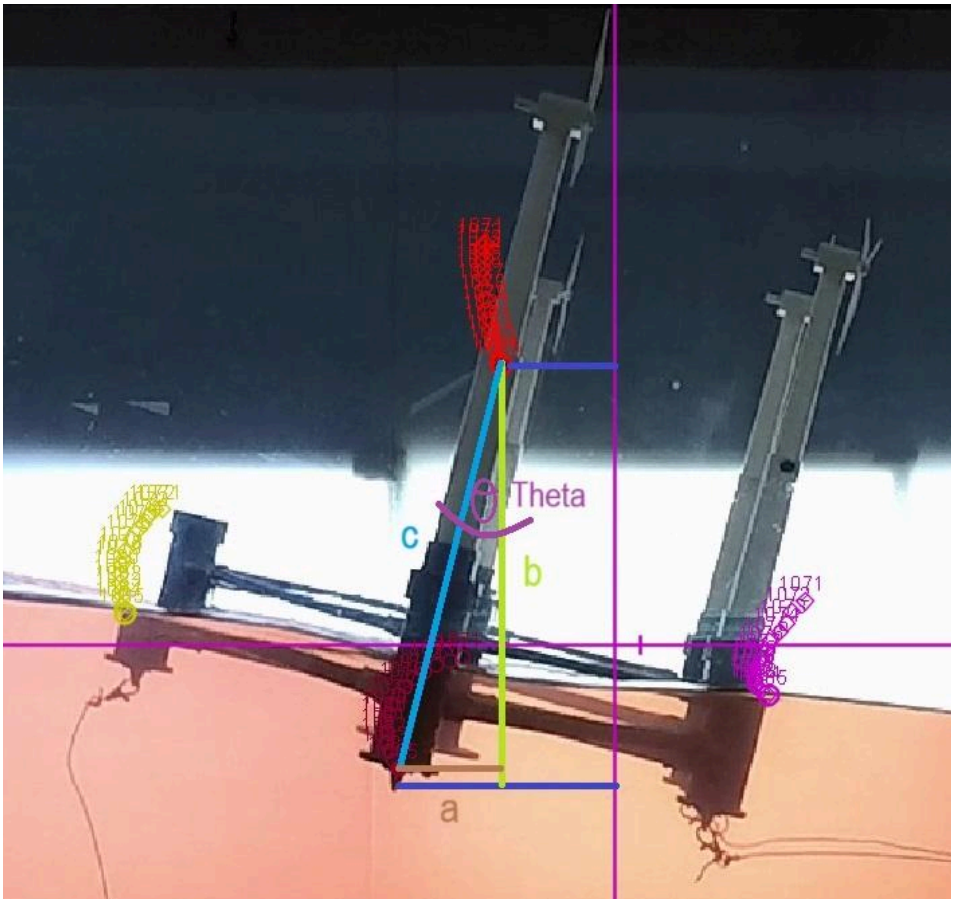


Figura 102: Diagrama para cálculo de ángulo de adrizamiento

Hay que destacar algo muy importante al momento de procesar la información obtenida, ya que el ángulo de adrizamiento y los cálculos que se desarrollan asociados

a este, son con respecto a la sumersión de la plataforma en el agua, sin embargo, por lo que se pudo extraer de los análisis, es que el oleaje inclina la plataforma pero no necesariamente la plataforma se inclina dentro del agua.

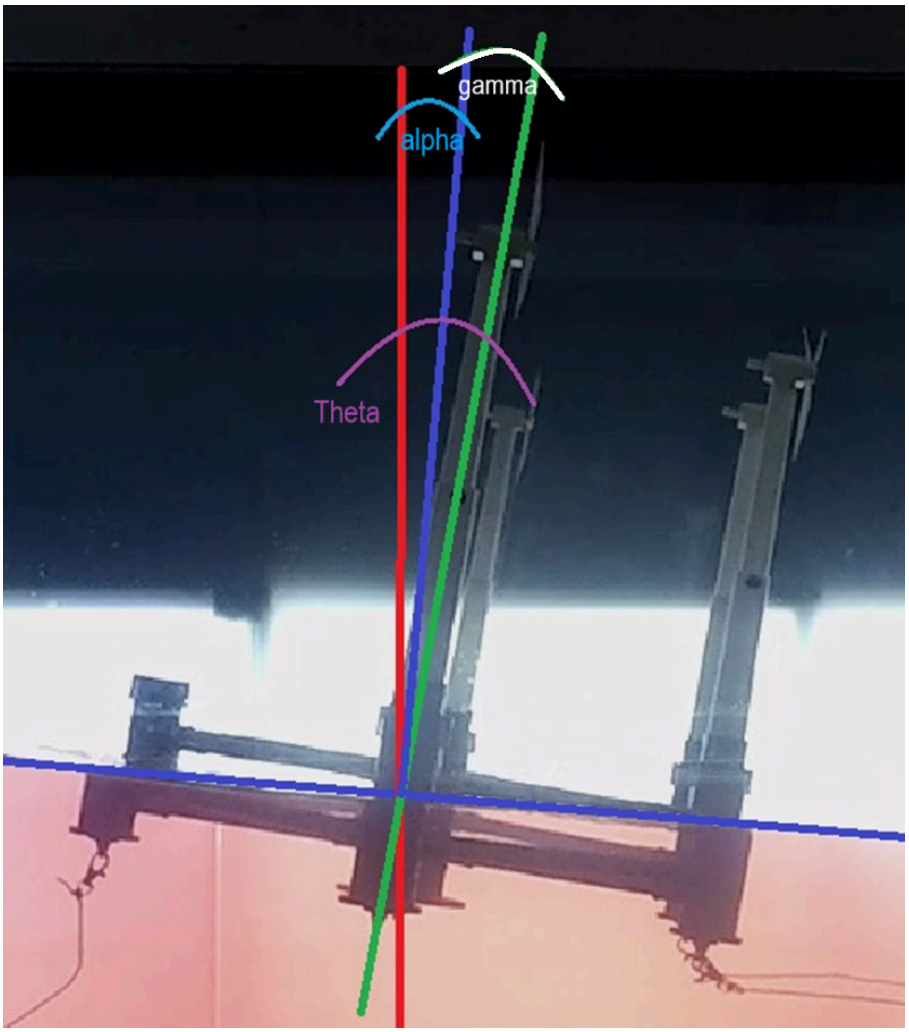


Figura 103: Ejemplificación de inclinación inercial y no inercial.

En la figura 103 se retrata la diferencia de estas inclinaciones, una de ellas fue llamada inclinación gravitacional o inclinación inercial (theta) mientras que la otra fue llamada inclinación marítima o inclinación no inercial (gamma). La inclinación inercial es la inclinación directa que tiene la plataforma con respecto a la vertical de la gravedad, mientras que la inclinación no inercial es la inclinación desde la normal o línea perpendicular a la superficie del agua hasta la plataforma.

Con los análisis del Tracker y Matlab se puede obtener el ángulo que produce la normal de la superficie del agua y la vertical de gravedad (alpha), esto se puede al seguir los puntos en que el oleaje toca la plataforma en ambos extremos. Así que solo se le resta alpha a theta para obtener el ángulo no inercial.

8.2.1. Modelo P4

Gráfico de Adrizamiento

Al graficar todos los datos de los diferentes estados de mar con los diferentes calados de la plataforma, se pudo obtener el gráfico de adrizamiento que se ve a continuación:

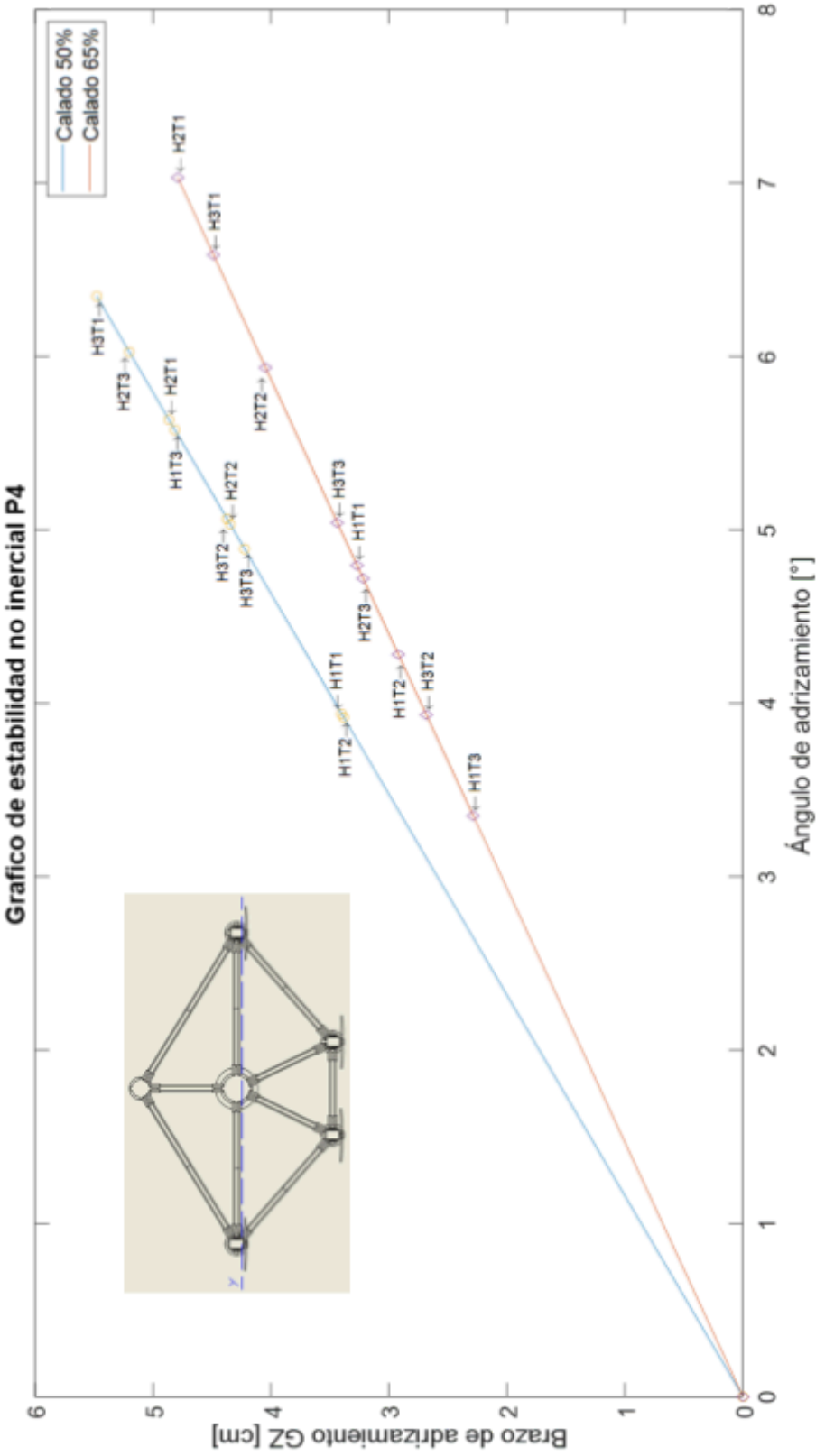


Gráfico 15: Gráfico de adrizamiento plataforma pentagonal, 50% y 65% de calado

El valor máximo del punto en el calado de 50% tiene un ángulo de 6,35 [°] y un brazo de 5,48 [cm], y el valor máximo del punto en el calado de 65% tiene un ángulo de 7,03 [°], y un brazo de 4,79 [cm].

La diferencia percentil entre ambas curvas es de un 21%, lo que significa que la plataforma pentagonal varía en 21% su estabilidad desde el calado de 65% hasta el calado de 50%.

Parametros Cinemáticos

A continuación se presentan los promedios de los valores proporcionados por el software de seguimiento Tracker y procesados por Matlab, tanto para las velocidades horizontal y vertical como para la magnitud de la velocidad. Del mismo modo, se muestran los promedios de las aceleraciones horizontal y vertical, así como la magnitud de la aceleración.

Estado de mar	v_x [cm/s]	v_z [cm/s]	v [cm/s]	a_x $[cm/s^2]$	a_z $[cm/s^2]$	a $[cm/s^2]$
H1T1	9.423	5.069	11.552	41.476	25.135	54.114
H1T2	7.27	5.184	9.833	30.512	25.083	43.796
H1T3	7.313	4.496	9.474	27.91	19.604	36.96
H2T1	13.657	7.879	17.251	63.009	38.539	80.484
H2T2	10.845	7.836	14.804	46.971	37.818	66.505
H2T3	11.335	7.237	14.756	41.861	28.543	55.37
H3T1	23.06	14.146	29.817	106.565	69.388	137.69
H3T2	20.365	12.813	26.435	85.686	55.165	111.837
H3T3	18.321	12.415	24.331	66.378	49.2	91.276

Tabla 18: Parámetros cinemáticos de P4, 50% de calado

Como se ve en la tabla anterior, el bajo periodo y gran altura de oleaje produce que la plataforma tenga mayor velocidad y aceleración sin importar el eje de medición o su magnitud. Sucede algo similar en el gráfico siguiente, con unas pocas diferencias.

Estado de mar	v_x [cm/s]	v_z [cm/s]	v [cm/s]	a_x $[cm/s^2]$	a_z $[cm/s^2]$	a $[cm/s^2]$
H1T1	8.613	5.196	10.995	43.592	35.744	61.834
H1T2	7.233	5.724	10.285	31.897	30.301	48.817
H1T3	6.89	4.568	8.894	26.886	20.564	38.031
H2T1	11.204	7.616	14.863	50.364	39.089	71.217
H2T2	10.879	8.356	15.287	45.498	42.699	68.803
H2T3	11.382	7.484	14.932	42.615	30.259	57.416
H3T1	22.81	15.059	30.026	102.749	72.564	138.433
H3T2	19.725	13.885	26.506	81.767	60.8	113.145
H3T3	18.013	12.556	24.204	66.021	52.925	93.115

Tabla 19: Parámetros cinemáticos de P4, 65% de calado

Parámetros Dinámicos

Utilizando las variables mencionadas anteriormente, se derivaron los valores de la fuerza neta horizontal y vertical, junto con la magnitud de la fuerza neta del modelo.

Estado de mar	F_{xn} [N]	F_{yn} [N]	F_n [N]
H1T1	0.476	0.289	0.621
H1T2	0.35	0.288	0.503
H1T3	0.32	0.225	0.424
H2T1	0.723	0.442	0.924
H2T2	0.539	0.434	0.763
H2T3	0.481	0.328	0.636
H3T1	1.223	0.797	1.581
H3T2	0.984	0.633	1.284
H3T3	0.762	0.565	1.048

Tabla 20: Parámetros dinámicos de P4, 50% de calado

Como se ve en la tabla anterior, el bajo periodo y gran altura de oleaje produce que la plataforma tenga mayor fuerza neta sin importar el eje de

medición o su magnitud. Sucede algo similar en el gráfico siguiente, con unas pocas diferencias.

Estado de mar	F_{xn} [N]	F_{yn} [N]	F_n [N]
H1T1	0.62	0.508	0.879
H1T2	0.454	0.431	0.694
H1T3	0.382	0.292	0.541
H2T1	0.716	1.013	1.013
H2T2	0.647	0.607	0.978
H2T3	0.606	0.43	0.816
H3T1	1.461	1.032	1.969
H3T2	1.163	0.865	1.609
H3T3	0.939	0.753	1.324

Tabla 21: Parámetros dinámicos de P4, 65% de calado

De estos datos cinemáticos y dinámicos serán resaltadas y comparadas las magnitudes, dejando dos tablas como las de a continuación:

Estado de mar	v [cm/s]	a [cm/s^2]	F_n [N]
Máximo	29.82	137.69	1.58
Mínimo	9.47	36.96	0.42
Promedio	17.58	75.34	0.86
Desv. Estándar	7.51	33.35	0.38

Tabla 22: Parámetros resumidos de P4, 50% de calado

Estado de mar	v [cm/s]	a [cm/s^2]	F_n [N]
Máximo	30.03	138.43	1.97
Mínimo	8.89	38.03	0.54
Promedio	17.33	76.76	1.09
Desv. Estándar	7.66	32.34	0.46

Tabla 23: Parámetros resumidos de P4, 65% de calado

Cinemáticamente la diferencia entre el mayor valor de velocidad de ambos calados es de un 0,7%, y la diferencia en la aceleración es de un 0,5%.

Se utilizó el método de los nodos para calcular las fuerzas a las que se sometieron las diferentes armaduras (en este caso pontones) de la plataforma pentagonal, utilizando la mayor fuerza neta medida en las tablas anteriores cuyos valores son 1,58 [N] y 1,97 [N], las cuales difieren entre sí en un 24,7%.

Dando como resultado que la mayor fuerza interna a la que se sometió un pontón en un calado del 50% es de 2,87 [N] y con un calado de 65% es de 3,55 [N]. Generando una diferencia de 23,7% en la fuerza interna del pontón.

8.2.2. Modelo T3

Al graficar todos los datos de los diferentes estados de mar con los diferentes calados de la plataforma, se pudo obtener el gráfico de adrizamiento que se ve a continuación:

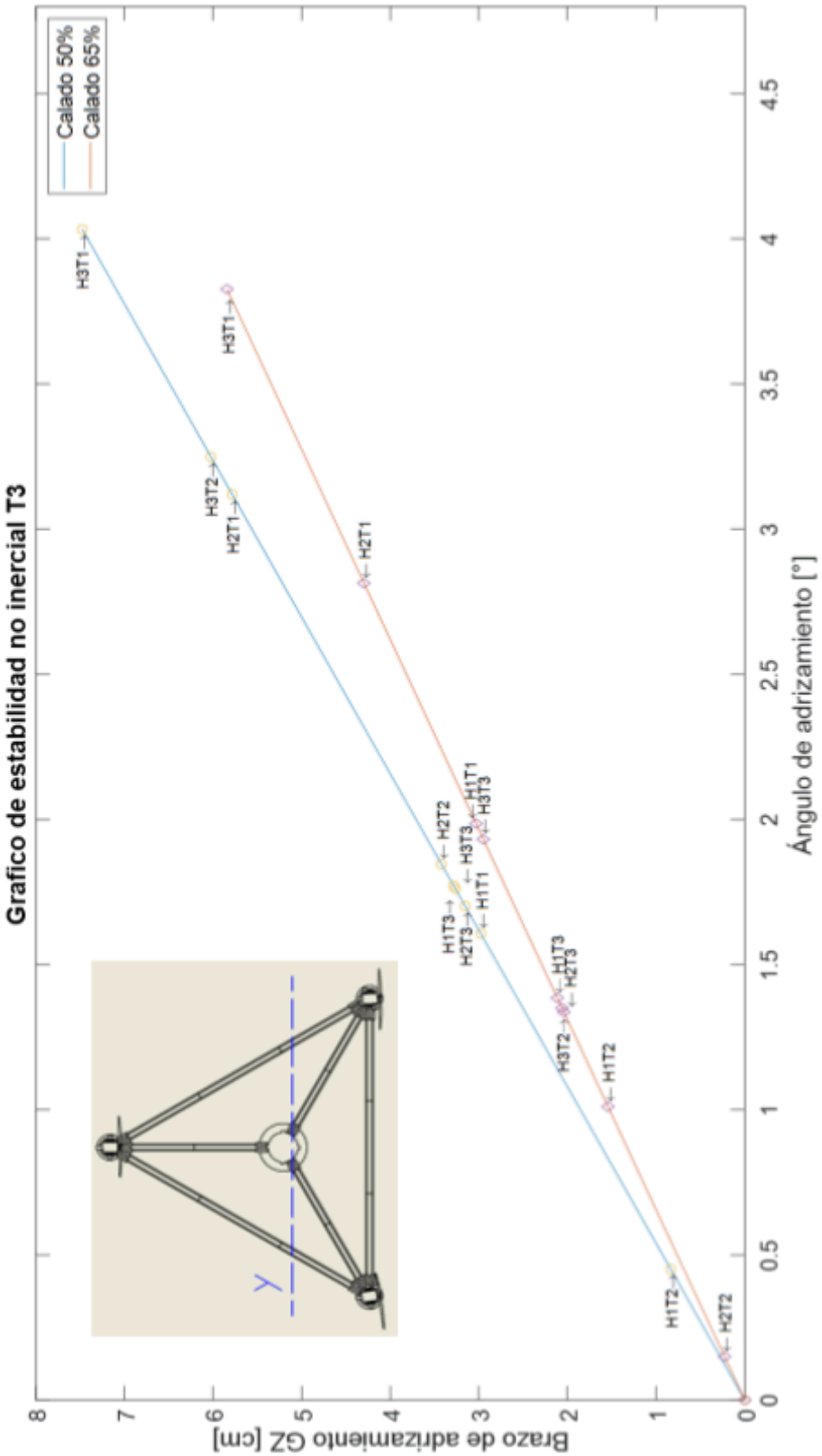


Gráfico 16: Gráfico de adrizamiento plataforma triangular, 50% y 65% de calado

El valor máximo del punto en el calado de 50% tiene un ángulo de 4,03 [°] y un brazo de 7,48 [cm], y el valor máximo del punto en el calado de 65% tiene un ángulo de 3,83 [°], y un brazo de 5,84 [cm]

La diferencia percentil entre ambas curvas es de un 18%, lo que significa que la plataforma pentagonal varía en 18% su estabilidad desde el calado de 65% hasta el calado de 50%.

Parametros Cinemáticos

A continuación se presentan los promedios de los valores proporcionados por el software de seguimiento Tracker y procesados por Matlab, tanto para las velocidades horizontal y vertical como para la magnitud de la velocidad. Del mismo modo, se muestran los promedios de las aceleraciones horizontal y vertical, así como la magnitud de la aceleración.

Estado de mar	v_x [cm/s]	v_z [cm/s]	v [cm/s]	a_x $[cm/s^2]$	a_z $[cm/s^2]$	a $[cm/s^2]$
H1T1	6.984	6.541	10.515	33.371	30.869	49.602
H1T2	6.589	7.056	10.697	28.449	30.787	46.744
H1T3	5.934	4.466	8.184	21.849	18.315	31.609
H2T1	11.631	9.988	16.914	52.588	45.997	77.096
H2T2	9.501	9.008	14.521	39.963	38.204	61.149
H2T3	9.568	6.743	13.051	37.084	29.962	52.118
H3T1	20.227	18.328	30.04	94.807	95.036	148.023
H3T2	18.324	16.163	27.11	76.411	72.335	115.908
H3T3	17.256	13.059	24.238	62.364	55.453	90.456

Tabla 24: Parámetros cinemáticos de T3, 50% de calado

Como se ve en la tabla anterior, el bajo periodo y gran altura de oleaje produce que la plataforma tenga mayor velocidad y aceleración sin importar el eje de medición o su magnitud. Sucede algo similar en el gráfico siguiente, con unas pocas diferencias.

Estado de mar	v_x [cm/s]	v_z [cm/s]	v [cm/s]	a_x $[cm/s^2]$	a_z $[cm/s^2]$	a $[cm/s^2]$
H1T1	6.42	5.658	9.261	29.709	27.421	44.354
H1T2	6.846	6.801	10.626	28.658	40.137	54.331
H1T3	6.086	4.41	8.354	24.509	26.275	38.975
H2T1	10.815	10.21	16.216	50.196	50.386	77.806
H2T2	10.207	8.953	15.164	42.734	47.053	69.324
H2T3	11.382	7.63	14.95	40.982	38.701	62.326
H3T1	20.876	18.985	30.915	93.318	92.073	145.93
H3T2	18.835	16.409	27.589	79.195	75.632	120.48
H3T3	17.327	12.71	23.531	62.037	54.977	92.157

Tabla 25: Parámetros cinemáticos de T3, 65% de calado

Parámetros Dinámicos

Utilizando las variables mencionadas anteriormente, se derivaron los valores de la fuerza neta horizontal y vertical, junto con la magnitud de la fuerza neta del modelo.

Estado de mar	F_{xn} [N]	F_{yn} [N]	F_n [N]
H1T1	0.306	0.283	0.455
H1T2	0.261	0.283	0.429
H1T3	0.201	0.168	0.29
H2T1	0.483	0.422	0.708
H2T2	0.367	0.351	0.561
H2T3	0.34	0.275	0.478
H3T1	0.87	0.872	1.359
H3T2	0.701	0.664	1.064
H3T3	0.573	0.509	0.83

Tabla 26: Parámetros dinámicos de T3, 50% de calado

Como se ve en la tabla anterior, el bajo periodo y gran altura de oleaje produce que la plataforma tenga mayor fuerza neta sin importar el eje de

medición o su magnitud. Sucede algo similar en el gráfico siguiente, con unas pocas diferencias.

Estado de mar	F_{xn} [N]	F_{yn} [N]	F_n [N]
H1T1	0.333	0.307	0.497
H1T2	0.321	0.45	0.609
H1T3	0.275	0.295	0.437
H2T1	0.563	0.565	0.872
H2T2	0.479	0.527	0.777
H2T3	0.459	0.434	0.699
H3T1	1.046	1.032	1.636
H3T2	0.888	0.848	1.351
H3T3	0.695	0.616	1.033

Tabla 27 Parámetros dinámicos de T3, 65% de calado

De estos datos cinemáticos y dinámicos serán resaltadas y comparadas las magnitudes, dejando dos tablas como las de a continuación:

Estado de mar	v [cm/s]	a [cm/s^2]	F_n [N]
Máximo	30.04	148.02	1.36
Mínimo	8.18	31.61	0.29
Promedio	17.25	74.75	0.69
Desv. Estándar	7.95	37.57	0.34

Tabla 28: Parámetros resumidos de T3, 50% de calado

Estado de mar	v [cm/s]	a [cm/s^2]	F_n [N]
Máximo	30.92	145.93	1.64
Mínimo	8.35	38.98	0.44
Promedio	17.4	78.41	0.88
Desv. Estándar	8.14	35.63	0.4

Tabla 29: Parámetros resumidos de T3, 65% de calado

Cinemáticamente la diferencia entre el mayor valor de velocidad de ambos calados es de un 2,9%, y la diferencia en la aceleración es de un 1,4%.

Se utilizó el método de los nodos para calcular las fuerzas a las que se sometieron las diferentes armaduras (en este caso pontones) de la plataforma pentagonal, utilizando la mayor fuerza neta medida en las tablas anteriores cuyos valores son 1,36 [N] y 1,64 [N], las cuales difieren entre sí en un 20,6%.

Dando como resultado que la mayor fuerza interna a la que se sometió un pontón en un calado del 50% es de 2,73 [N] y con un calado de 65% es de 3,3 [N]. Generando una diferencia de 20,9% en la fuerza interna del pontón.

8.2.3. Modelo Mono-Turbina

Al graficar todos los datos de los diferentes estados de mar y con un solo calado de la plataforma, se pudo obtener el gráfico de adrizamiento que se ve a continuación:

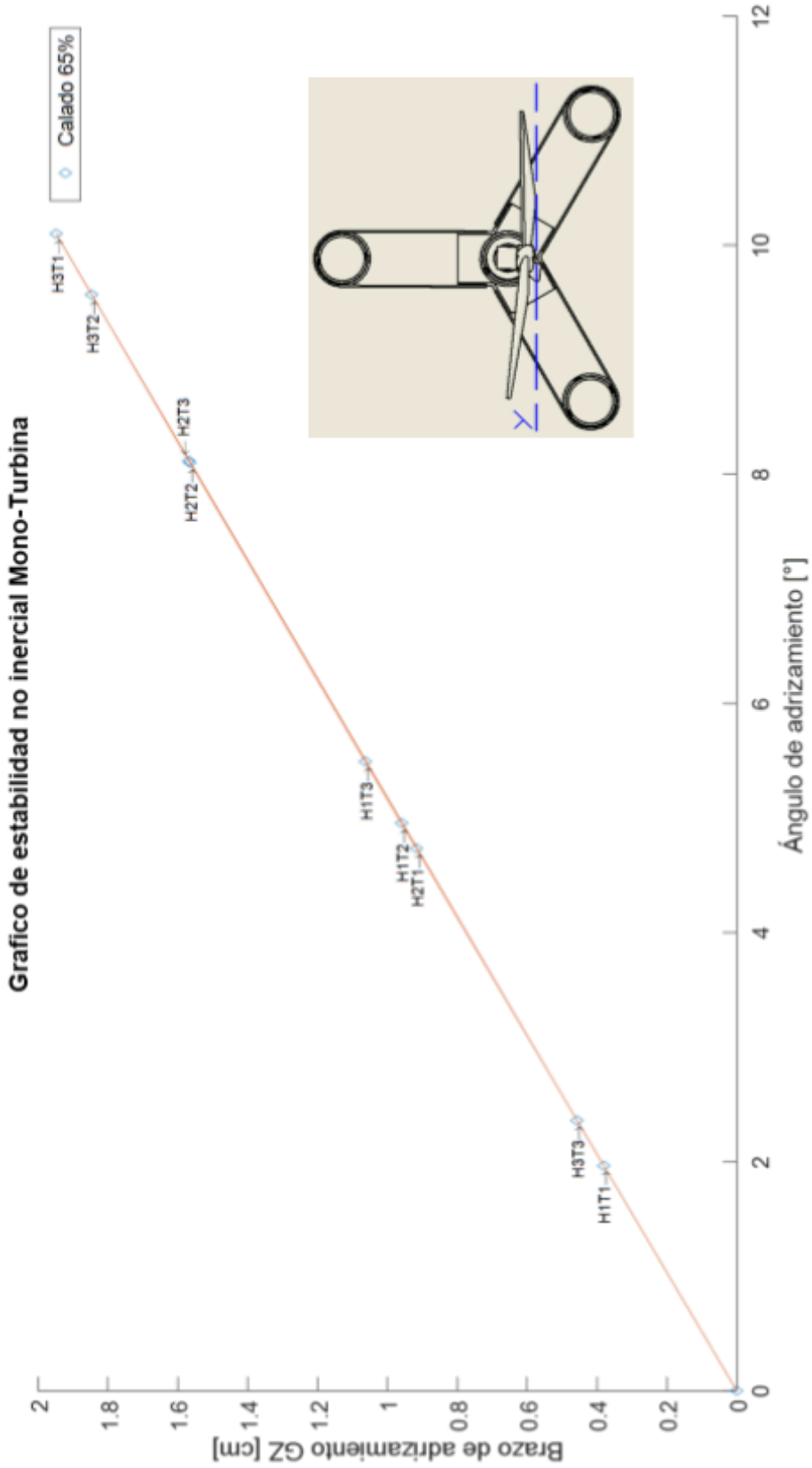


Gráfico 17: Gráfico de adrizamiento plataforma Mono-Turbina, 65% de calado

El valor máximo del punto en el calado de 65% tiene un ángulo de 10,1 [°], y un brazo de 1,9 [cm]

Parametros Cinemáticos

A continuación se presentan los promedios de los valores proporcionados por el software de seguimiento Tracker y procesados por Matlab, tanto para las velocidades horizontal y vertical como para la magnitud de la velocidad. Del mismo modo, se muestran los promedios de las aceleraciones horizontal y vertical, así como la magnitud de la aceleración.

Estado de mar	v_x [cm/s]	v_z [cm/s]	v [cm/s]	a_x $[cm/s^2]$	a_z $[cm/s^2]$	a $[cm/s^2]$
H1T1	5.719	4.099	7.73	26.902	20.26	37.475
H1T2	5.715	4.704	8.214	25.928	20.328	36.334
H1T3	5.475	3.424	7.059	22.151	14.127	28.798
H2T1	10.963	7.163	14.346	50.163	32.377	66.236
H2T2	9.064	6.393	12.168	40.525	27.726	54.749
H2T3	9.215	5.691	11.77	35.972	21.949	46.16
H3T1	20.119	12.611	26.057	92.659	59.419	120.271
H3T2	18.633	11.478	23.988	80.104	49.418	103.101
H3T3	15.04	9.848	19.728	58.037	36.748	74.945

Tabla 30: Parámetros cinemáticos de Mono-Turbina, 65% de calado

Parámetros Dinámicos

Utilizando las variables mencionadas anteriormente, se derivaron los valores de la fuerza neta horizontal y vertical, junto con la magnitud de la fuerza neta del modelo.

Estado de mar	F_{xn} [N]	F_{yn} [N]	F_n [N]
H1T1	0.08	0.06	0.111
H1T2	0.077	0.06	0.108
H1T3	0.066	0.042	0.085
H2T1	0.148	0.096	0.196
H2T2	0.12	0.082	0.162
H2T3	0.106	0.065	0.137
H3T1	0.274	0.176	0.356
H3T2	0.237	0.146	0.305
H3T3	0.172	0.109	0.222

Tabla 31: Parámetros dinámicos de Mono-Turbina, 65% de calado

De estos datos cinemáticos y dinámicos serán resaltadas y comparadas las magnitudes, dejando la tabla de a continuación:

Estado de mar	v [cm/s]	a [cm/s^2]	F_n [N]
Máximo	26.06	120.27	0.36
Mínimo	7.06	28.8	0.09
Promedio	14.56	63.12	0.19
Desv. Estándar	7.11	31.47	0.09

Tabla 32: Parámetros resumidos de Mono-turbina, 65% de calado

Se utilizó el método de los nodos para calcular las fuerzas a las que se sometieron las diferentes armaduras (en este caso pontones) de la plataforma pentagonal, utilizando la mayor fuerza neta medida en la tabla anterior cuyo valor es 0,36 [N]

8.3. Comparación de plataformas

Se procede a contrastar y exponer gráficamente los resultados de la evaluación de los sistemas de estabilización utilizados en las plataformas previas. En el gráfico subsiguiente, se ofrece una comparativa detallada de los resultados obtenidos en los diferentes brazos de adrizamiento de dichas plataformas. Este análisis contribuirá a visualizar de manera más clara y detallada las diferencias y similitudes entre los diversos enfoques empleados, proporcionando así una perspectiva más completa sobre la eficacia de los

sistemas de estabilización en el contexto específico de las plataformas en cuestión.

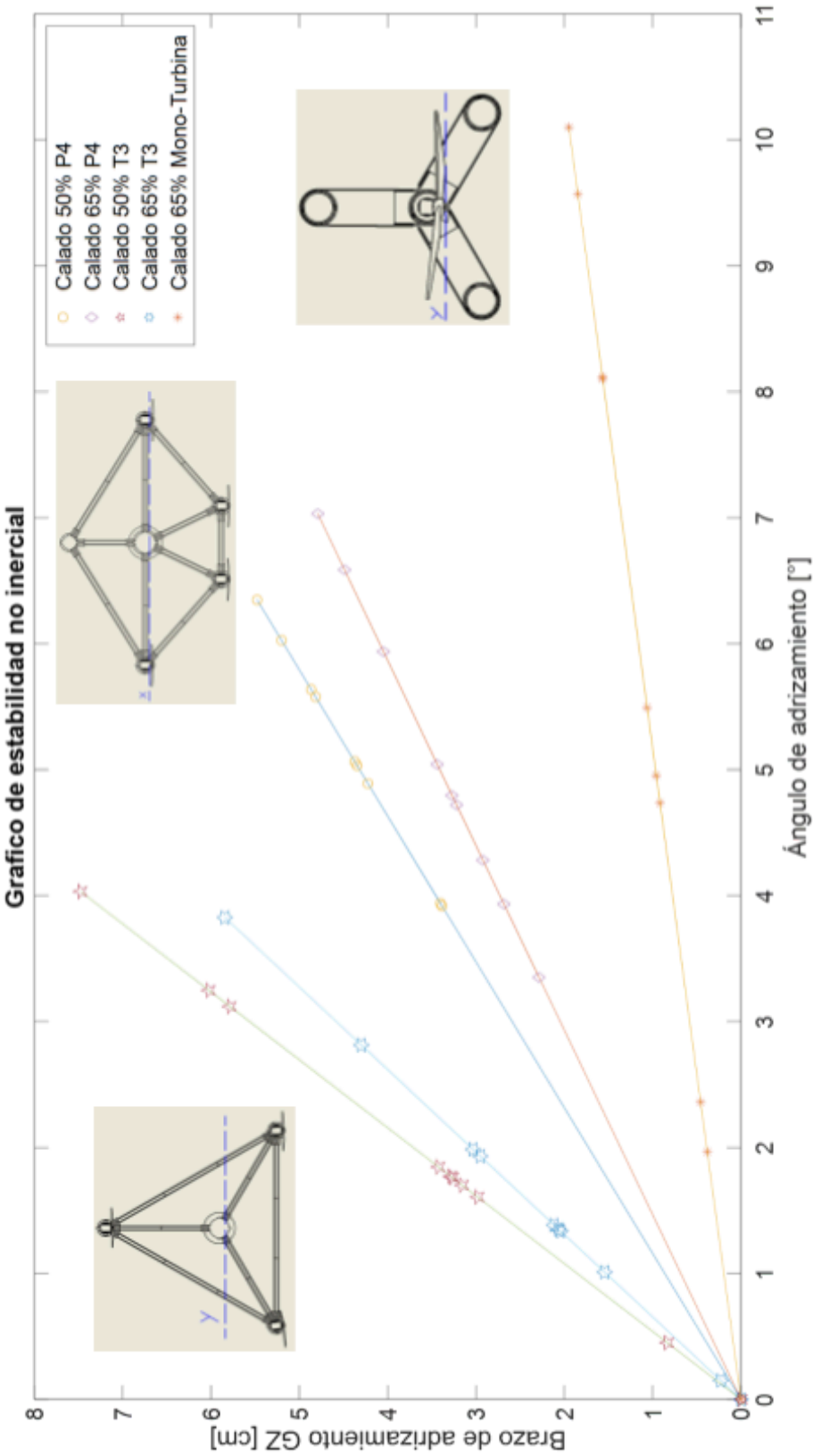


Gráfico 18: Gráfico de adrizamiento del conjunto de las plataformas

En un mismo ángulo de 4 grados como ejemplo, se tiene que la plataforma P4 con calado 50% produce un brazo de 3,5 [cm], y con calado de 65% produce un brazo de 2,7 [cm]. Mientras que la plataforma T3 con calado 50% produce un brazo de 7,4 [cm], y con calado de 65% produce un brazo de 6,1 [cm]. Con este mismo grado de inclinación la plataforma mono-turbina con un calado del 65% produce un brazo de 0,8 [cm].

La diferencia porcentual entre la curva mono-turbina y la curva triangular a 65% de calado es de un 663%, mientras que la diferencia porcentual entre la curva pentagonal a 65% de calado y la curva triangular a 65% de calado es de un 126%.

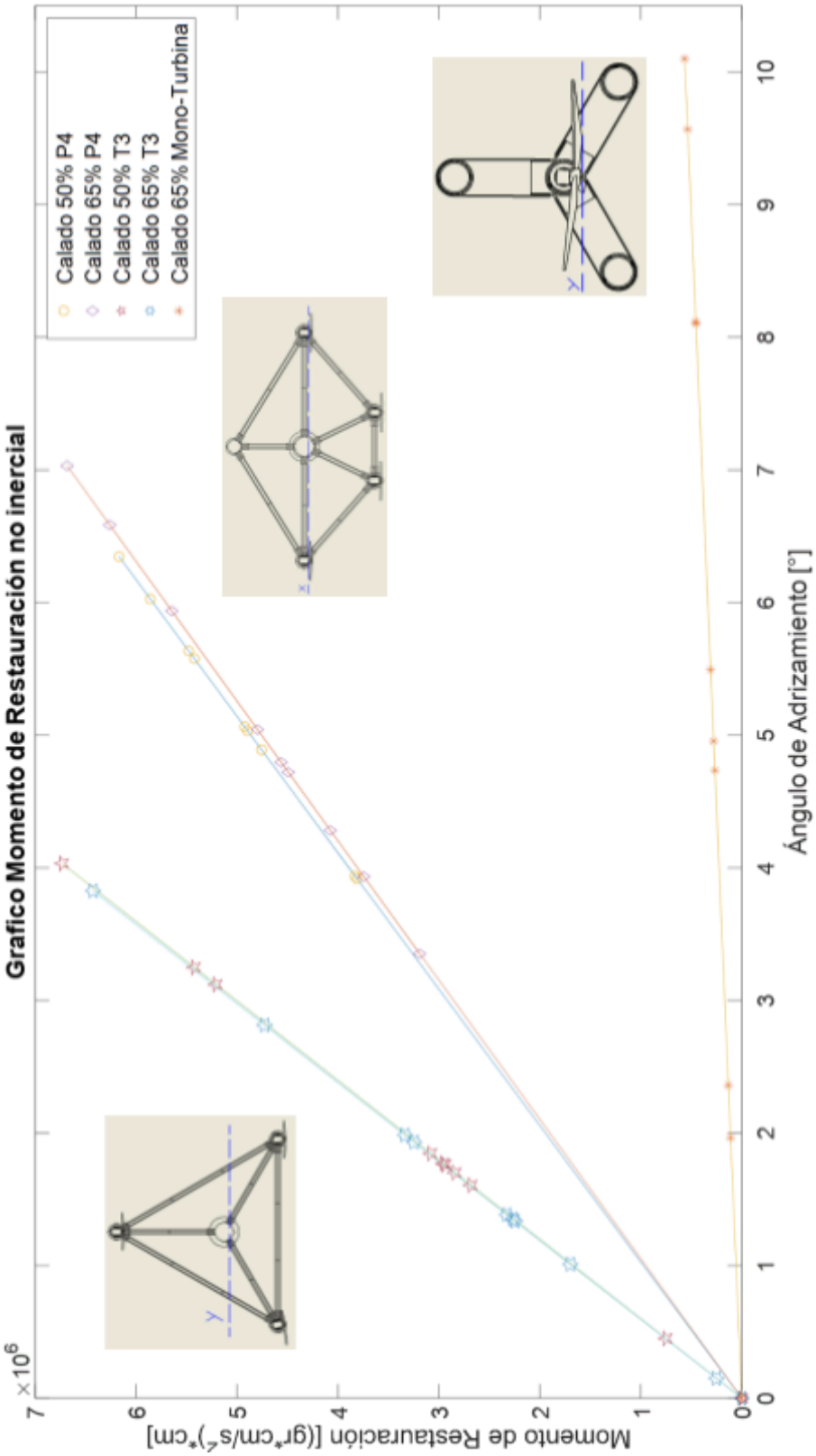


Gráfico 19: Gráfico de momento de adrizamiento del conjunto de las plataformas

La diferencial porcentual del momento de restauración entre la plataforma pentagonal y la plataforma triangular multi-turbina es de 76,4%, mientras que

la diferencia porcentual entre la plataforma triangular y la plataforma mono-turbina es de 2794%

Parametros Cinemáticos

La diferencia porcentual entre la plataforma pentagonal y la plataforma triangular multi-turbina con calado de 50% en la velocidad promedio es de 2% mientras que en la aceleración es de 0,8%. Con el calado de 65% la diferencia en velocidad es de 0,4%, mientras que la diferencia en la aceleración es de 2,2%. La diferencia porcentual de velocidad de la turbina triangular y la mono-turbina es de 19,5%, mientras que la diferencia en la aceleración es de 24,2%.

Parámetros Dinámicos

La diferencia porcentual entre la plataforma pentagonal y la plataforma triangular multi-turbina con calado de 50% en la fuerza neta promedio es de 16,2%. Con el calado de 65% la diferencia en la fuerza neta promedio es de 20,1%. La diferencia porcentual de la fuerza neta promedio de la turbina triangular y la mono-turbina es de 356%. La comparación de las fuerzas internas más desfavorables entre las plataformas pentagonal y plataforma triangular multi-turbina de un calado al 50% es de 5% de diferencia, mientras en un calado del 65% es de 7,6% de diferencia, y la diferencia entre la plataforma triangular y la plataforma mono-turbina en sus fuerzas internas es de 686%

9. Extrapolación de resultados

En este capítulo se lleva a cabo la extrapolación a escala de prototipo de los resultados obtenidos para la prueba T03 de Prueba de estabilidad residual, conforme a la tabla 4 presentada en la sección 4.6. Los valores de la altura significativa de ola, el desplazamiento horizontal y la amplitud media de oscilación vertical se determinaron al multiplicar por λ=1/50 aquellos obtenidos para el modelo. Por otro lado, la fuerza neta se multiplicó por un factor de escala de λ^3.

La información del acero con el que se obtendrán los resultados posteriores se extrajo del artículo “Proveedor de soluciones en acero para la industria global de energía eólica” [49] y los detalles del acero que se ocupa es EN 10025 o ASTM E235. [50]

Las fuerzas internas que aparecen en las plataformas serán calculadas como fuerzas en tensión, porque si bien algunas de esas fuerzas son en compresión, a través de las fórmulas en la sección 4.8.1 obtenemos que con un factor de seguridad de 2, el esfuerzo admisible por compresión es 2899 [Mpa] y el esfuerzo admisible por tensión es de 116 [Mpa], por lo que se puede inferir que si la estructura falla lo hará por tensión en vez de compresión.

9.1. Modelo P4

Utilizando el escalamiento para la información obtenida del gráfico 16 en el que muestra las inclinaciones de la plataforma se calcula que el valor máximo del punto en el calado de 50% tiene un ángulo de 6,35 [°] y un brazo de 2,7 [m], y el valor máximo del punto en el calado de 65% tiene un ángulo de 7,03 [°], y un brazo de 2,4 [m]. Los ángulos son los mismos ya que las dimensiones son las mismas entre sí.

La mayor fuerza interna a la que se sometió un pontón en un calado del 50% es de 359 [kN] y con un calado de 65% es de 444 [kN].

Utilizando la fórmula 20 se pudo calcular el esfuerzo de trabajo en tensión con la fuerza interna más desfavorable que es 444 [kN], para el ponton más desfavorable que es el superior, teniendo como resultado 7,7 [Mpa], lo que lo hace por mucho menor al esfuerzo admisible de 116 [Mpa].

9.2. Modelo T3

Utilizando el escalamiento para la información obtenida del gráfico 17 en el que muestra las inclinaciones de la plataforma se calcula que el valor máximo del punto en el calado de 50% tiene un ángulo de 4,03 [°] y un brazo de 3,7 [m], y el valor máximo del punto en el calado de 65% tiene un ángulo de 3,83 [°], y un brazo de 1,9 [m]. Los ángulos son los mismos ya que las dimensiones son las mismas entre sí.

La mayor fuerza interna a la que se sometió un pontón en un calado del 50% es de 341 [kN] y con un calado de 65% es de 413 [kN].

Utilizando la fórmula 20 se pudo calcular el esfuerzo de trabajo en tensión con la fuerza interna más desfavorable que es 413 [kN], para el ponton más desfavorable que es el superior, teniendo como resultado 7,2 [Mpa], lo que lo hace por mucho menor al esfuerzo admisible de 116 [Mpa].

.

9.3. Modelo mono-turbina

Utilizando el escalamiento para la información obtenida del gráfico 18 en el que muestra las inclinaciones de la plataforma se calcula que el valor máximo del punto en el calado de 65% tiene un ángulo de 10,1 [°], y un brazo de 1 [m]. Los ángulos son los mismos ya que las dimensiones son las mismas entre sí.

9.4. Comparación de plataformas

En un mismo ángulo de 4 grados como ejemplo, se tiene que la plataforma P4 con calado 50% produce un brazo de 1,8 [m], y con calado de 65% produce un brazo de 1,4 [m]. Mientras que la plataforma T3 con calado 50% produce un brazo de 3,7 [m], y con calado de 65% produce un brazo de 3,1 [m]. Con este mismo grado de inclinación la plataforma mono-turbina con un calado del 65% produce un brazo de 0,4 [m].

10. Conclusión

En el presente trabajo de título se desarrolló una metodología experimental y teórica al estudiar modelos de plataformas semi-sumergibles multi-turbinas con diferentes geometrías sometidas a un oleaje característico de Punta Galera en relación a los estados de mar en tanto altura de ola significativa y periodo de oleaje más desfavorables para las estructuras de las plataformas. El estudio realizado implicó el análisis de los principales parámetros cinemáticos y dinámicos característicos de un cuerpo interactuando con oleaje regular monocromático.

Las pruebas T01 - Prueba de plataforma seca y T02 - Prueba de plataforma húmeda resultaron cruciales para llevar a cabo la caracterización de los diversos modelos diseñados en cuanto a sus propiedades fundamentales de masa y estabilidad de flotación en condiciones estáticas antes de llevar a cabo las pruebas de oleaje.

La prueba T03 - Prueba de estabilidad residual permitió describir el comportamiento de cada modelo asociado a la estabilidad de las plataformas durante la oscilación que presentaban por el oleaje ligado a la geometría de sus estructuras, propiedades de masa y a la capacidad de cada modelo de retornar a su posición de equilibrio.

Se debe destacar que este análisis de estabilidad es preliminar, ya que se grafico un valor experimental que es el ángulo de inclinación con un valor teórico dependiente de este ángulo que fue el brazo de adrizamiento y posterior momento de restauración.

Podemos concluir que el volumen sumergido tiene directa influencia en la altura metacéntrica, por esto es que con más volumen sumergido, hay una menor altura metacéntrica y por consecuencia la capacidad de restauración y estabilidad disminuyen. Por esta razón las plataformas al tener una profundidad del 50% de calado poseen una mayor altura metacéntrica que cuando tienen un calado del 65%, y por consecuencia son más estables.

También se puede concluir desde una vista superior (vista en planta) que la distancia del centro de gravedad de cada pontón y cada cilindro en comparación hasta el centro de gravedad de la plataforma completa influye en la altura metacéntrica, esto se debe a que impacta en la inercia de la plataforma. A mayor distancia del centro de gravedad mayor es la inercia y mayor es la altura metacéntrica. Sin embargo, la orientación de los pontones también aumenta la inercia de la plataforma, en otras palabras si los pontones se encuentran paralelos a la incidencia del oleaje y del viento, entonces se encontrarán en la posición de mayor inercia.

Habiendo mencionado lo anterior, se puede comprender el porqué los resultados de los gráficos de adrizamiento nos muestran que la plataforma triangular se inclina menos que la pentagonal y produce un brazo de adrizamiento más grande, lo que en otras palabras es decir que es más estable, al igual que nos dice porque ambas son más estables que la plataforma mono-turbina.

El momento de restauración de la plataforma triangular y pentagonal es prácticamente igual en sus dos calados, esto se debe a que se aumentó el peso de las plataformas en vez de cambiar la forma o volumen de los cilindros flotantes para aumentar el calado, como el momento se obtiene al multiplicar el brazo adrizante por el peso de la plataforma, virtualmente no se hizo ningún cambio. Con esto en consideración sabemos que en un mismo ángulo de inclinación y un mismo calado, la plataforma triangular es un 76,4% más estable frente al volcamiento en comparación a la plataforma pentagonal y sabemos que es 1287% más estable frente al volcamiento que la plataforma mono-turbina.

En el ámbito cinemático la mayor diferencia de velocidad promedio entre las plataformas multi-turbinas es de un 2% y en aceleración promedio es de 2,2%, por lo que se puede concluir que a pesar de sus geometrías diferentes el movimiento de ambas plataformas es básicamente el mismo, siendo que para un calado del 50% la plataforma triangular fue la que se movió menos y para un calado del 65% la que se movió menos fue la plataforma pentagonal. Pero cuando se compara el movimiento de la plataforma triangular multiturbina con la plataforma mono-turbina se obtiene que esta última se mueve 19,5% menos en promedio.

Dinámicamente el peso de las plataformas es importante, por lo que la diferencia de la fuerza interna entre calados de cada plataforma es proporcional. La diferencia de fuerza interna entre las plataformas no supera el 7,6% por lo que ambas plataformas son sometidas a una fuerza interna similar, con la plataforma pentagonal siendo la que es ligeramente sometida a más fuerza interna. Pero cuando se compara la plataforma triangular multiturbina con la plataforma mono-turbina se obtiene que esta última tiene una fuerza interna 686% menor.

Con la extrapolación de los resultados se puede concluir que las macroestructuras semi-sumergibles son capaces de resistir los esfuerzos dinámicos provocados por el movimiento del oleaje y del viento.

Todo lo anterior se puede simplificar al decir que la plataforma más estable frente al volcamiento es la plataforma triangular, y si bien la plataforma mono-turbina se mueve menos, no quiere decir que sea la más recomendada en comparación con las otras plataformas, ya que sus estructuras son suficientemente capaces de resistir las fuerzas internas y poseen la ventaja de contar con varias turbinas para producir más del doble de electricidad.

El trabajo realizado logró captar un panorama cinemático y dinámico que sirve como una primera aproximación al estudio fenomenológico experimental de dos plataformas semisumergibles de diferencia geométrica multi-turbinas y su interacción con oleaje regular monocromático. Los cálculos de esfuerzo en la extrapolación para conocer la resistencia de la estructura son de ámbito estático y no cálculos dinámicos, así que se recomienda un estudio más profundo en el análisis de resistencia, al igual que un análisis de fatiga. Se prevé que trabajos futuros apunten a describir con mayor detalle los factores implicados. En cuanto a futuras mediciones experimentales se podría hacer el mismo experimento pero esta vez obteniendo el brazo de adrizamiento en tiempo real y compararlo con los valores teóricos de cálculo, al mismo tiempo que se evalúan los movimientos de la misma plataforma pero vista de diferentes ángulos dentro del canal de olas. Otro estudio futuro puede estar asociado a las conexiones de fondeo, ya que durante el experimento, se encontró que a diferentes distancias

o estiramientos del cable podían producir un efecto resorte inestabilizador en la plataforma, lo que podrían ocasionar fallos por esfuerzo o fatiga.

Referencia

1. *IEA – International Energy Agency. (s. f.-a). IEA. Recuperado 23 de septiembre de 2022, https://www.iea.org/*

2. *Planelles, M. C. D. (2018, 2 mayo). El 13% de la población mundial aún no tiene acceso a la electricidad. El País. https://elpais.com/economia/2018/05/02/actualidad/1525257286_099135.html#:%7E:text=Mil%20millones%20de%20personas%20no,es%20de%20origen%20renovable. . .*

3. *Statista. (2021, 27 septiembre). Consumo global de energía por fuente 2000-2050. https://es.statista.com/estadisticas/634593/consumo-global-de-energia-por-fuente/*

4. *United Nations. (s. f.). El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible | Naciones Unidas. https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible*

5. *Transición Energética de Chile - Política Energética Nacional. (2022, febrero). https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf*

6. *Iberdrola. (2018, November 8). qué es la energía eólica marina. Iberdrola. https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funciona-la-energia-eolica-marina*

7. *Iberdrola. (2021, April 22). EÓLICA MARINA FLOTANTE. Iberdrola. https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante*

8. *Vázquez, J. a. R. (2021, January 9). Turbina Eólica Marina: Covierte la fuerza del viento en electricidad. Avatar Energía, blog de Energías Renovables. https://avatarenergia.com/turbina-eolica-marina/*

9. *Iberdrola. (2021b, April 22). FLOATING OFFSHORE WIND. Iberdrola. https://www.iberdrola.com/innovation/floating-offshore-wind*

10. *Hu, Z., Li, L., Wang, J., Hu, Q., & Shen, M. (n.d.). Dynamic responses of a semi-type offshore floating wind turbine during normal state and emergency shutdown. China Ocean Engineering, 30(1), 97–112. https://www.researchgate.net/publication/271197957_Dynamic_responses_of_a_semi-type_offshore_floating_wind_turbine_during_normal_state_and_emergency_shutdown*

11. *The WindFloat® - principle power. (n.d.). https://www.principlepower.com/windfloat*

12. *Our technology - Hexicon. (n.d.). Hexicon. https://www.hexicongroup.com/our-technology/*

13. *Admin. (2012, August 3). Hexicon's hexagonal floating wind platform could reduce maintenance costs - Ecofriend. Ecofriend. https://ecofriend.com/hexicon-s-hexagonal-floating-wind-platform-could-reduce-maintenance-costs.html*

14. *Bashetty, S., & Özçelik, S. (2021). Review on Dynamics of Offshore floating wind turbine platforms. Energies, 14(19), 6026. https://doi.org/10.3390/en14196026*

15. *Semi-submersible wind turbine hull shape design for a favorable system response behavior*. (2020, mayo). ScienceDirect. https://www-sciencedirect-com.uchile.idm.oclc.org/science/article/pii/S0951833920300198

16. Reyes-Casimiro, M. (2021, septiembre). *Efecto de la geometría del casco de plataformas semisumergibles de producción en su respuesta hidrodinámica*. Scielo. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432021000300001

17. M.T.-R. (2019, septiembre). *Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/336006050_Modelado_y_control_de_turbinas_eolicas_marinas_flotantes

18. Ventura, G. (2016, julio). Estudio del comportamiento en la mar de una plataforma tipo truss spar. UpCommons. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/90130/121113_TFG+-+Comportamiento+en+la+Mar+de+una+Plataforma+Offshore.pdf?sequence=1

19. Hydrodynamic characteristics of a fixed semi-submersible platform interacting with incident waves by fully nonlinear method. (2021). ScienceDirect. https://www-sciencedirect-com.uchile.idm.oclc.org/science/article/pii/S2092678221000340

20. Dynamic analysis of a novel semi-submersible platform for a 10 MW wind turbine in intermediate water depth. (2021, octubre). ScienceDirect. https://www-sciencedirect-com.uchile.idm.oclc.org/science/article/pii/S0029801821010611

21. Qualification of innovative floating substructures for 10MW wind turbines and water depths greater than 50m. (2016, 1 marzo). LIFES50+. http://lifes50plus.eu/wp-content/uploads/2015/11/GA_640741_LIFES50_D7.4.pdf

22. Pascual, C. V., Santamaría, R. M., Rodríguez, I. L., García, R. G., López, J. L., De Hidraulica Ambiental de Cantabria, F. I., & De Cantabria, U. (2012, 18 julio). ES2387232A1 - Plataforma semisumergible para aplicaciones en mar abierto - Google Patents. https://patents.google.com/patent/ES2387232A1/es/1000

23. Roddier, D., Cermelli, C., & Inc, P. P. (2008, 23 abril). US20140196654A1 - Floating Wind Turbine Platform with Ballast Control and Mooring System - Google Patents. https://patents.google.com/patent/US20140196654A1/en

24. Heronemus, W. E., Systems, O. W. E., & Heronemus, P. R. (2002, 8 marzo). WO2003076800A2 - Offshore wind turbine - Google Patents. https://patents.google.com/patent/WO2003076800A2/en

25. Von Heland, F., & Ab, H. (2014, 11 julio). WO2016007076A1 - Multi-turbine wind power platform for offshore applications - Google Patents. https://patents.google.com/patent/WO2016007076A1/pt-PT

26. Bashetty, S., & Özçelik, S. (2022). Design and Stability Analysis of an Offshore Floating Multi-Wind Turbine Platform. Inventions, 7(3), 58. https://doi.org/10.3390/inventions7030058

27. Escobar, D. (2012, junio). *SELECCIÓN EN CHILE DE LOS SITIOS MÁS ADECUADOS PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DEL OLEAJE UTILIZANDO SWAN*. Repositorio USM. https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/41414/3560900211943UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

28. Estudio numérico-experimental de una boya para equipo undimotriz de segunda generación - PDF Free Download. (s. f.). https://docplayer.es/208905486-Estudio-numerico-experimental-de-una-boya-para-equipo-undimotriz-de-segunda-generacion.html

29. Reyes-Casimiro, M. (2021, septiembre). Efecto de la geometría del casco de plataformas semisumergibles de producción en su respuesta hidrodinámica. Scielo. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432021000300001

30. TOMELIC CASTRO, Y. A. (2021). Diseño y estudio experimental de la resonancia de boyas para generación undimotriz en aguas someras de la bahía de Valparaíso [Tesis]. USM.

31. LOS MODELOS FÍSICOS A ESCALA REDUCIDA Y LA SIMULACIÓN DE MANIOBRAS DE BUQUES. HERRAMIENTAS PARA EL DISEÑO PORTUARIO. (2003). https://www.oas.org/cip/docs/la_comision/reuniones_pasadas/ordinarias/3reunion_mexico2003/15_modelos_fis_escala_redu_doc127_03.pdf.pdf

32. Capitulo 6. (s. f.). Estatica. https://estaticarmm.weebly.com/capitulo-6.html#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20de%20los%20nodos,de%20los%20nodos%20o%20uniones.

33. Tuesta, C. F. P. (s. f.). 2. Tipos de inestabilidad analizados.pdf. Scribd. https://es.scribd.com/document/255390012/2-Tipos-de-Inestabilidad-Analizados-pdf

34. colaboradores de Wikipedia. (2024, 27 febrero). Principio de arquímedes. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Arqu%C3%ADmedes

35. TAMBURRINO T., A., NIÑO C., Y., & UCh-DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL. (s. f.). Fuerzas sobre superficies curvas. U-Cursos. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/CI3101/1/material_docente/bajar?bajar=1&id=245946

36. Ingenierizando. (2021, 23 noviembre). Centro de gravedad. Ingenierizando. https://www.ingenierizando.com/dinamica/centro-de-gravedad/

37. L. GUERRERO B., B. (n.d.). EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS FLOTANTES. Wiki-ead. https://wiki-ead.b-cdn.net/images/d/d1/02_Equilibrio.pdf

38. Prácticas de seguridad relativas a la estabilidad de buques pesqueros pequeños - PDF Free Download. (s. f.). https://docplayer.es/40894-Practicas-de-seguridad-relativas-a-la-estabilidad-de-buques-pesqueros-pequenos.html

39. Universidad de Cantabria. (s. f.). Estabilidad en los remolcadores. En Remolcadores. https://personales.gestion.unican.es/martinji/Archivos/EstabilidadRemolcadores.pdf

40. Mayor, H. G. (s. f.). Estabilidad inicial transversal. https://estabilidadbuque.blogspot.com/2011/07/estabilidad-inicial-transversal-v.html

41. Mayor, H. G. (s. f.-a). Características, cálculo y trazado de la curva de estabilidad. Pantocarenas. https://estabilidadbuque.blogspot.com/2011/08/caracteristicas-calculo-y-trazado-de-la.html

42. Arosemena, A. (n.d.). Hidrostática y Estabilidad. Academia. https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/72/clase_3.pdf

43. Hu, Z., Li, L., Wang, J., Hu, Q., & Shen, M. (2016). Dynamic responses of a semi-type offshore floating wind turbine during normal state and emergency shutdown. China Ocean Engineering, 30(1), 97-112. https://doi.org/10.1007/s13344-016-0005-y

44. Anexo 10 - POTENCIA LOCAL LARGA DATA (FICHAS/CATASTRO). (s. f.). En Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía Undimotriz.

45. Zamorano, L., Otarolla, G., Beya, I., & Catalan, P. (s. f.). Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía Undimotriz [Diapositivas]. CORFO. https://www.inh.cl/cms/images/stories/noticias/2014/seminario/Proyecto%20Undimotriz.pdf

46. Atlas de Oleaje de Chile. (s. f.). https://oleaje.uv.cl/atlas.html

47. Explorador eólico. (s. f.). https://eolico.minenergia.cl/exploracion

48. Bauer, L. (s. f.). ACSA LMW-10.000 - 10,00 kW - Aerogenerador. https://es.wind-turbine-models.com/turbines/2383-acsa-lmw-10.000

49. Steel solutions provider to the global wind energy industry. (s. f.). Arcelor Mittal. https://annual2023.windeurope.org/sites/default/files/WindenergybrochureEN.pdf

50. BS EN10025 structural steel plate - S235, S275 and S355 and equivalent ASTM. (s. f.). https://www.steelplatesforsale.com/blog/BS-EN10025-structural-steel-plate-and-equivalent-ASTM.html

Anexo

10.1.1. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H1T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,1	19,6	18%

Tabla 33 Condiciones de laboratorio P4 50%, HIT2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10.9	5	1.56	0.64282	0.10418

Tabla 34: Conversión de oleaje ideal

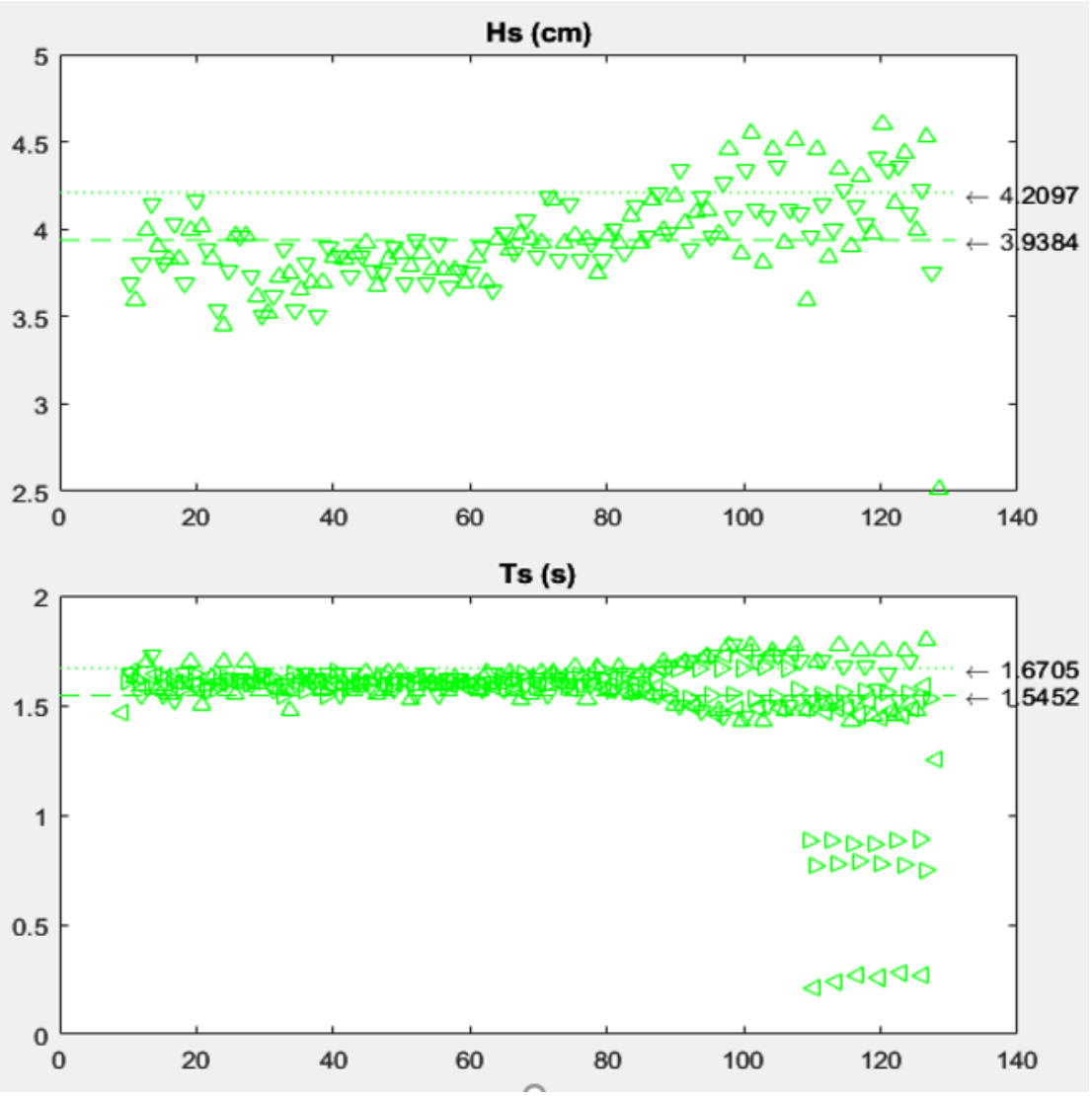


Gráfico 20: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.1	10.5	6.2	1.49	0.67344	0.12179

Tabla 35: Conversión de oleaje real

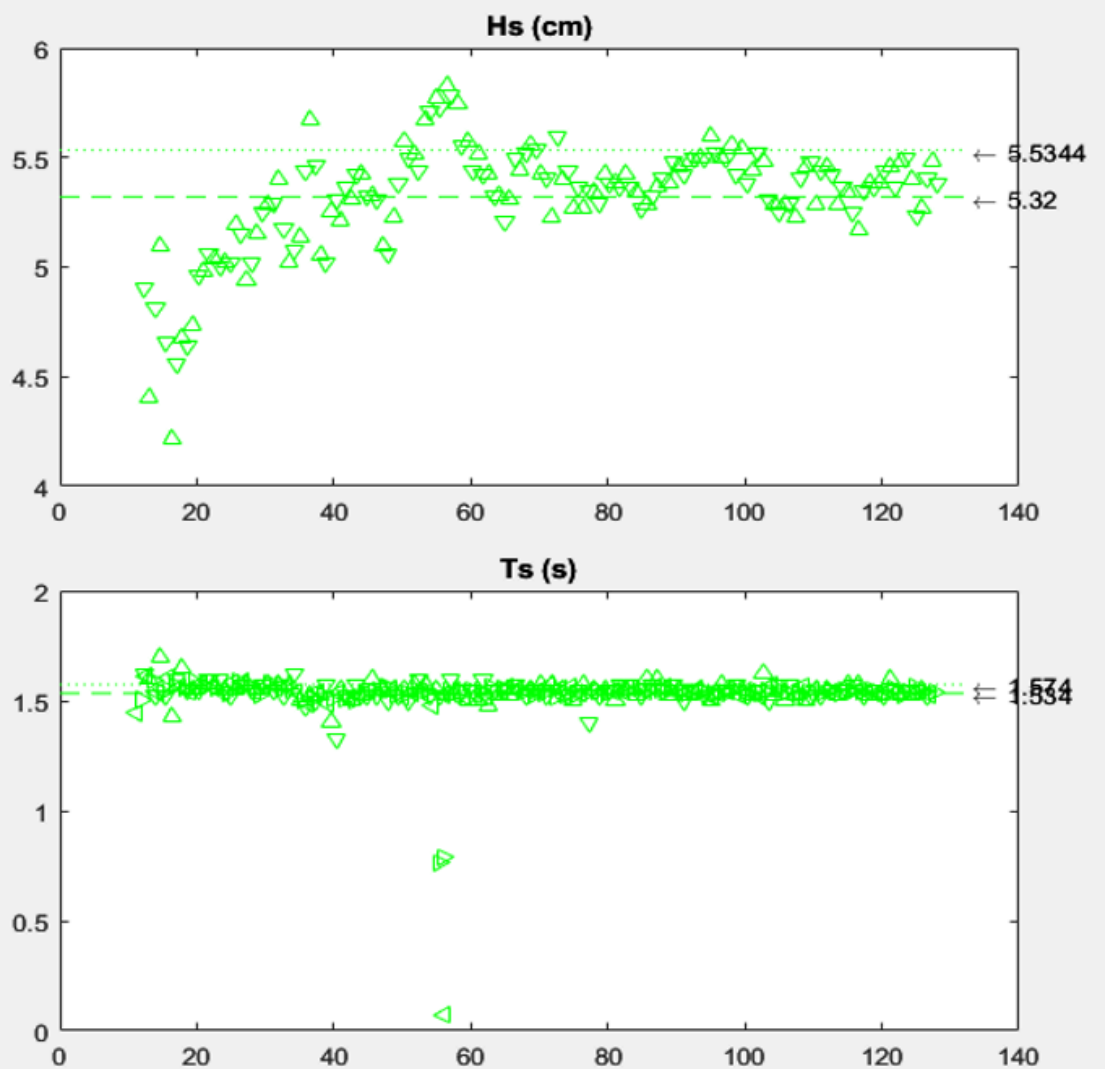


Gráfico 21: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

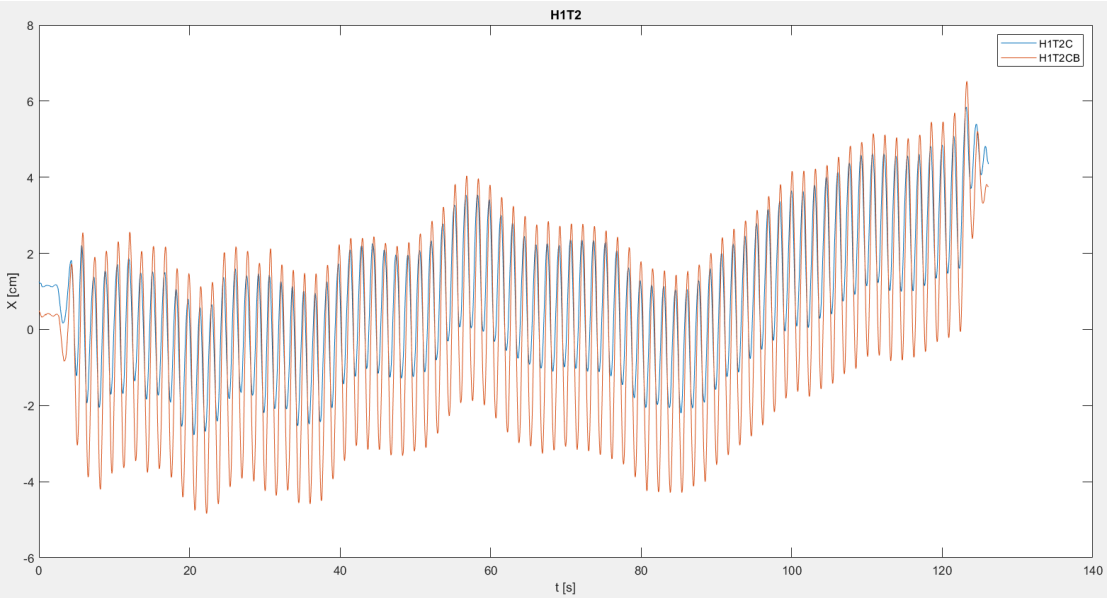


Gráfico 22: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

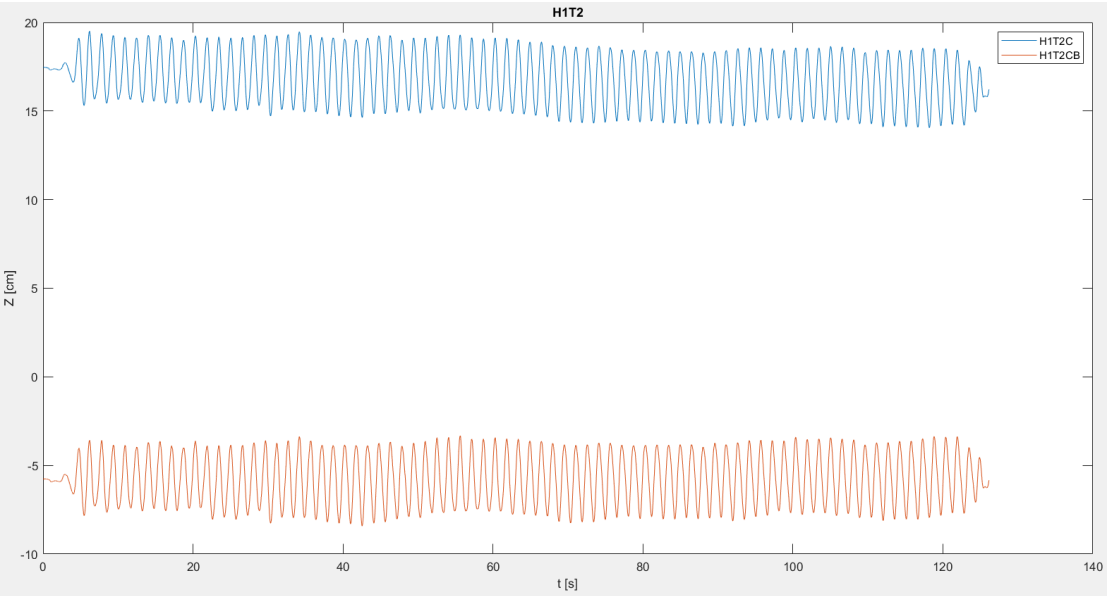


Gráfico 23: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

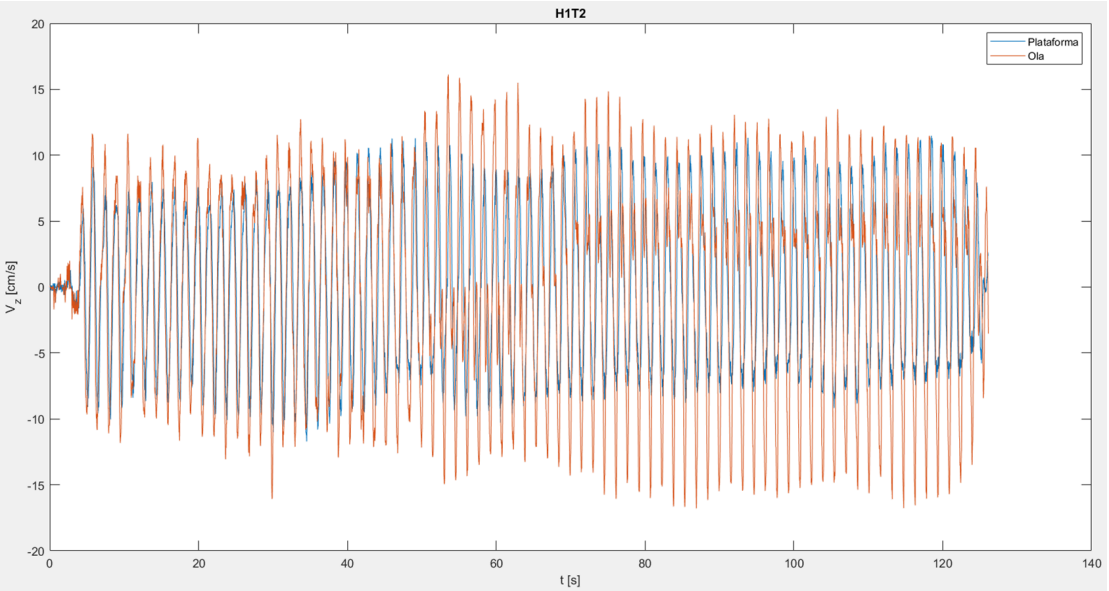


Gráfico 24: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.2. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H1T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,1	19,7	18%

Tabla 36: Condiciones de laboratorio P4 50%, HIT3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	12.7	5	1.79	0.55678	0.1241

T*abla 37: Conversión de oleaje ideal*

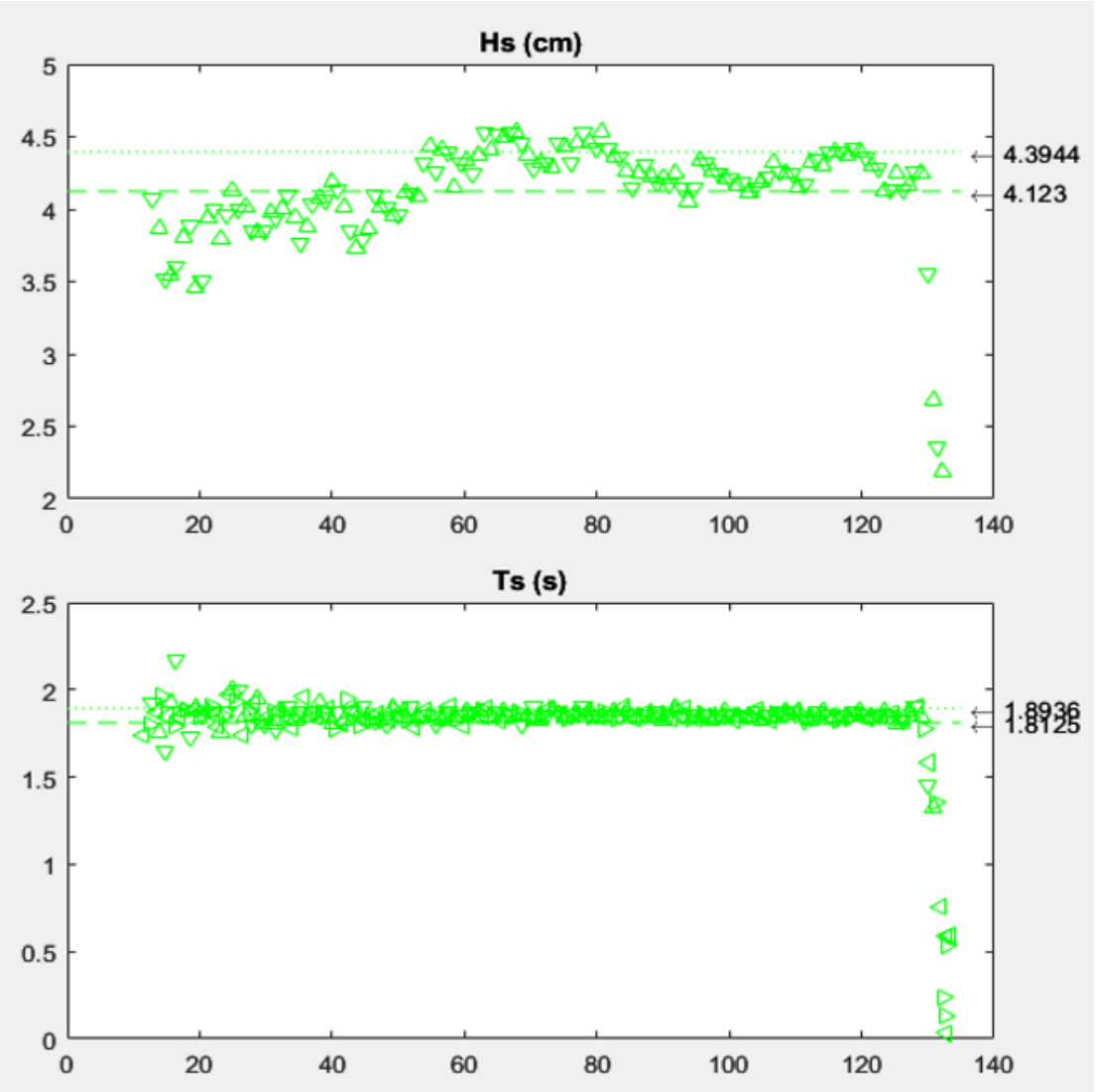


Gráfico 25: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.2	12.1	6.4	1.71	0.58439	0.14991

Tabla 38: Conversión de oleaje real

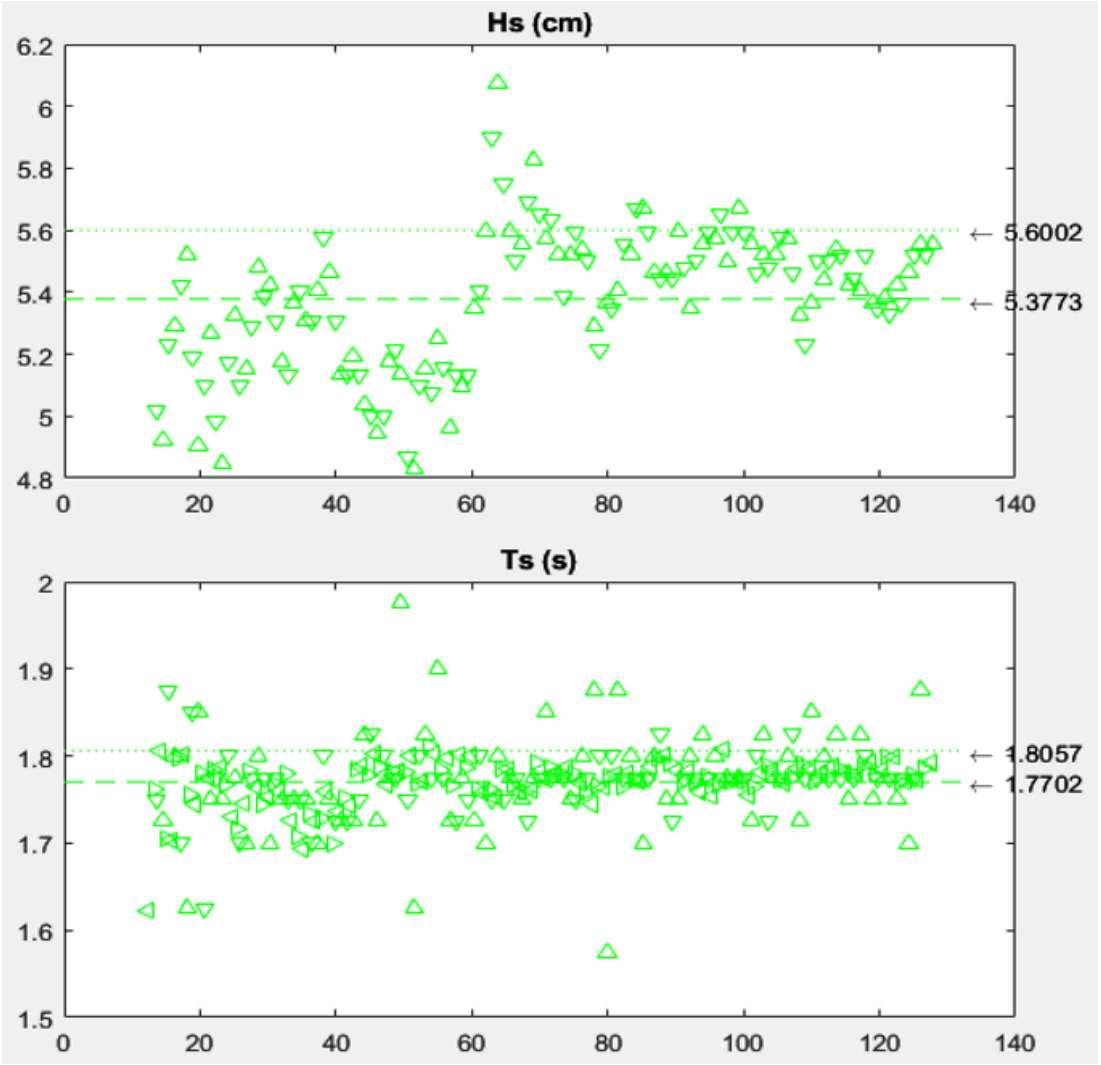


Gráfico 26: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

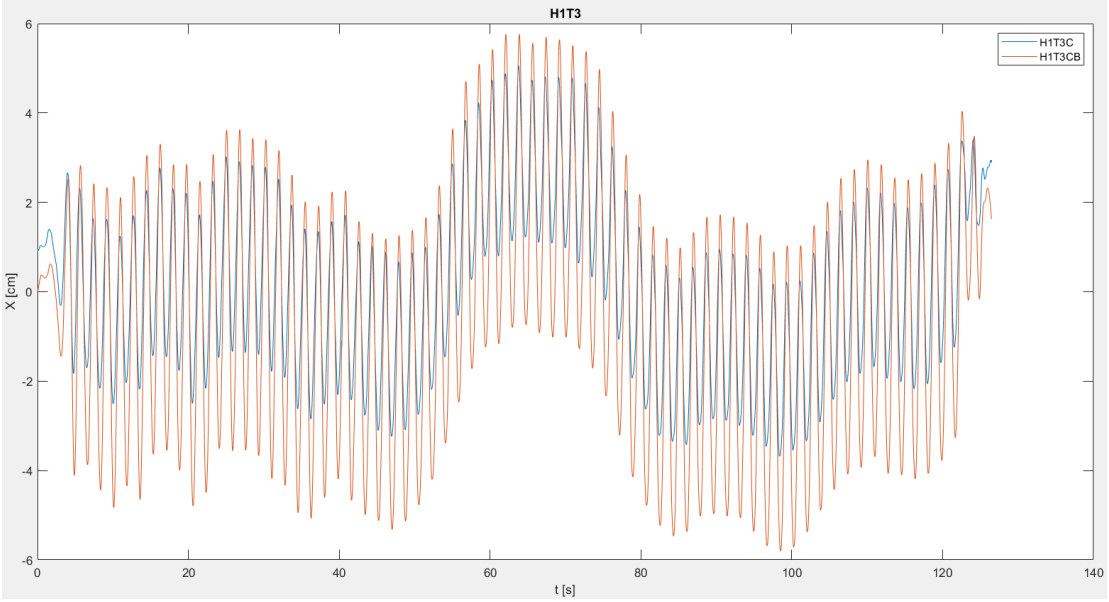


Gráfico 27: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

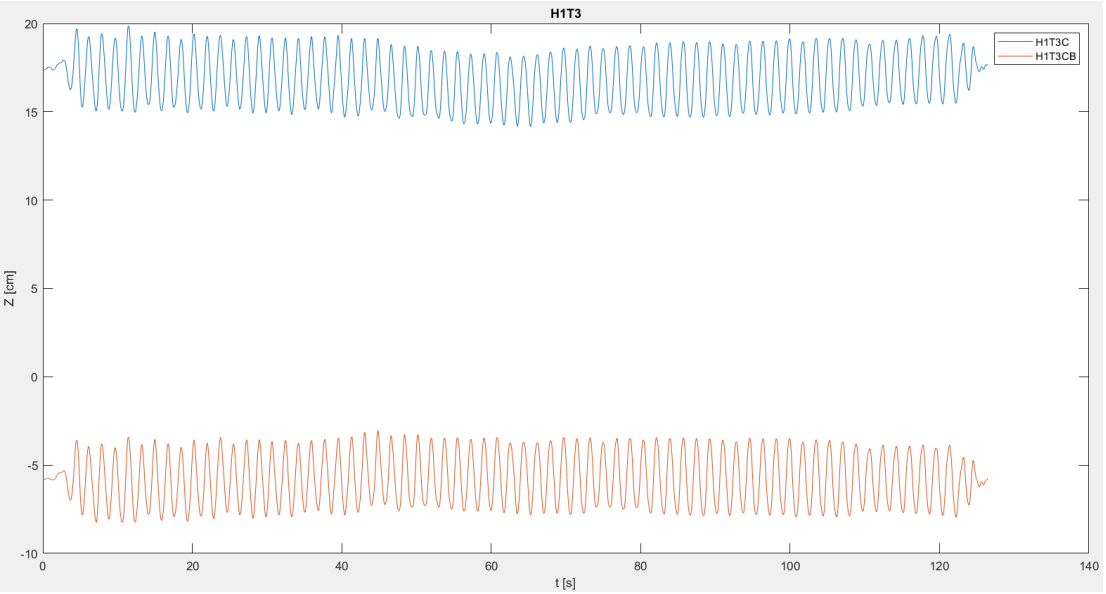


Gráfico 28: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

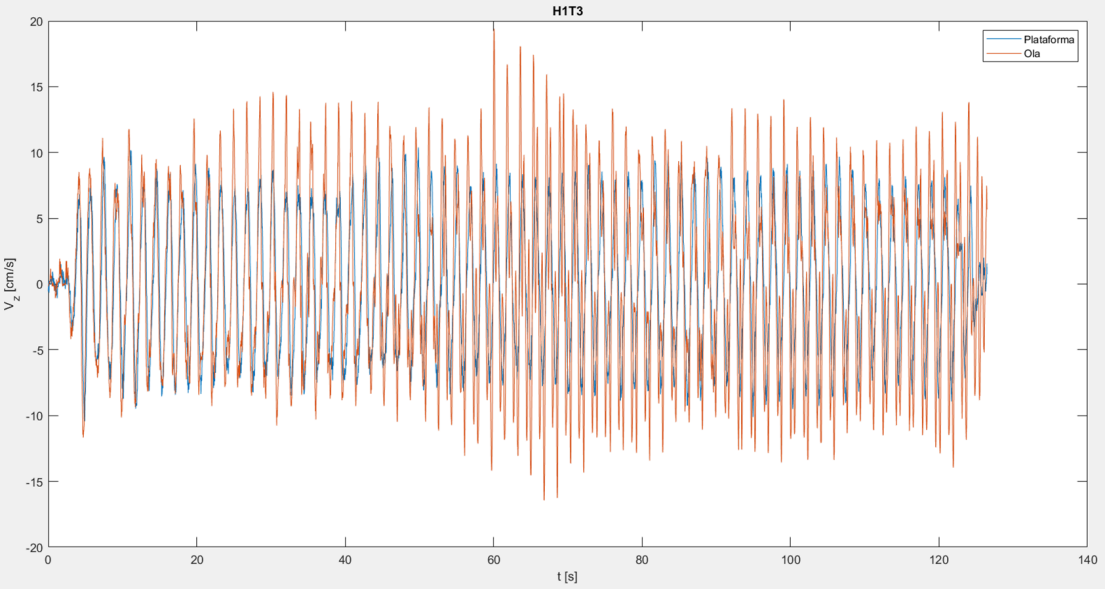


Gráfico 29: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.3. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H2T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19	19.2	18%

Tabla 39: Condiciones de laboratorio P4 50%, H2T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10	7.8	1.41	0.70711	0.14752

Tabla 40: Conversión de oleaje ideal

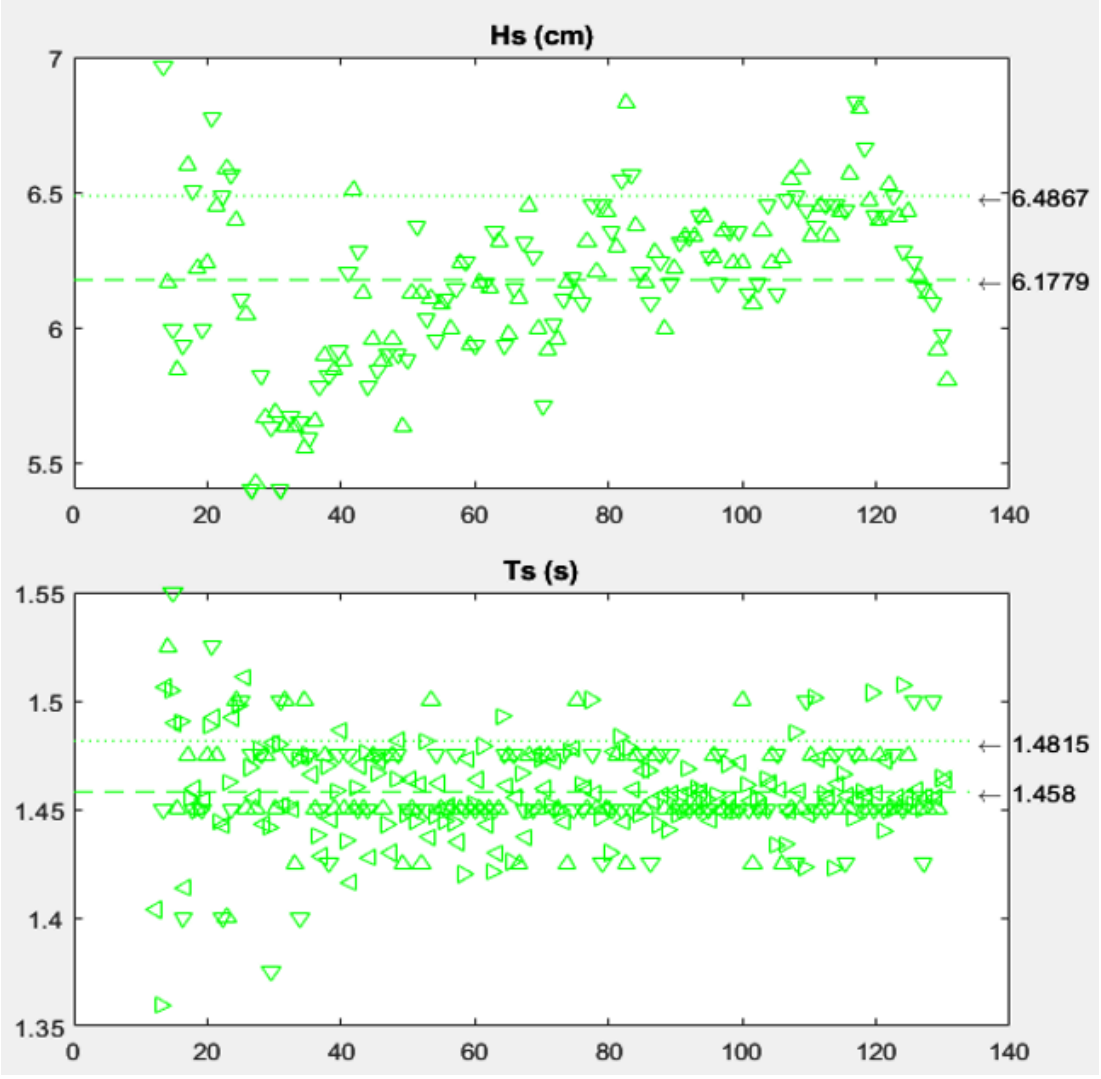


Gráfico 30: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
5	9.6	10	1.36	0.73657	0.17467

Tabla 41: Conversión de oleaje real

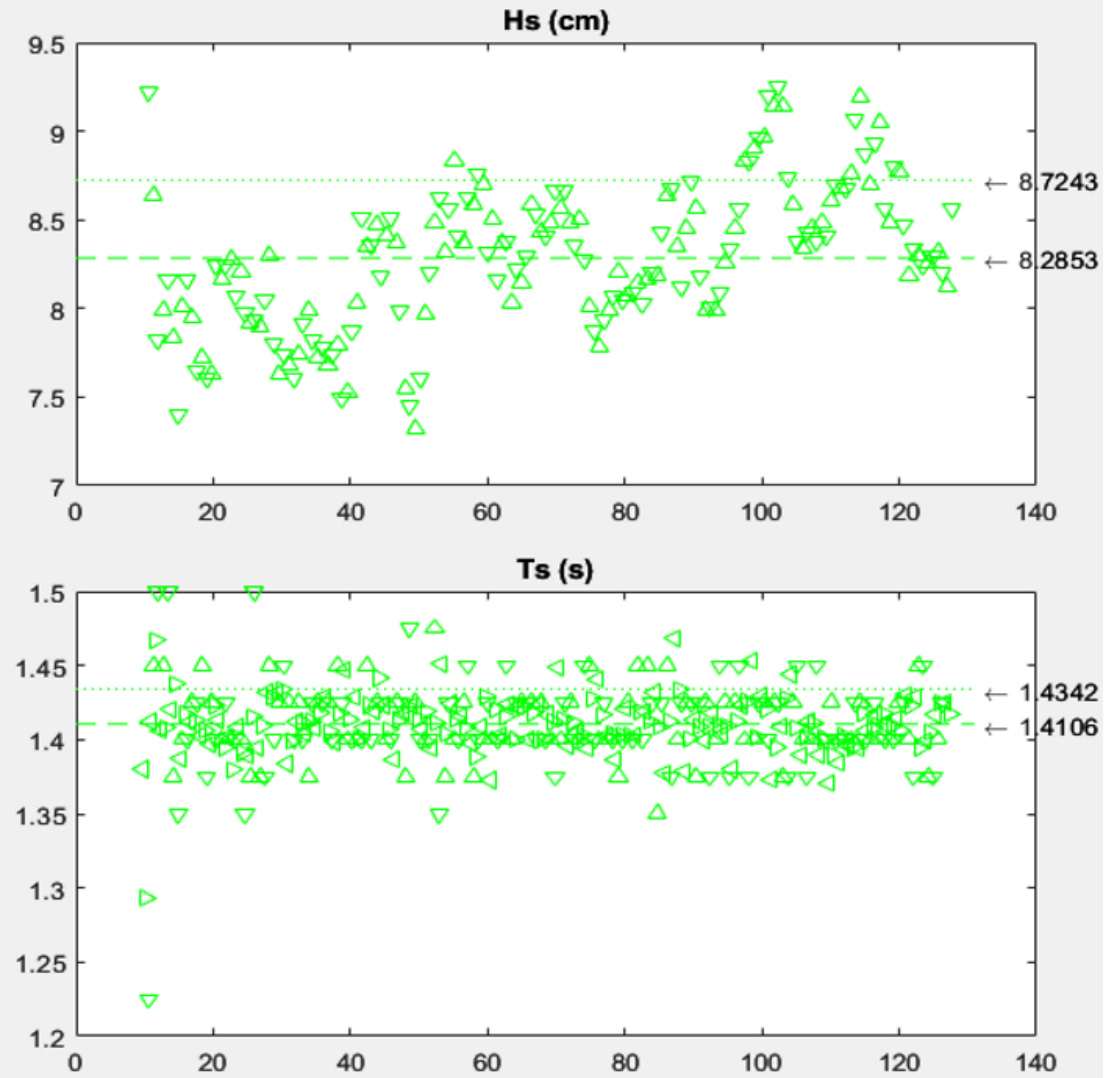


Gráfico 31: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

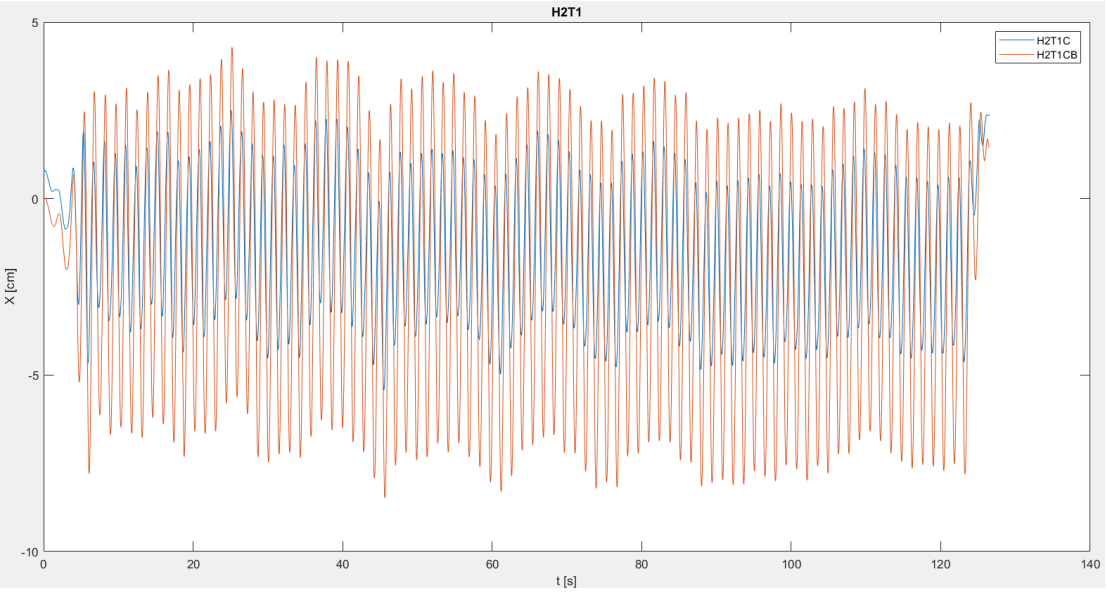


Gráfico 32: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

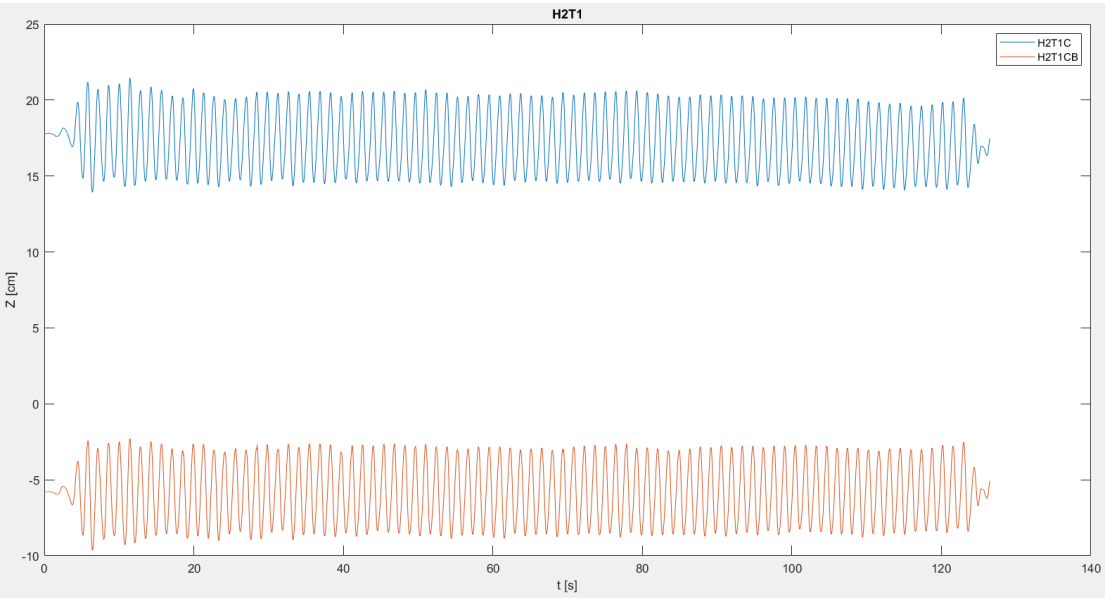


Gráfico 33: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

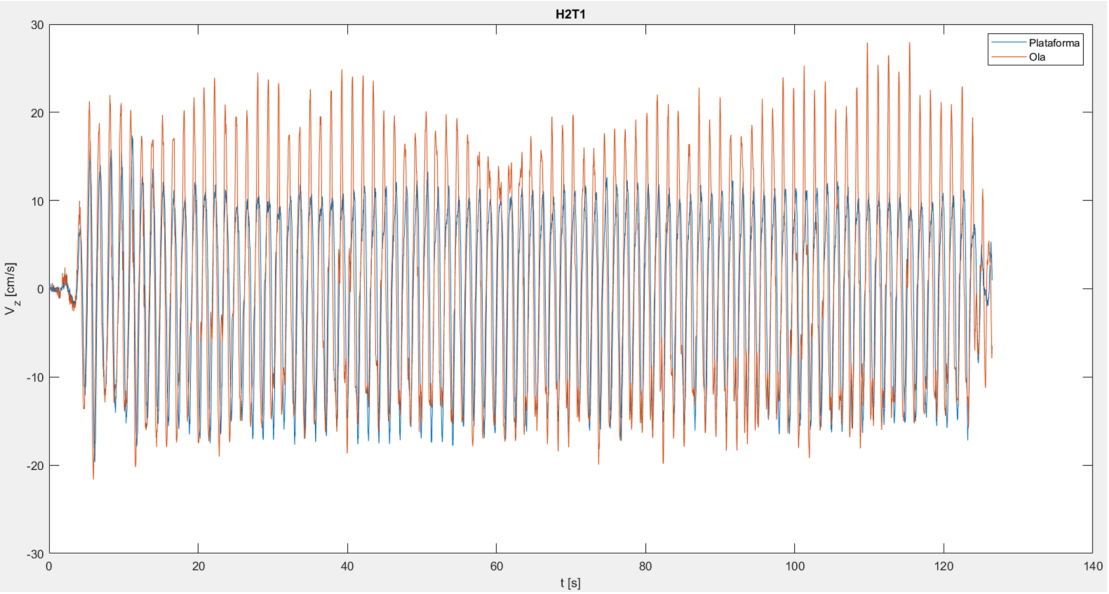


Gráfico 34: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.4. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H2T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19.1	19.4	18%

Tabla 42: Condiciones de laboratorio P4 50%, H2T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10.9	7.8	1.56	0.64282	0.16668

Tabla 43: Conversión de oleaje ideal

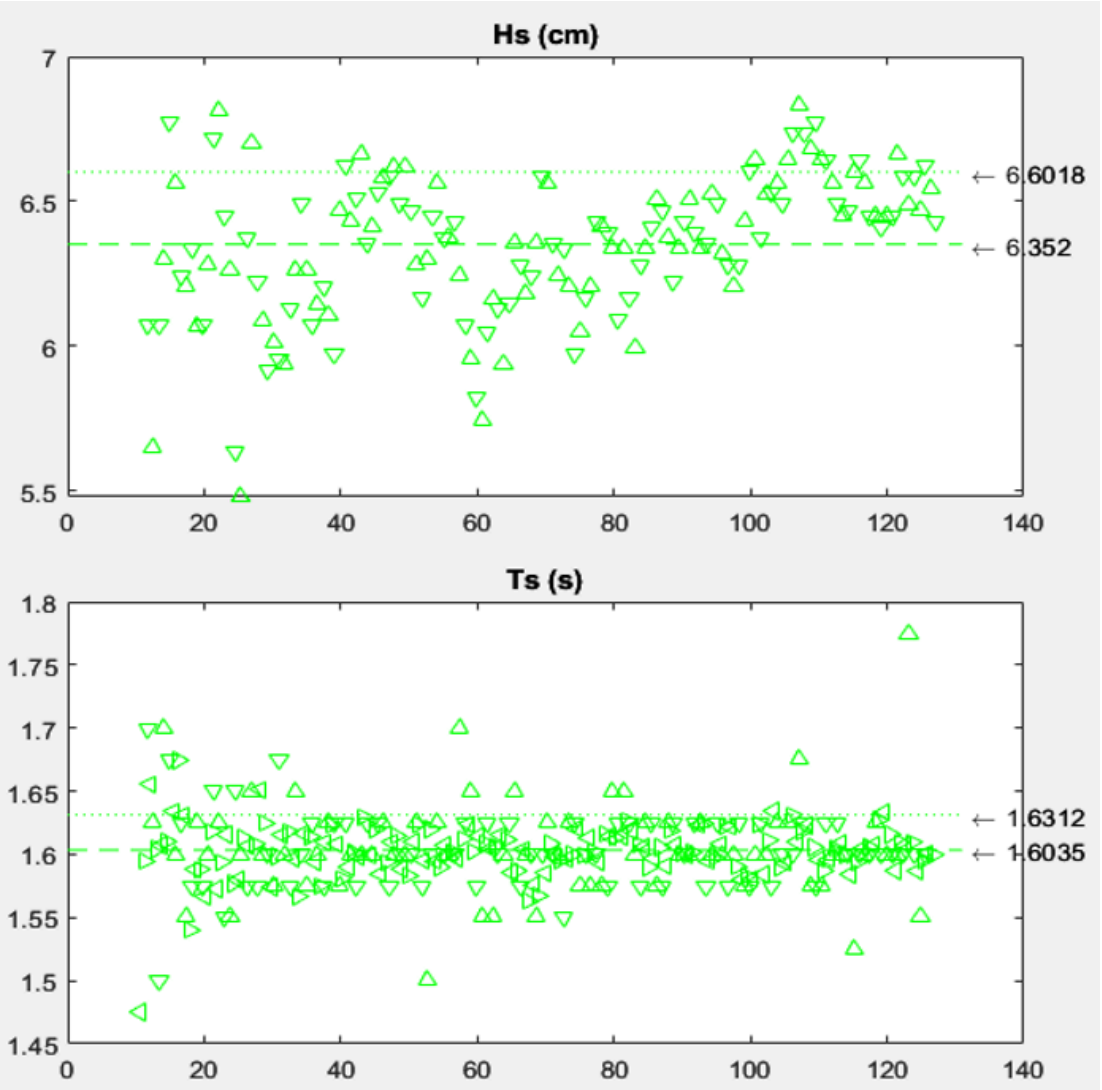


Gráfico 35: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.6	10.5	9.2	1.49	0.67344	0.18072

Tabla 44: Conversión de oleaje real

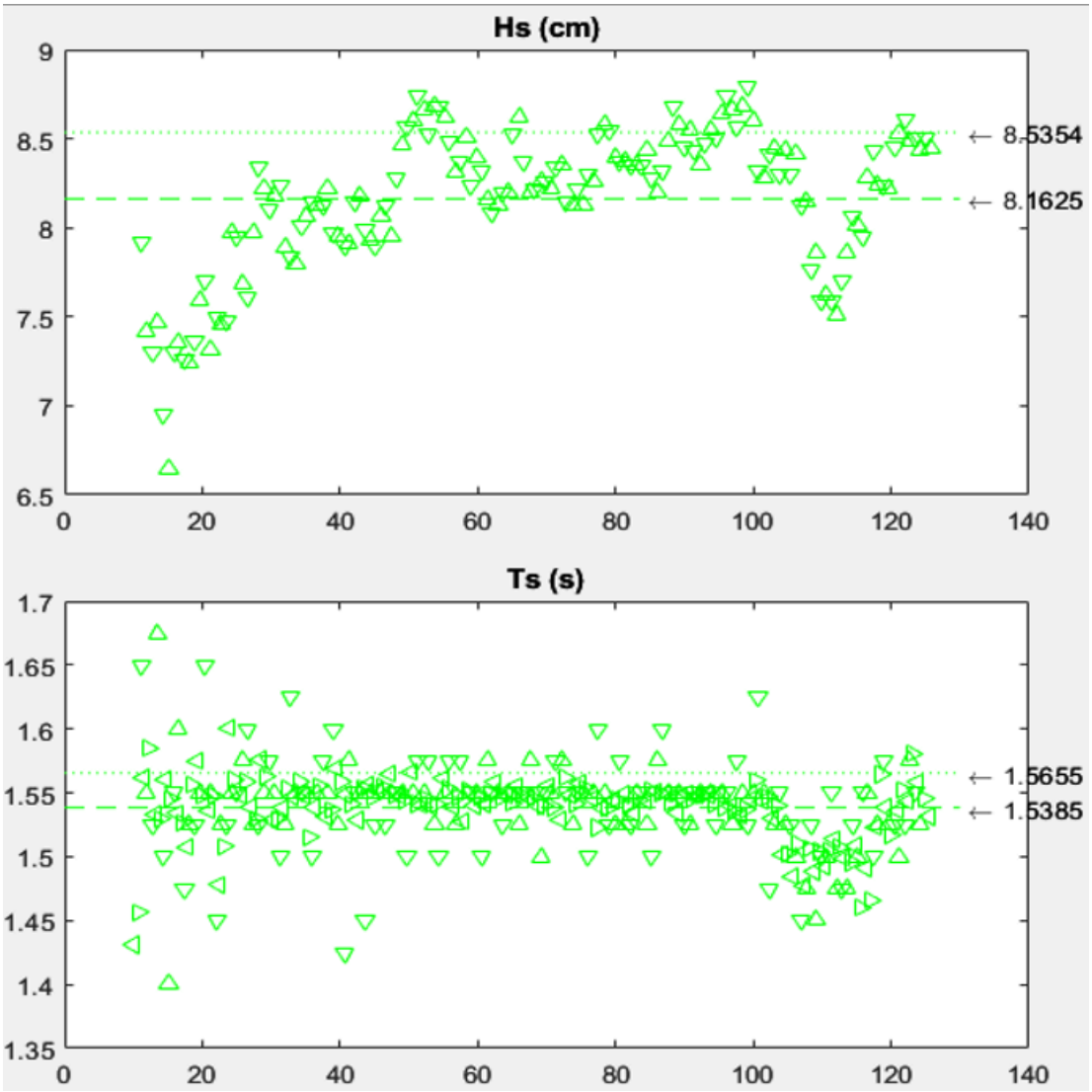


Gráfico 36: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

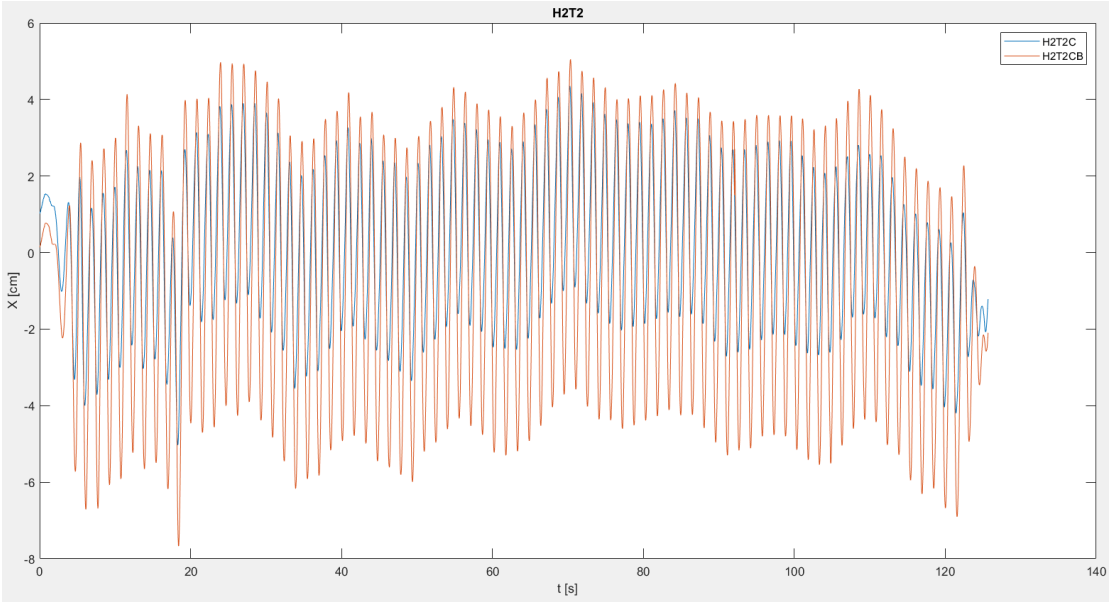


Gráfico 37: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

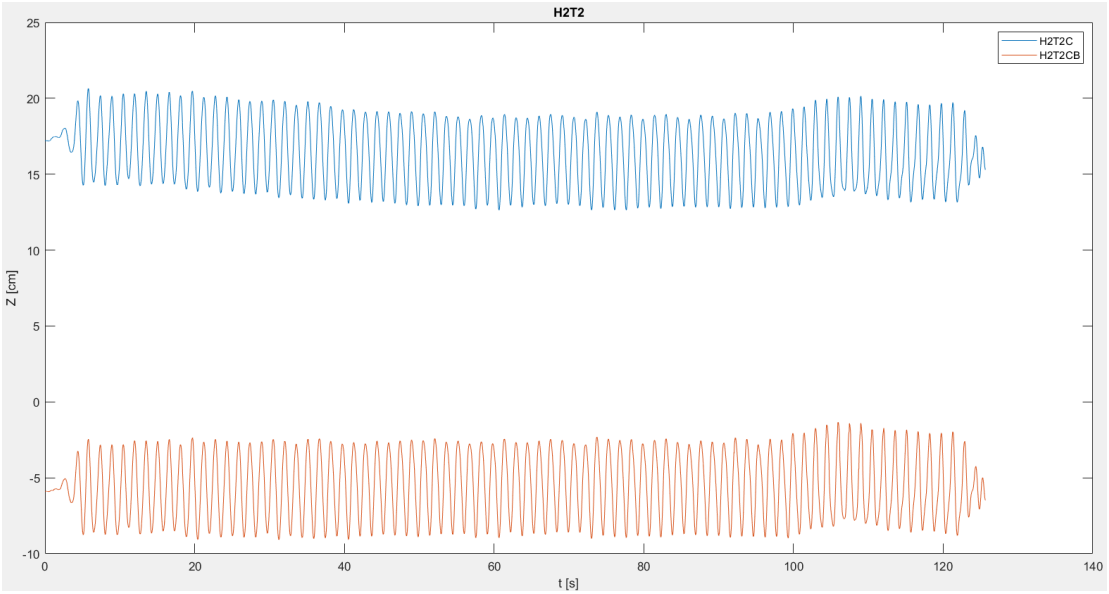


Gráfico 38: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

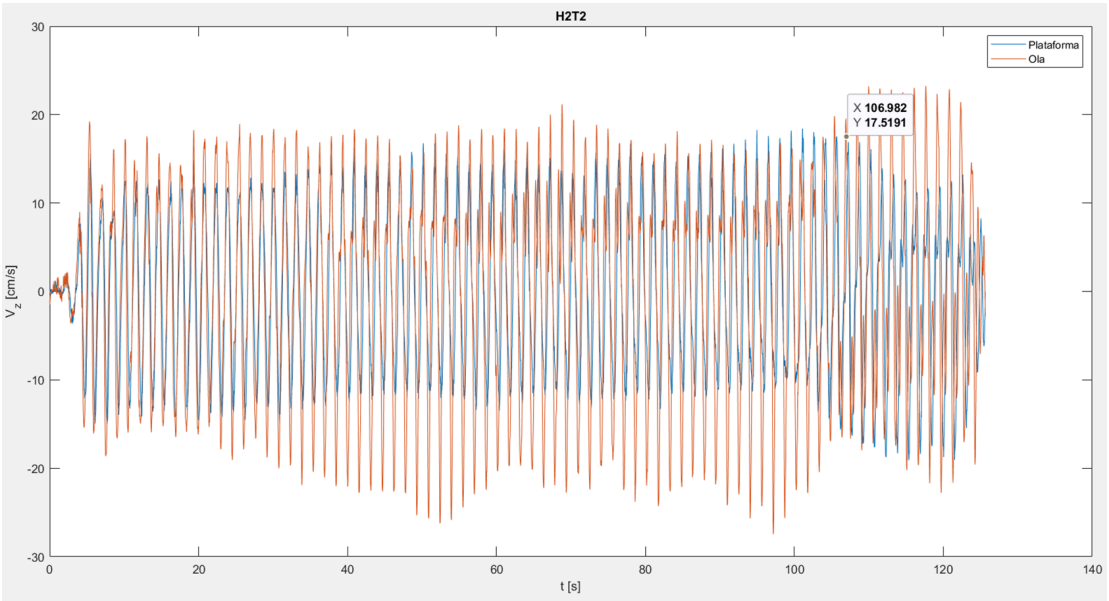


Gráfico 39: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.5. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H2T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20	20.3	18%

Tabla 45: Condiciones de laboratorio P4 50%, H2T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	12.7	7.8	1.79	0.55678	0.19855

Tabla 46: Conversión de oleaje ideal

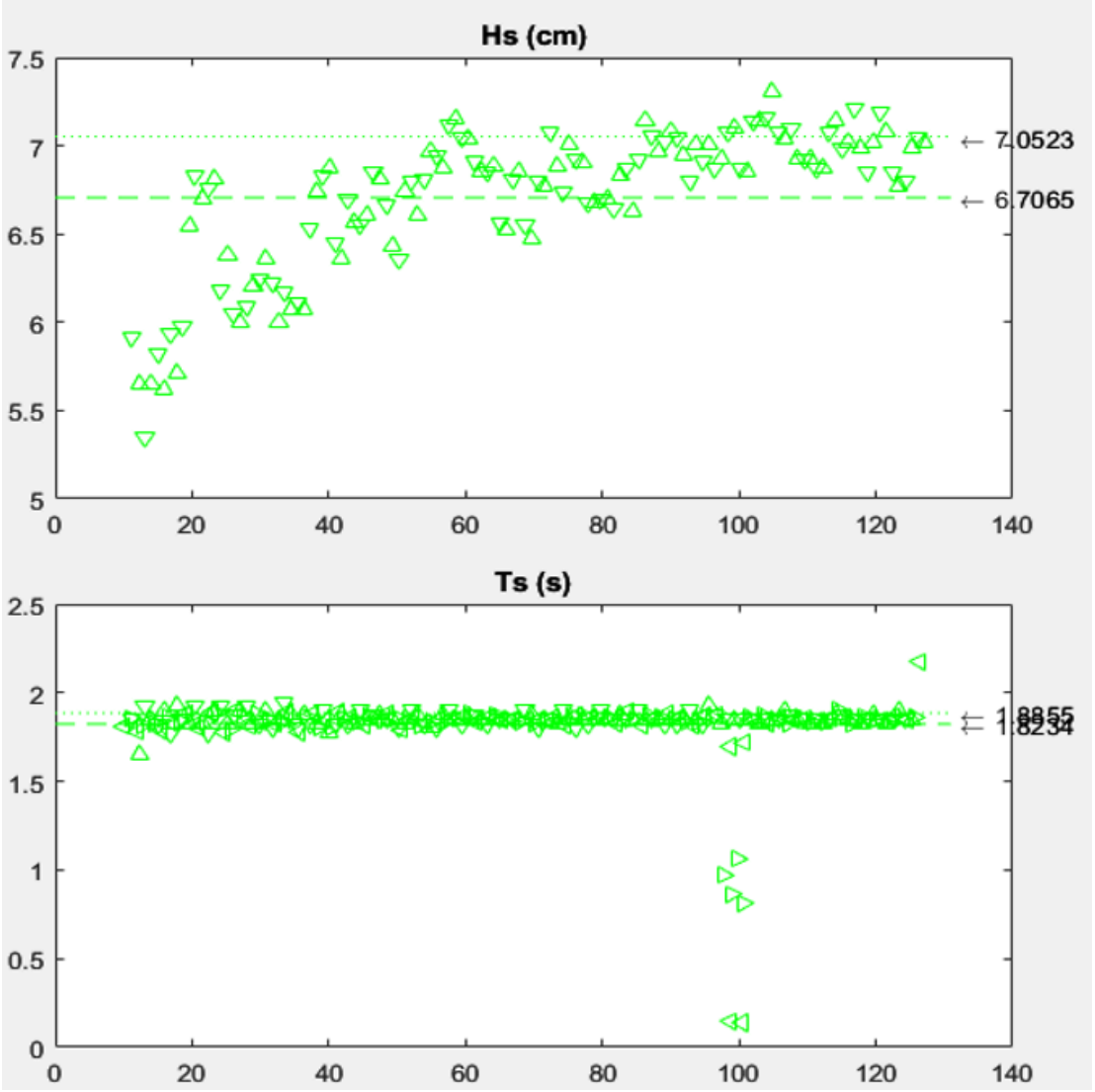


Gráfico 40: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.8	12.1	9.6	1.71	0.58439	0.22487

Tabla 47: Conversión de oleaje real

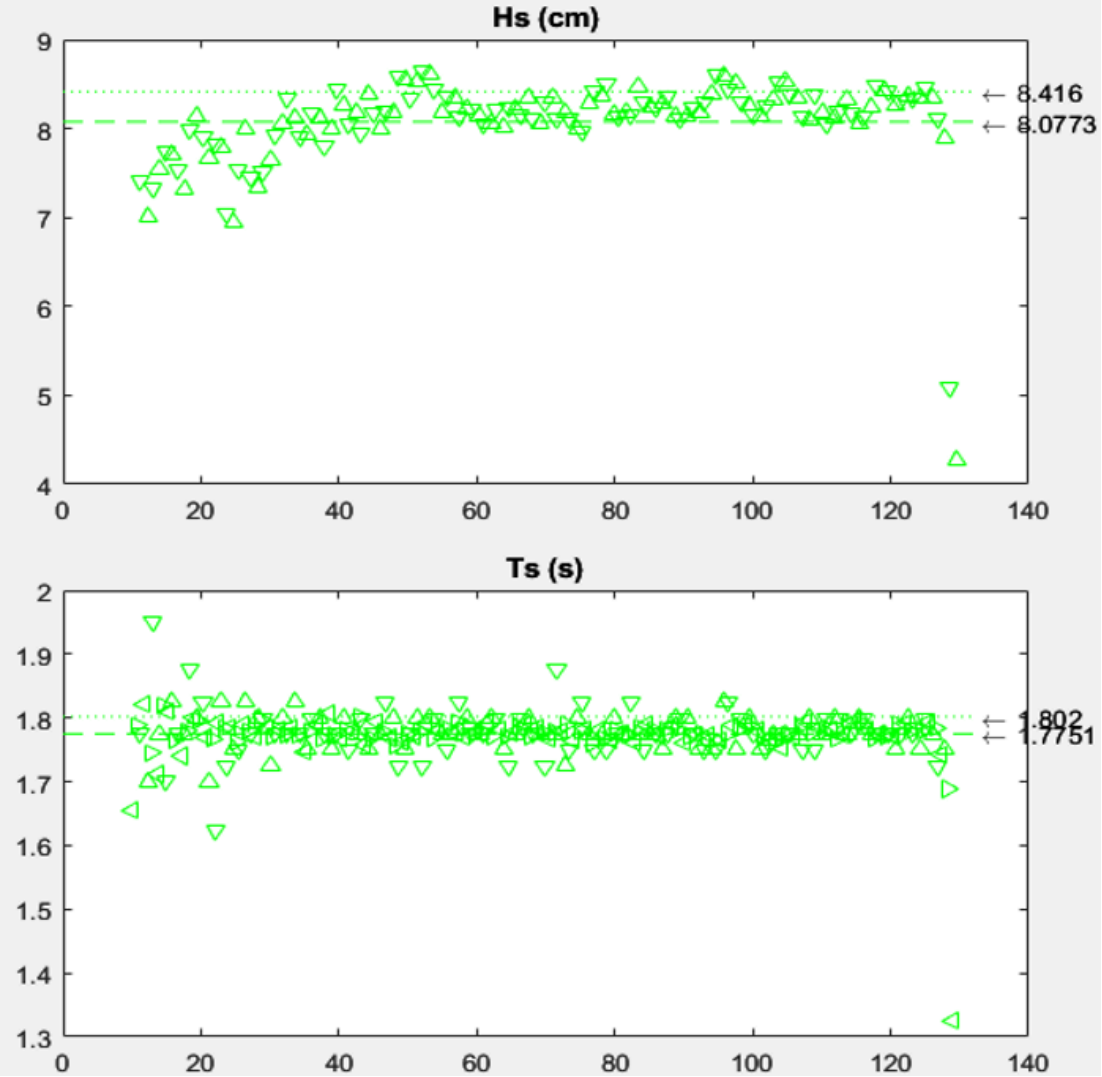


Gráfico 41: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

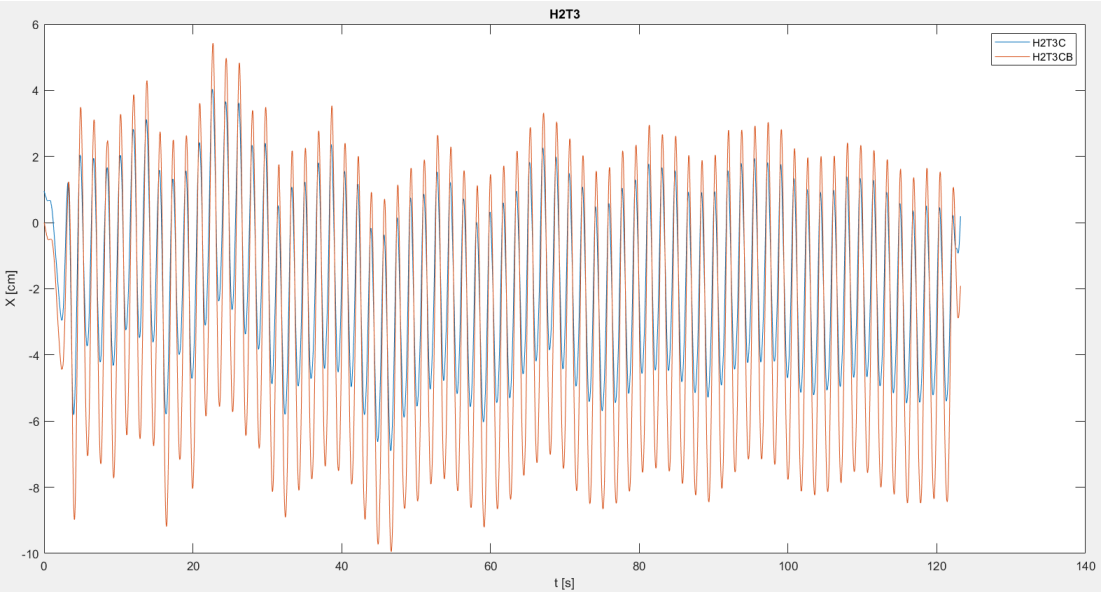


Gráfico 42: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

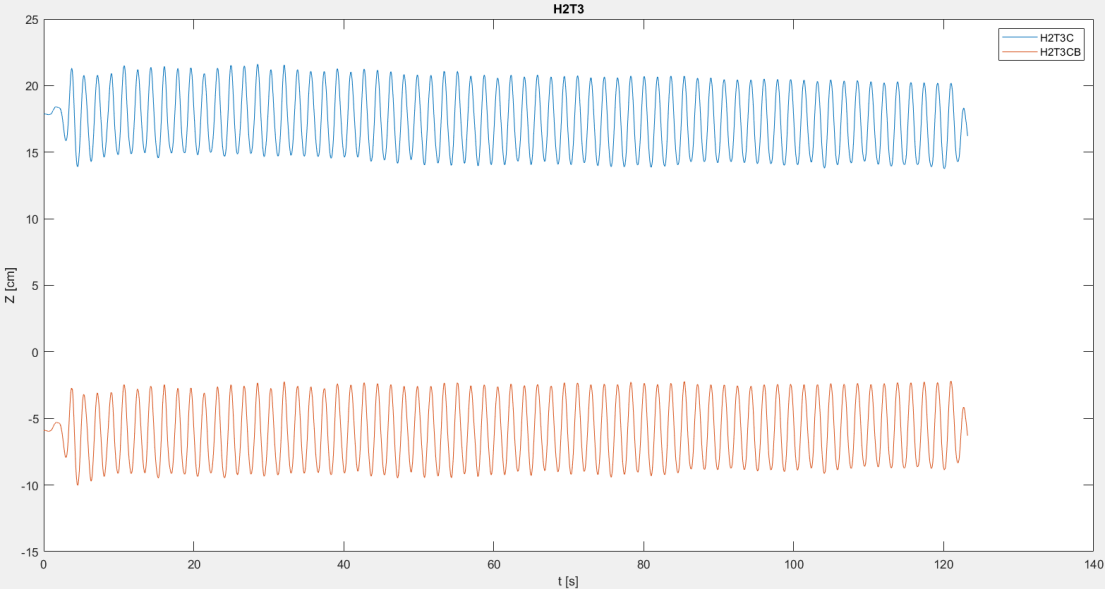


Gráfico 43: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

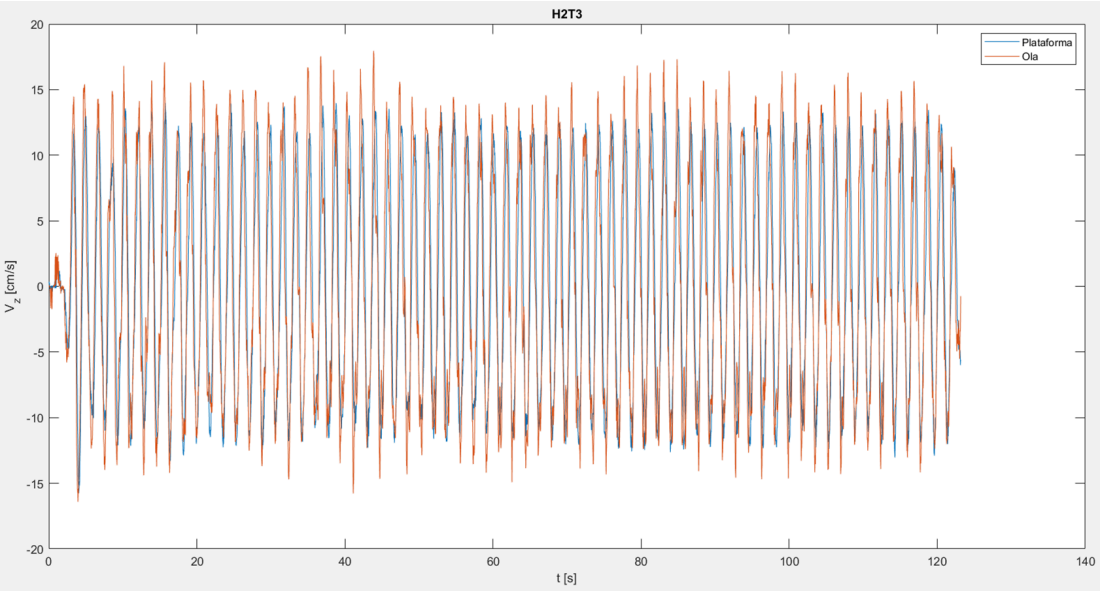


Gráfico 44: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.6. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H3T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19.5	19.6	18%

Tabla 48: Condiciones de laboratorio P4 50%, H3T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10	14.4	1.41	0.70711	0.26553

Tabla 49: Conversión de oleaje ideal

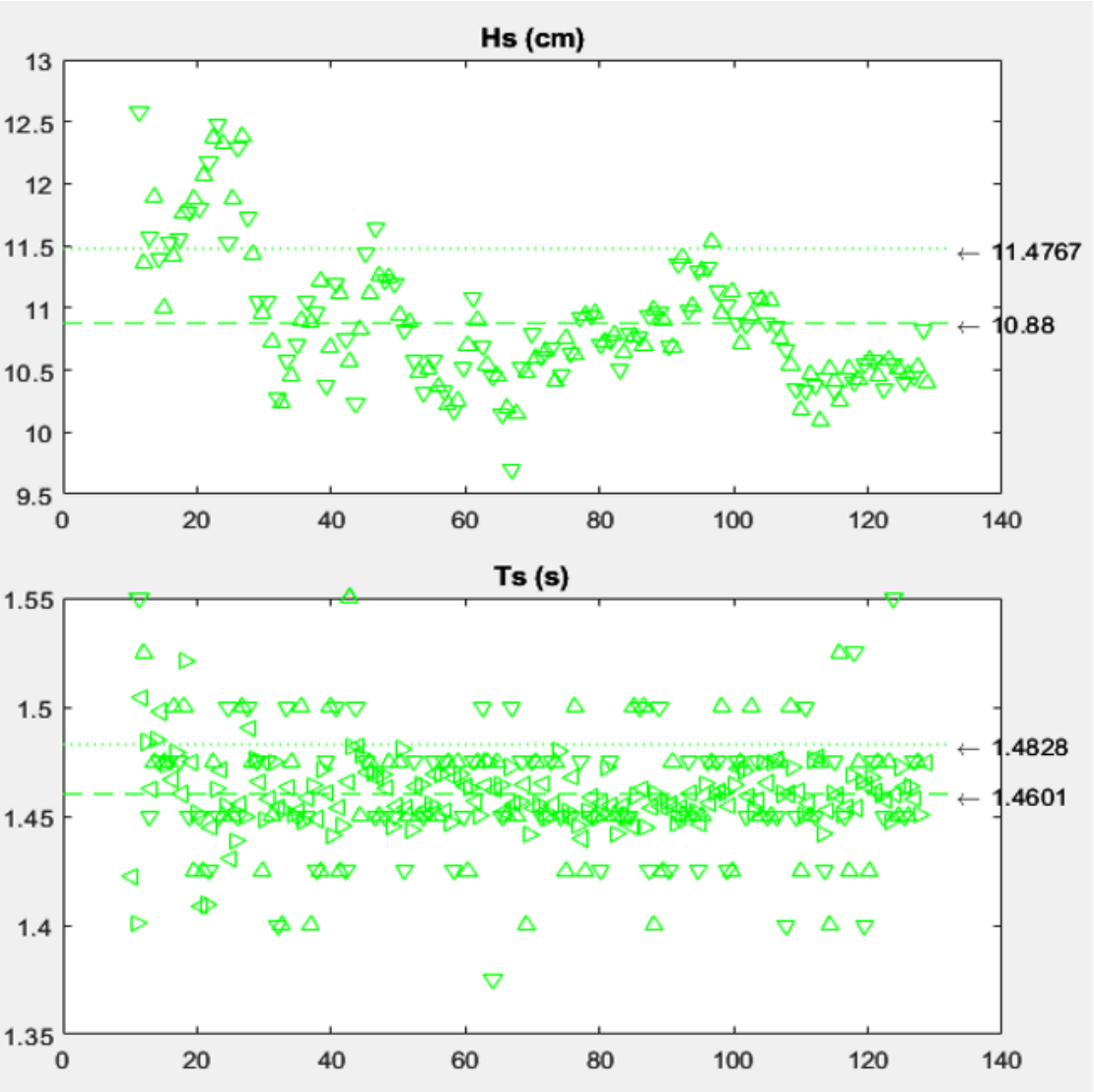


Gráfico 45: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.6	9.5	17.2	1.34	0.74432	0.29624

Tabla 50: Conversión de oleaje real

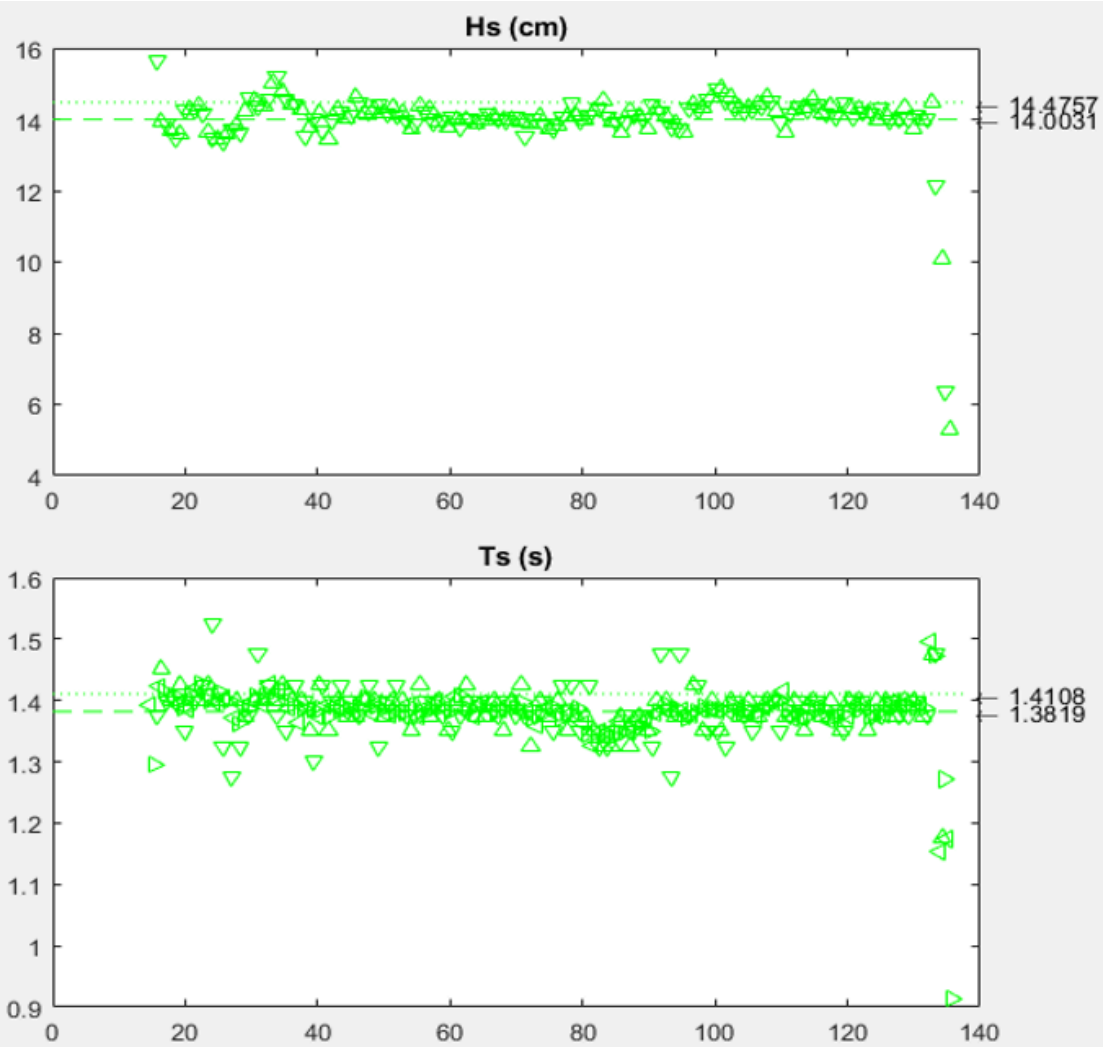


Gráfico 46: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

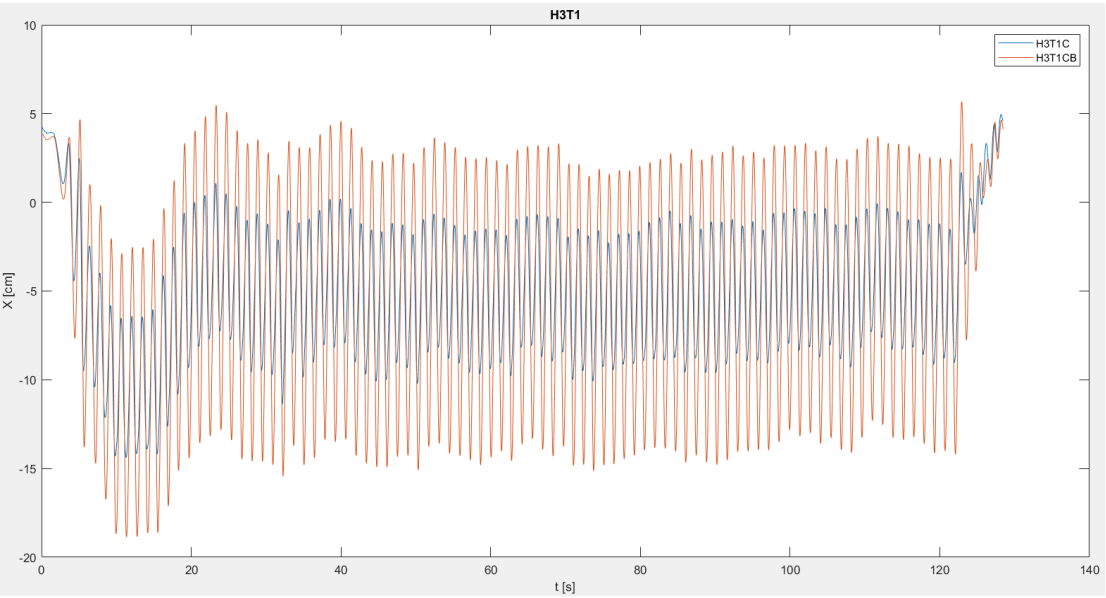


Gráfico 47: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

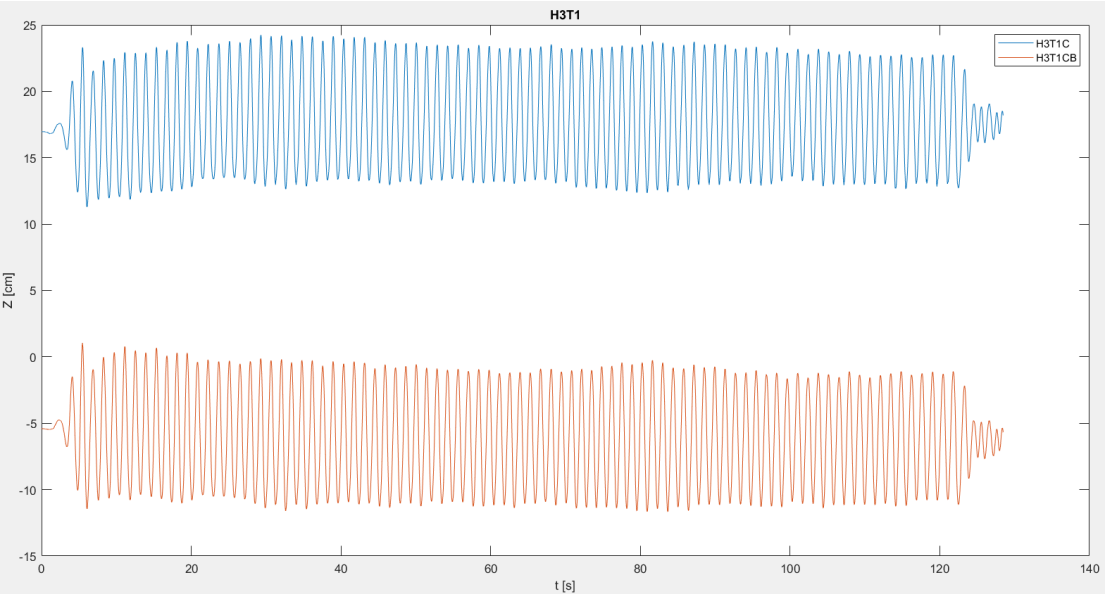


Gráfico 48: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

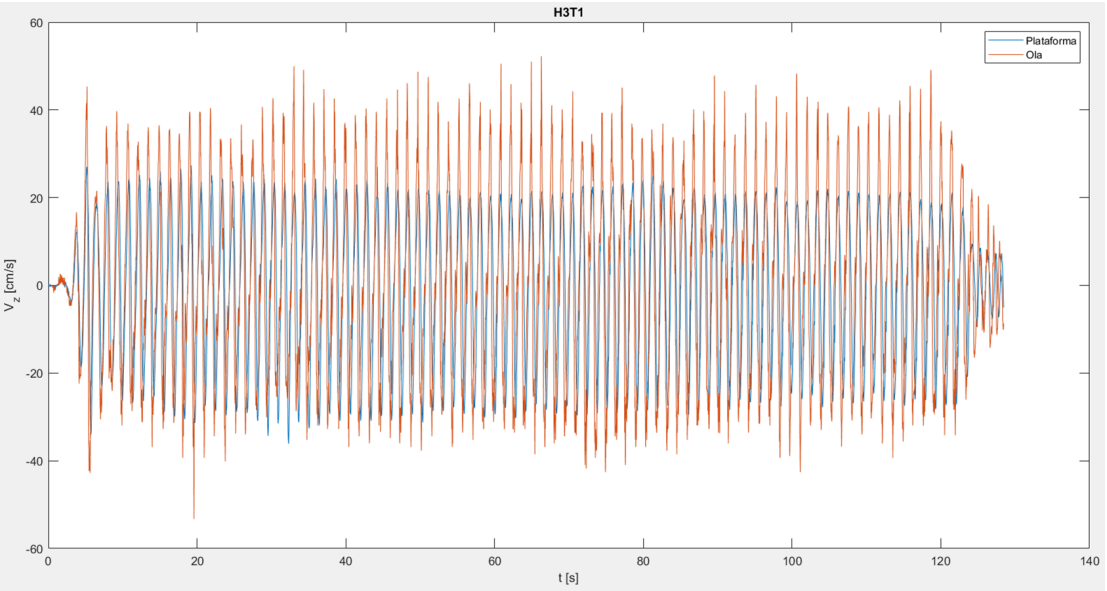


Gráfico 49: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.7. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H3T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19.6	19.8	18%

Tabla 51: Condiciones de laboratorio P4 50%, H3T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10.9	14.4	1.56	0.64282	0.30003

T*abla 52: Conversión de oleaje ideal*

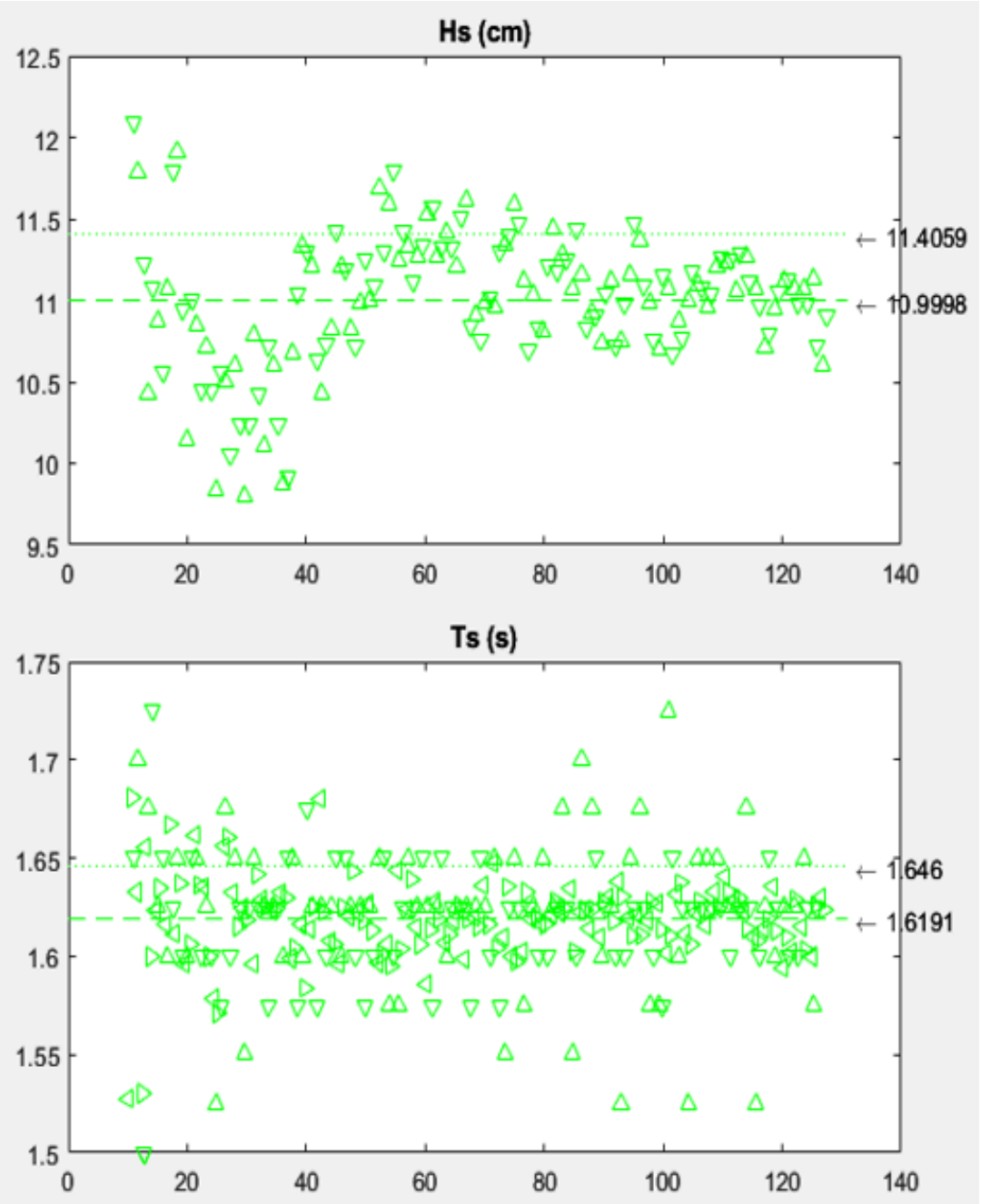


Gráfico 50: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.2	10.5	16.4	1.49	0.67344	0.32215

Tabla 53: Conversión de oleaje real

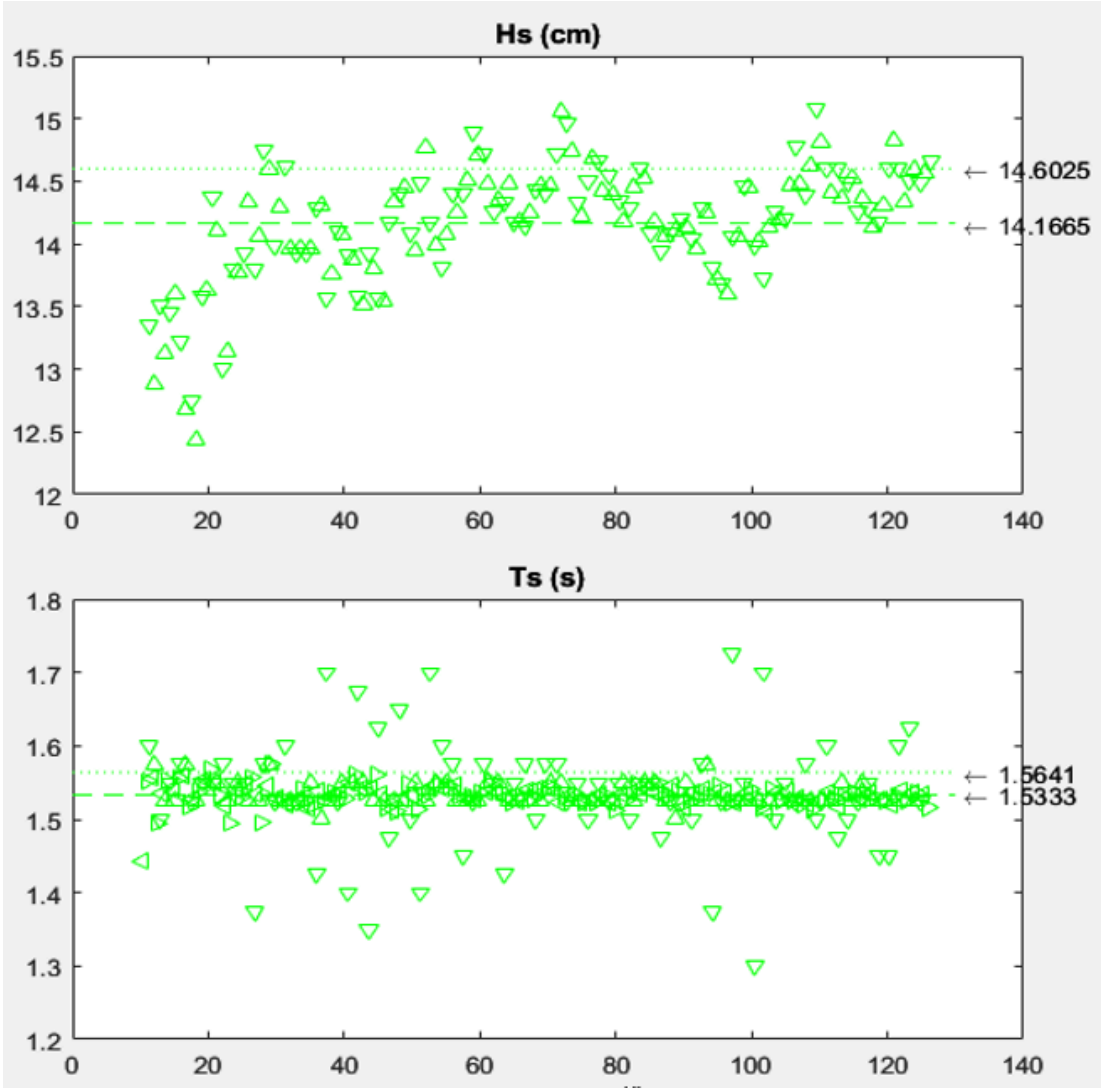


Gráfico 51: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

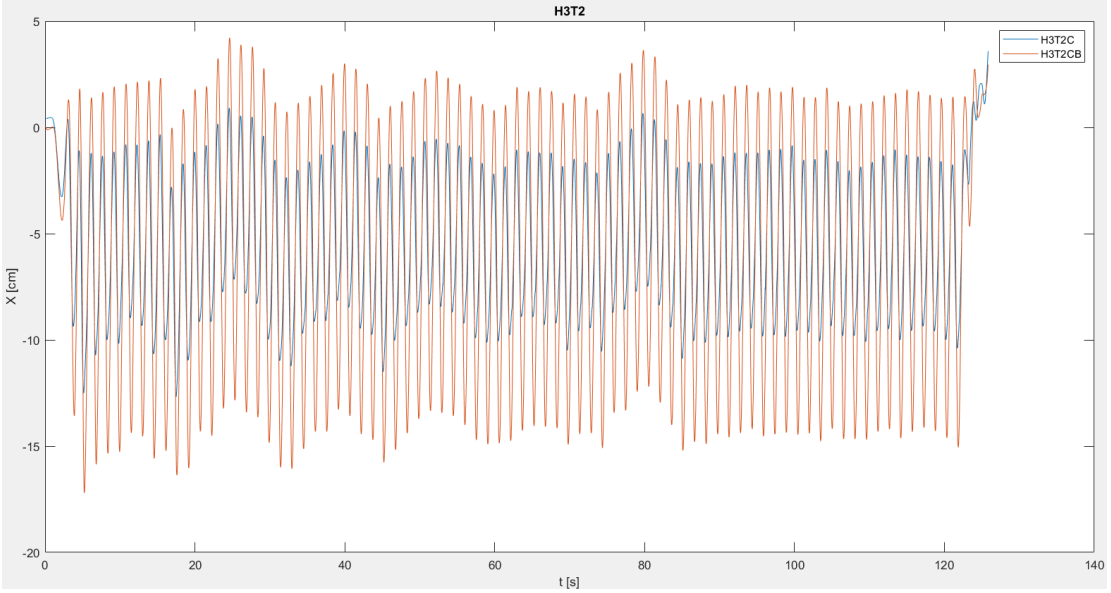


Gráfico 52: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

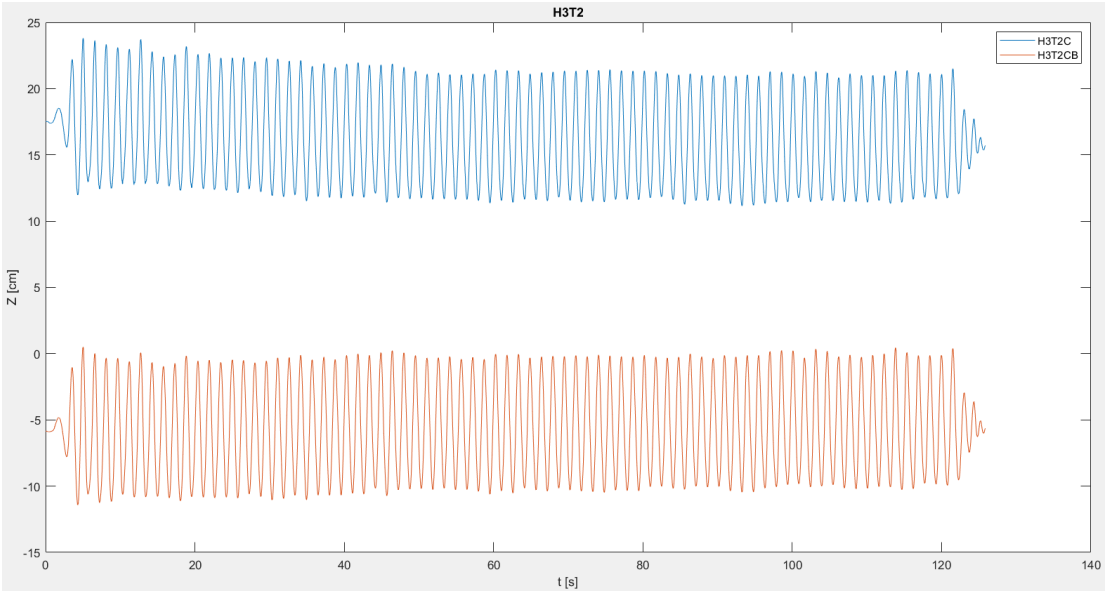


Gráfico 53: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

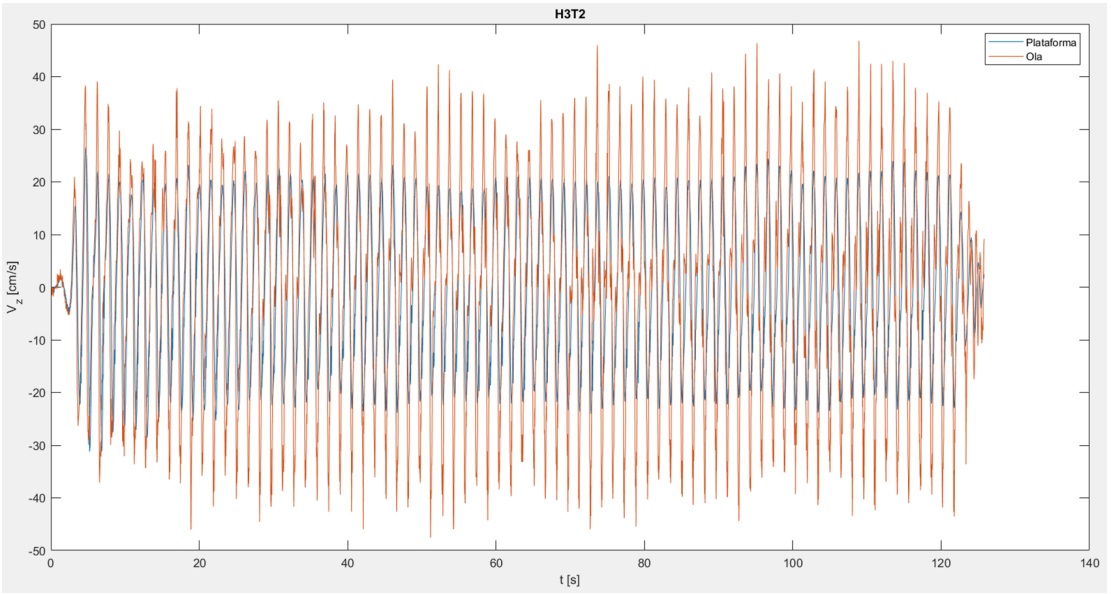


Gráfico 54: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.8. P4

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H3T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20	20.2	18%

Tabla 54: Condiciones de laboratorio P4 50%, H3T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	12.7	14.4	1.79	0.55678	0.3574

T*abla 55: Conversión de oleaje ideal*

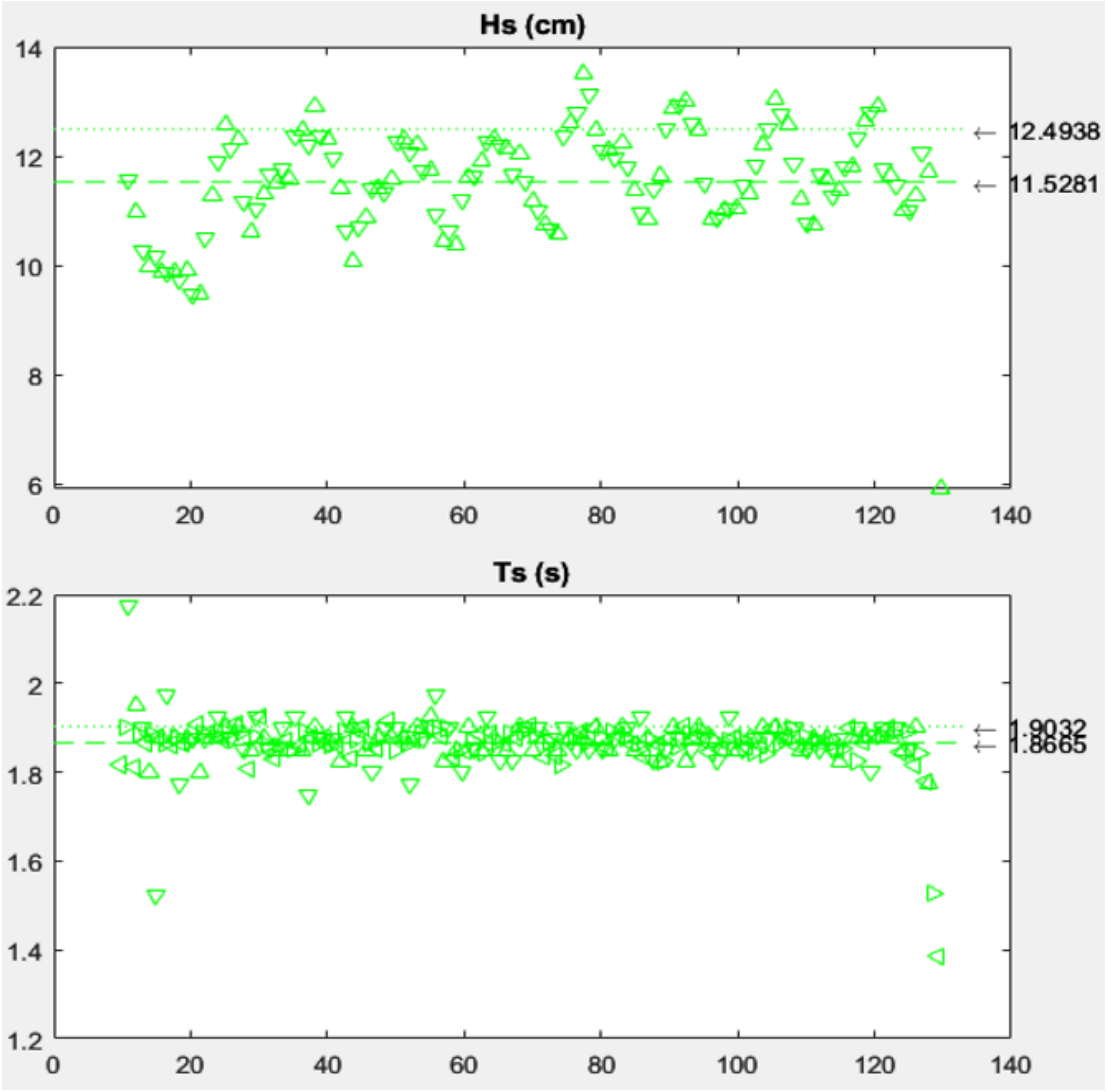


Gráfico 55: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.5	12.1	17	1.71	0.58439	0.39821

Tabla 56: Conversión de oleaje real

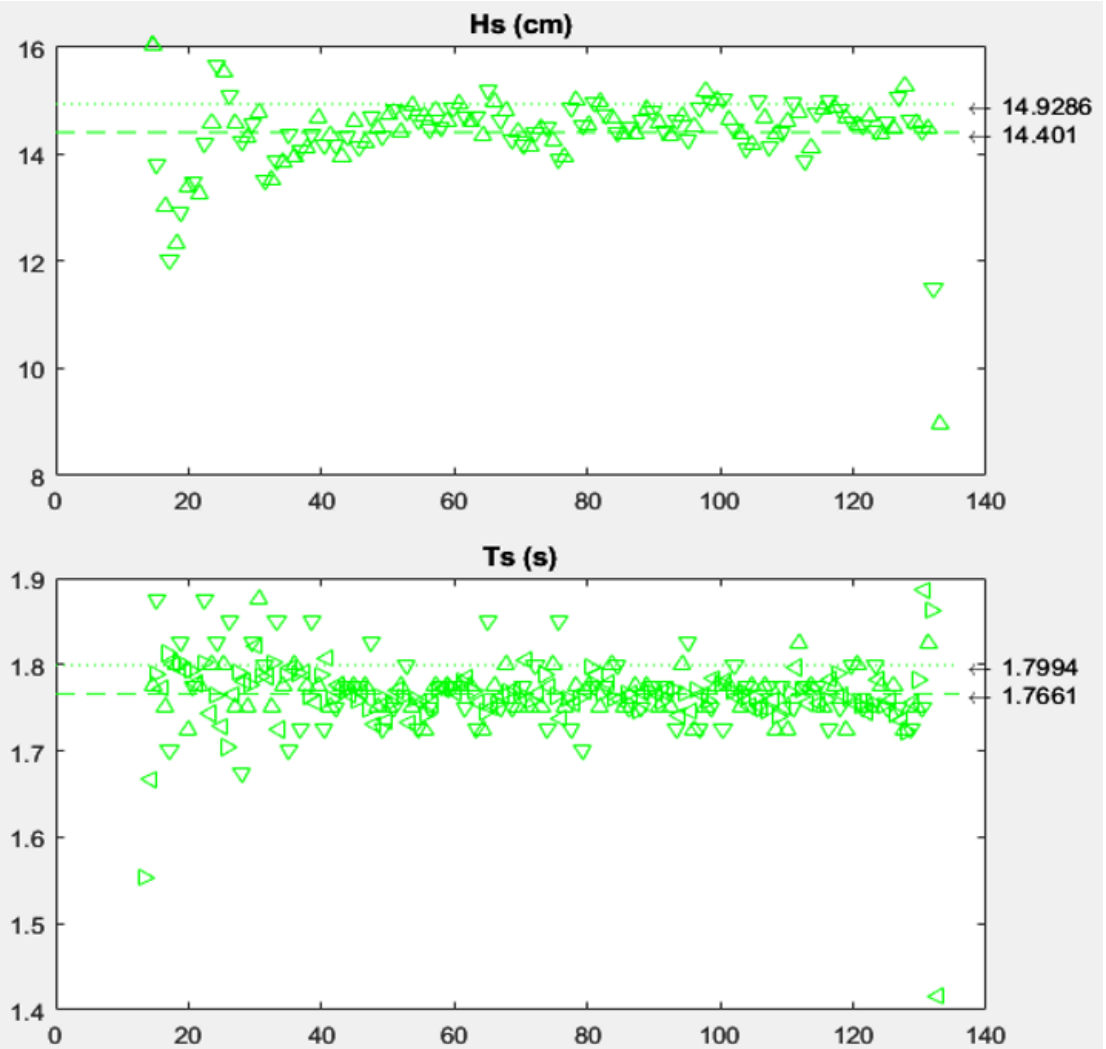


Gráfico 56: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

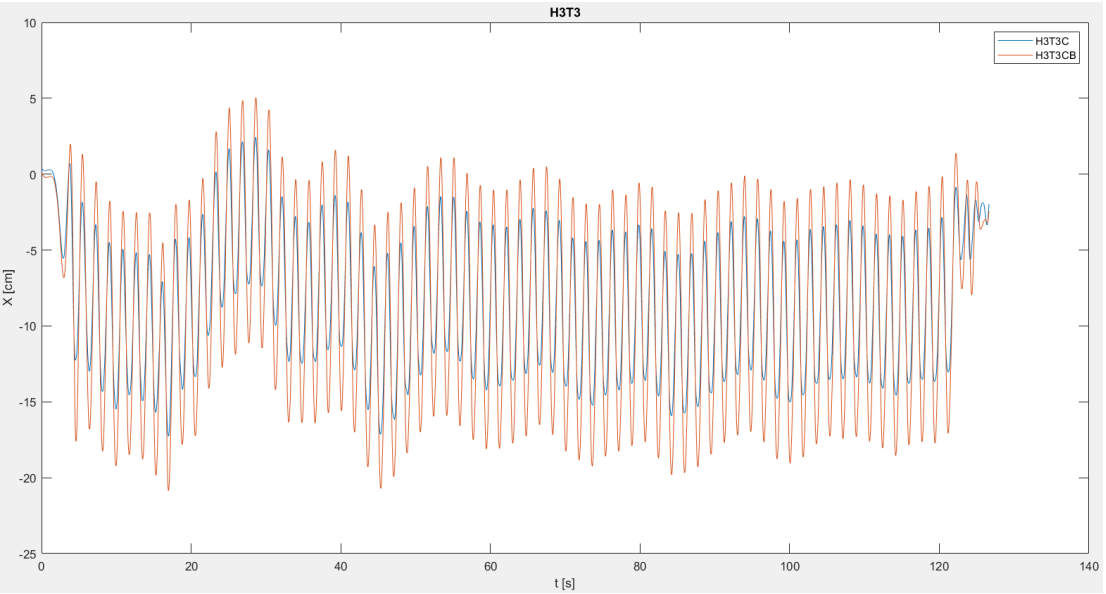


Gráfico 57: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

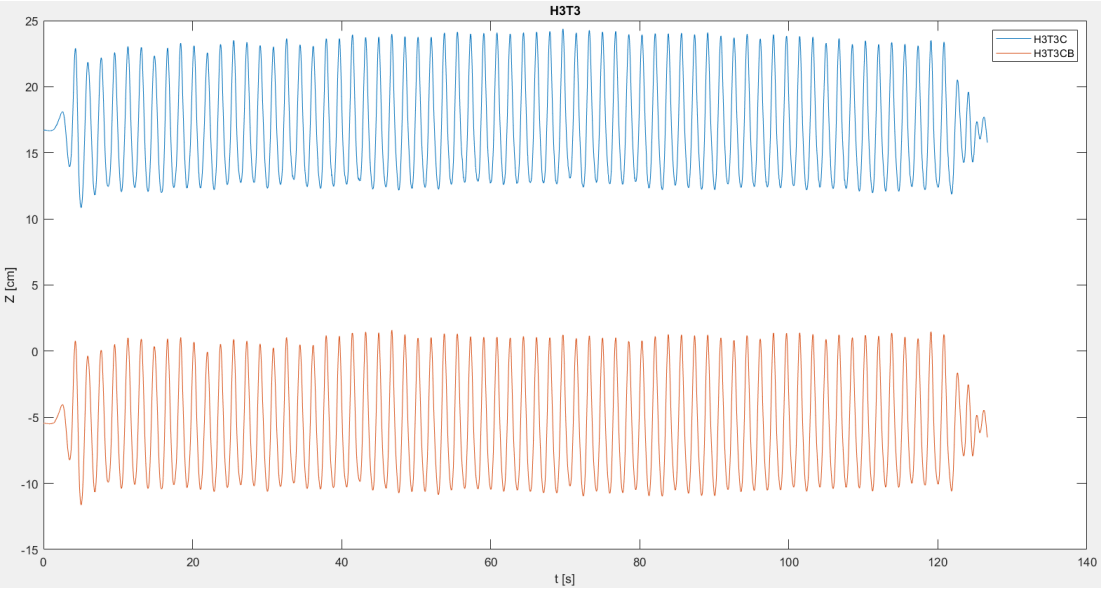


Gráfico 58: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

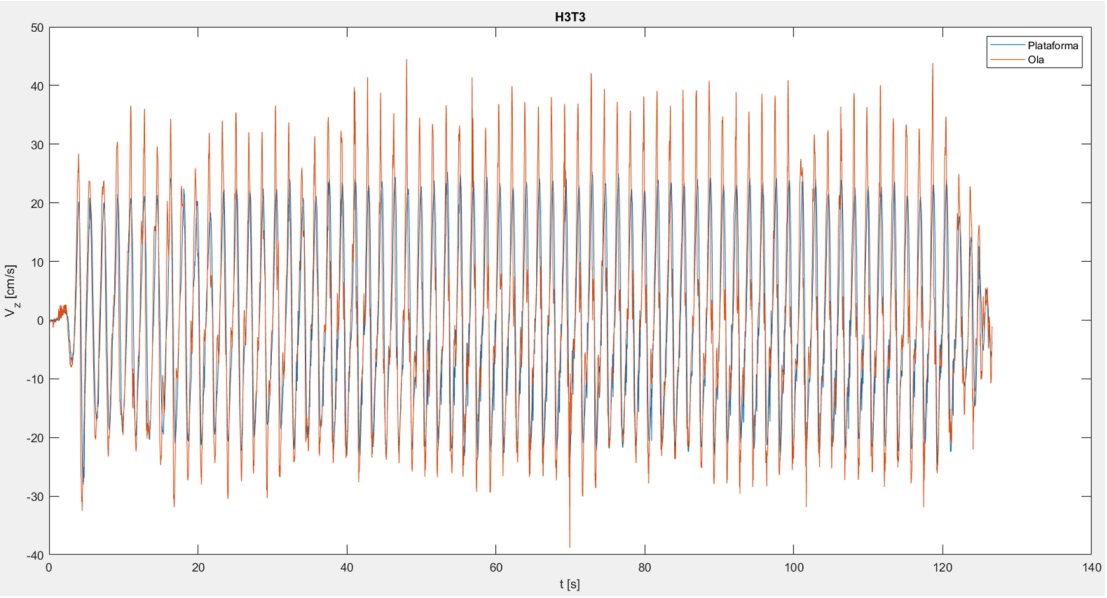


Gráfico 59: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.9. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H1T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.2	20.4	18%

Tabla 57: Condiciones de laboratorio P4 65%, H1T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10	5	1.41	0.70711	0.092197

Tabla 58: Conversión de oleaje ideal

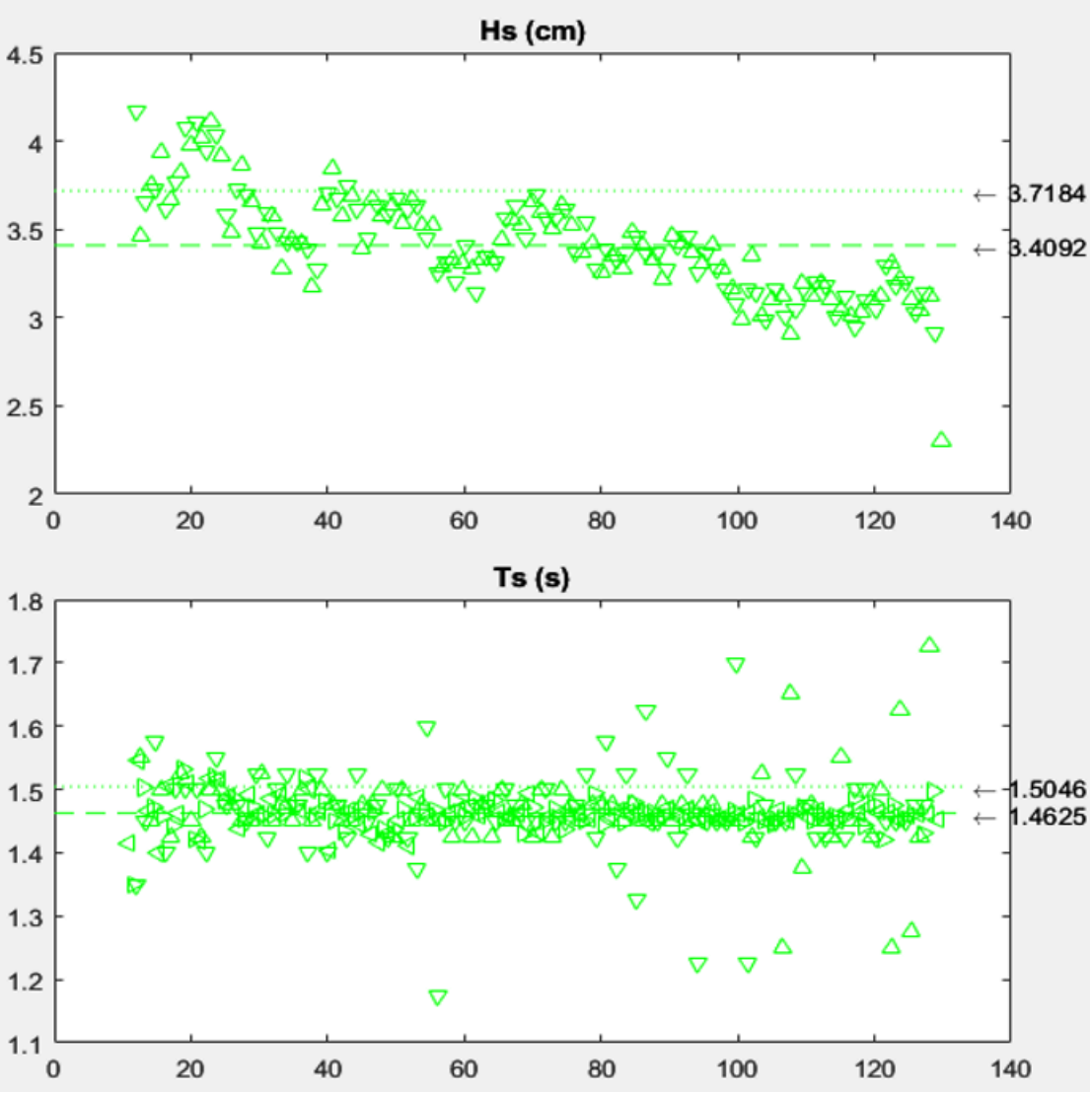


Gráfico 60: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.9	9.7	5.8	1.37	0.72898	0.10272

Tabla 59: Conversión de oleaje real

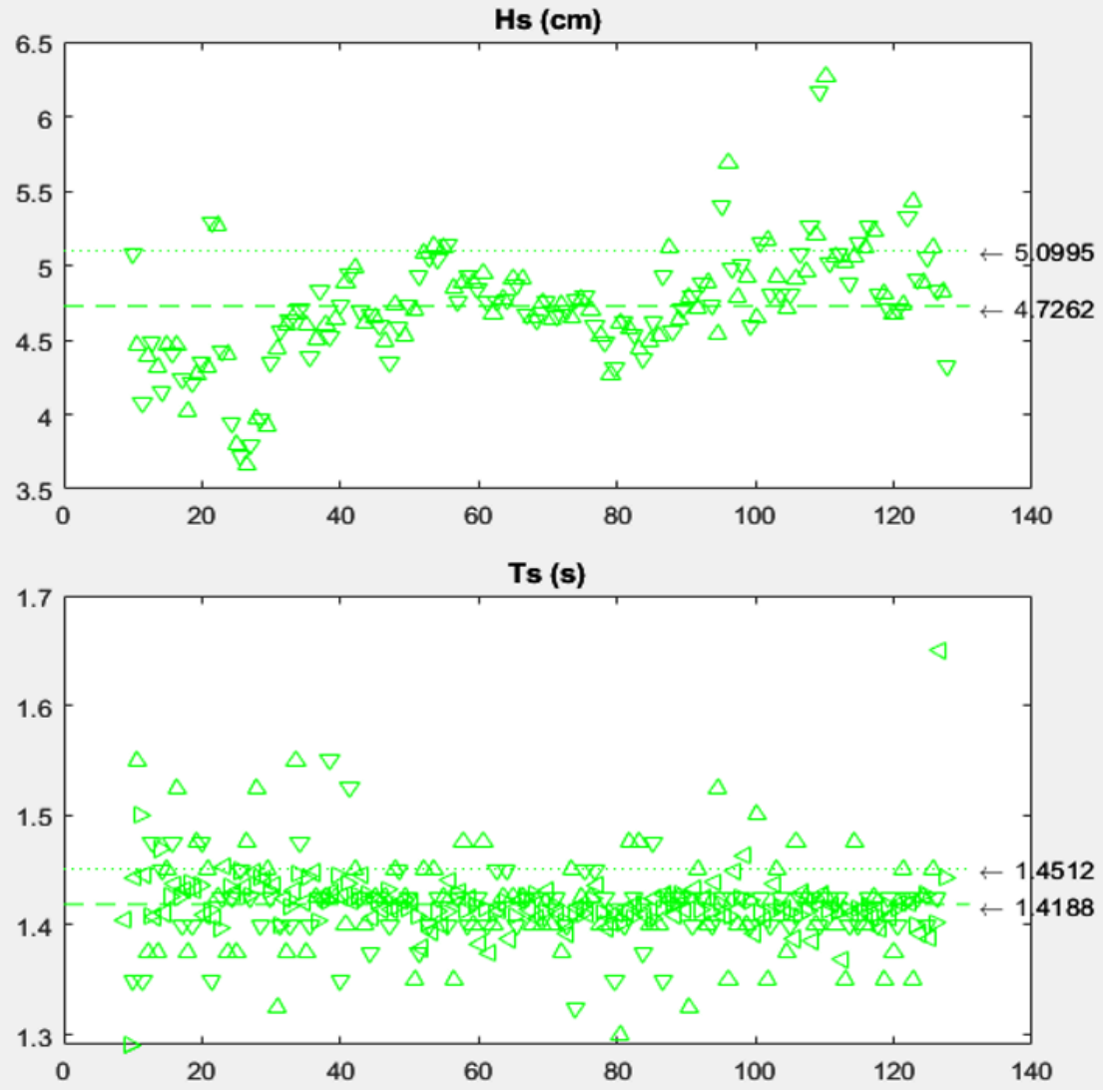


Gráfico 61: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

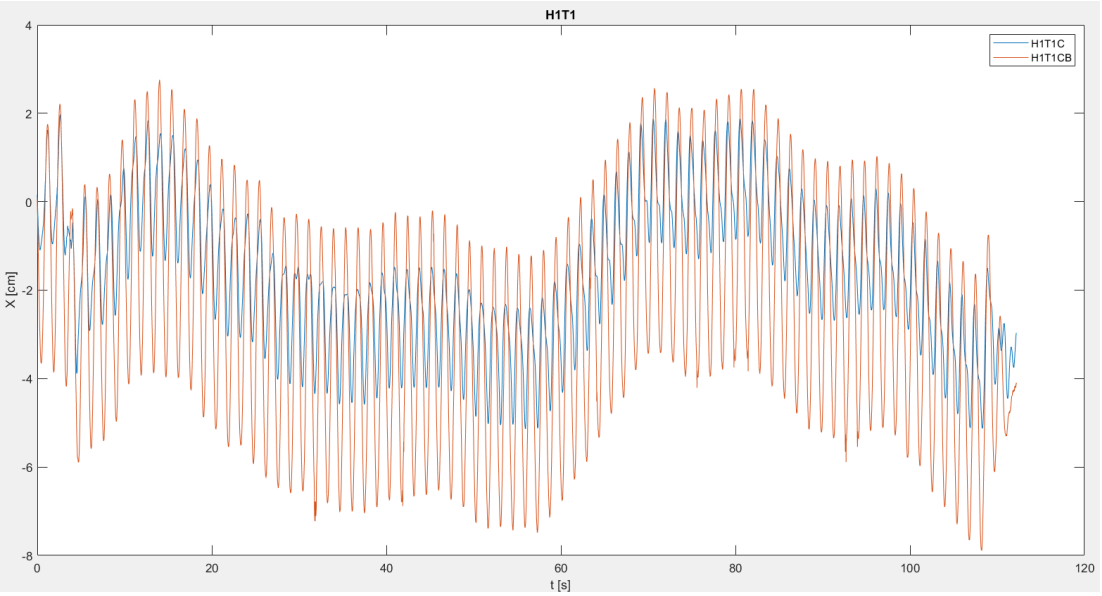


Gráfico 62: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

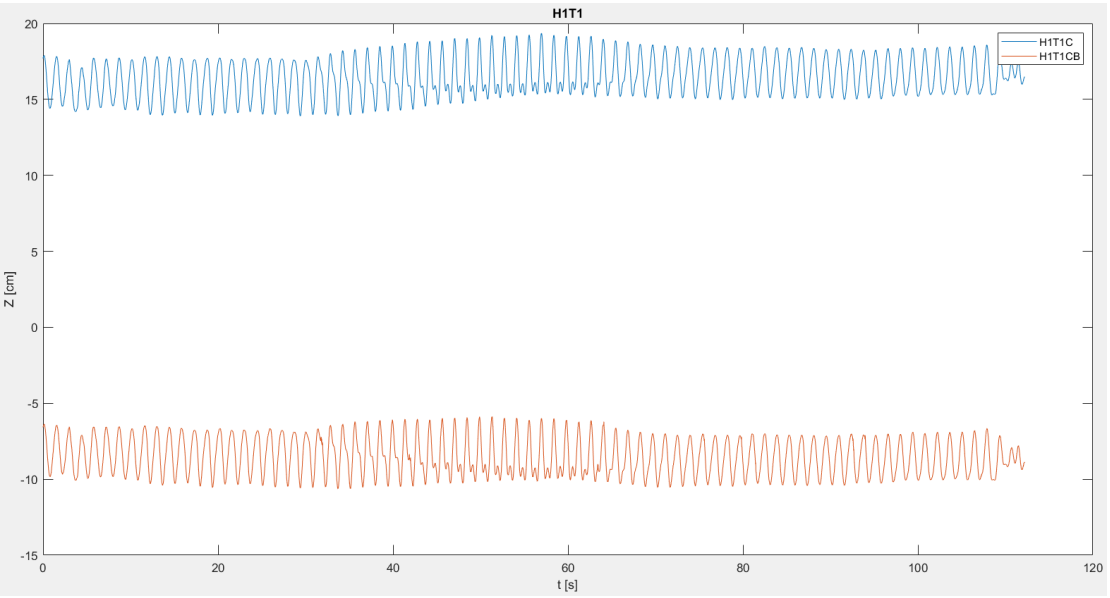


Gráfico 63: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

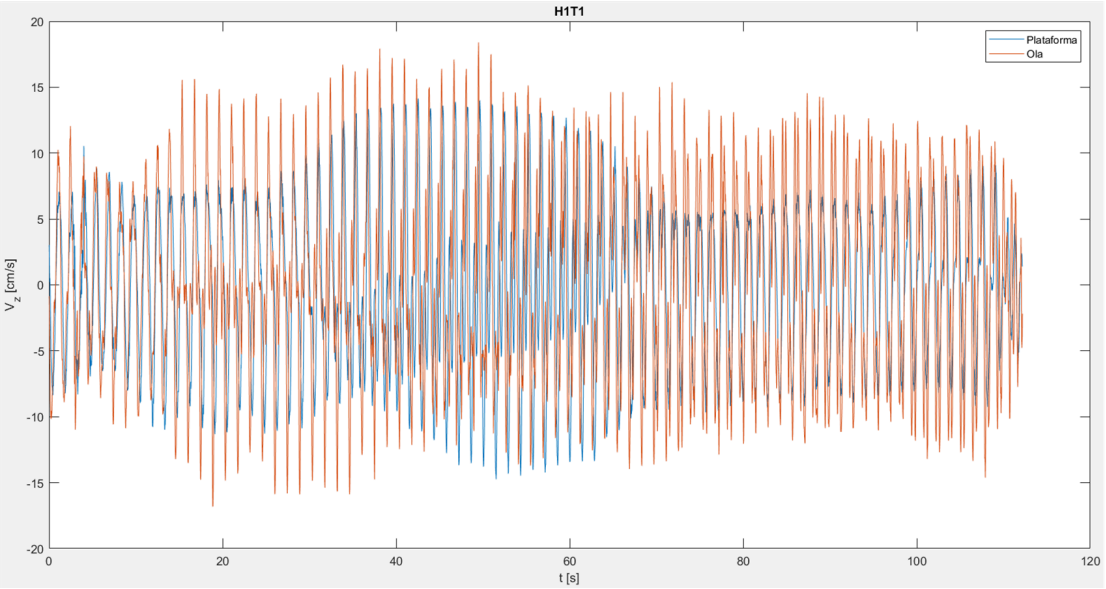


Gráfico 64: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.10. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H1T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.6	20.8	19%

Tabla 60: Condiciones de laboratorio P4 65%, H1T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10.9	5	1.56	0.64282	0.10418

T*abla 61: Conversión de oleaje ideal*

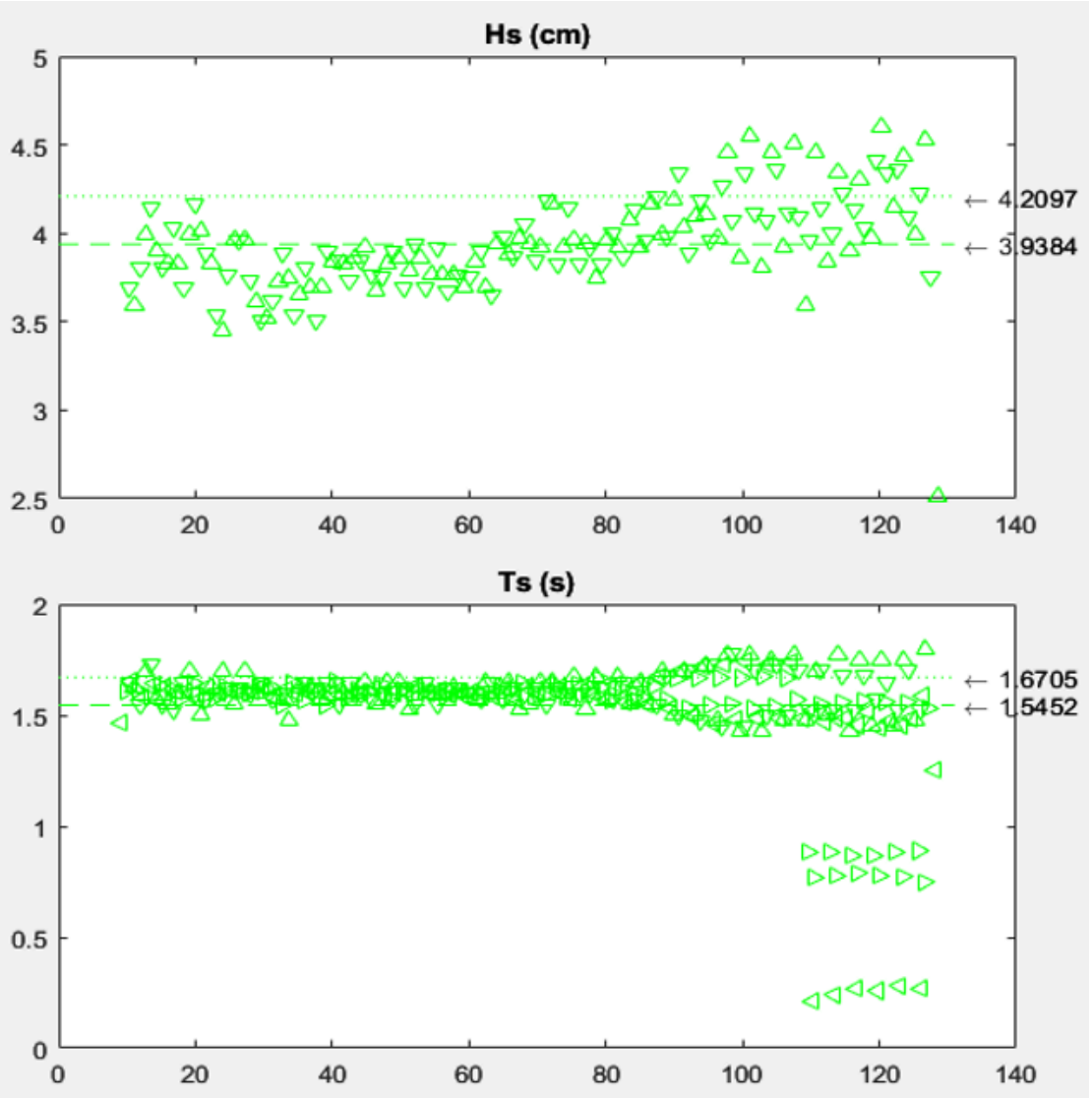


Gráfico 65: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3	10.5	6	1.49	0.67344	0.11786

Tabla 62: Conversión de oleaje real

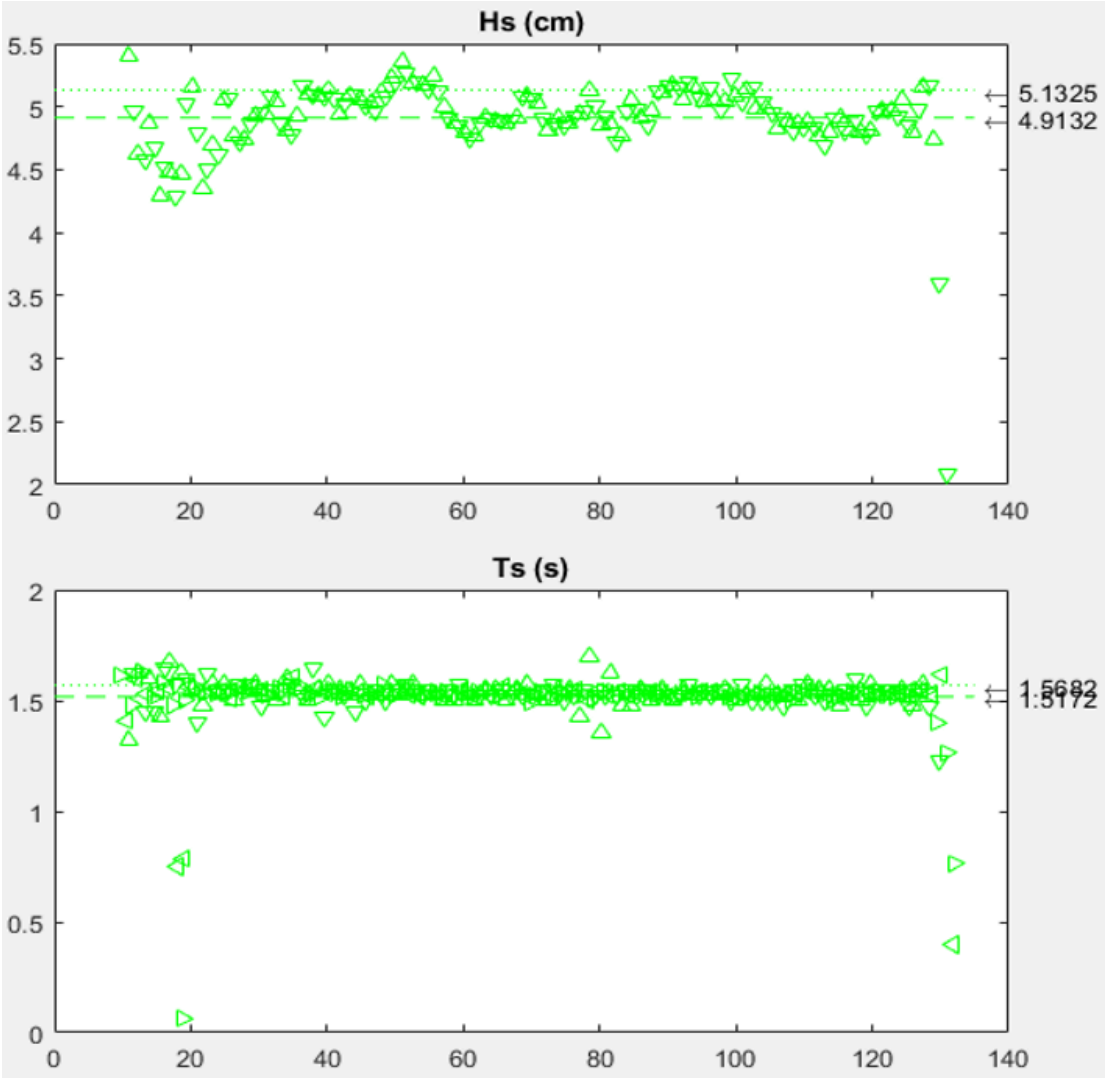


Gráfico 66: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

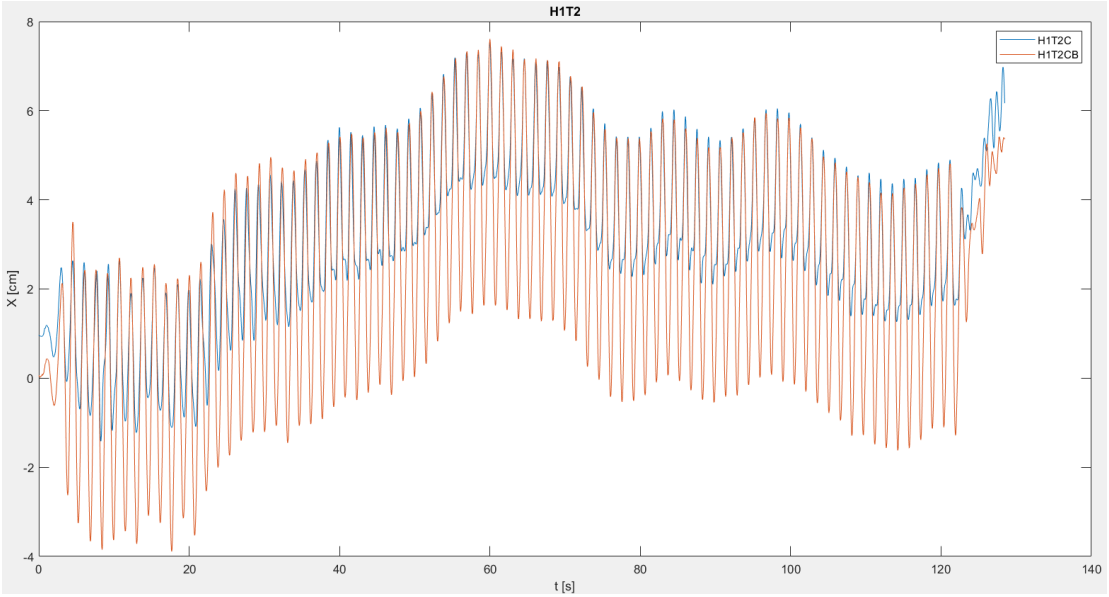


Gráfico 67: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

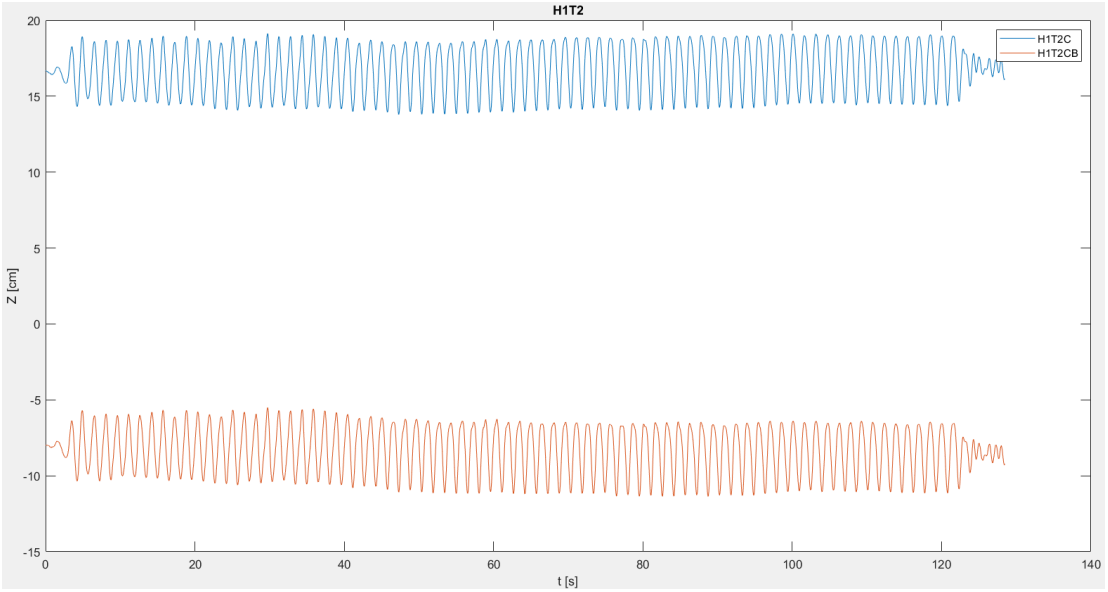


Gráfico 68: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

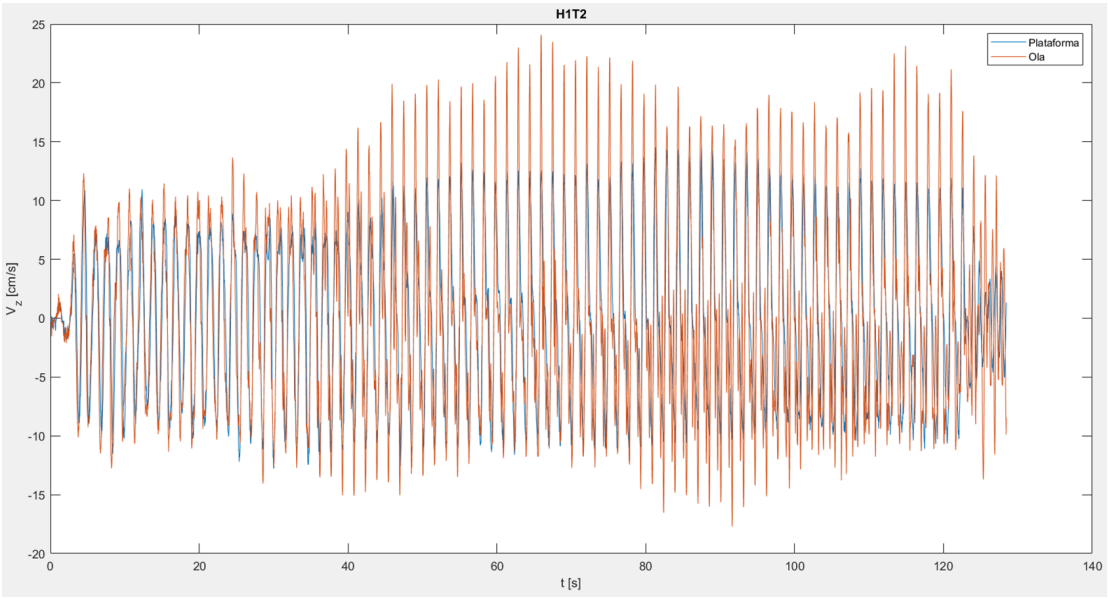


Gráfico 69: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.11. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H1T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.4	20.6	18%

Tabla 63: Condiciones de laboratorio P4 65%, H1T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	12.7	5	1.79	0.55678	0.1241

Tabla 64: Conversión de oleaje ideal

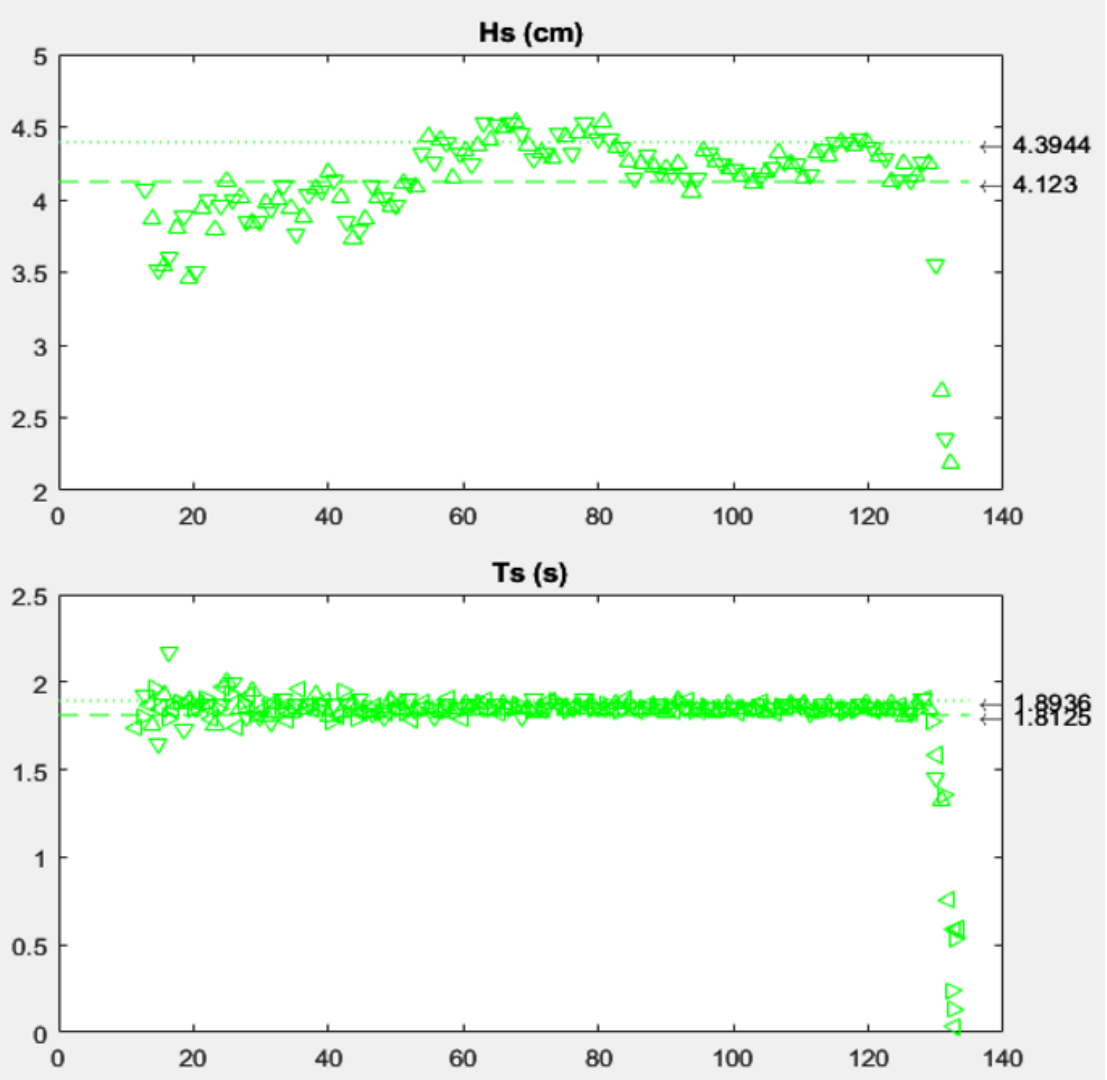


Gráfico 70: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.8	12.1	5.6	1.71	0.58439	0.13117

Tabla 66: Conversión de oleaje real

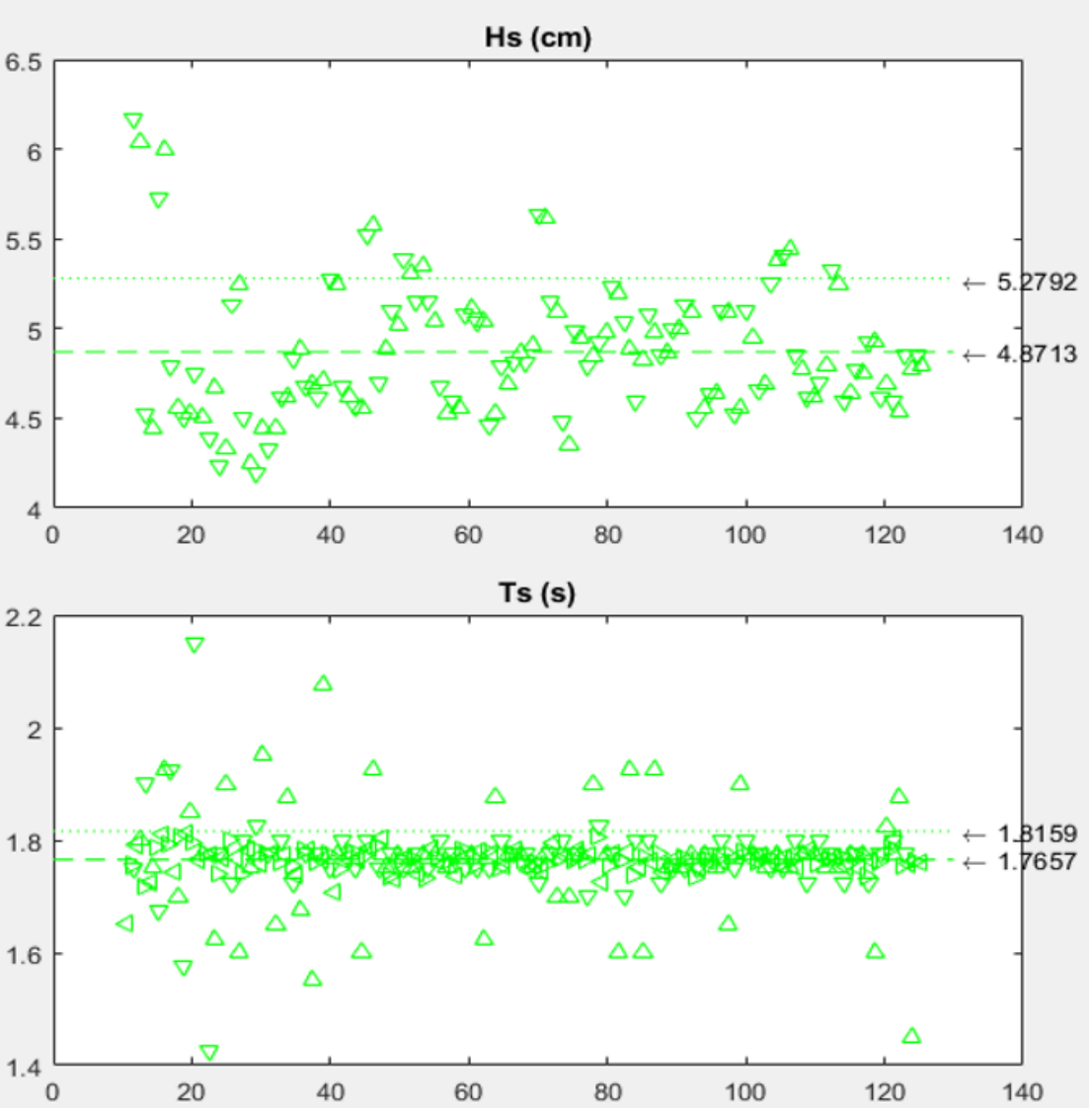


Gráfico 71: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

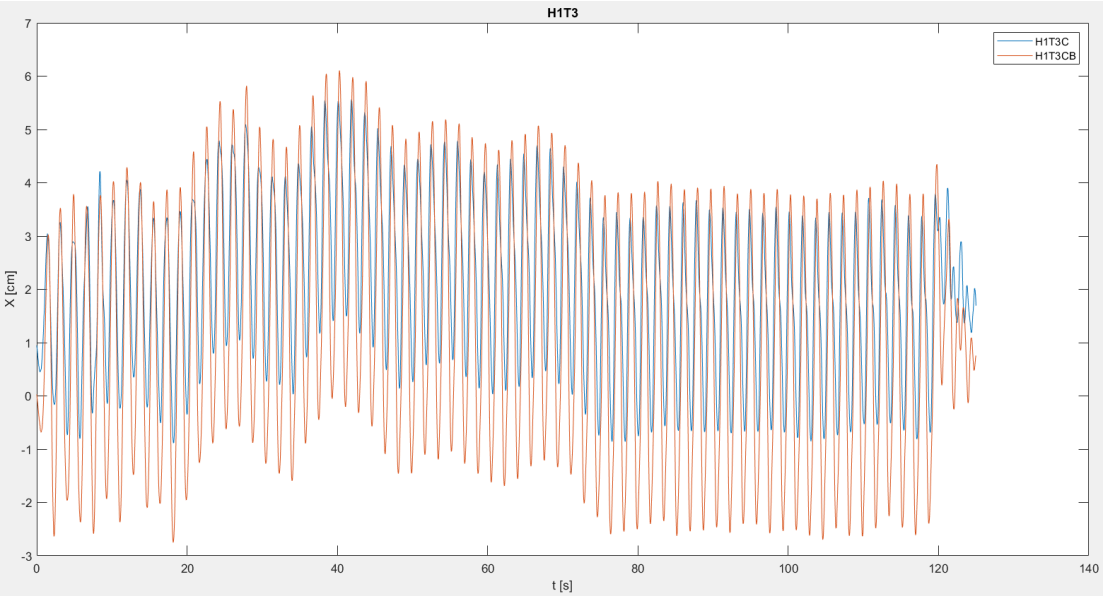


Gráfico 72: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

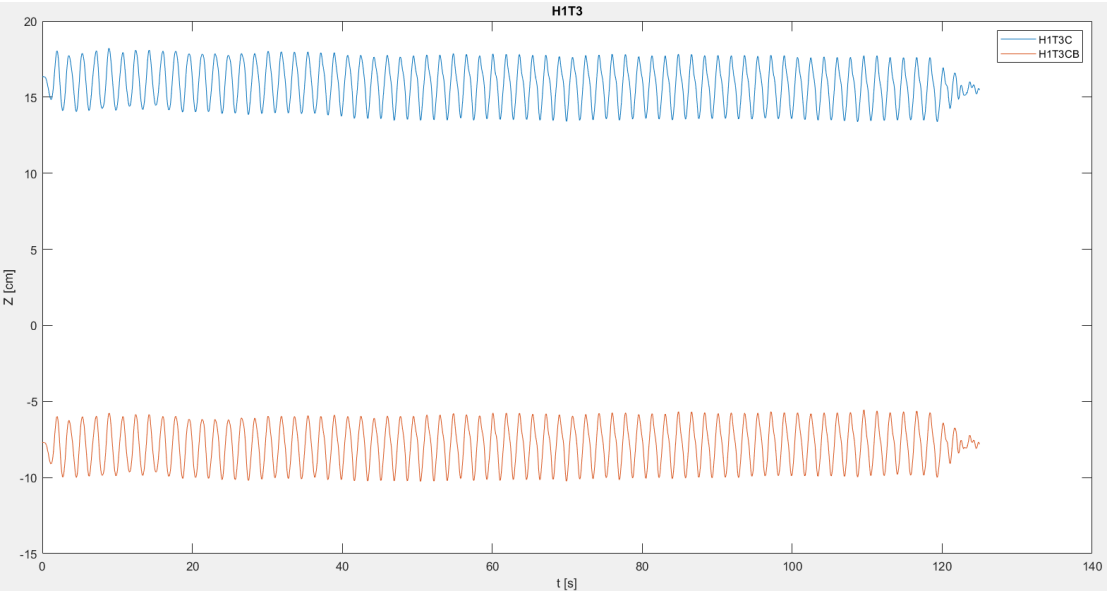


Gráfico 73: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

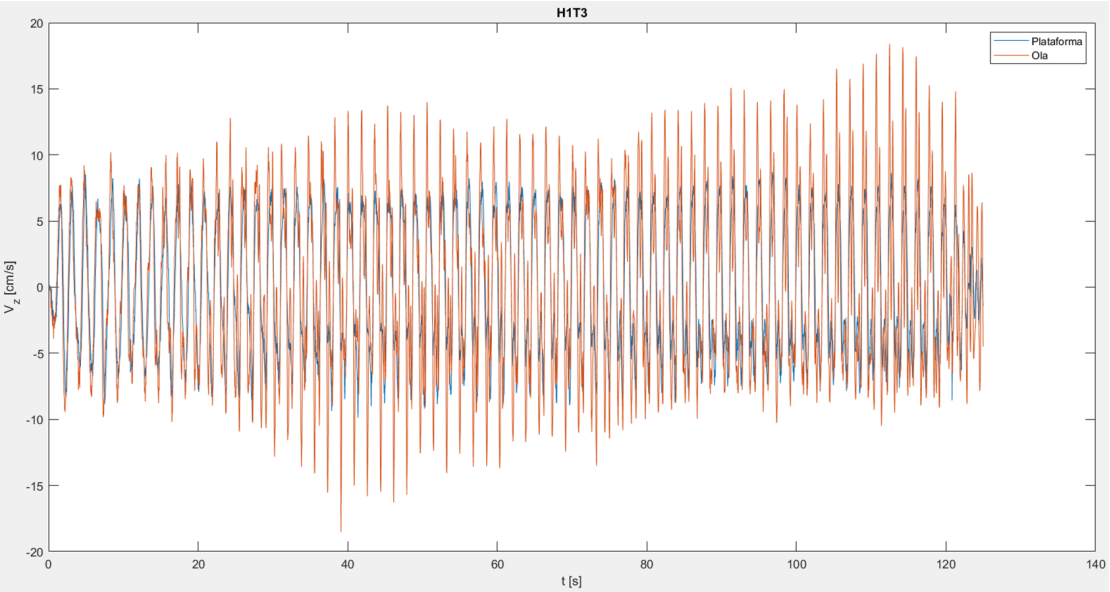


Gráfico 74: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.12. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H2T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20	20.2	19%

Tabla 67: Condiciones de laboratorio P4 65%, H2T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10	7.8	1.41	0.70711	0.14752

T*abla 68: Conversión de oleaje ideal*

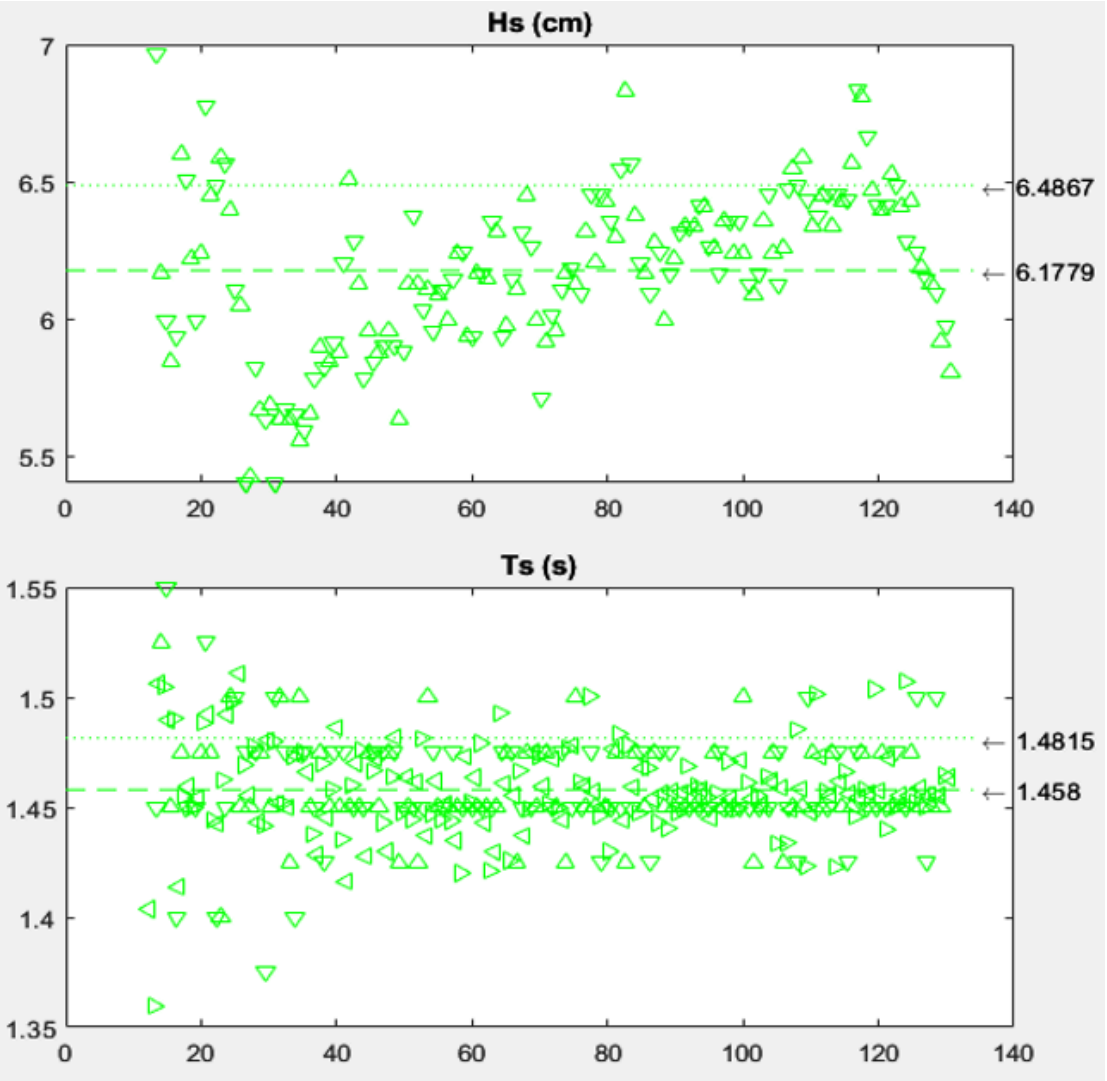


Gráfico 75: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
5	9.6	10	1.36	0.73657	0.17467

Tabla 69: Conversión de oleaje real

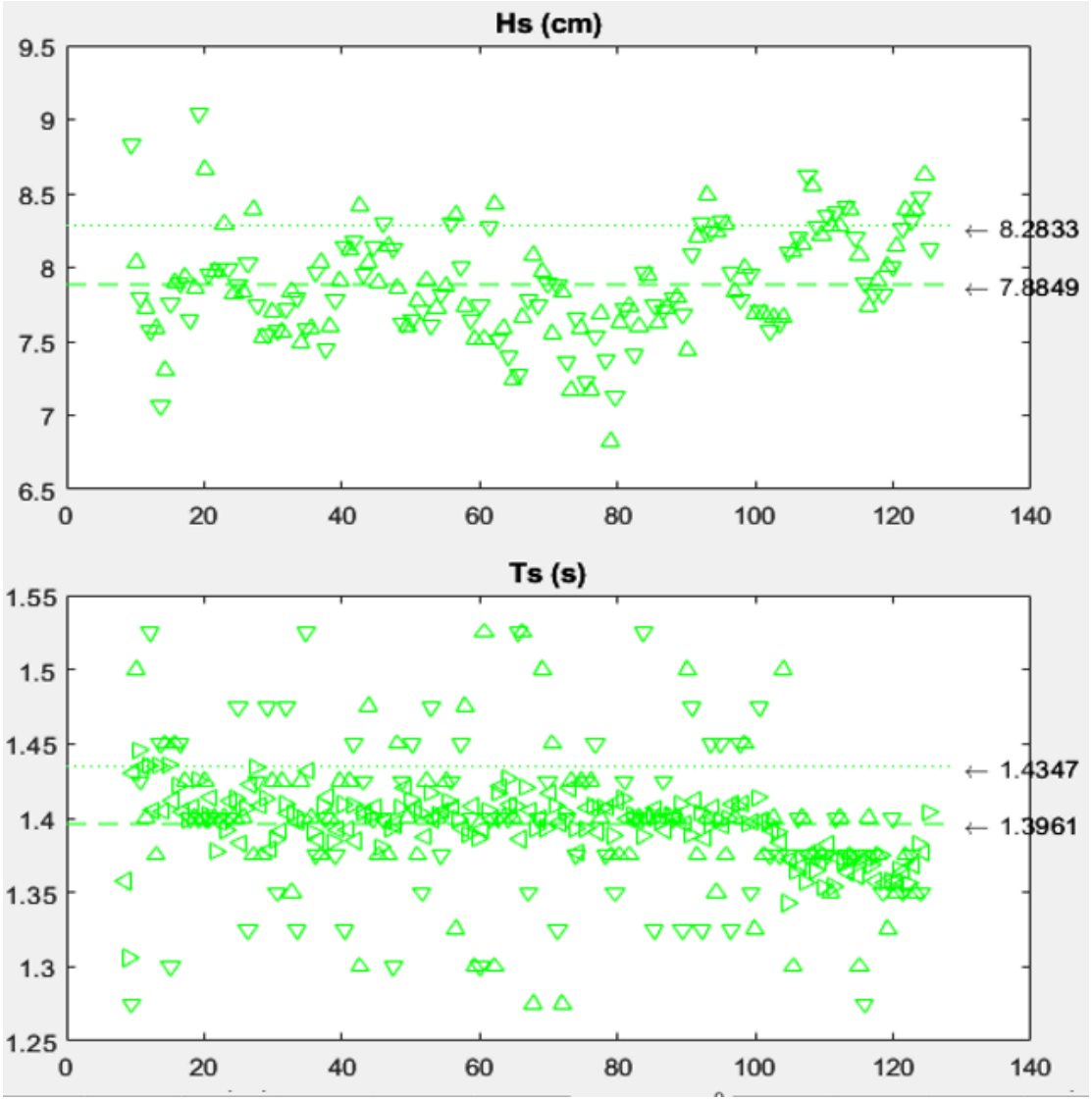


Gráfico 76: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

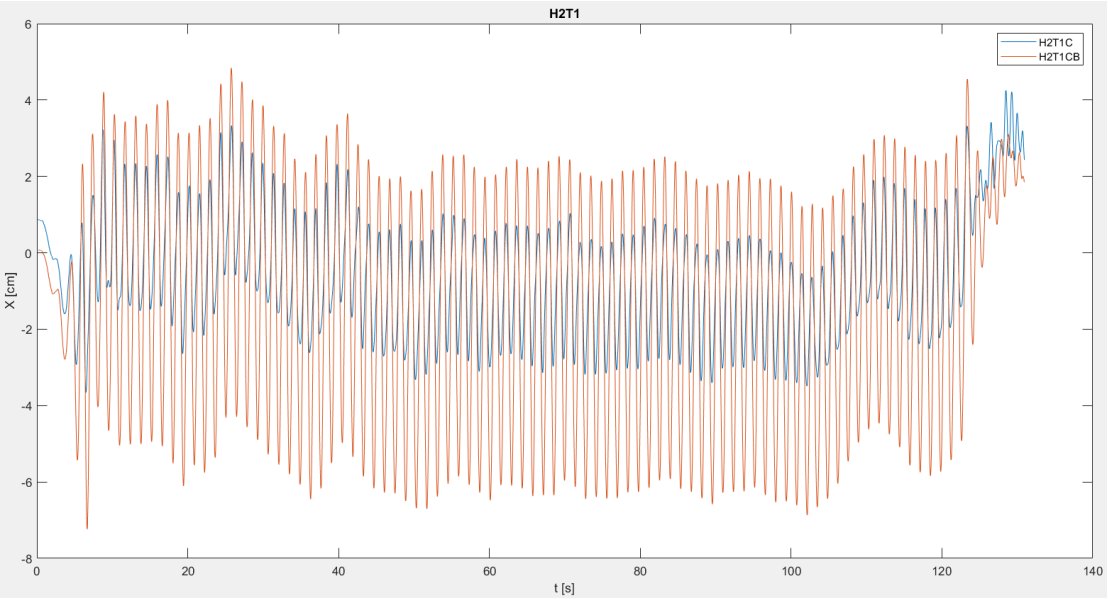


Gráfico 77: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

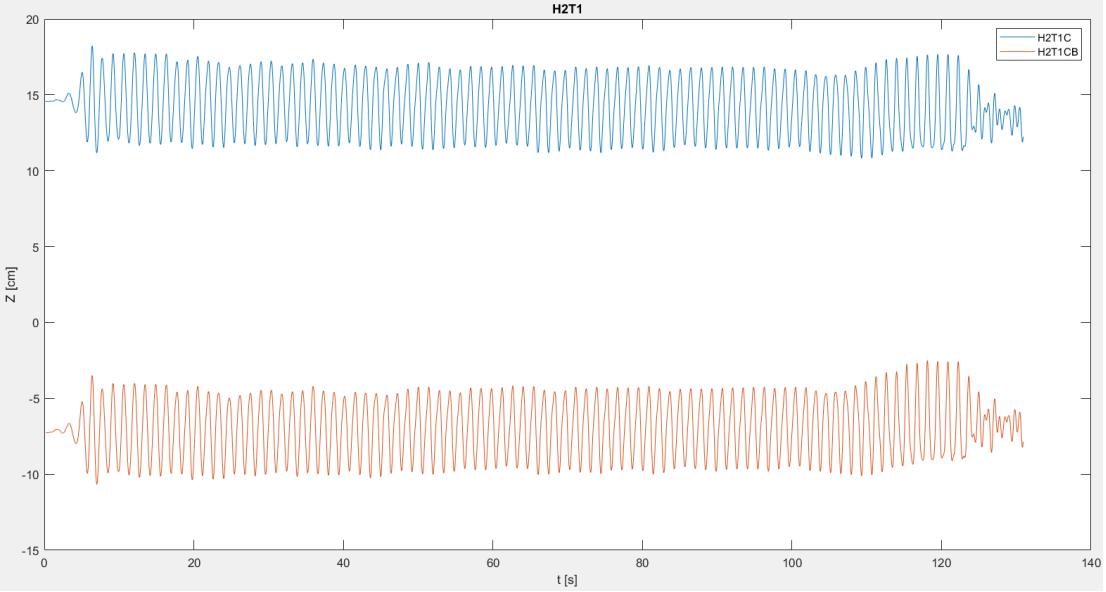


Gráfico 78: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

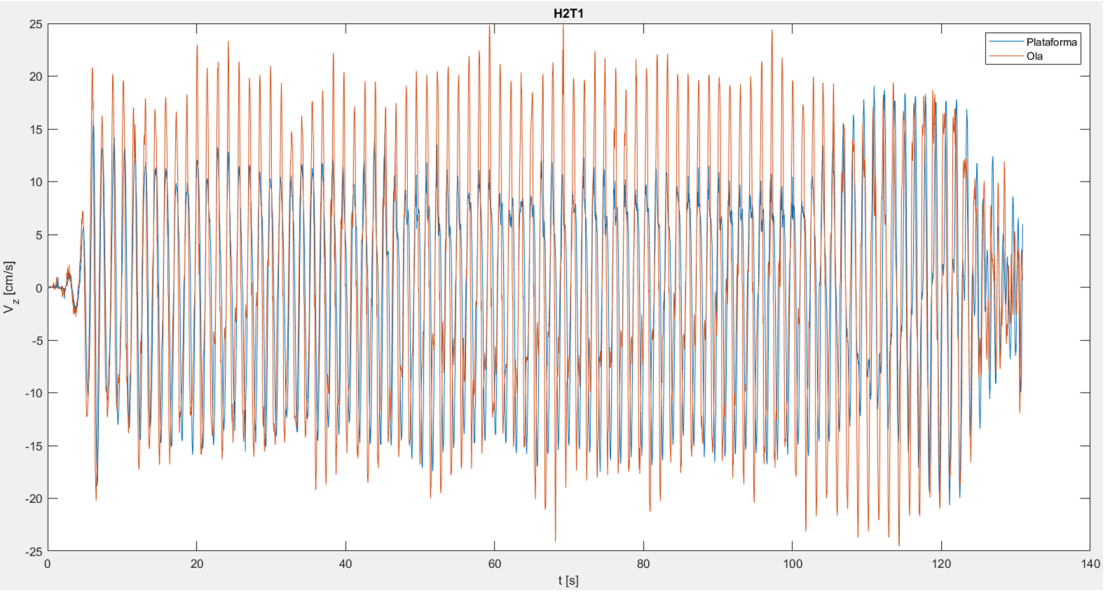


Gráfico 79: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.13. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H2T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21	21.2	19%

Tabla 70: Condiciones de laboratorio P4 65%, H2T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10.9	7.8	1.56	0.64282	0.16668

T*abla 71: Conversión de oleaje ideal*

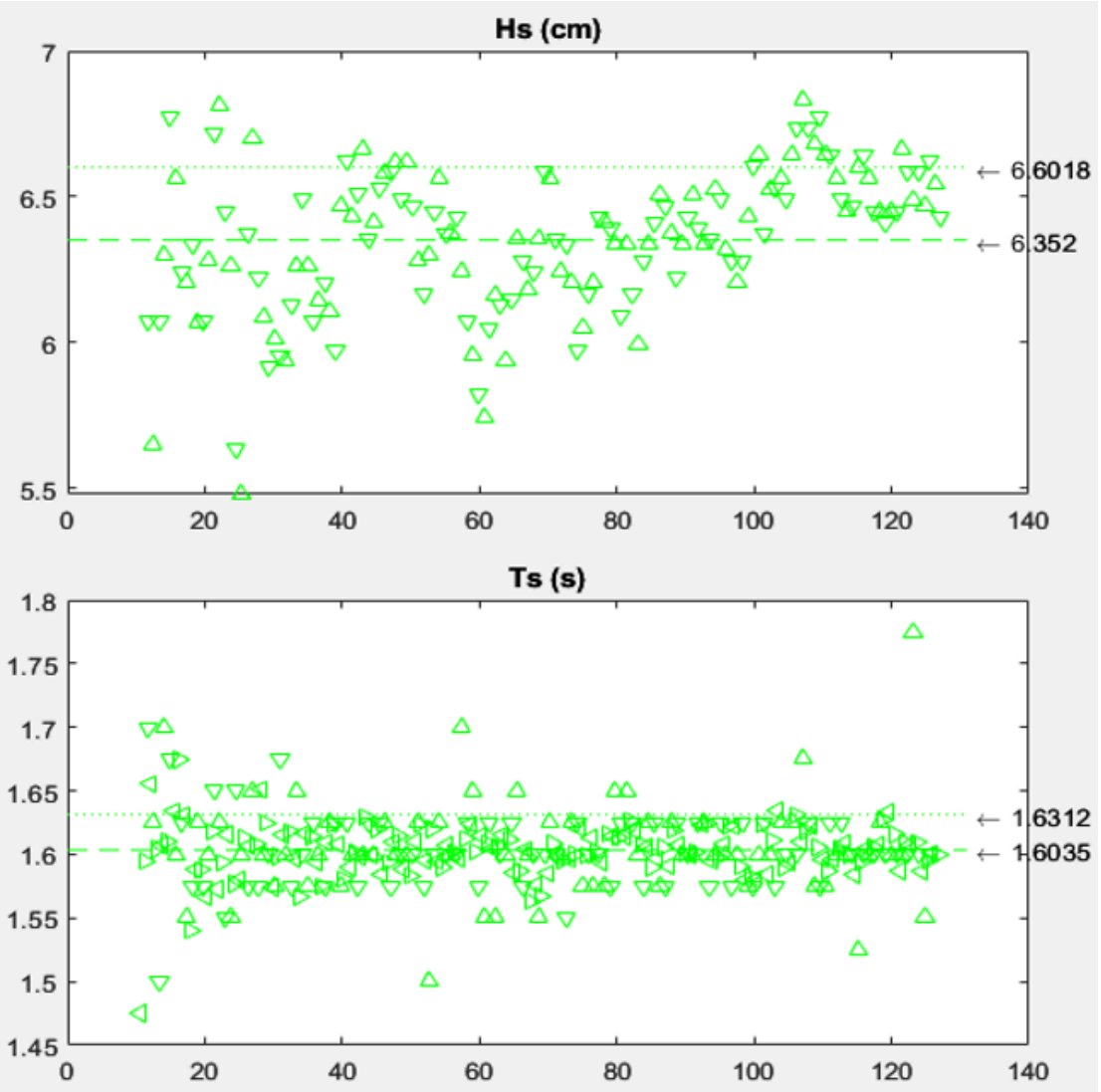


Gráfico 80: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.6	10.5	9.2	1.49	0.67344	0.18072

Tabla 72: Conversión de oleaje real

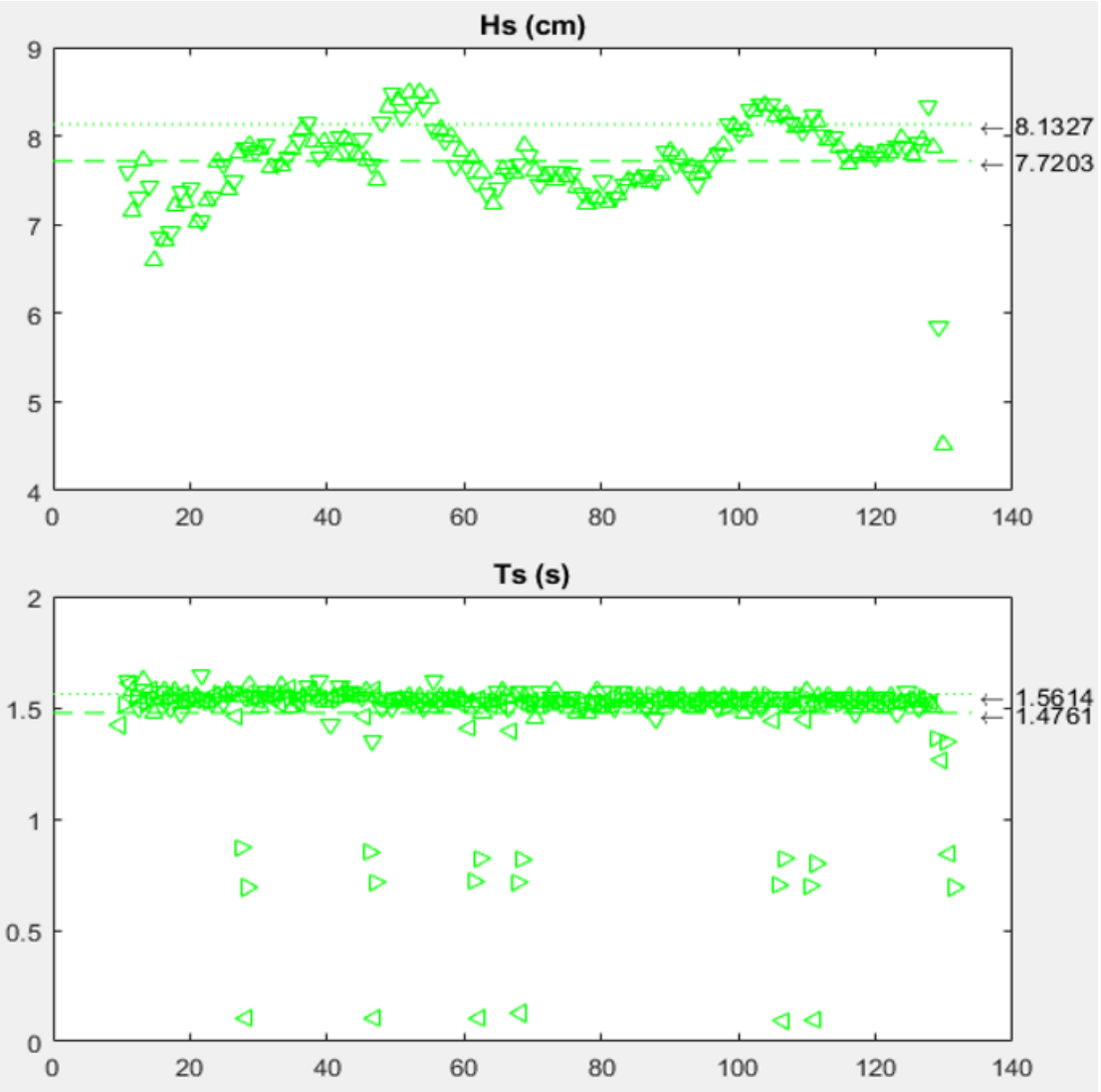


Gráfico 81: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

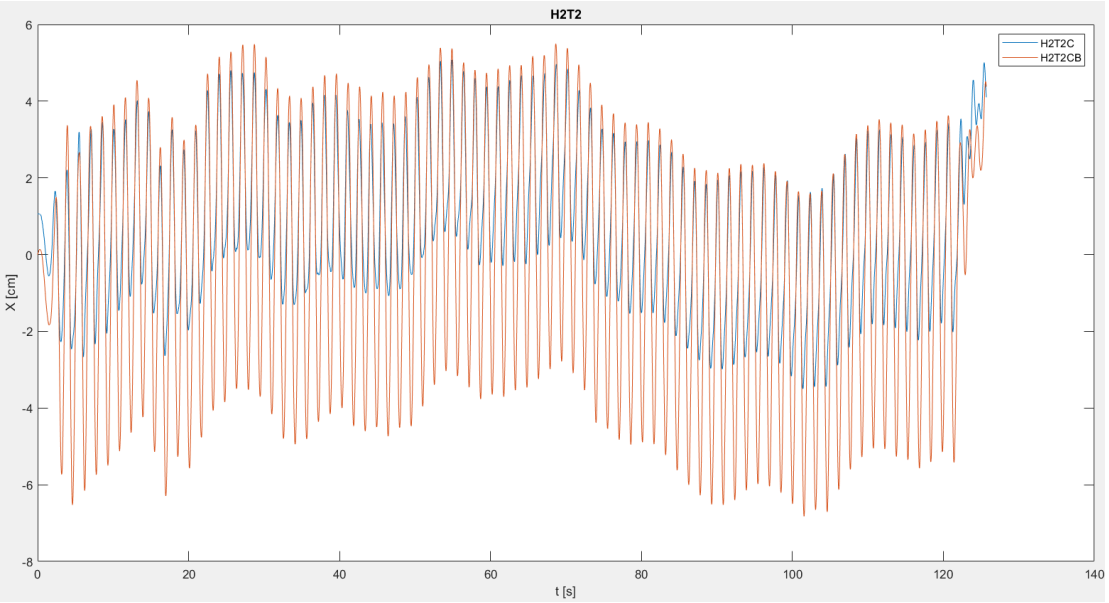


Gráfico 82: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

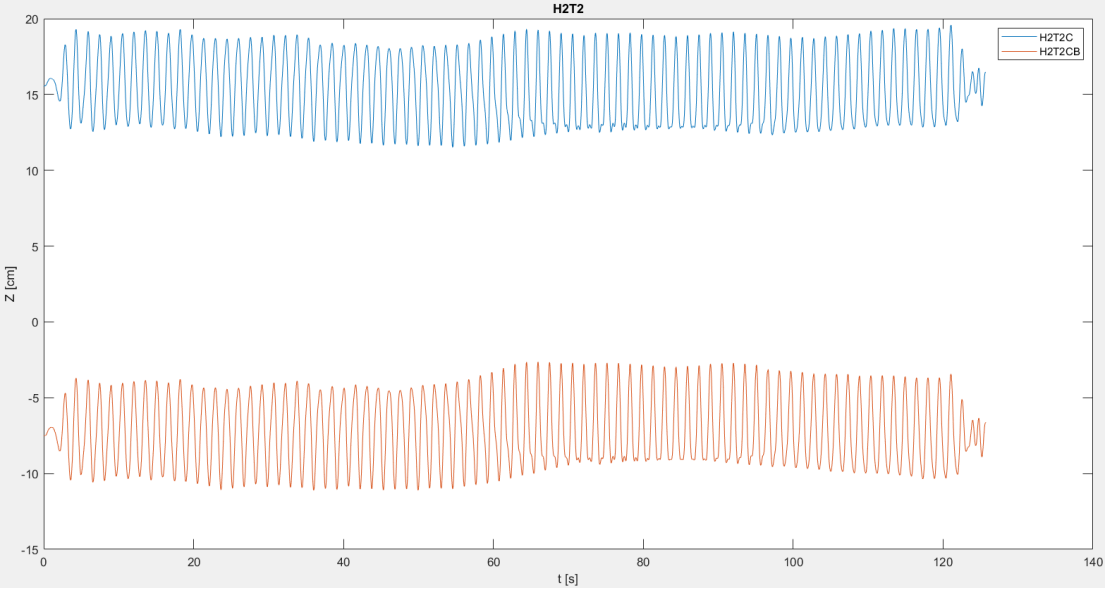


Gráfico 83: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

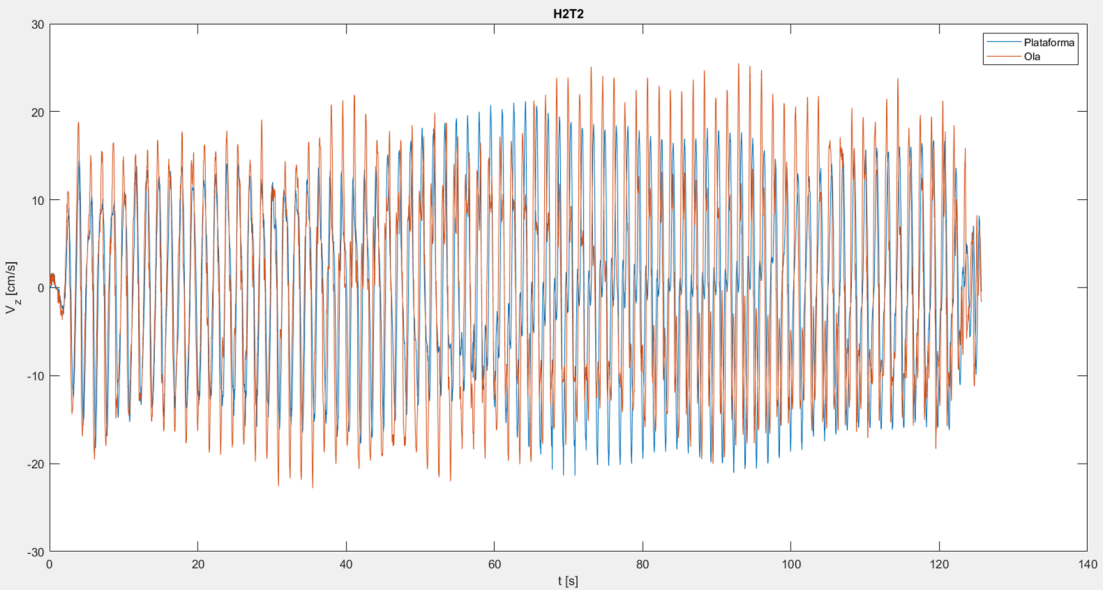


Gráfico 84: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.14. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H2T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21.6	21.8	19%

Tabla 73: Condiciones de laboratorio P4 65%, H2T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	12.7	7.8	1.79	0.55678	0.19855

Tabla 74: Conversión de oleaje ideal

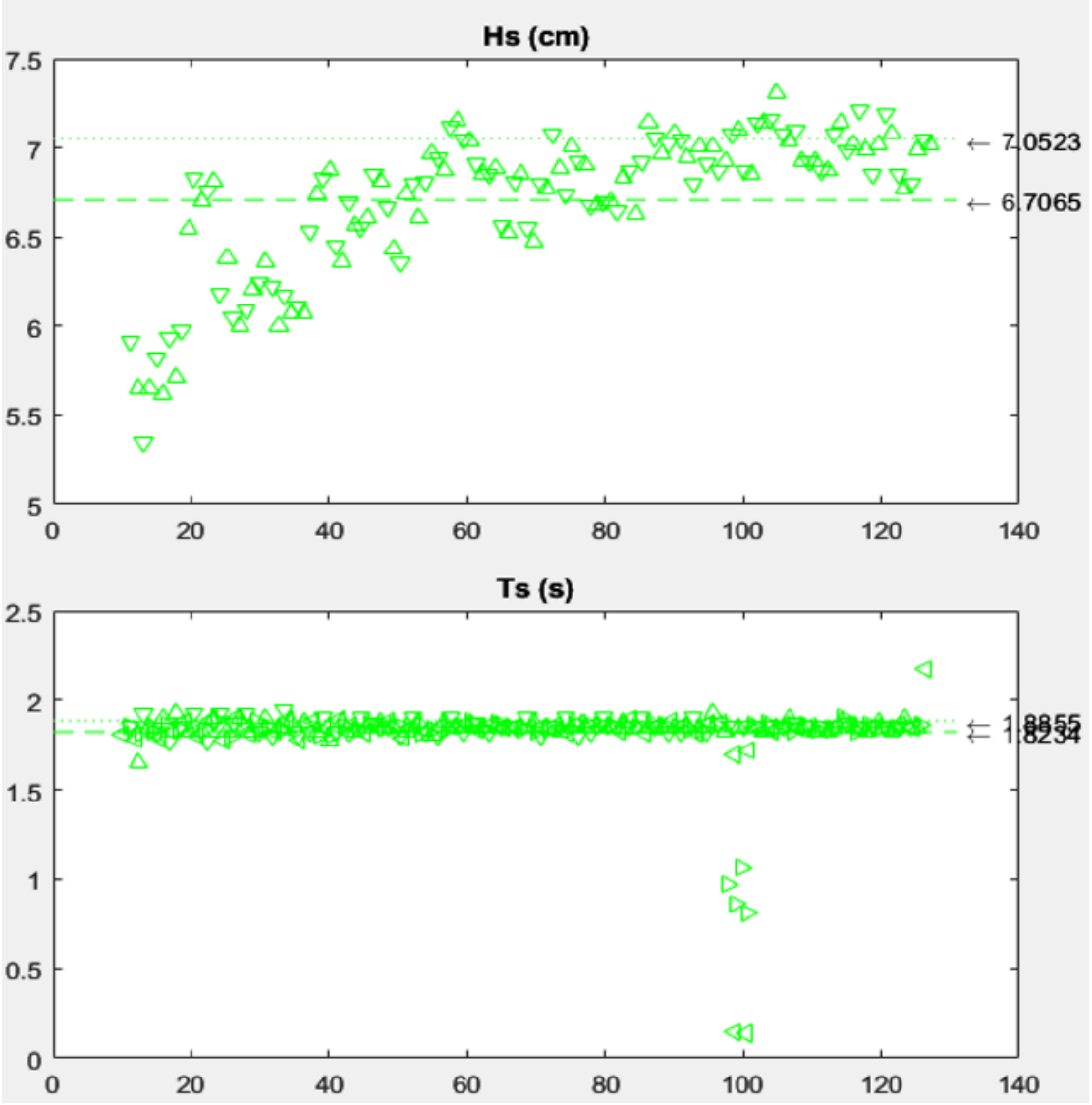


Gráfico 85: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.6	10.5	9.2	1.49	0.67344	0.18072

Tabla 75: Conversión de oleaje real

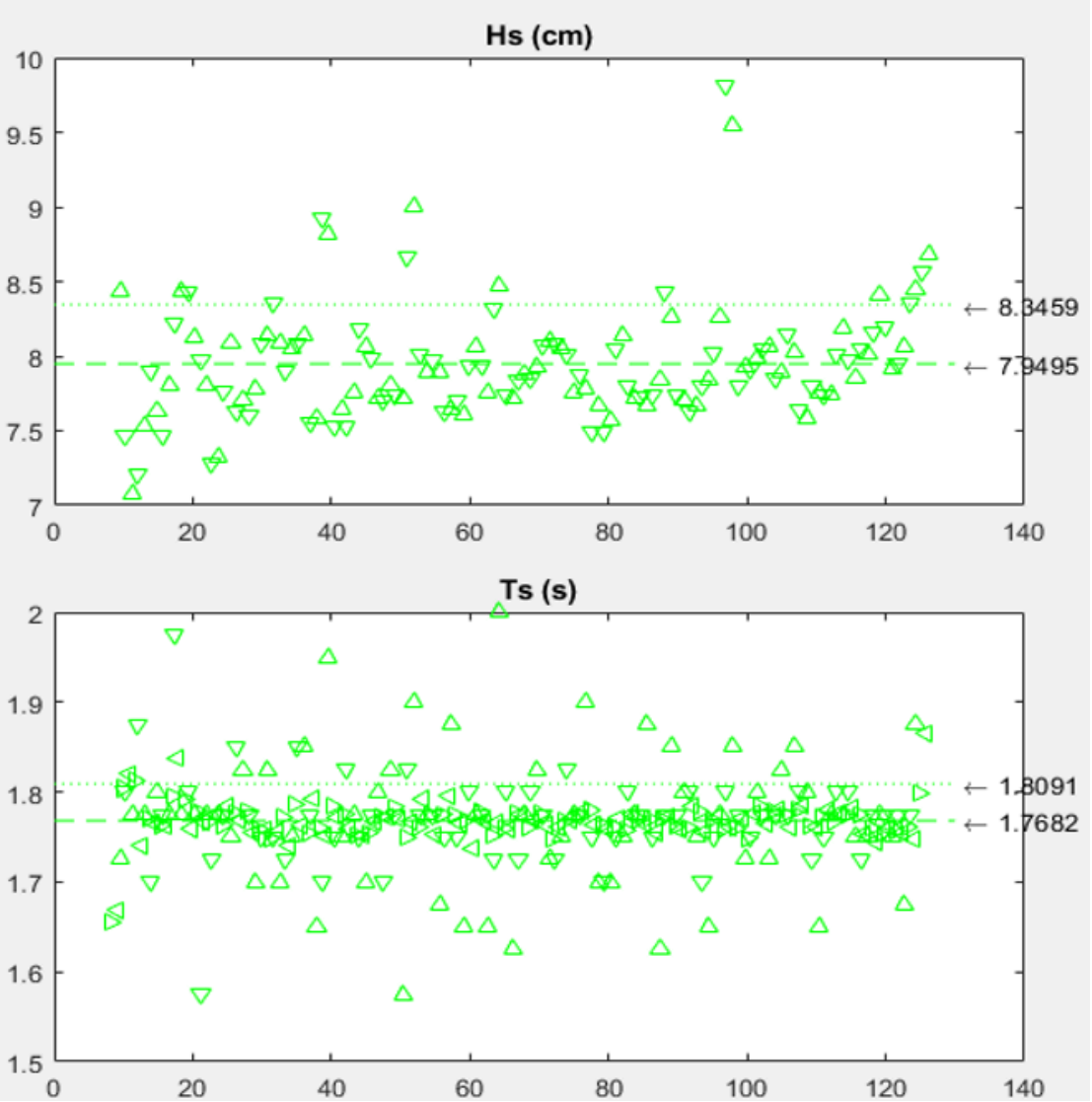


Gráfico 86: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

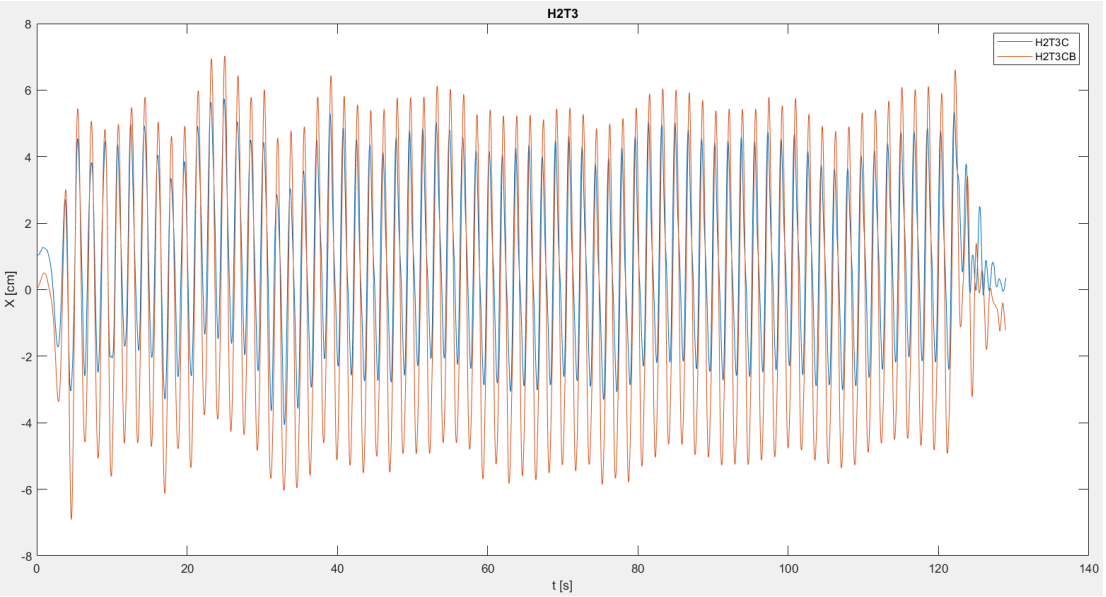


Gráfico 87: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

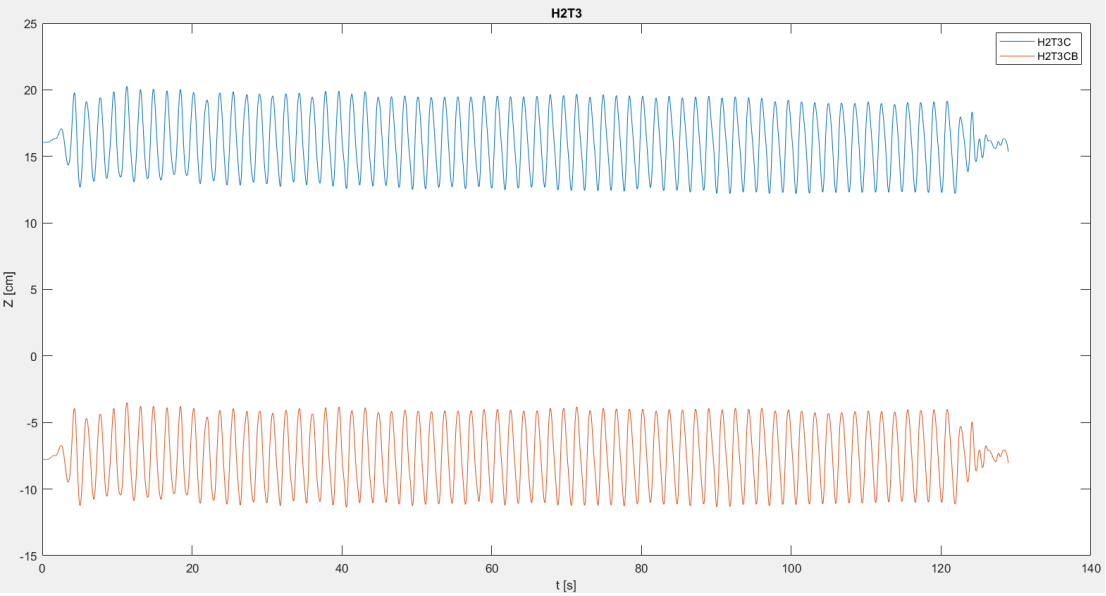


Gráfico 88: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

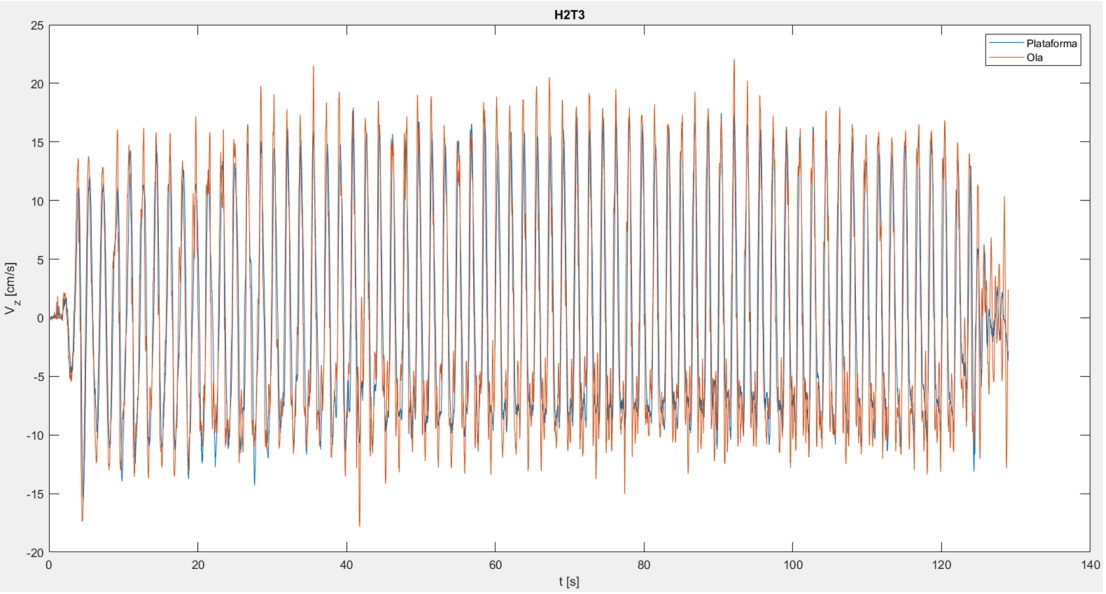


Gráfico 89: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.15. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H3T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21.3	21.5	18%

Tabla 76: Condiciones de laboratorio P4 65%, H3T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10	14.4	1.41	0.70711	0.26553

Tabla 77: Conversión de oleaje ideal

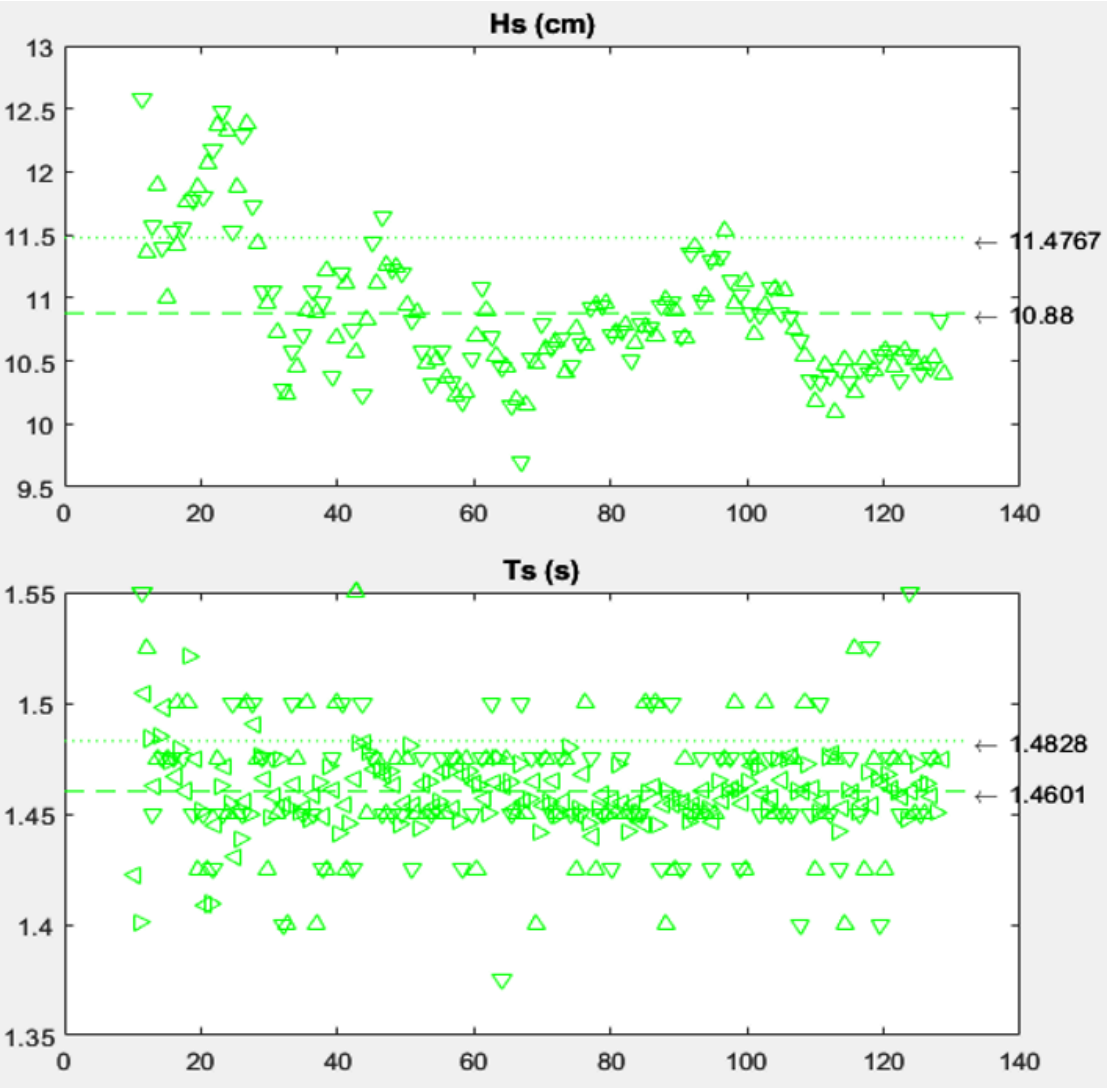


Gráfico 90: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.6	9.6	17.2	1.36	0.73657	0.30044

Tabla 78: Conversión de oleaje real

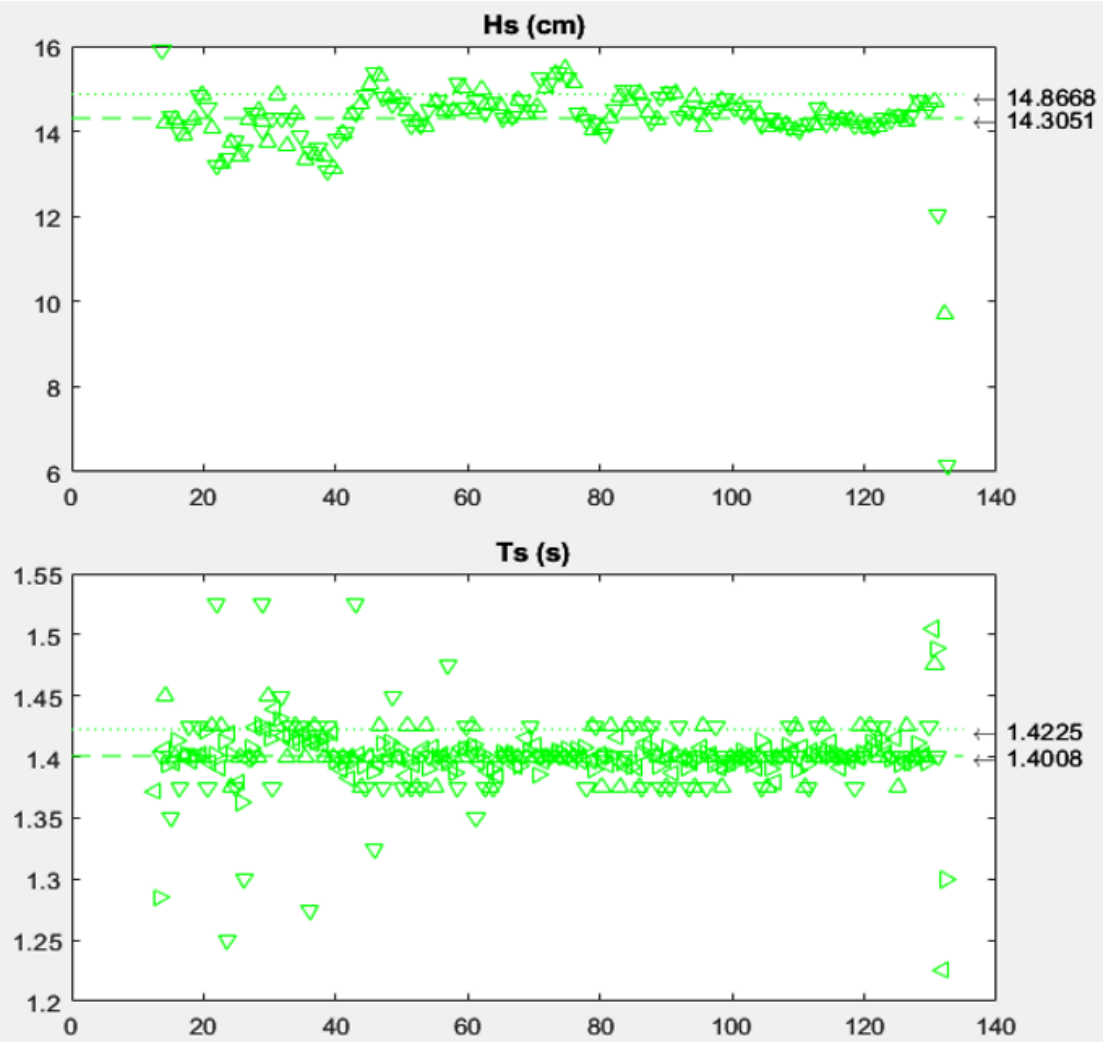


Gráfico 91: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

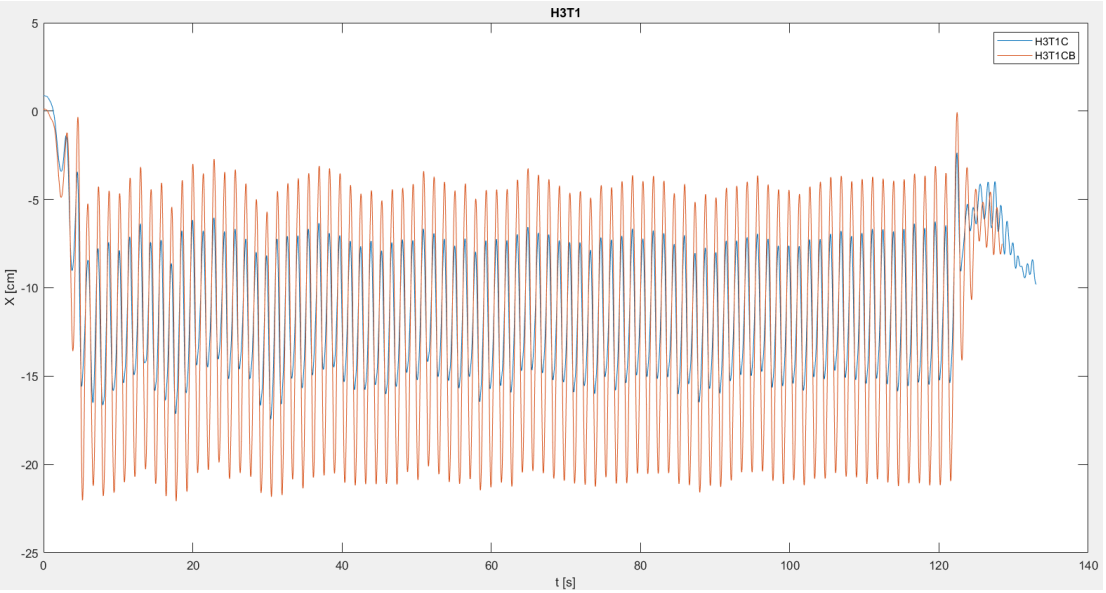


Gráfico 92: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

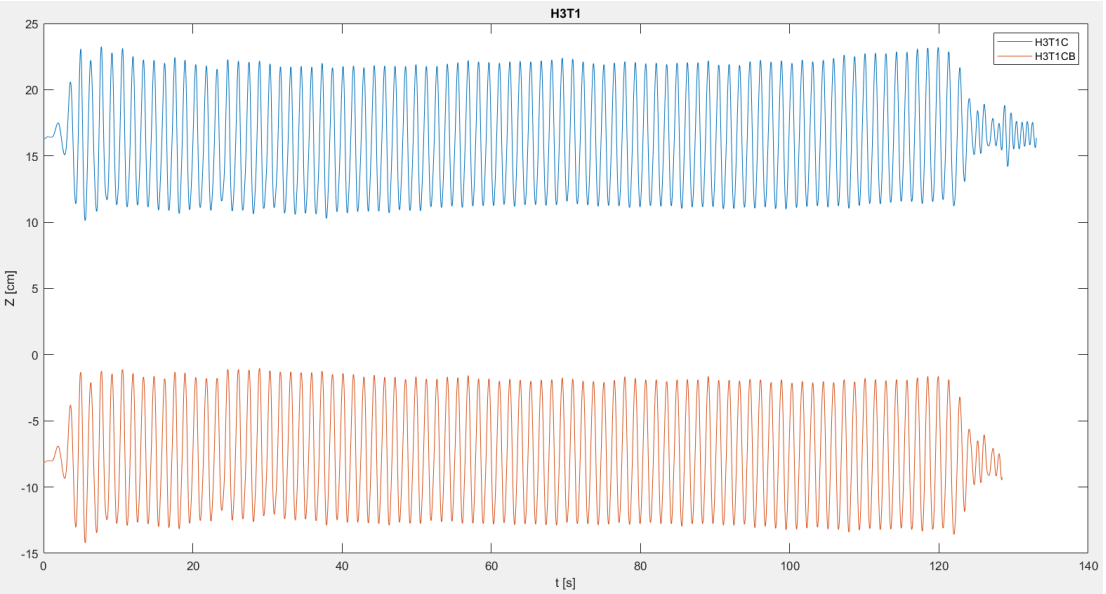


Gráfico 93: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

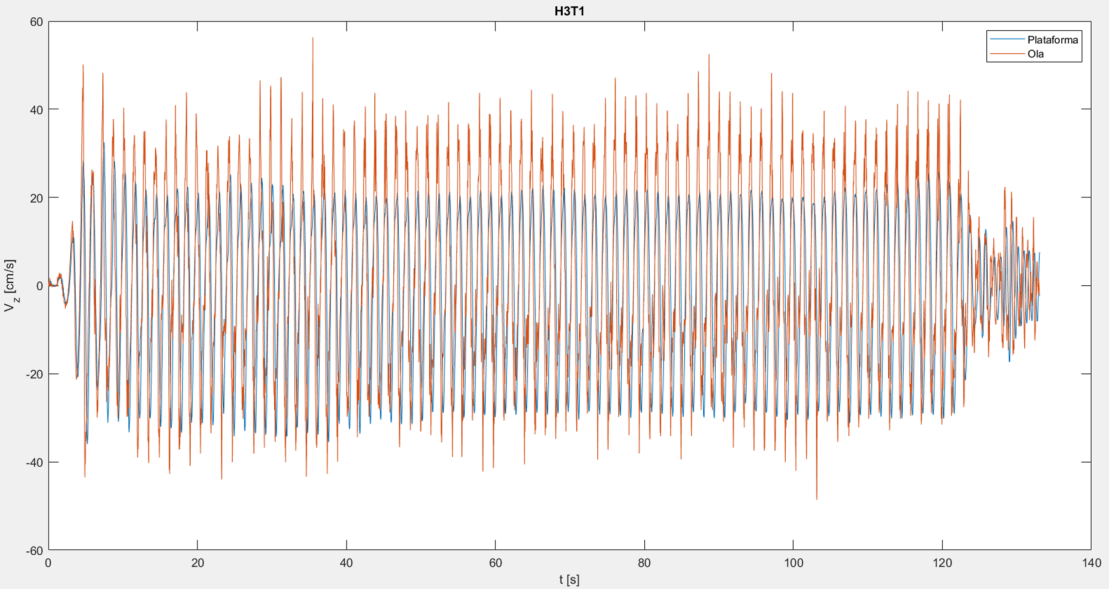


Gráfico 94: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.16. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H3T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.8	21	18%

Tabla 79: Condiciones de laboratorio P4 65%, H3T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10.9	14.4	1.56	0.64282	0.30003

Tabla 80: Conversión de oleaje ideal

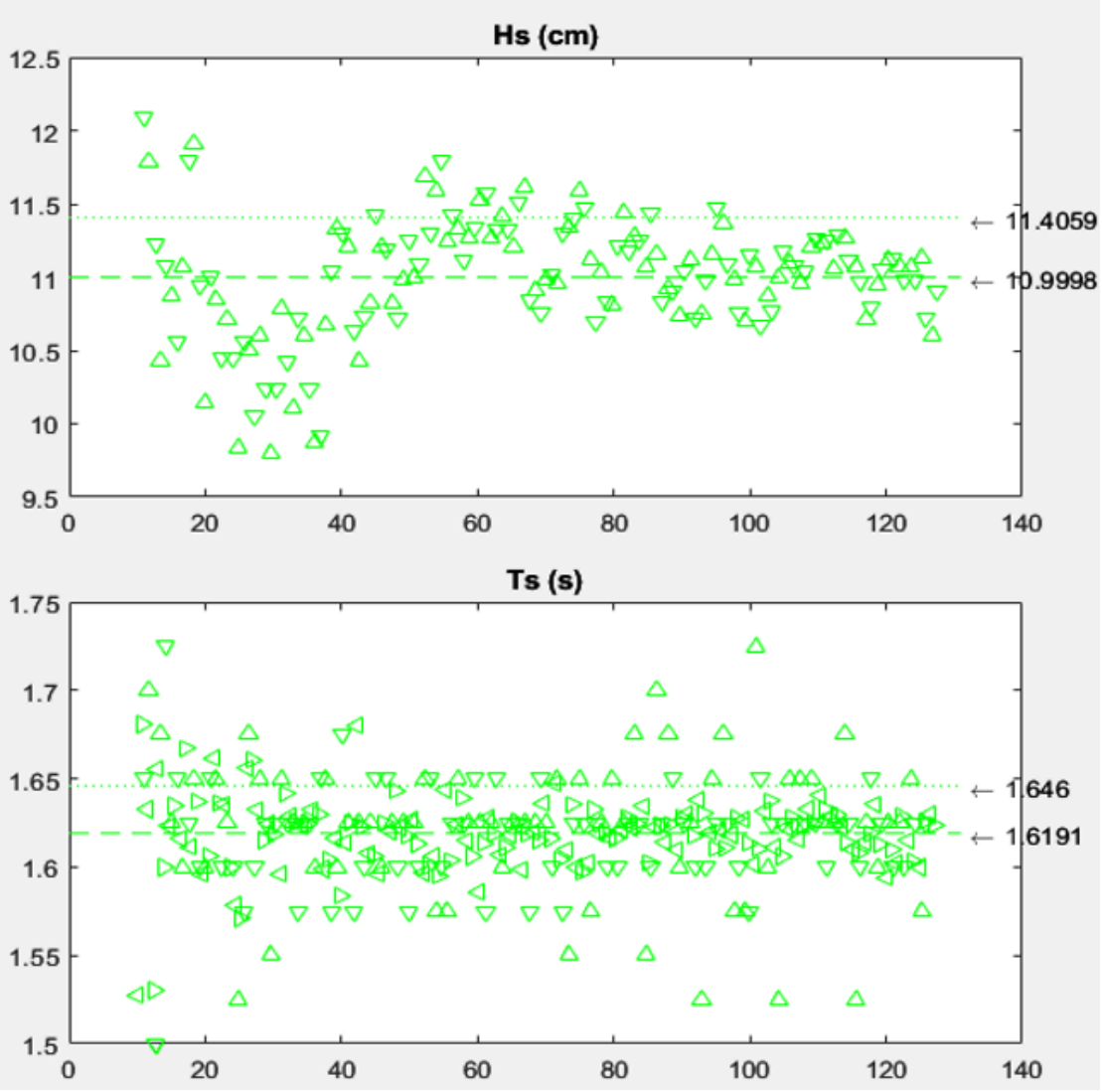


Gráfico 95: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.2	10.5	16.4	1.49	0.67344	0.32215

Tabla 81: Conversión de oleaje real

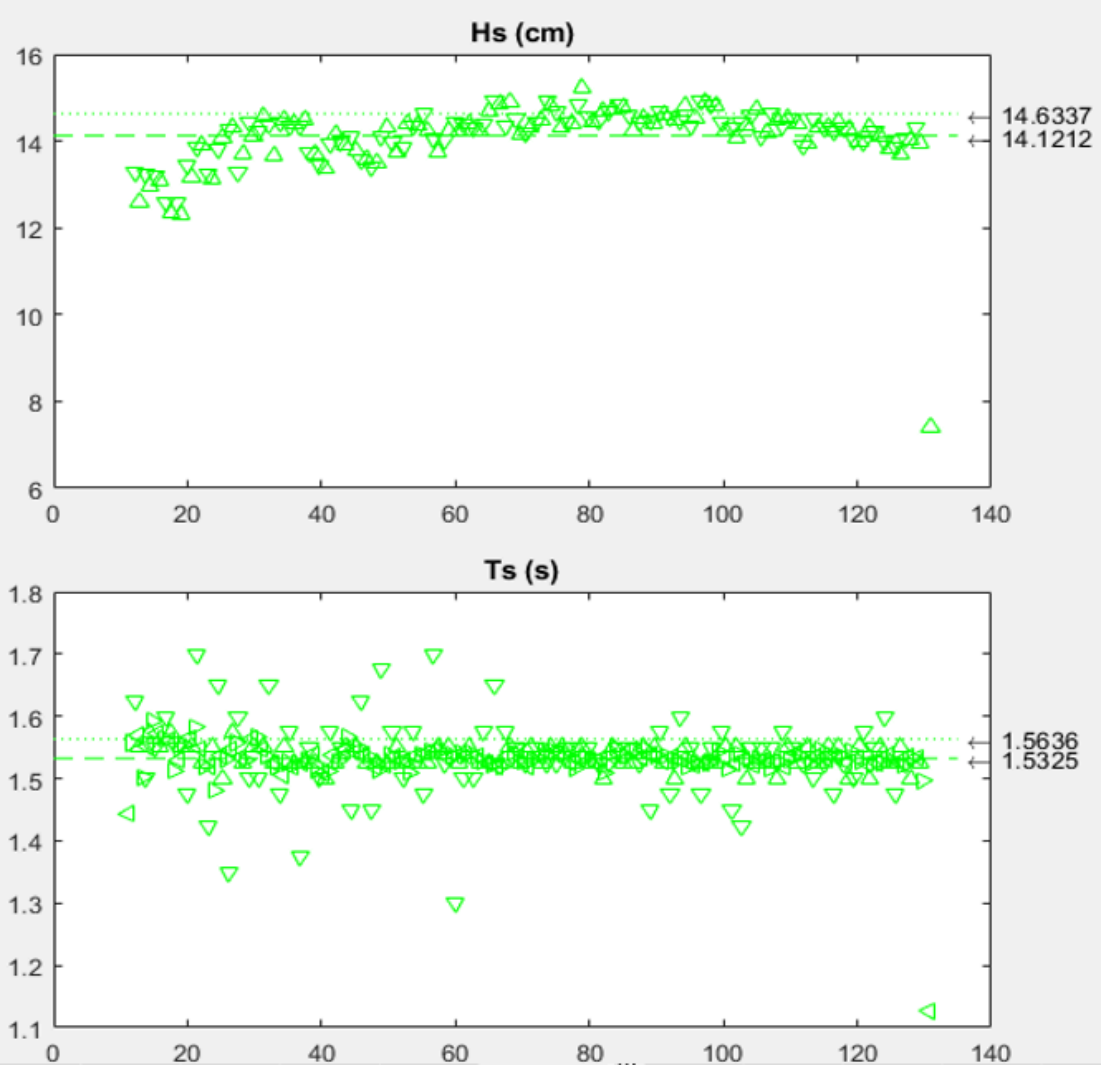


Gráfico 96: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

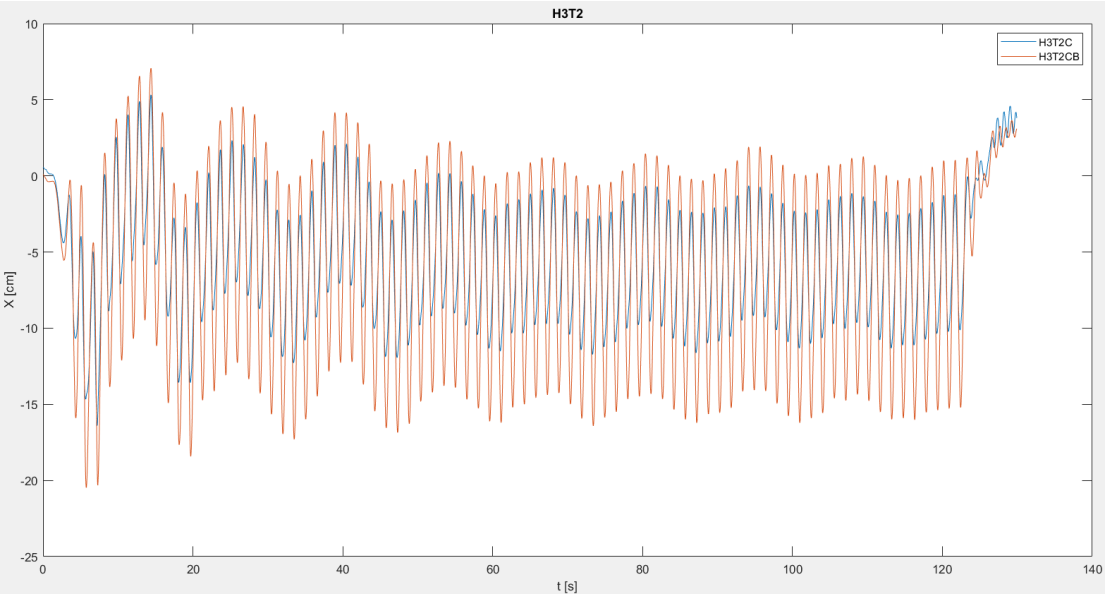


Gráfico 97: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

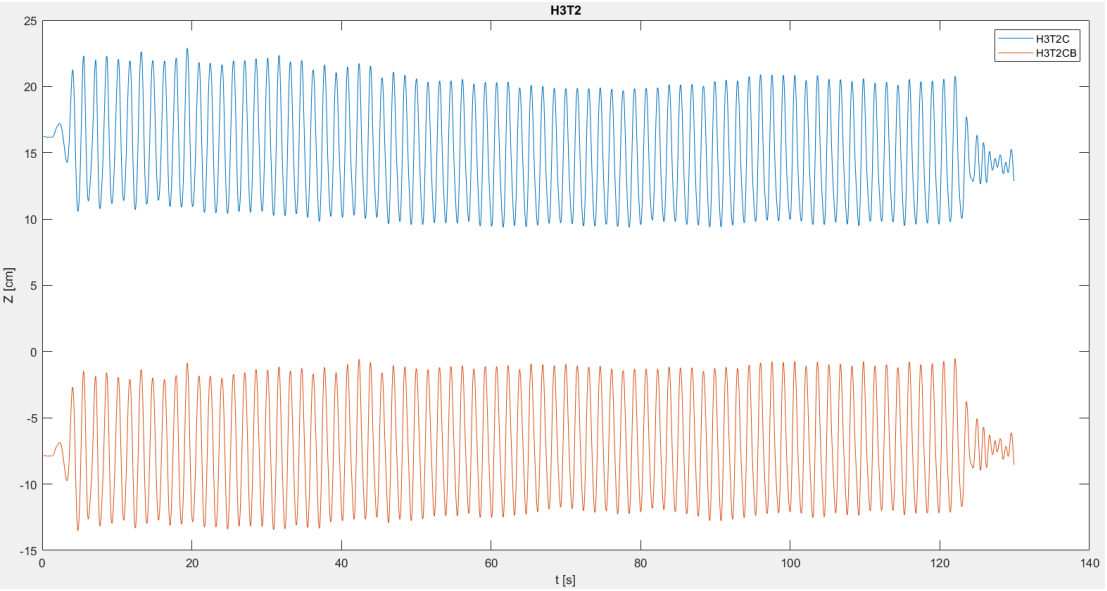


Gráfico 98: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

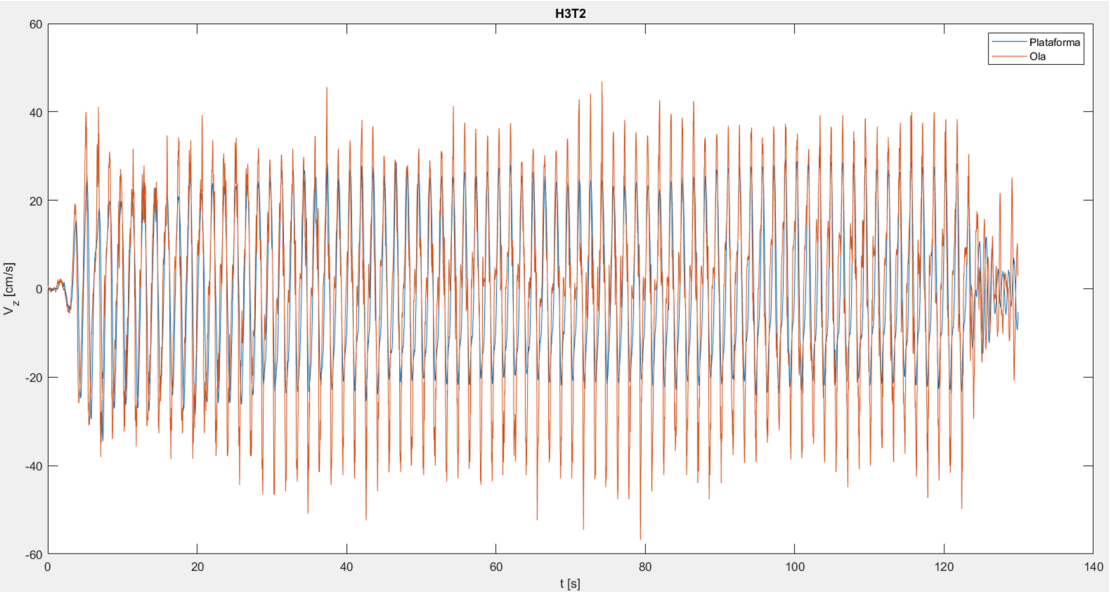


Gráfico 99: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.17. P4

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H3T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21.1	21.3	18%

Tabla 82: Condiciones de laboratorio P4 65%, H3T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	12.7	14.4	1.79	0.55678	0.3574

Tabla 83: Conversión de oleaje ideal

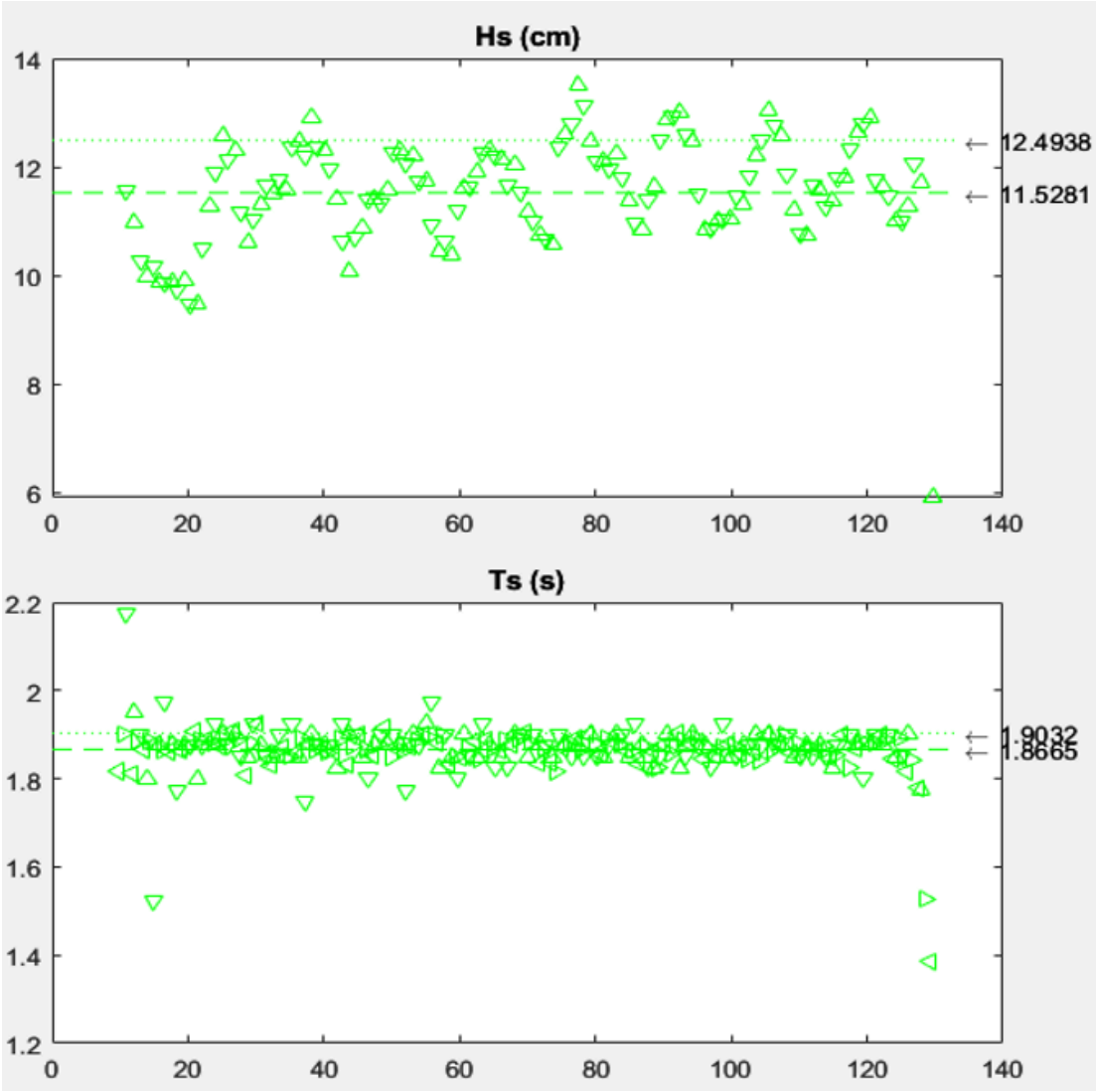


Gráfico 100: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.6	12.1	17.2	1.71	0.58439	0.40289

Tabla 84: Conversión de oleaje real

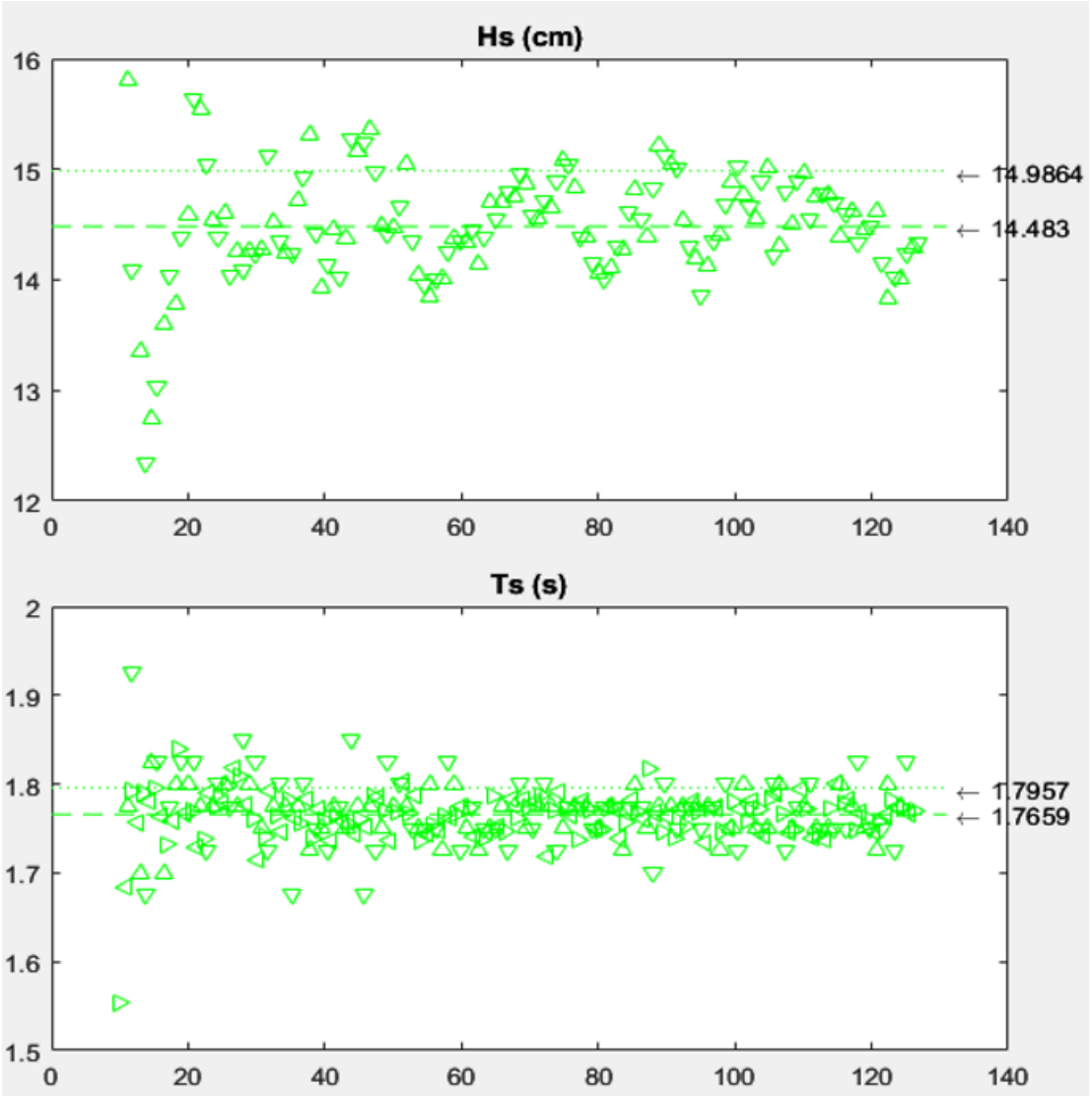


Gráfico 101: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

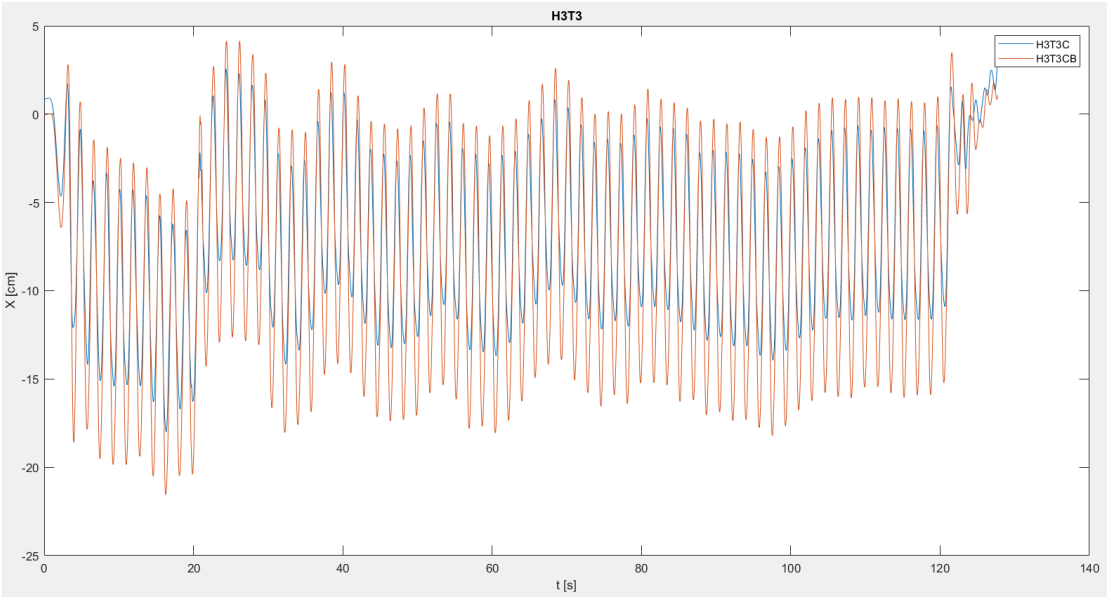


Gráfico 102: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

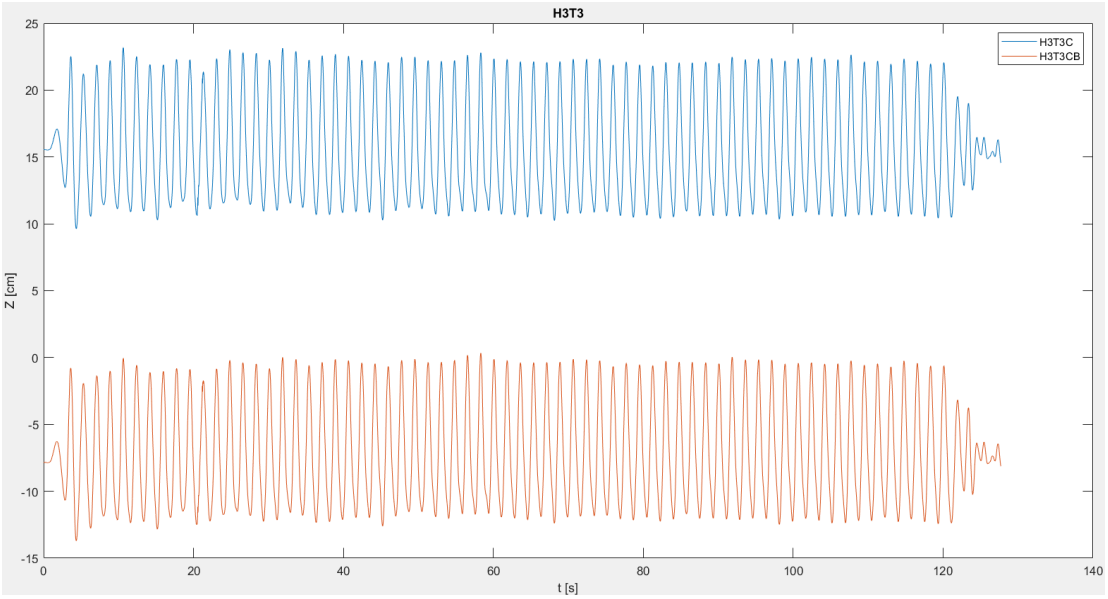


Gráfico 103: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

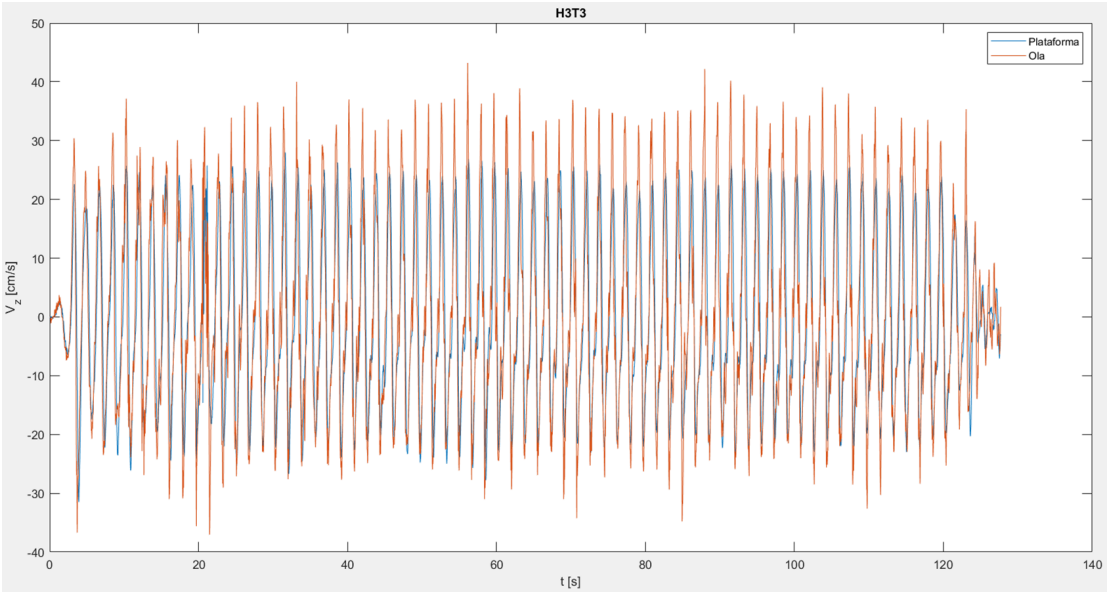


Gráfico 104: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.18. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H1T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19, 2	19,4	18%

Tabla 85: Condiciones de laboratorio T3 50%, H1T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10	5	1.41	0.70711	0.092197

Tabla 86: Conversión de oleaje ideal

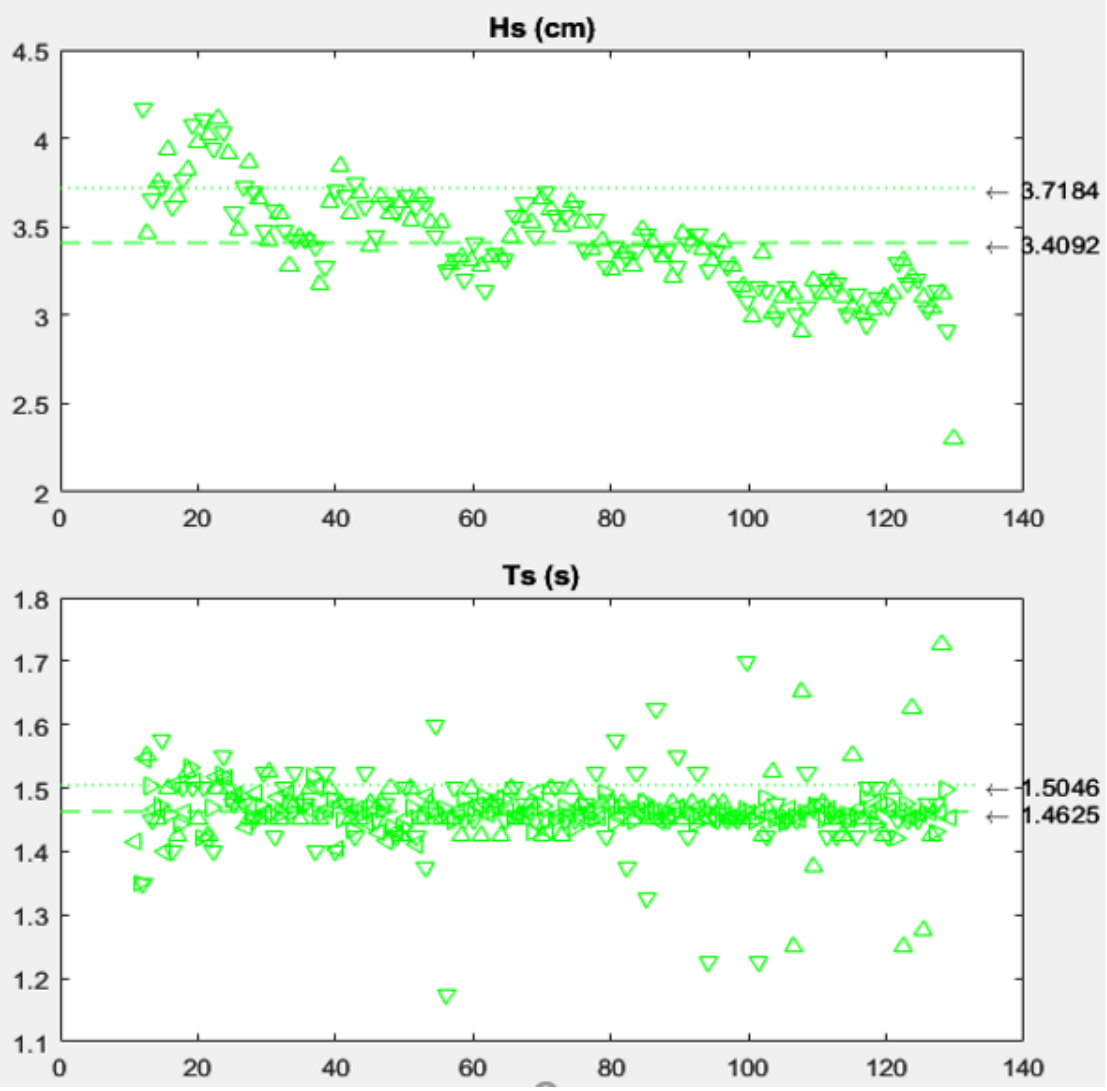


Gráfico 105: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.3	9.7	6.6	1.3718	0.72898	0.11689

Tabla 87: Conversión de oleaje real

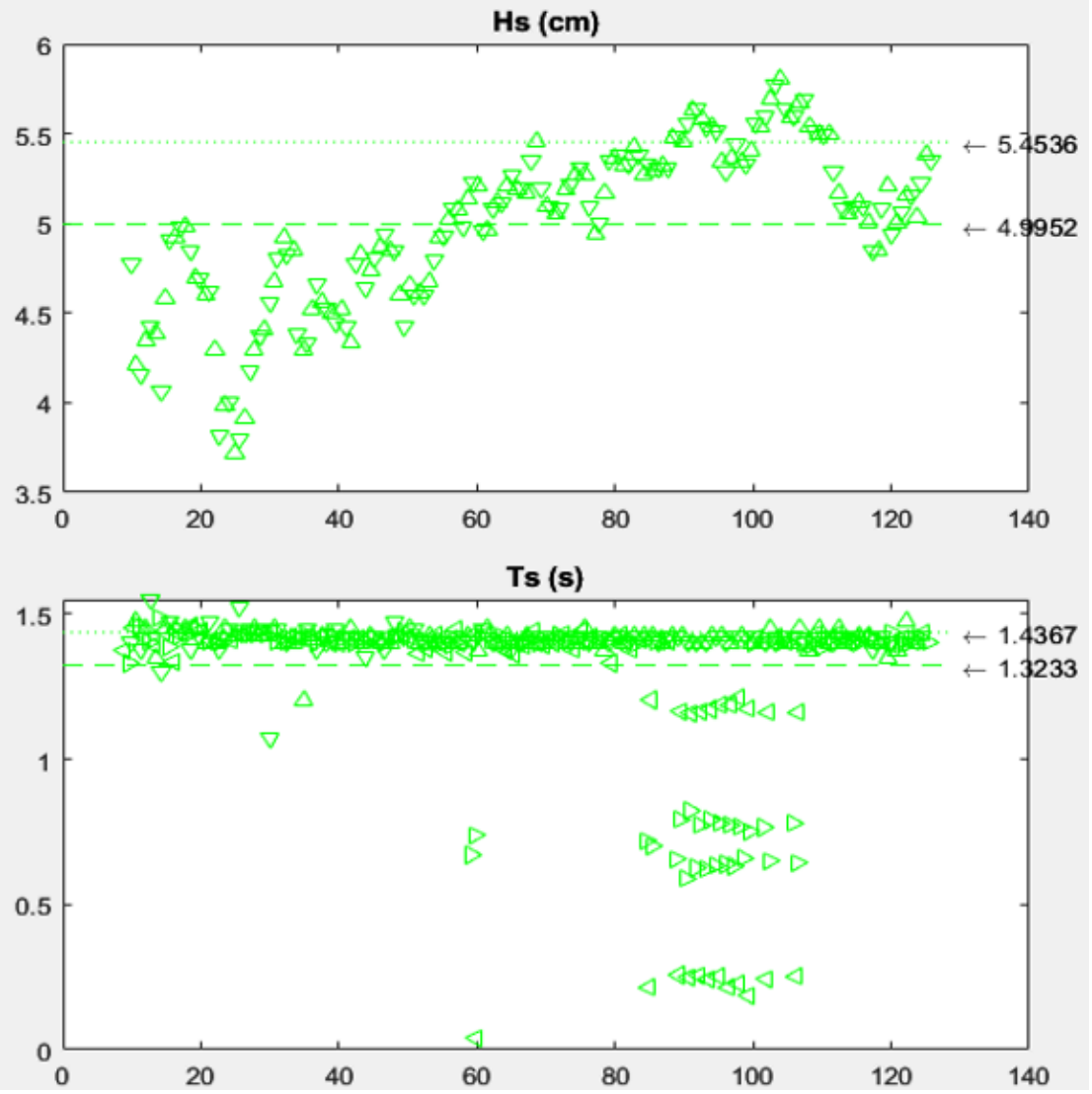


Gráfico 106: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

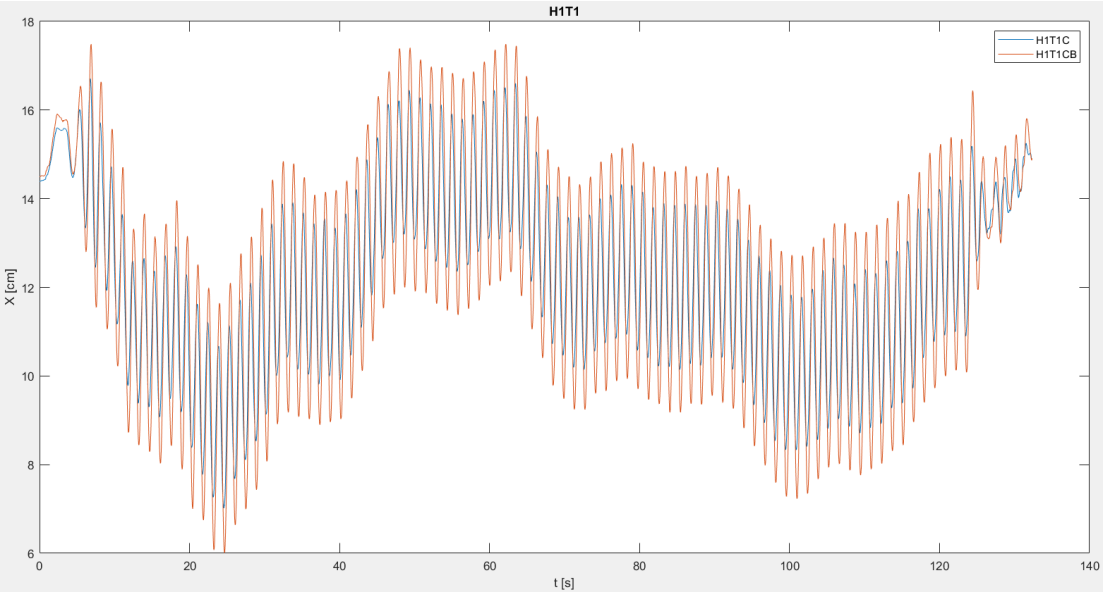


Gráfico 107: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

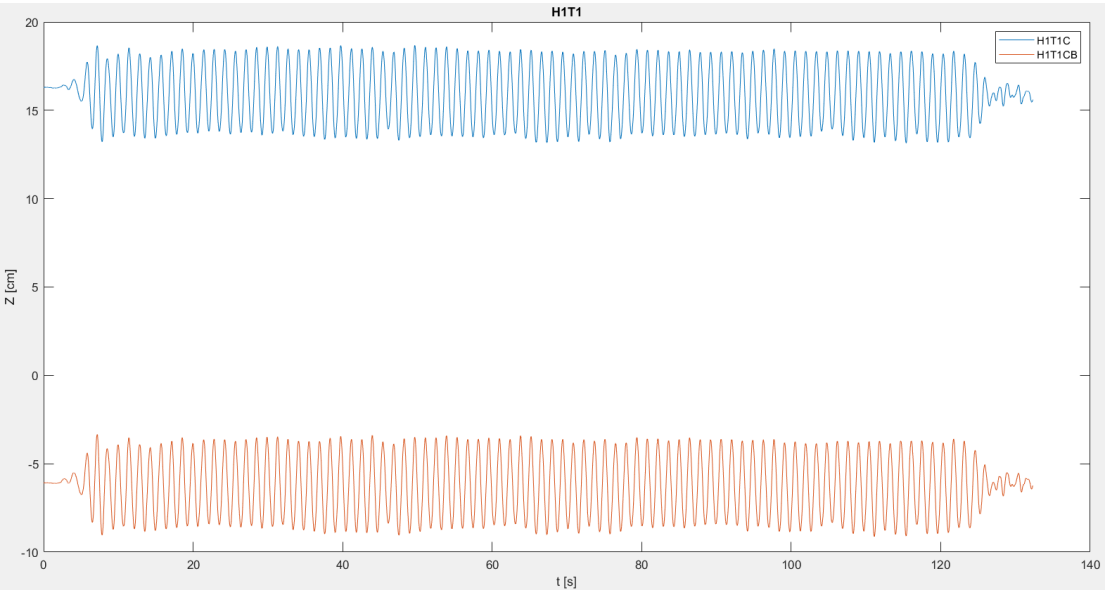


Gráfico 108: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

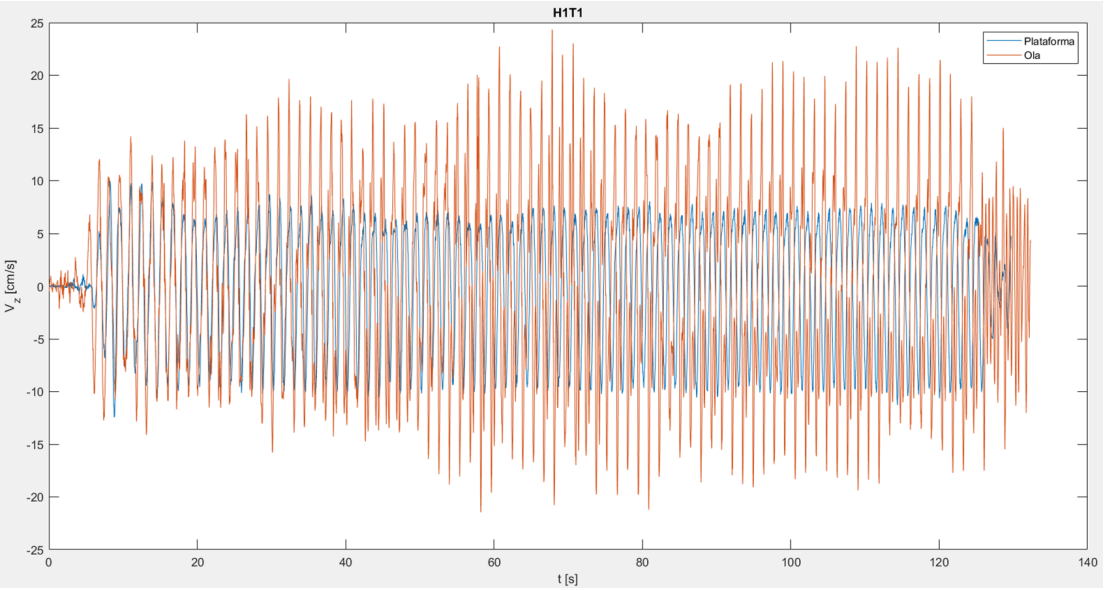


Gráfico 109: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.19. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H1T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,1	19,6	18%

Tabla 88: Condiciones de laboratorio T3 50%, HIT2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10.9	5	1.56	0.64282	0.10418

T*abla 89: Conversión de oleaje ideal*

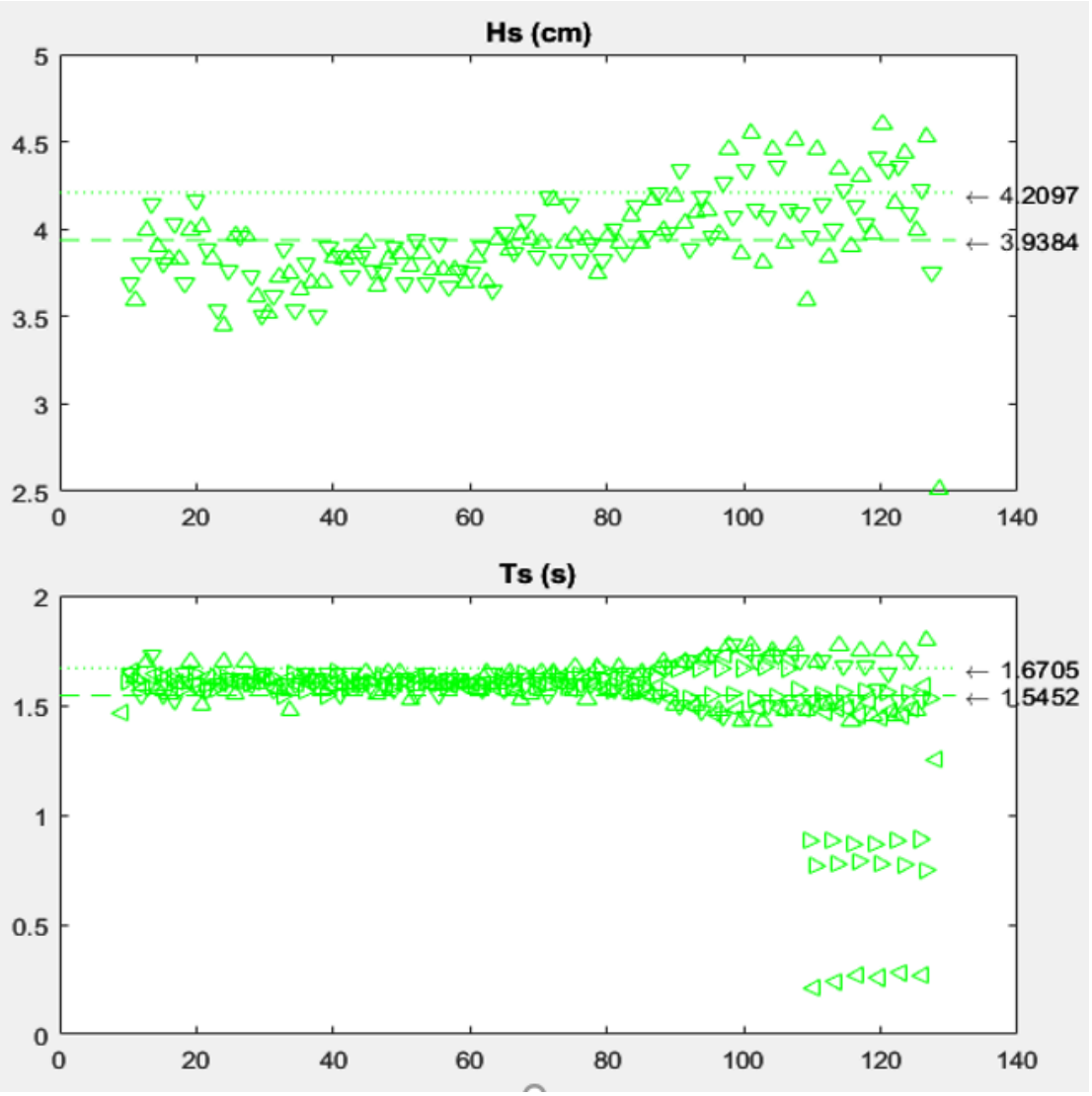


Gráfico 110: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.9	10.6	5.8	1.49	0.66708	0.11532

Tabla 90: Conversión de oleaje real

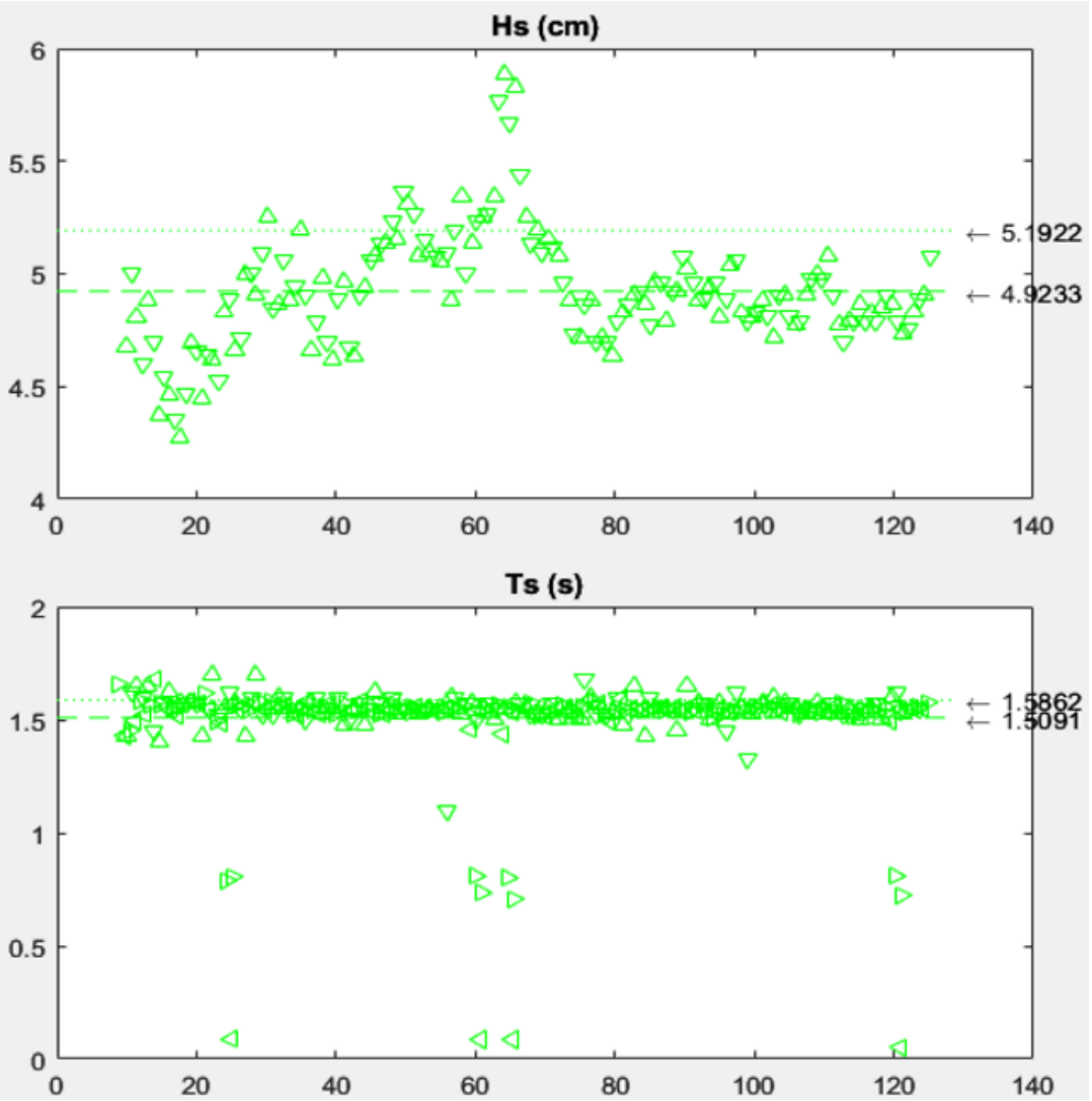


Gráfico 111: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

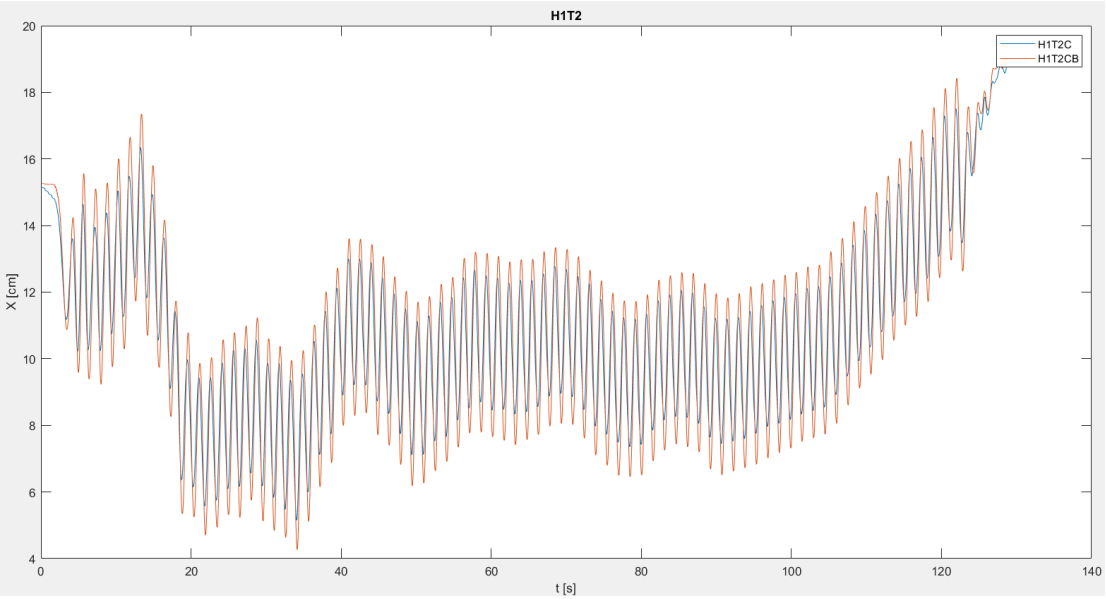


Gráfico 112: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

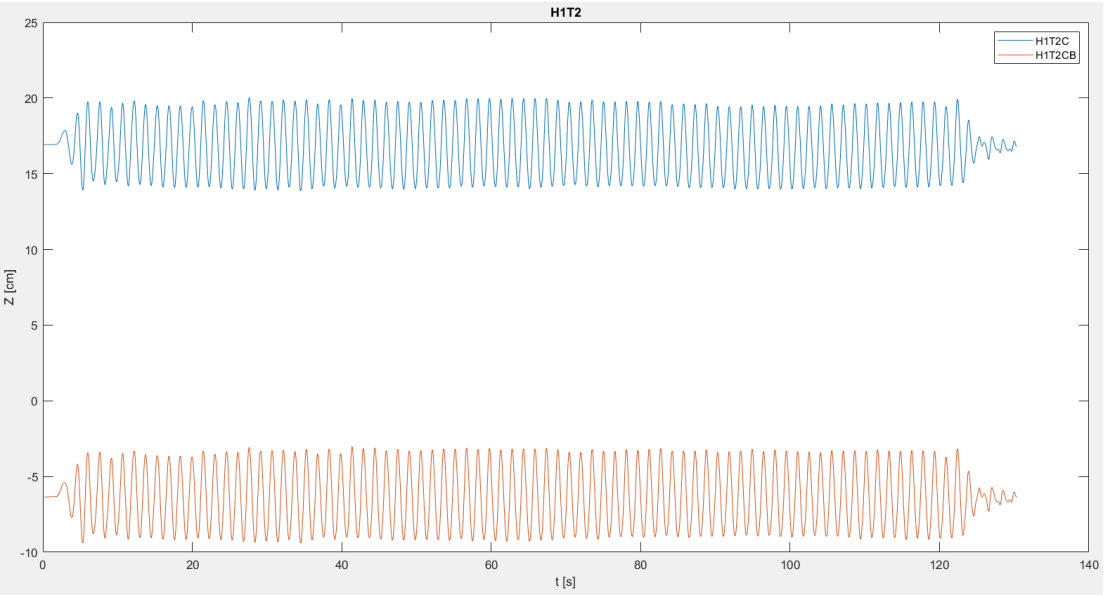


Gráfico 113: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

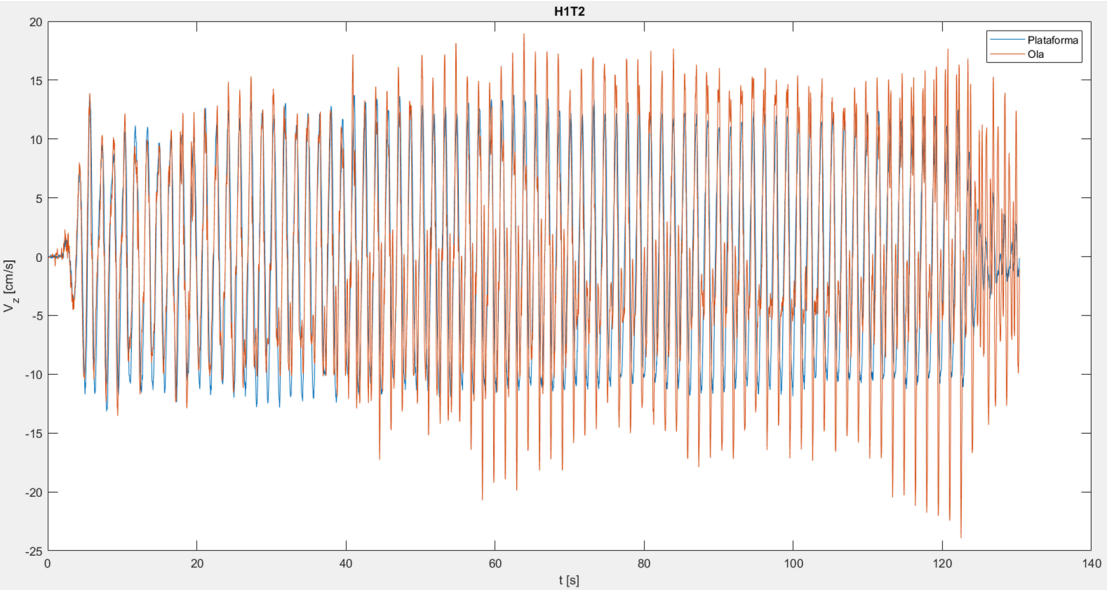


Gráfico 114: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.20. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H1T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19,1	19,7	18%

Tabla 91: Condiciones de laboratorio T3 50%, HIT3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	12.7	5	1.79	0.55678	0.1241

T*abla 92: Conversión de oleaje ideal*

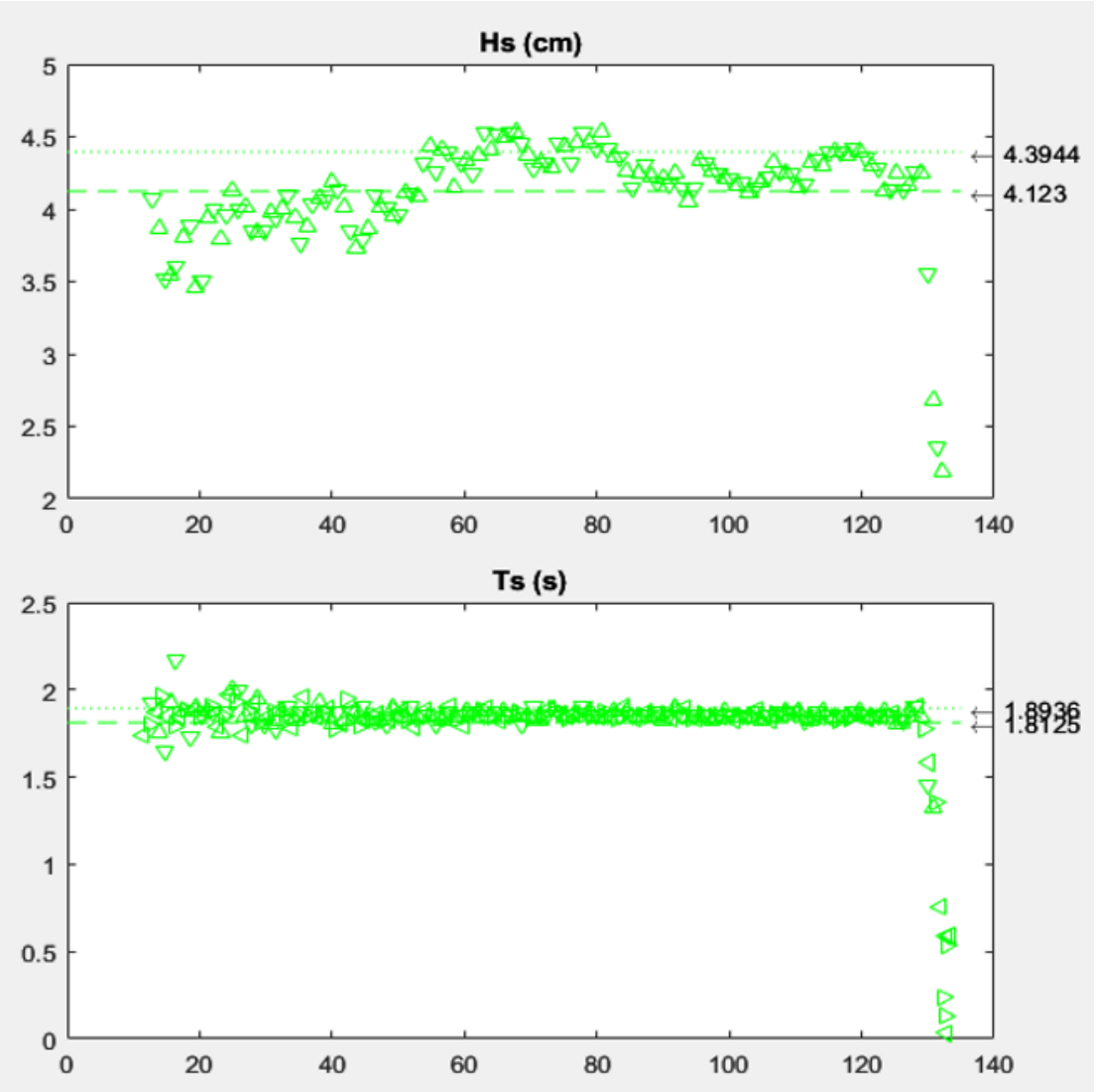


Gráfico 115: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.7	12.2	5.4	1.7253	0.5796	0.12775

Tabla 93: Conversión de oleaje real

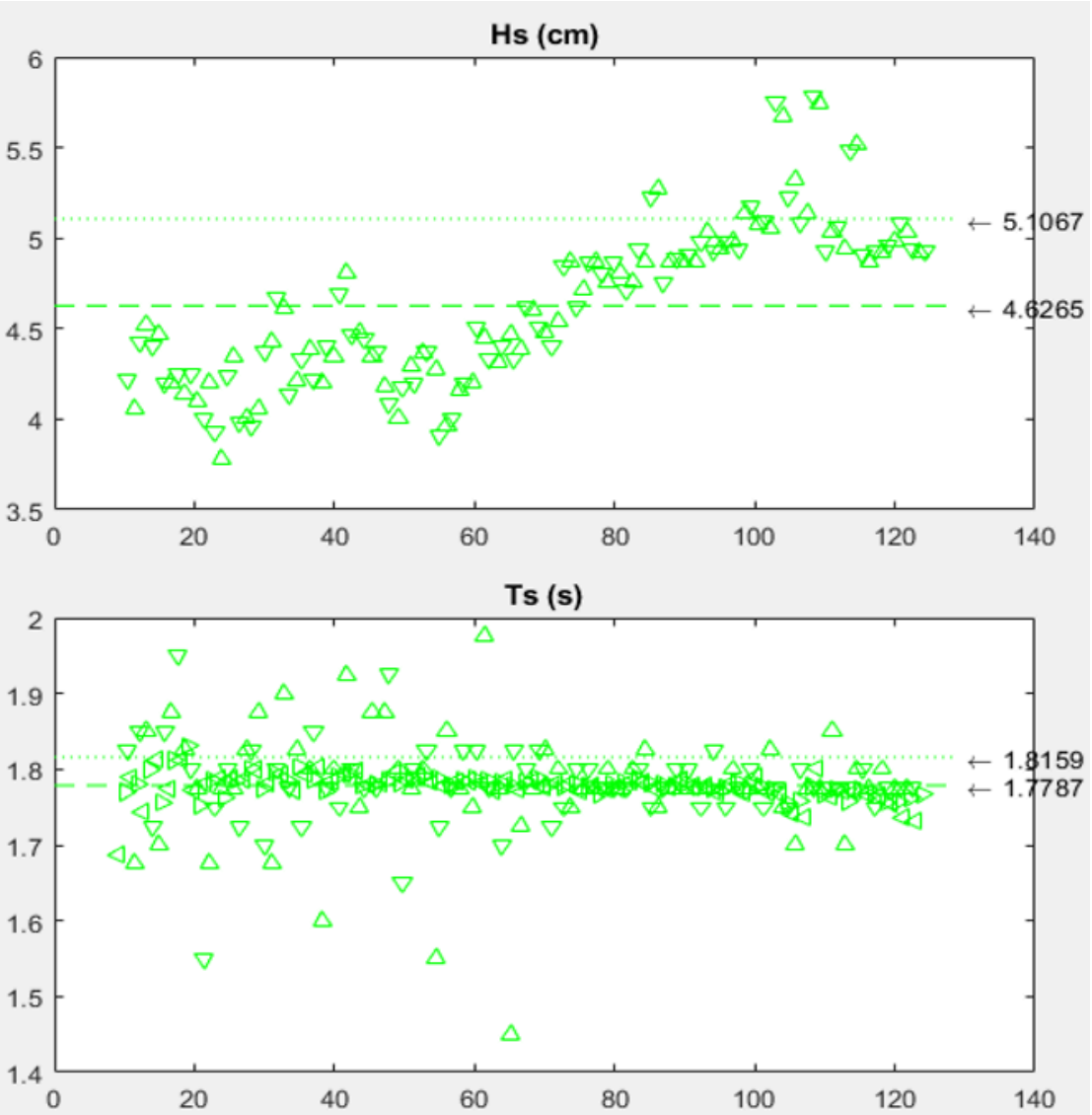


Gráfico 116: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

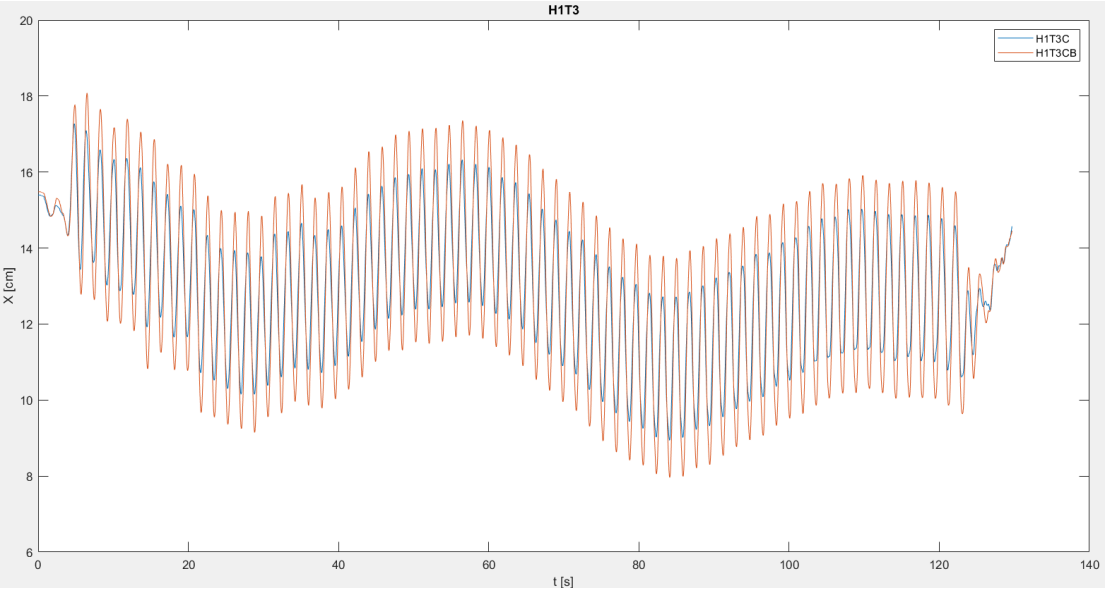


Gráfico 117: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

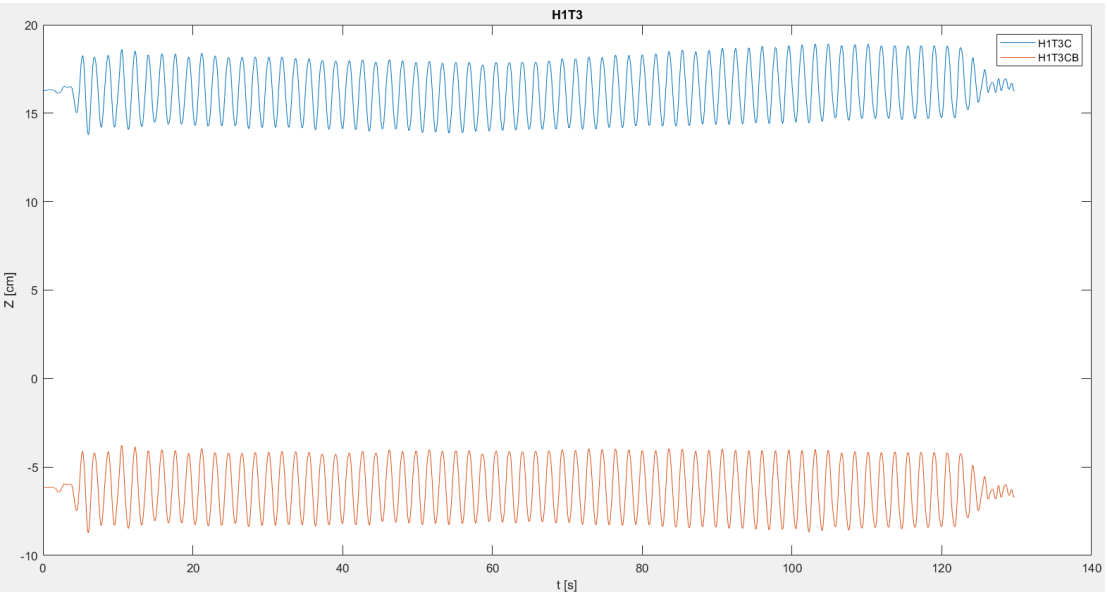


Gráfico 118: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

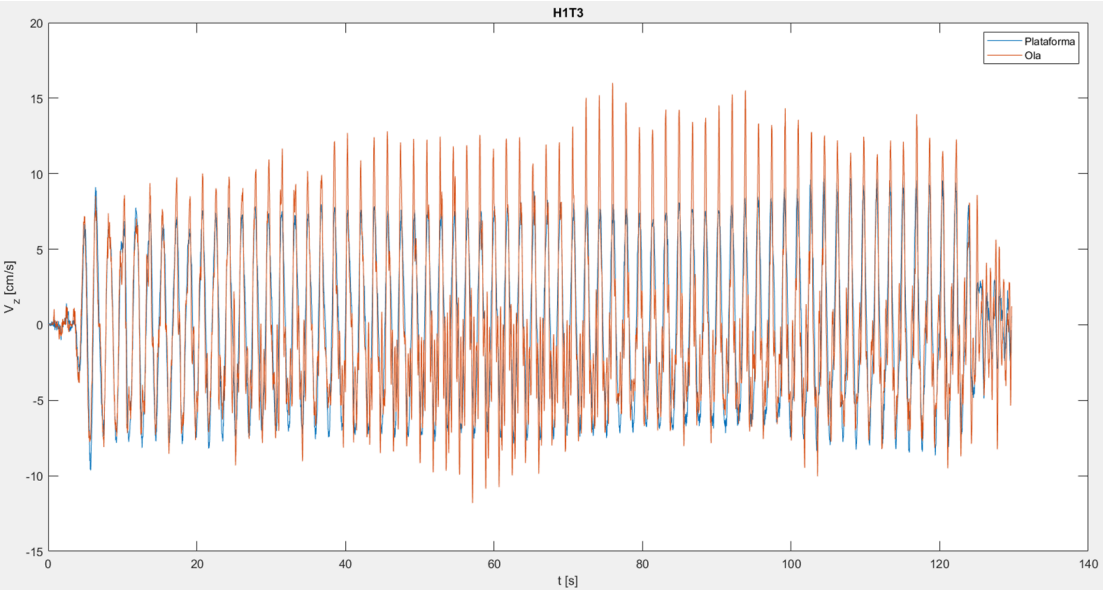


Gráfico 119: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.21. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H2T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19	19.2	18%

Tabla 94: Condiciones de laboratorio T3 50%, H2T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10	7.8	1.41	0.70711	0.14752

Tabla 95: Conversión de oleaje ideal

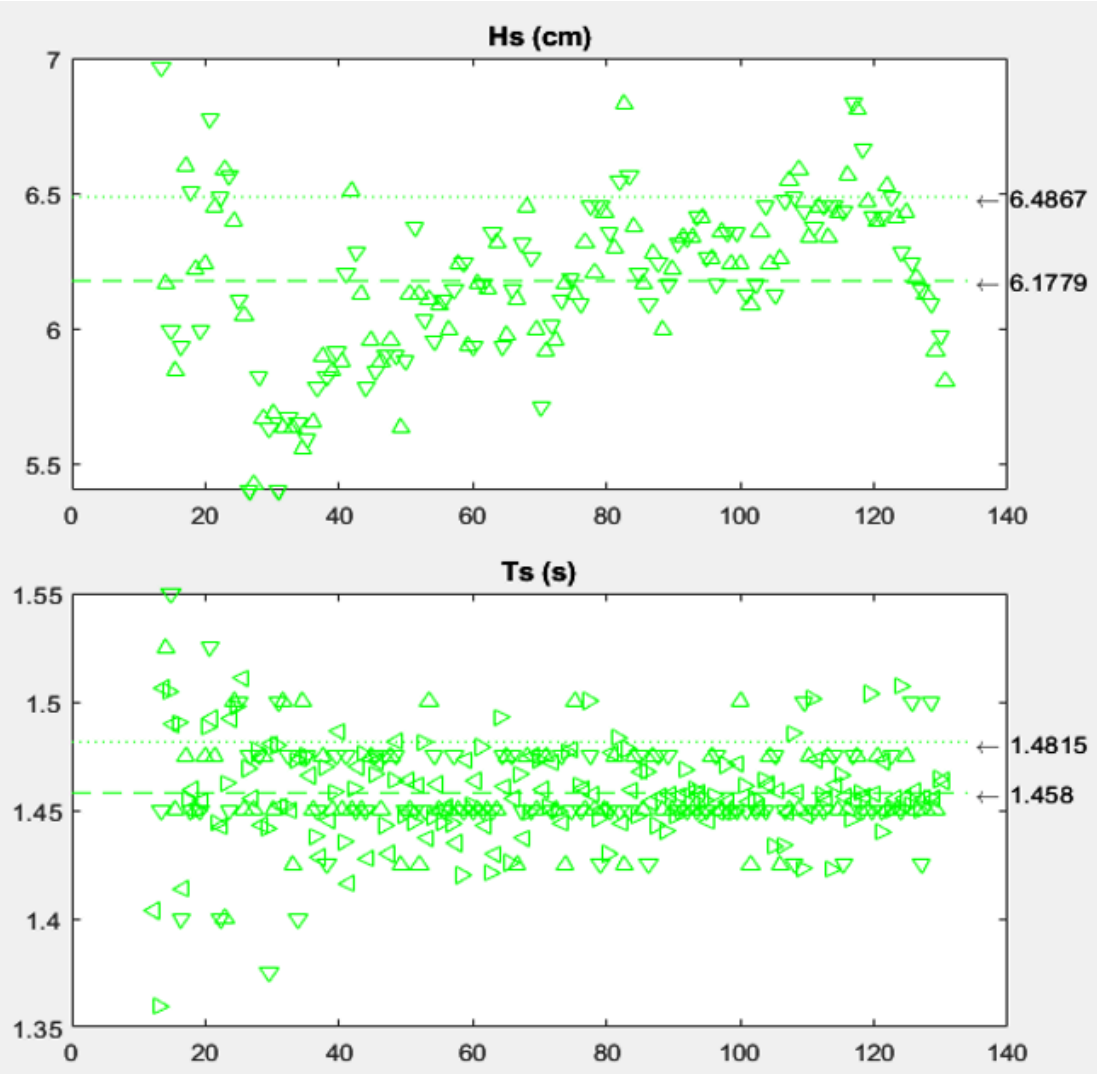


Gráfico 120: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
5.1	9.7	10.2	1.3718	0.72898	0.18065

Tabla 96: Conversión de oleaje real

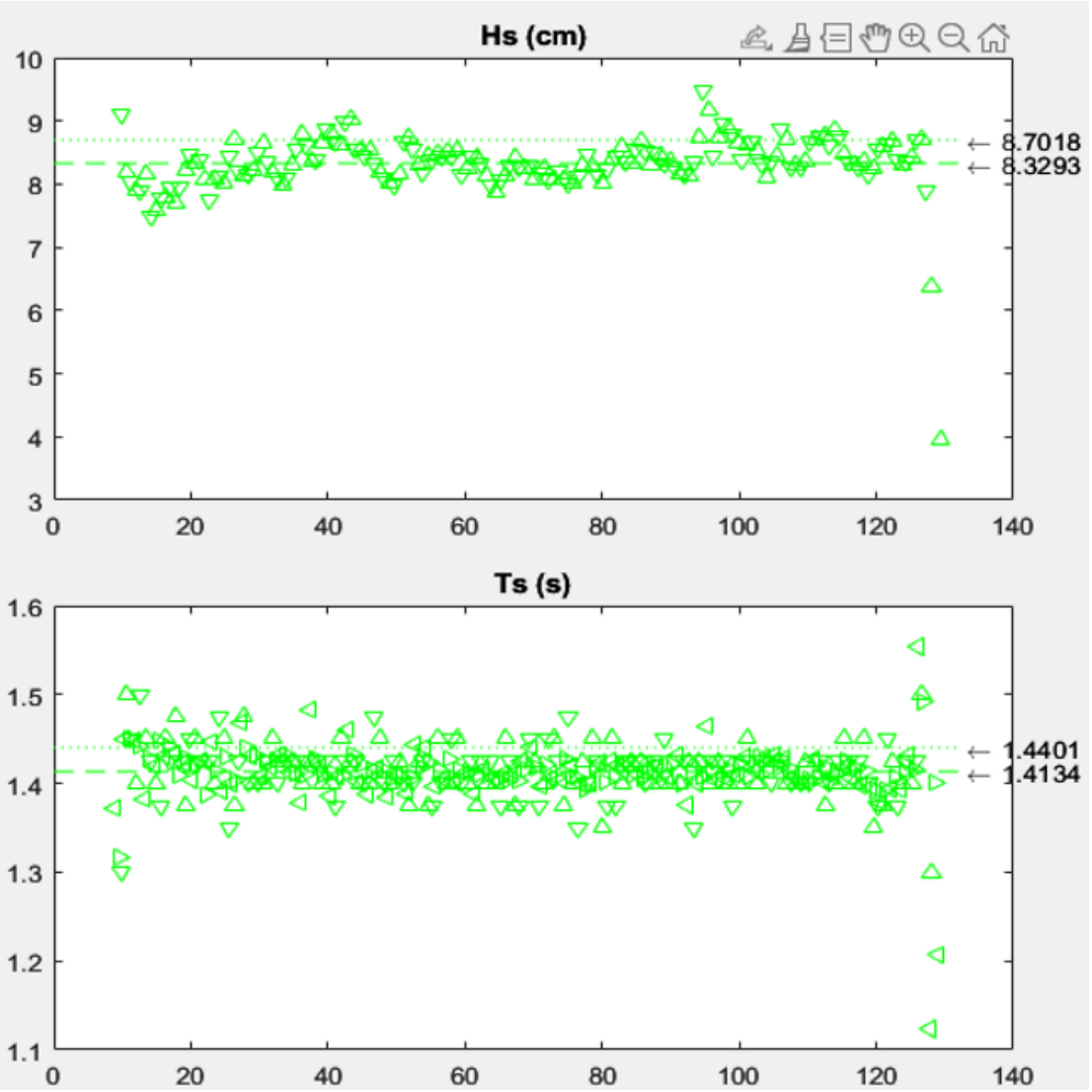


Gráfico 121: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

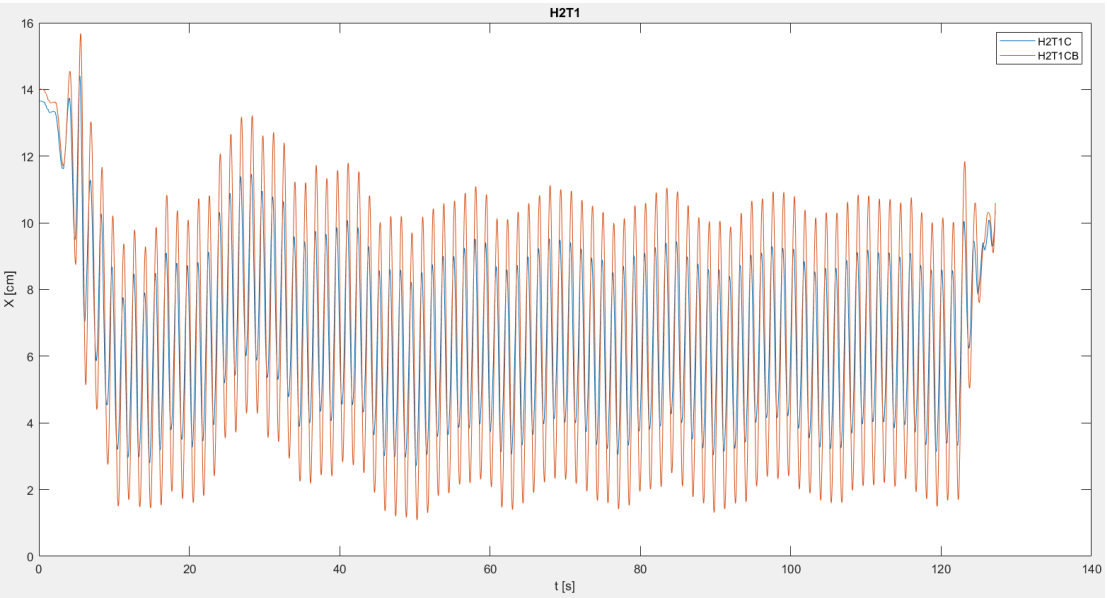


Gráfico 122: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

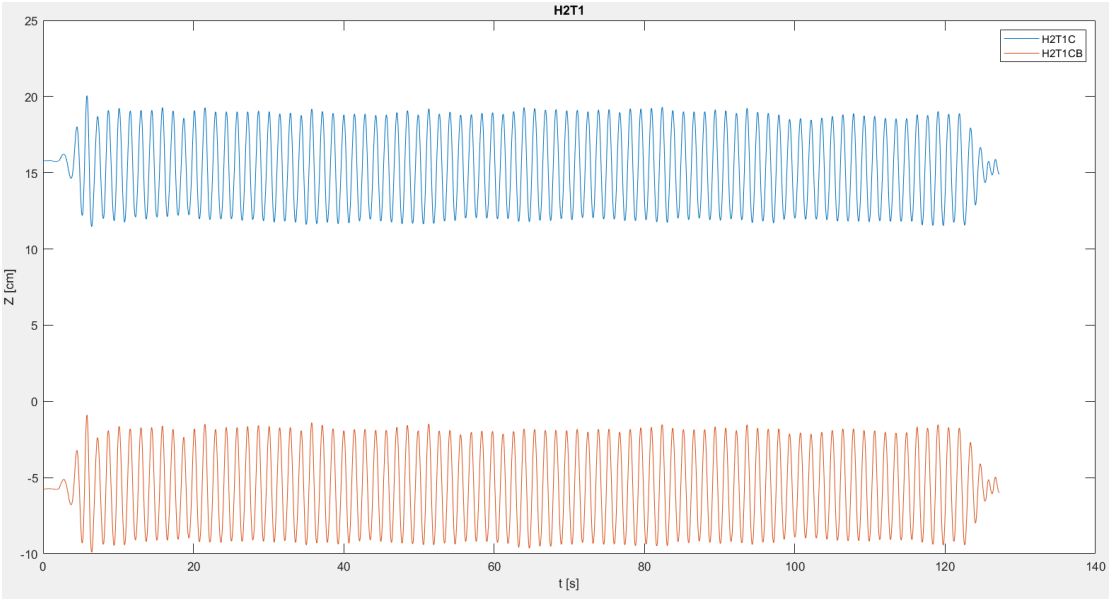


Gráfico 123: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

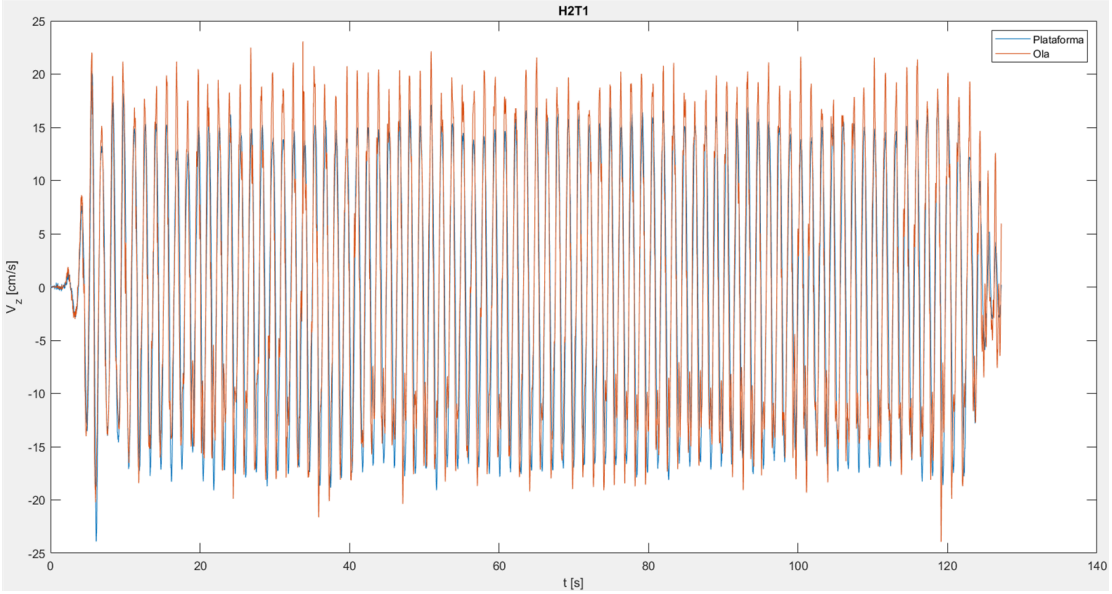


Gráfico 124: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.22. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H2T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19.1	19.4	18%

Tabla 97: Condiciones de laboratorio T3 50%, H2T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10.9	7.8	1.56	0.64282	0.16668

Tabla 98: Conversión de oleaje ideal

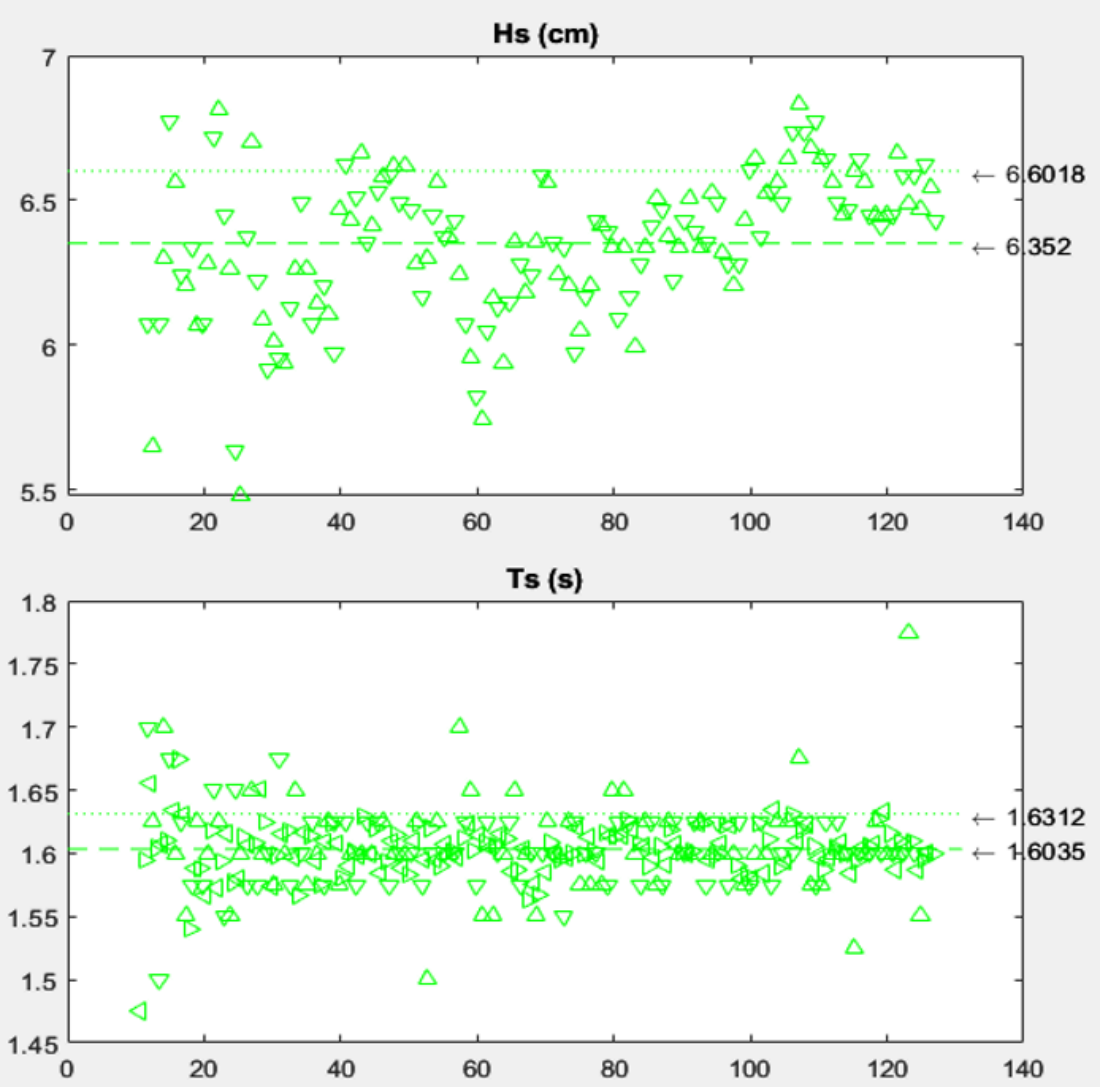


Gráfico 125: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.6	10.6	9.2	1.49	0.66708	0.18292

Tabla 99: Conversión de oleaje real

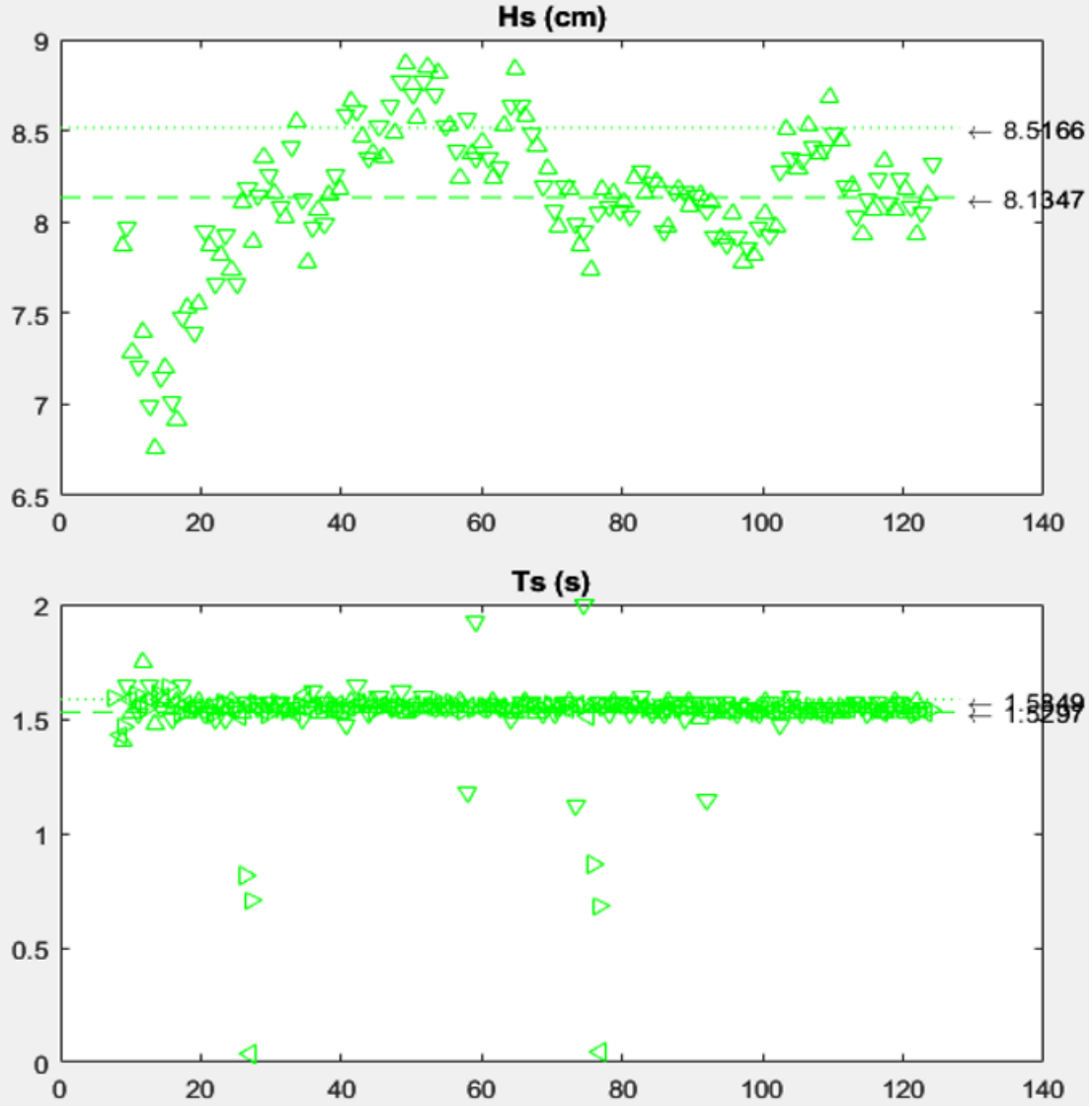


Gráfico 126: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

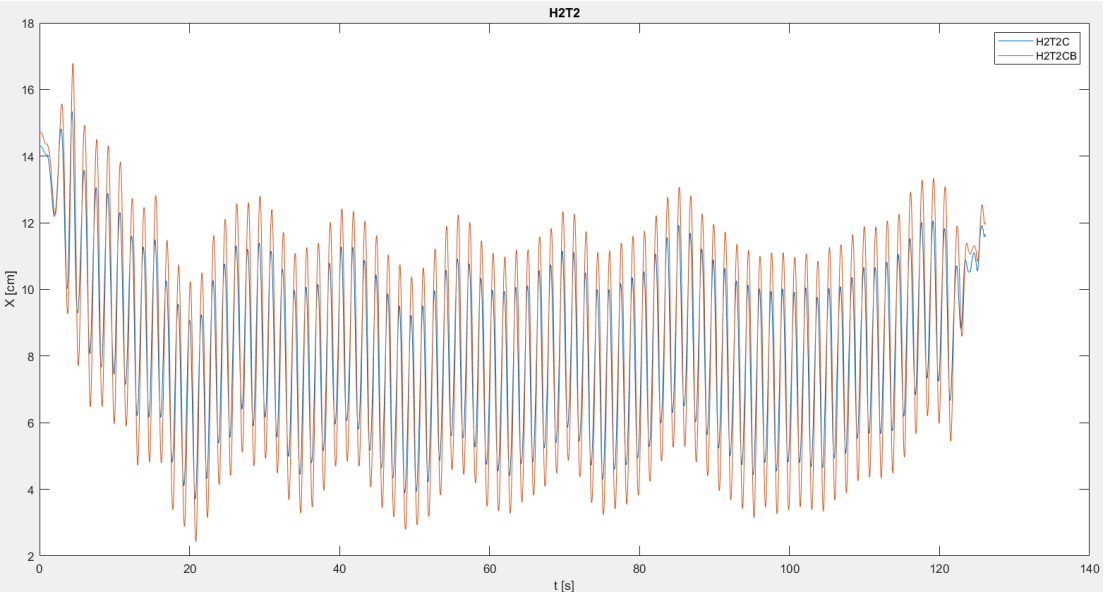


Gráfico 127: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

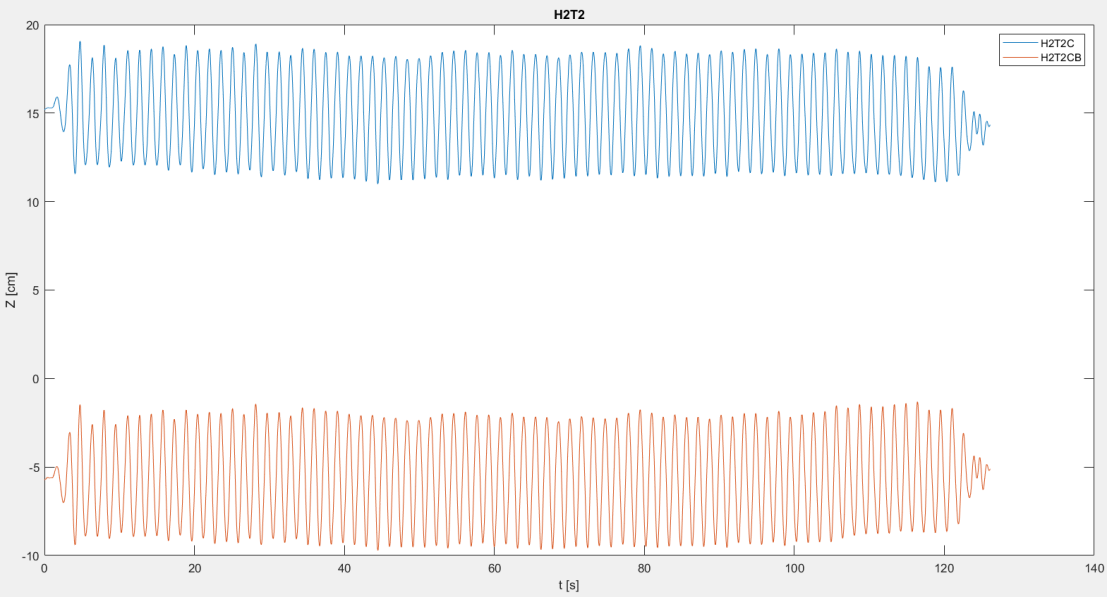


Gráfico 128: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

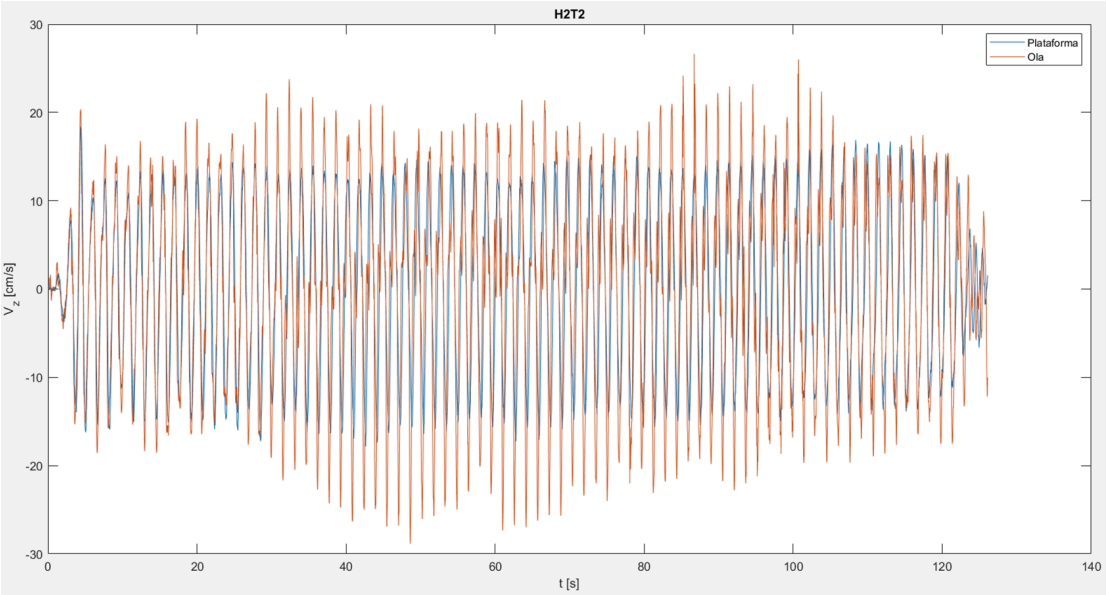


Gráfico 129: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.23. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H2T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20	20.3	18%

Tabla 100: Condiciones de laboratorio T3 50%, H2T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	12.7	7.8	1.79	0.55678	0.19855

T*abla 101: Conversión de oleaje ideal*

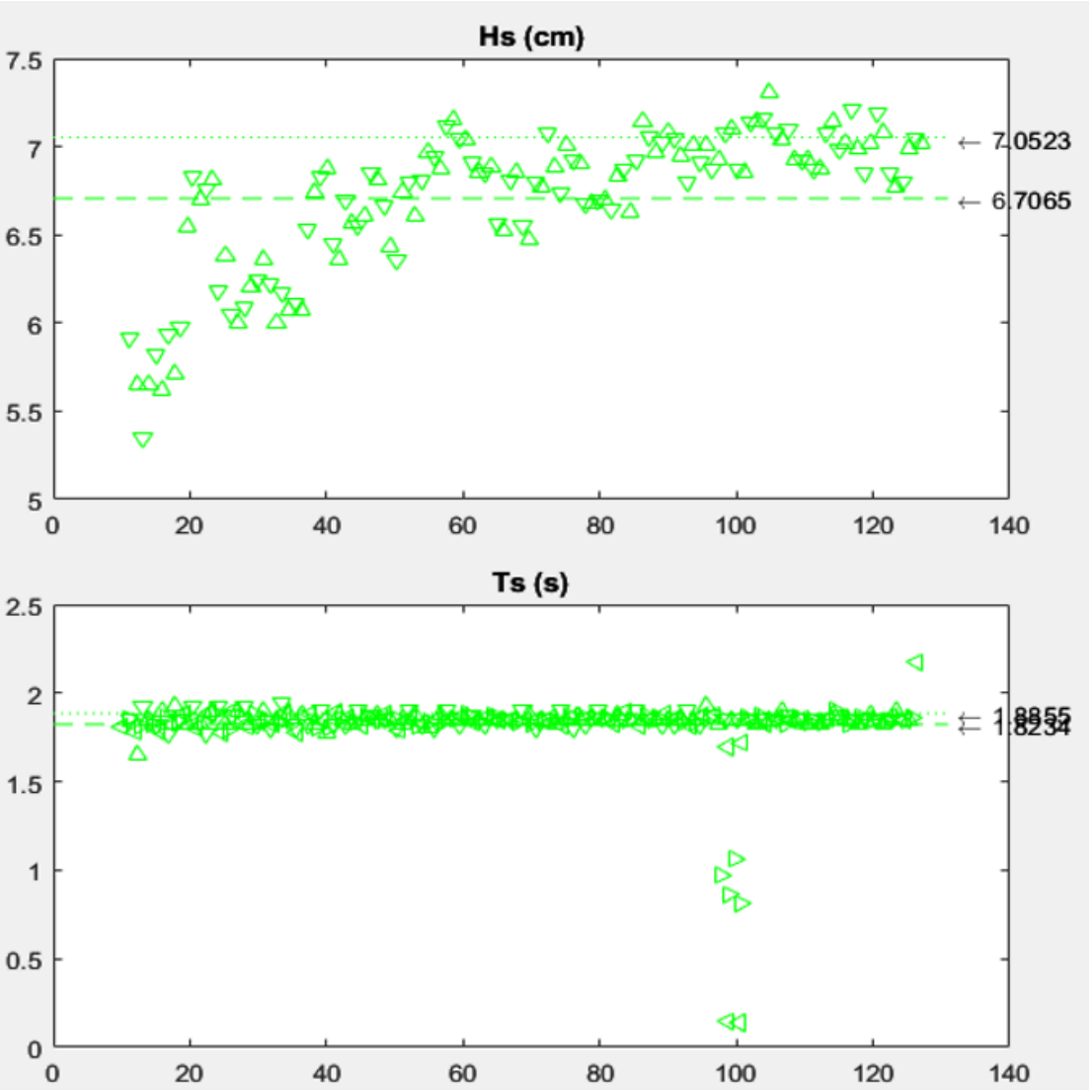


Gráfico 130: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.7	12.2	9.4	1.72	0.5796	0.22238

Tabla 102: Conversión de oleaje real

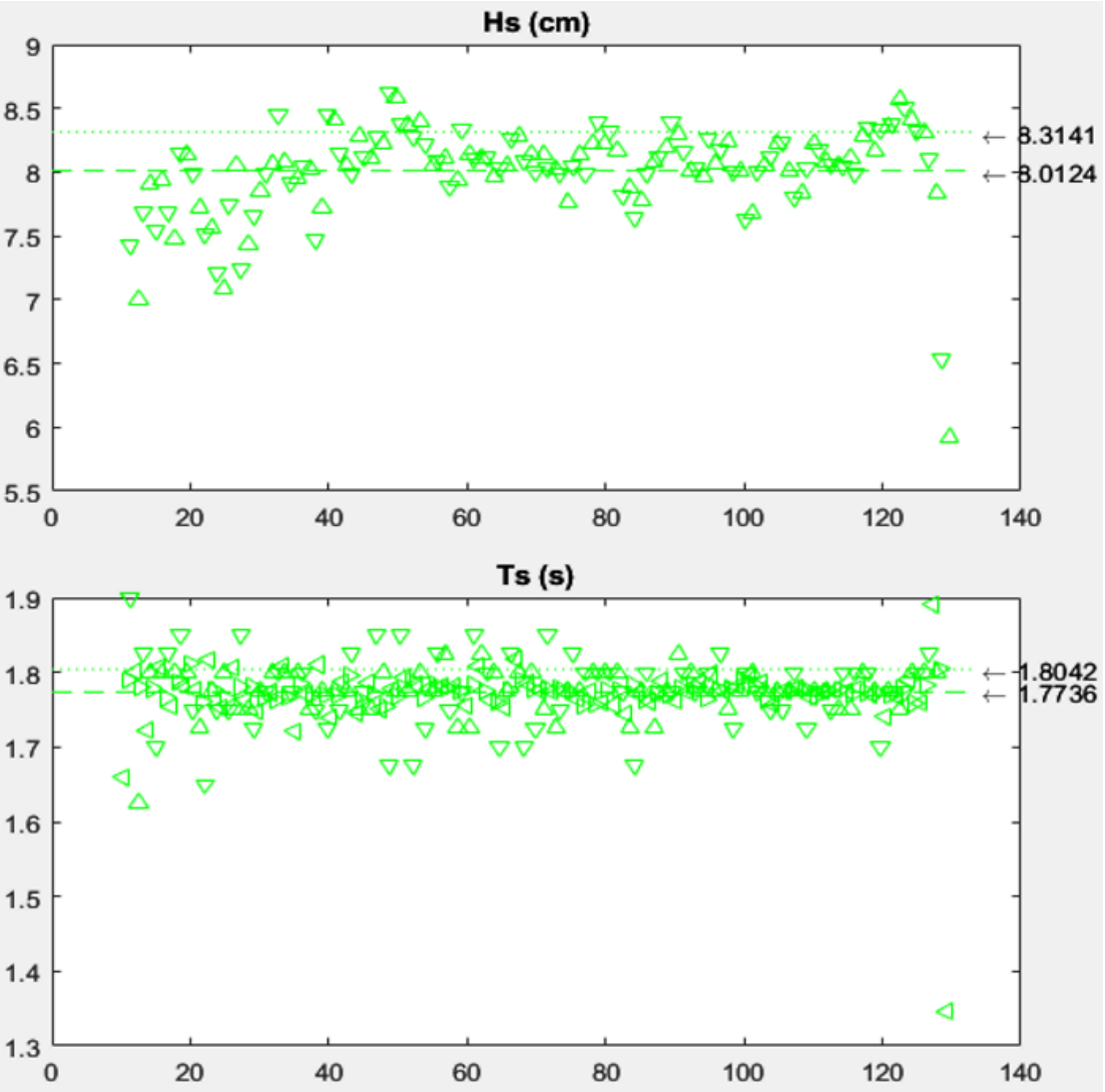


Gráfico 131: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

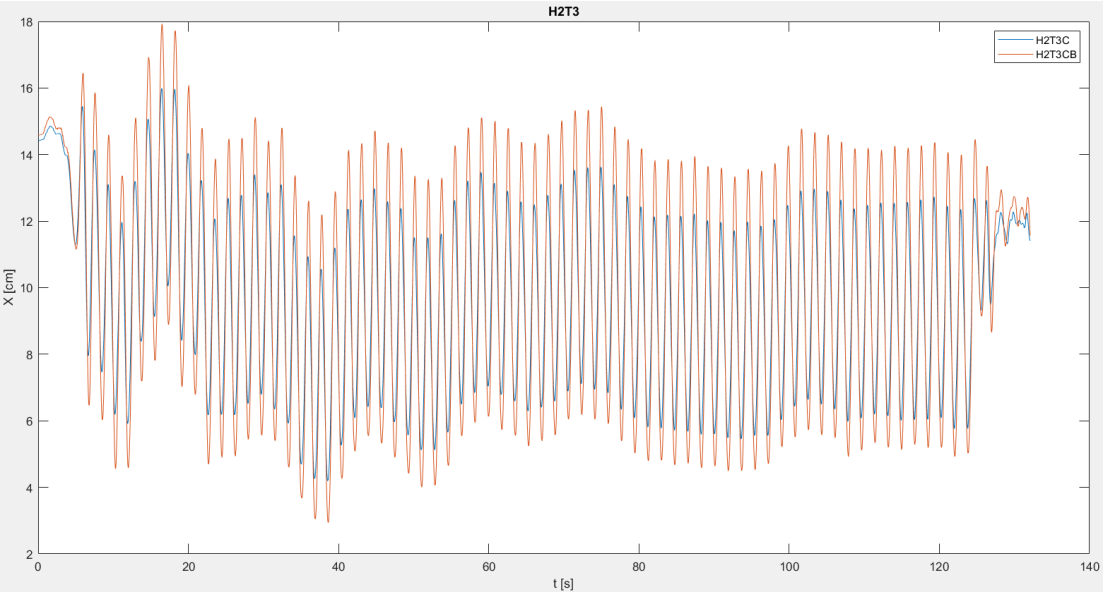


Gráfico 132: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

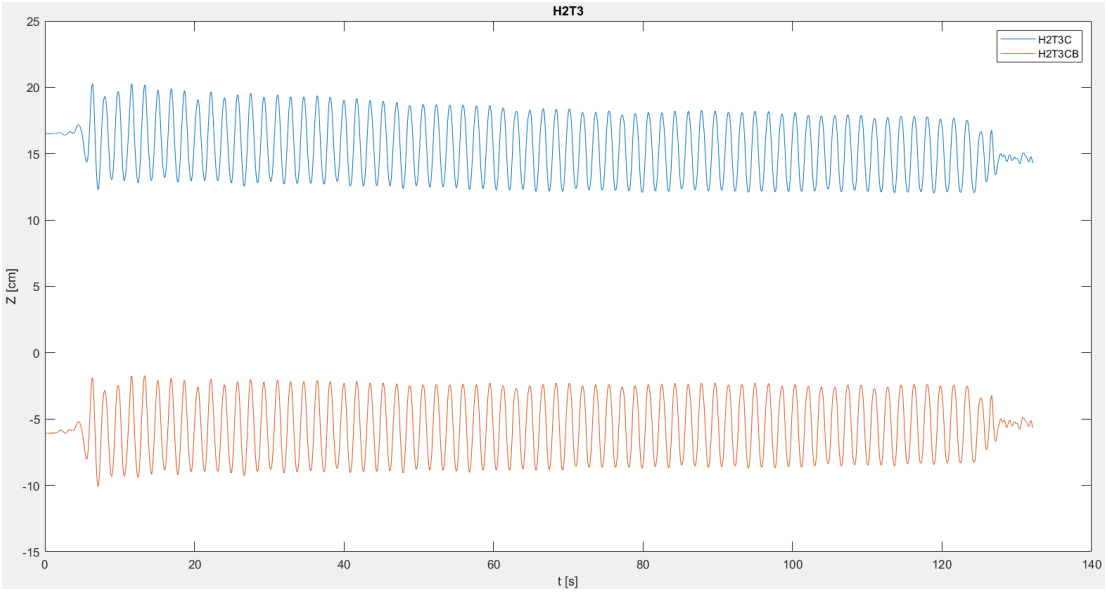


Gráfico 133: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

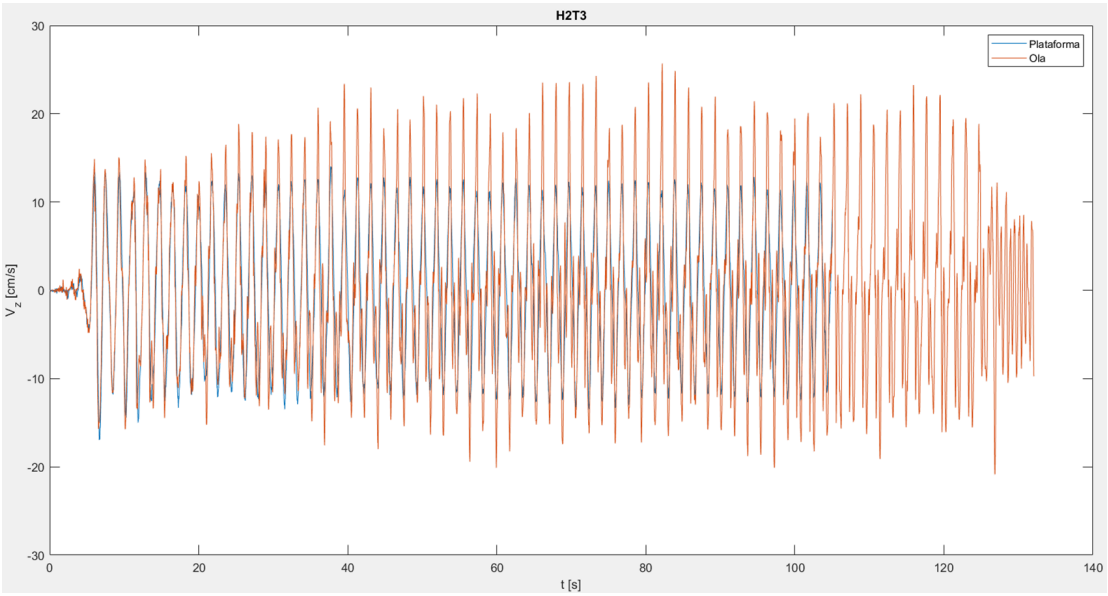


Gráfico 134: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.24. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H3T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19.5	19.6	18%

Tabla 103: Condiciones de laboratorio T3 50%, H3T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10	14.4	1.41	0.70711	0.26553

Tabla 104: Conversión de oleaje ideal

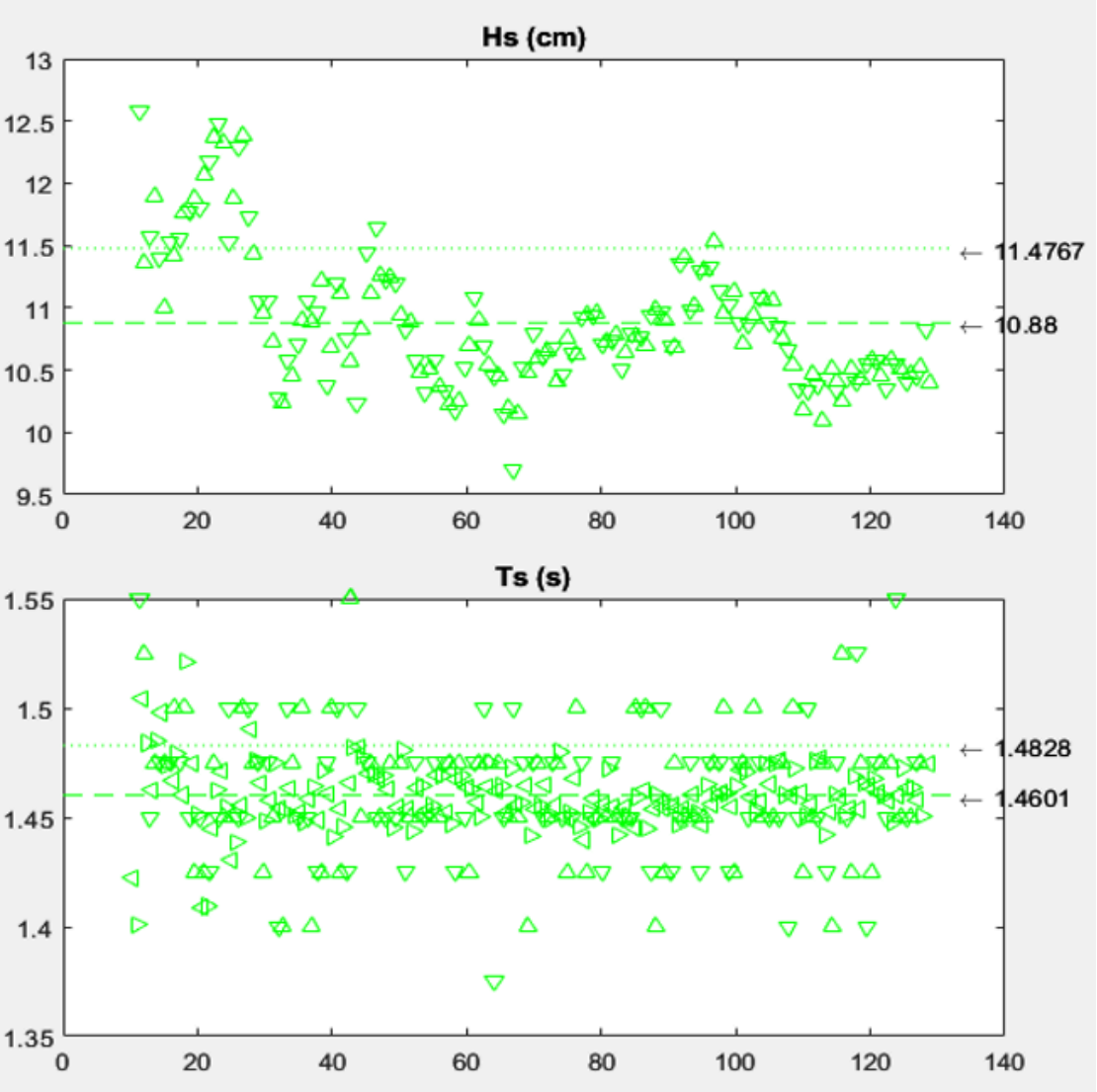


Gráfico 135: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.6	9.5	17.2	1.34	0.74432	0.29624

Tabla 105: Conversión de oleaje real

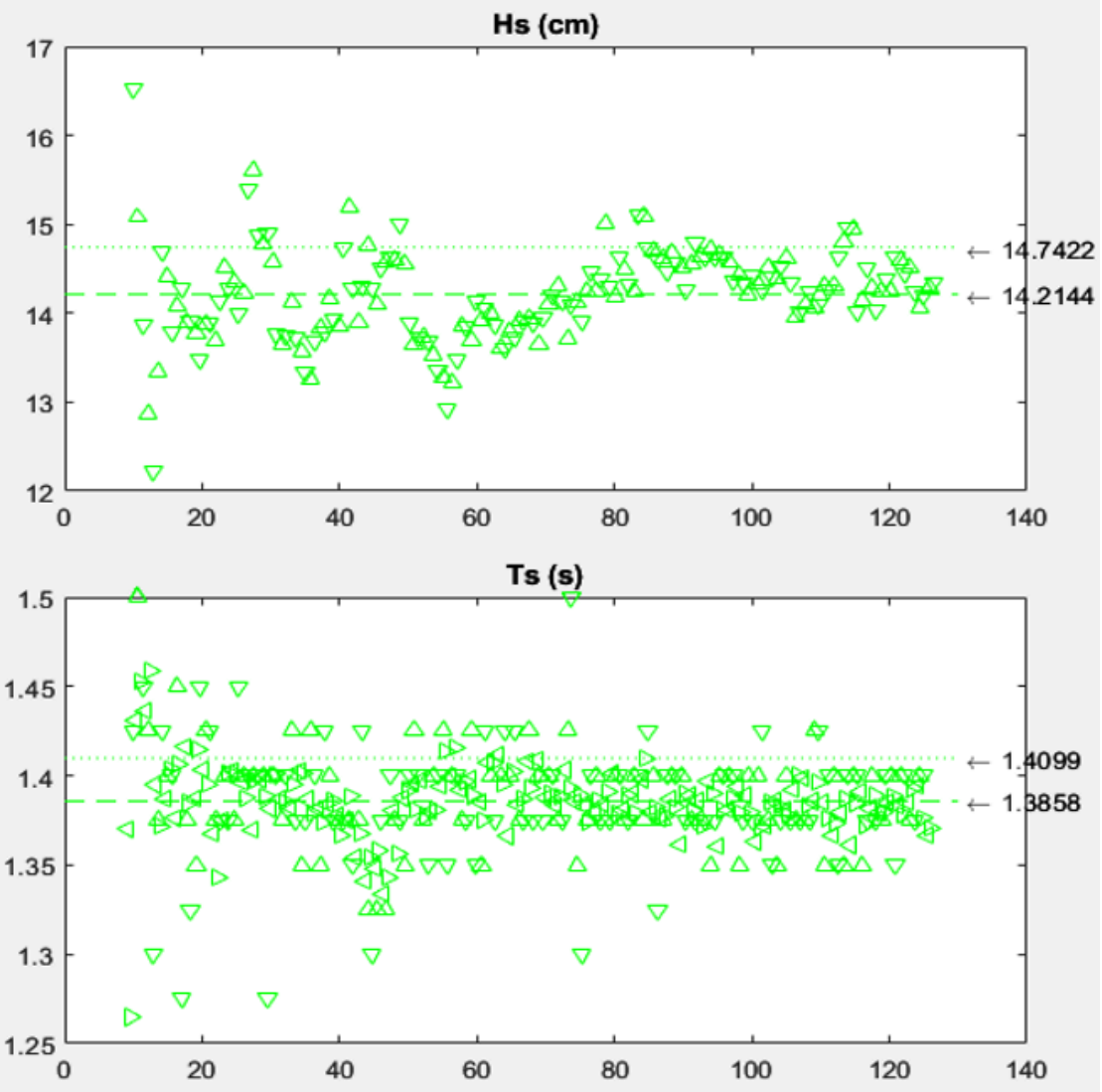


Gráfico 136: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

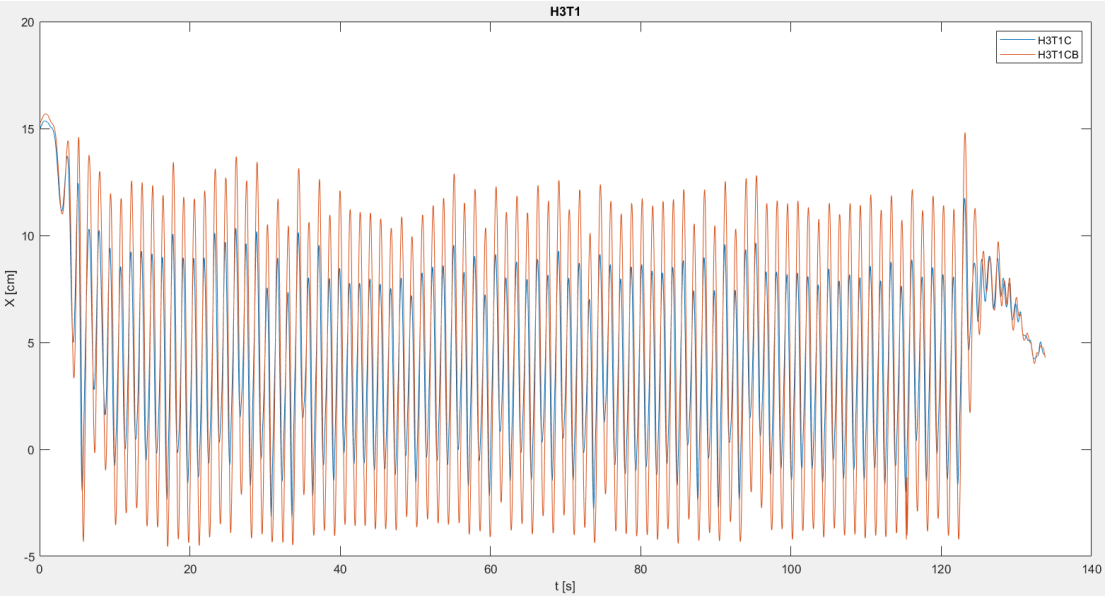


Gráfico 137: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

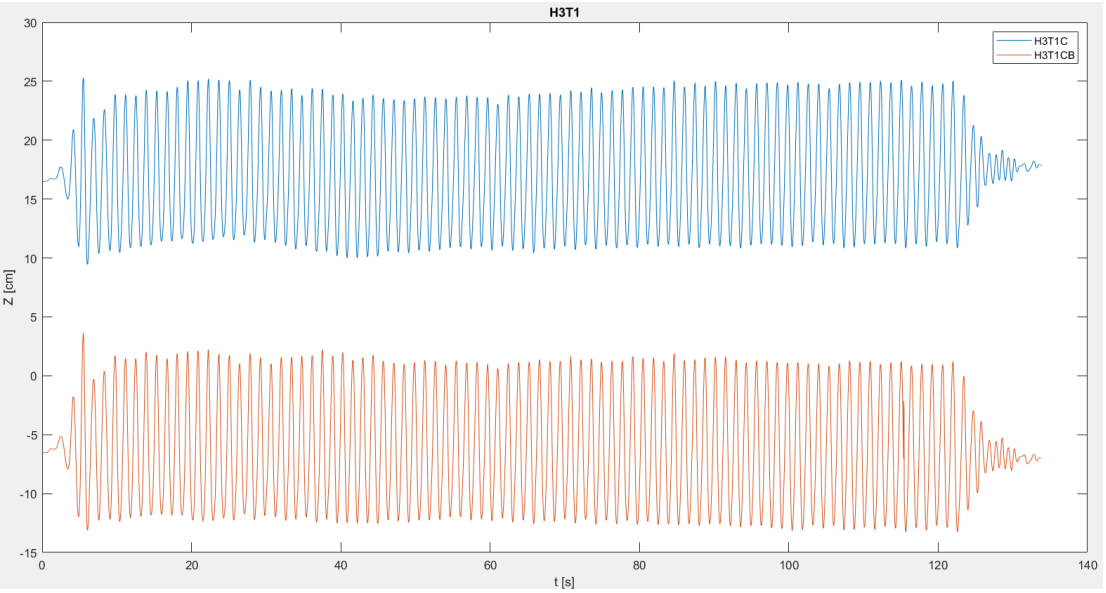


Gráfico 138: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

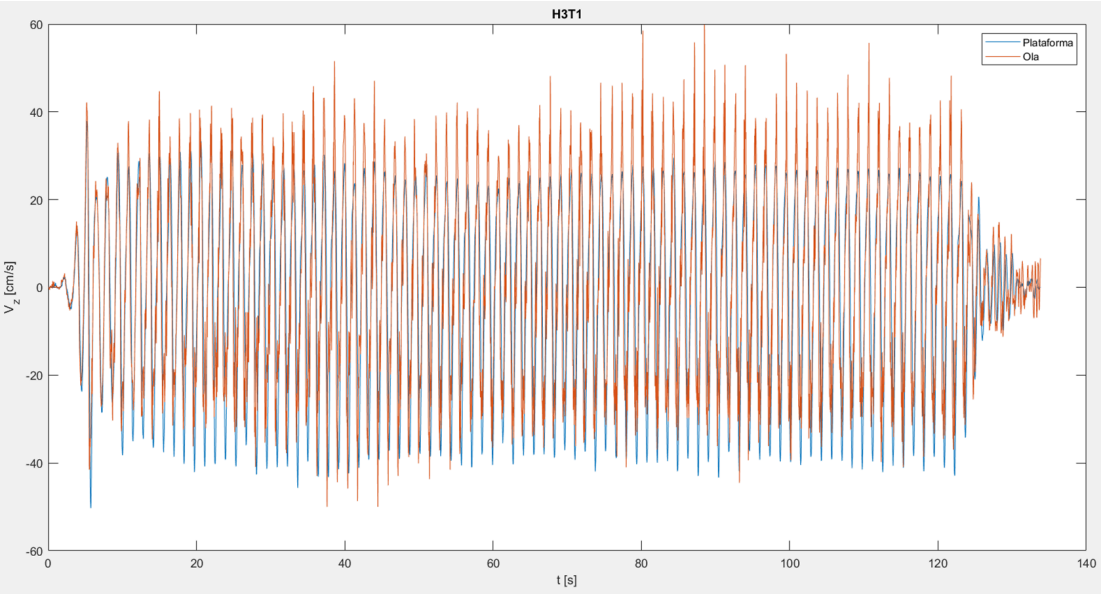


Gráfico 139: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.25. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H3T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
19.6	19.8	18%

Tabla 106: Condiciones de laboratorio T3 50%, H3T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10.9	14.4	1.56	0.64282	0.30003

T*abla 107: Conversión de oleaje ideal*

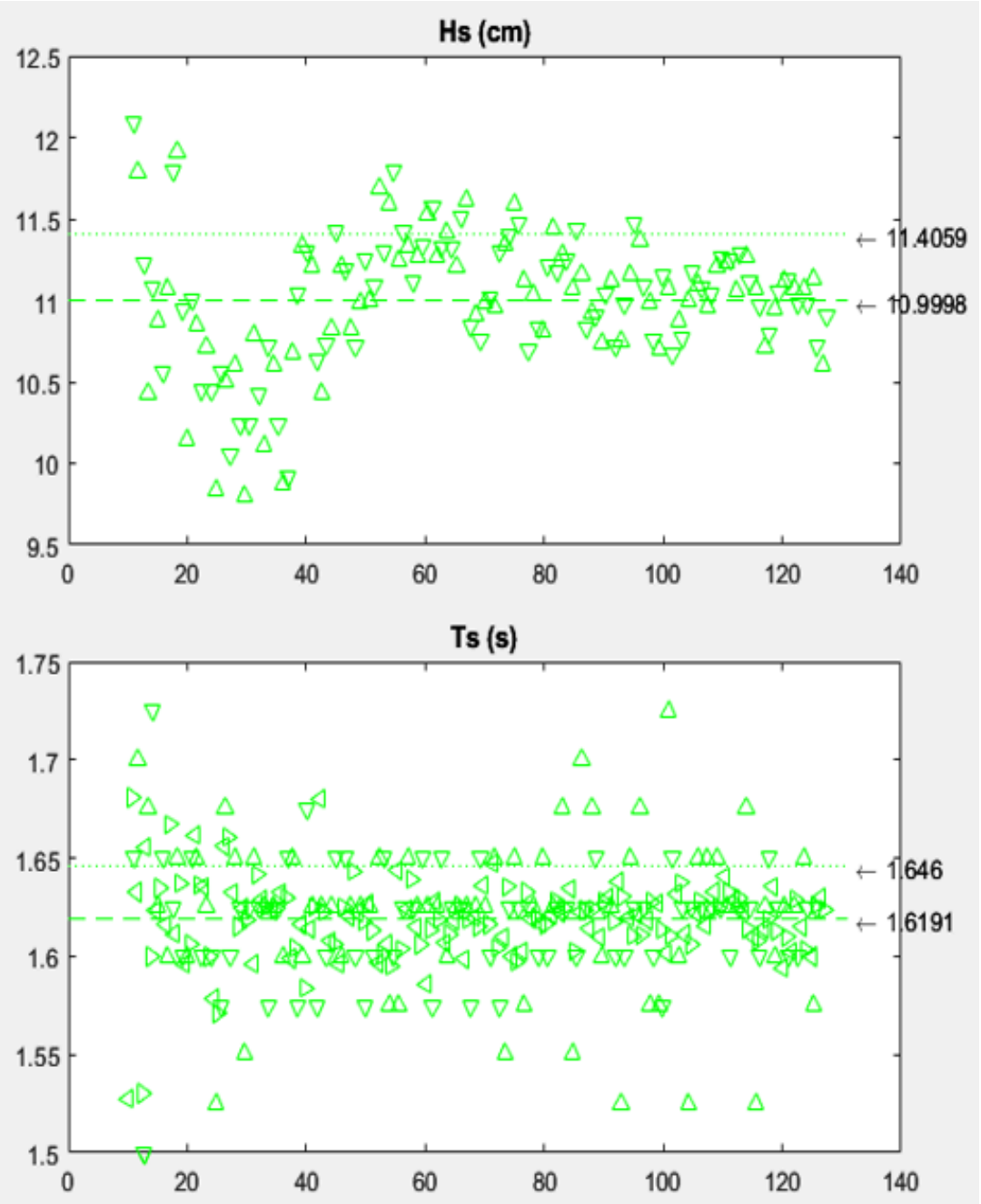


Gráfico 140: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.1	10.5	16.2	1.48	0.67344	0.31822

Tabla 108: Conversión de oleaje real

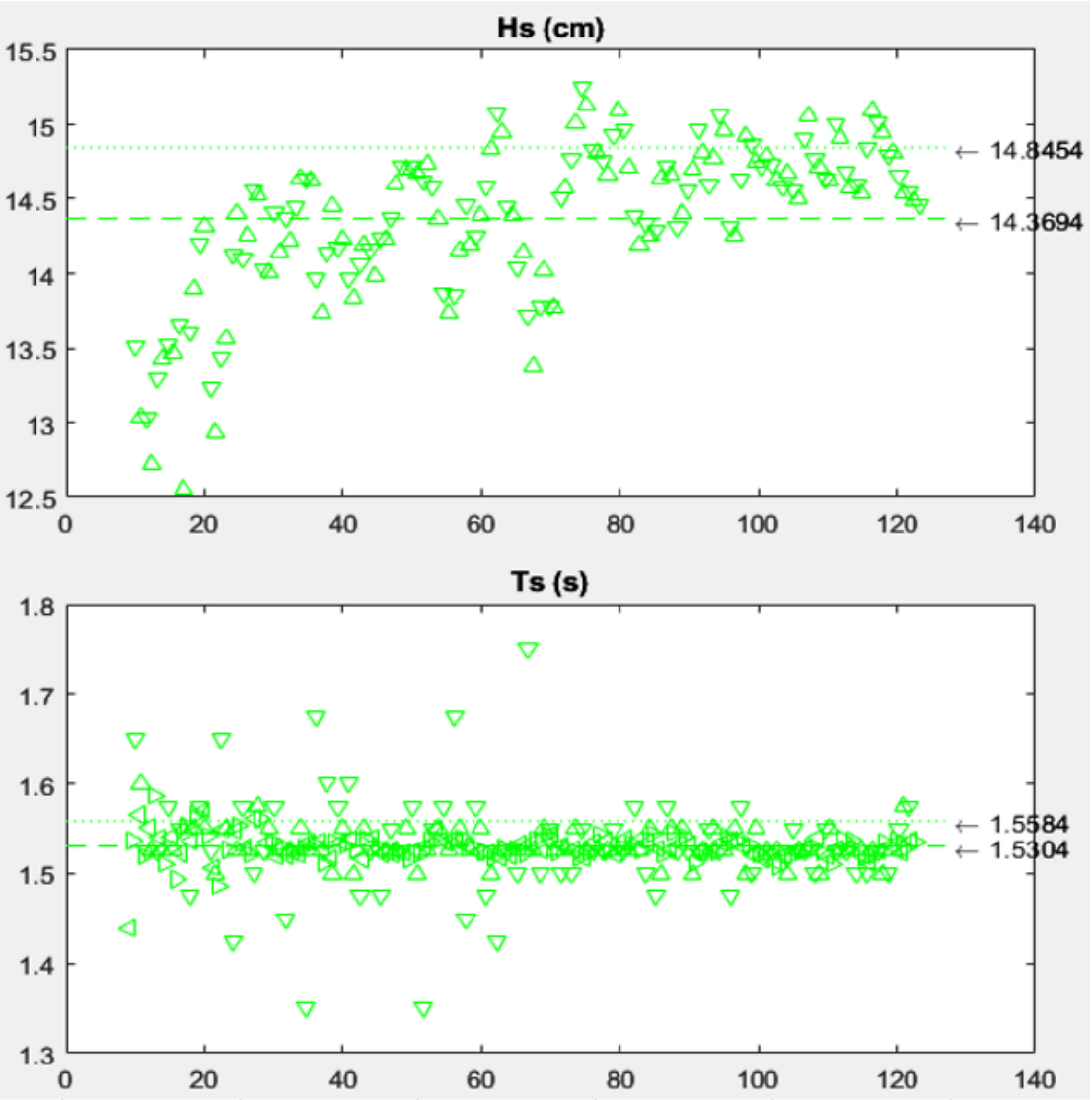


Gráfico 141: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

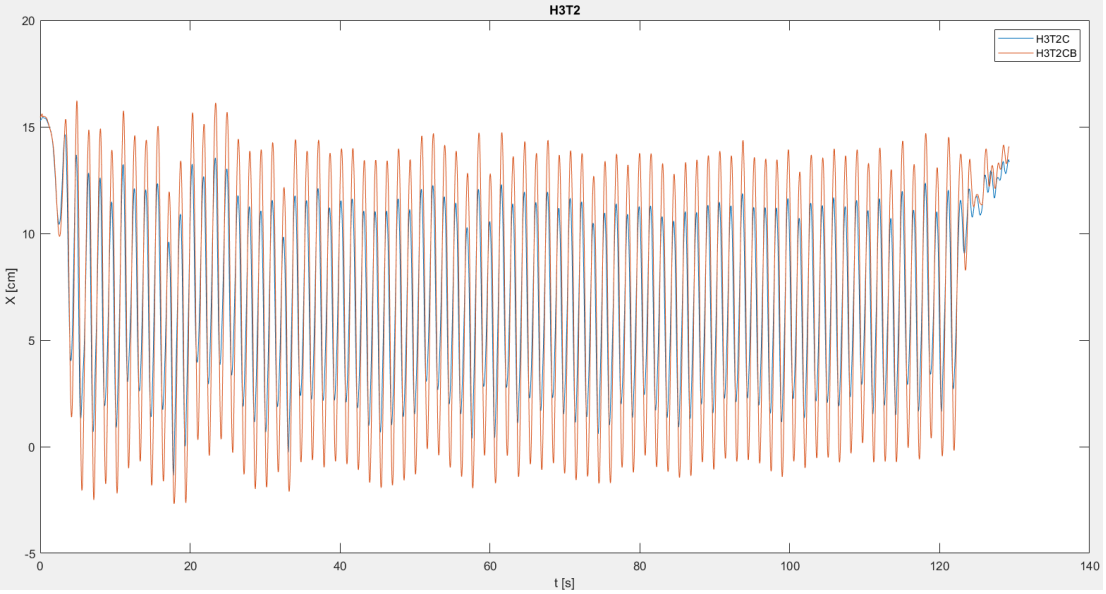


Gráfico 142: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

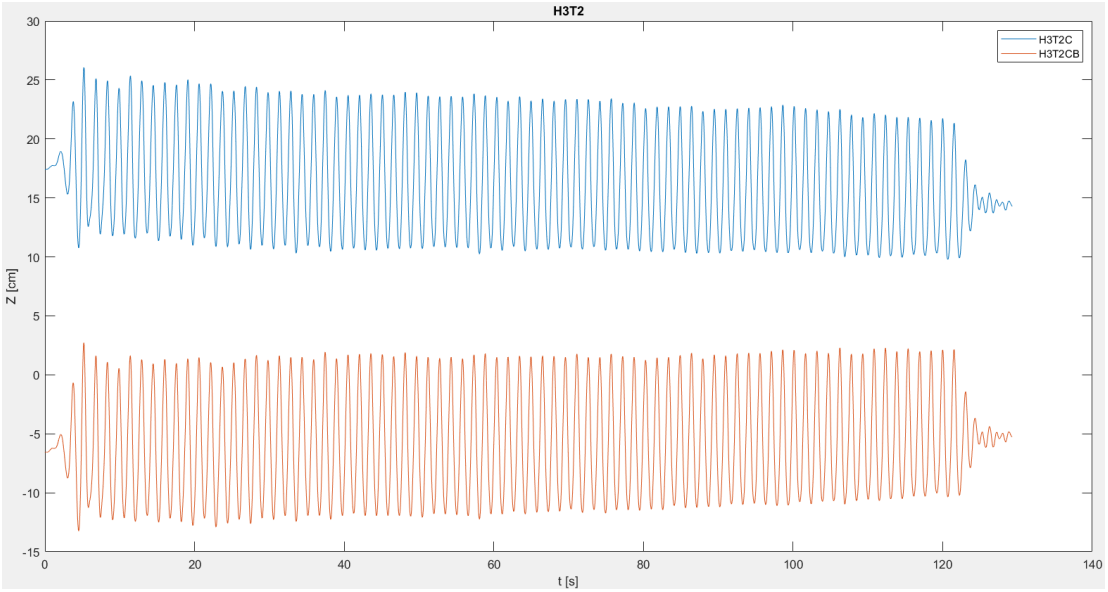


Gráfico 143: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

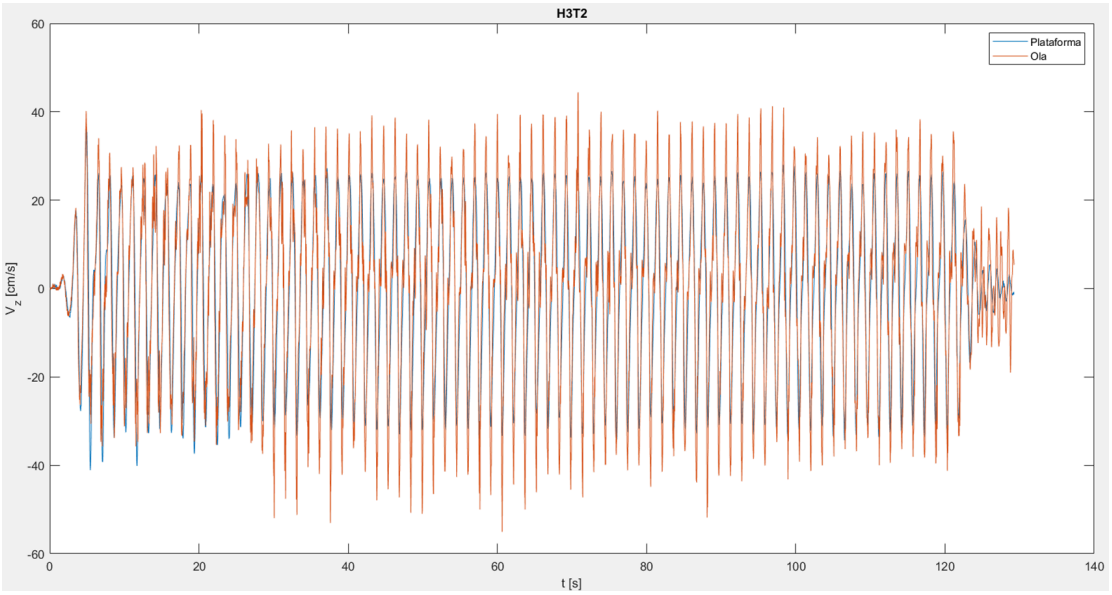


Gráfico 144: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.26. T3

Porcentaje calado: 50%
Estado de mar: H3T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20	20.2	18%

Tabla 109: Condiciones de laboratorio T3 50%, H3T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	12.7	14.4	1.79	0.55678	0.3574

T*abla 110: Conversión de oleaje ideal*

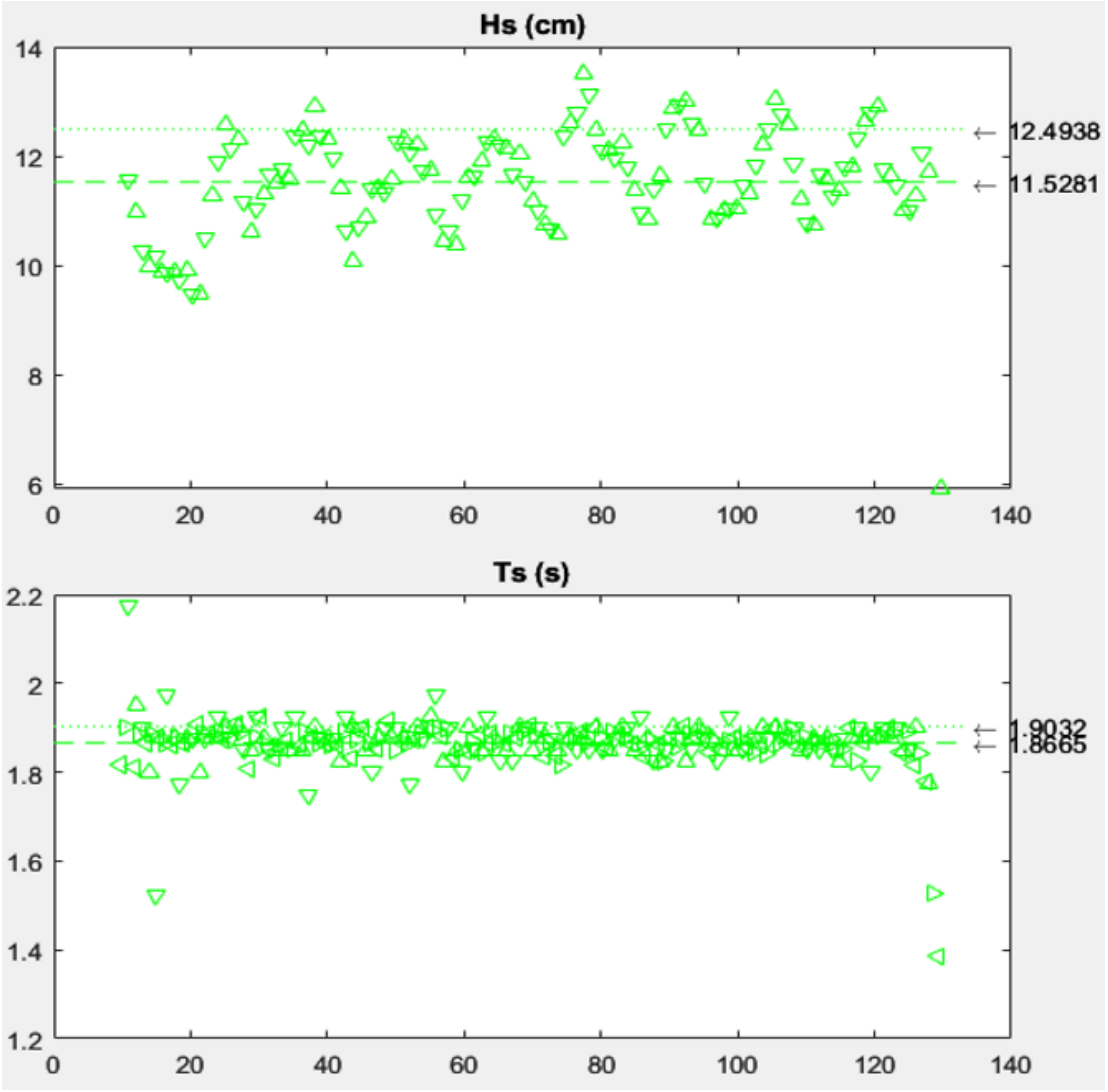


Gráfico 145: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.3	12.2	16.6	1.73	0.5796	0.39271

Tabla 111: Conversión de oleaje real

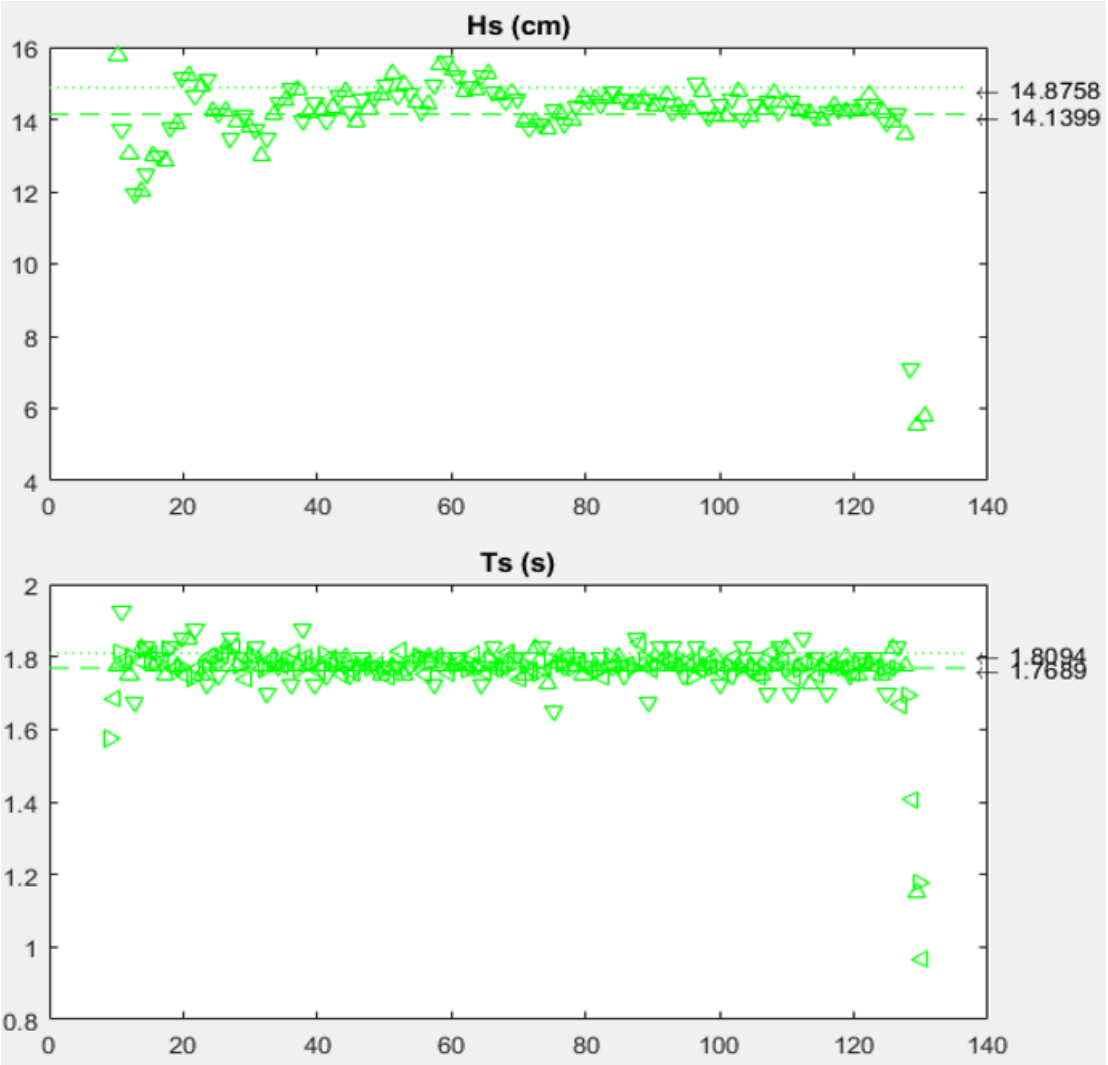


Gráfico 146: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

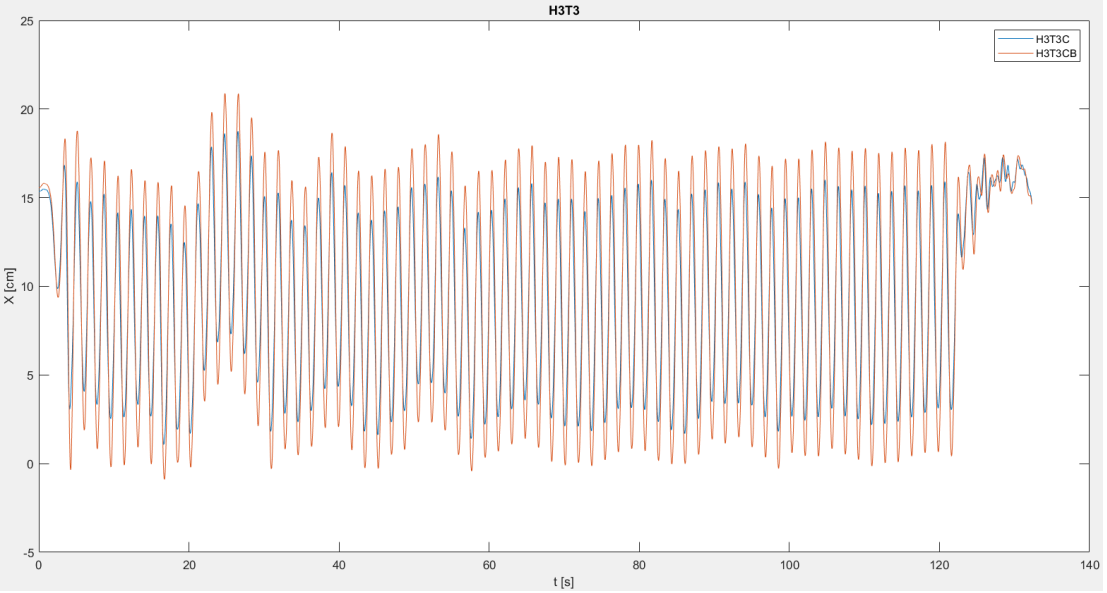


Gráfico 147: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

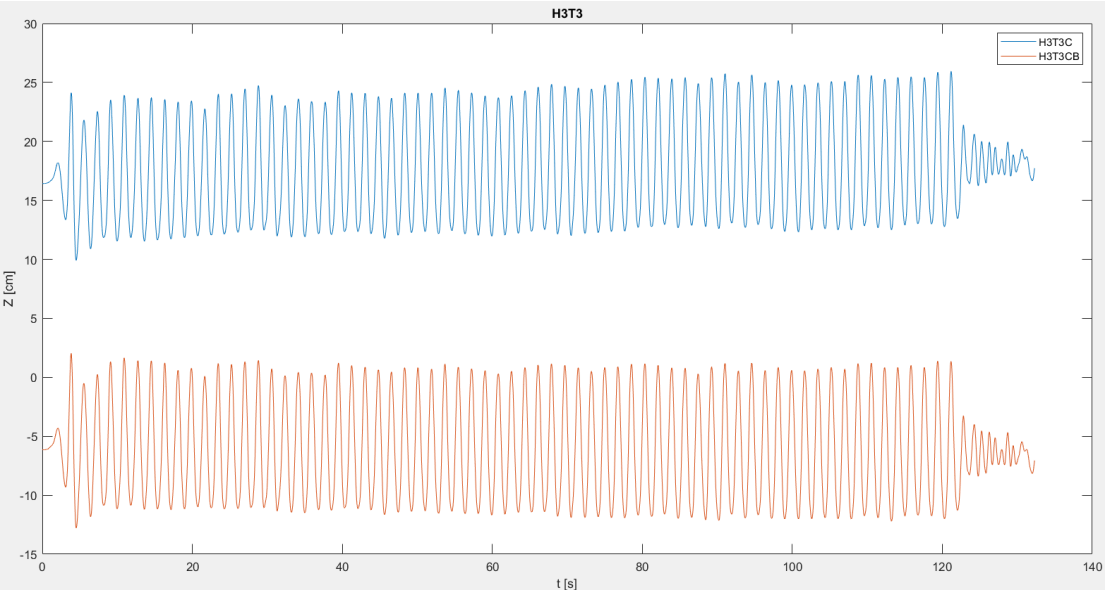


Gráfico 148: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

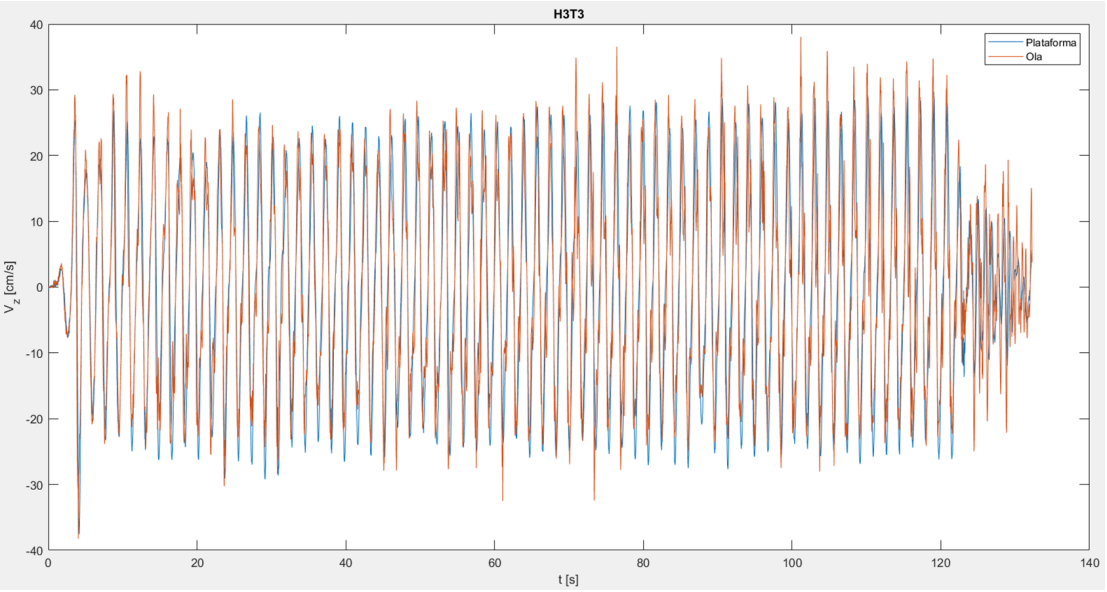


Gráfico 149: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.27. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H1T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.2	20.4	18%

Tabla 112: Condiciones de laboratorio T3 65%, H1T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10	5	1.41	0.70711	0.092197

Tabla 113: Conversión de oleaje ideal

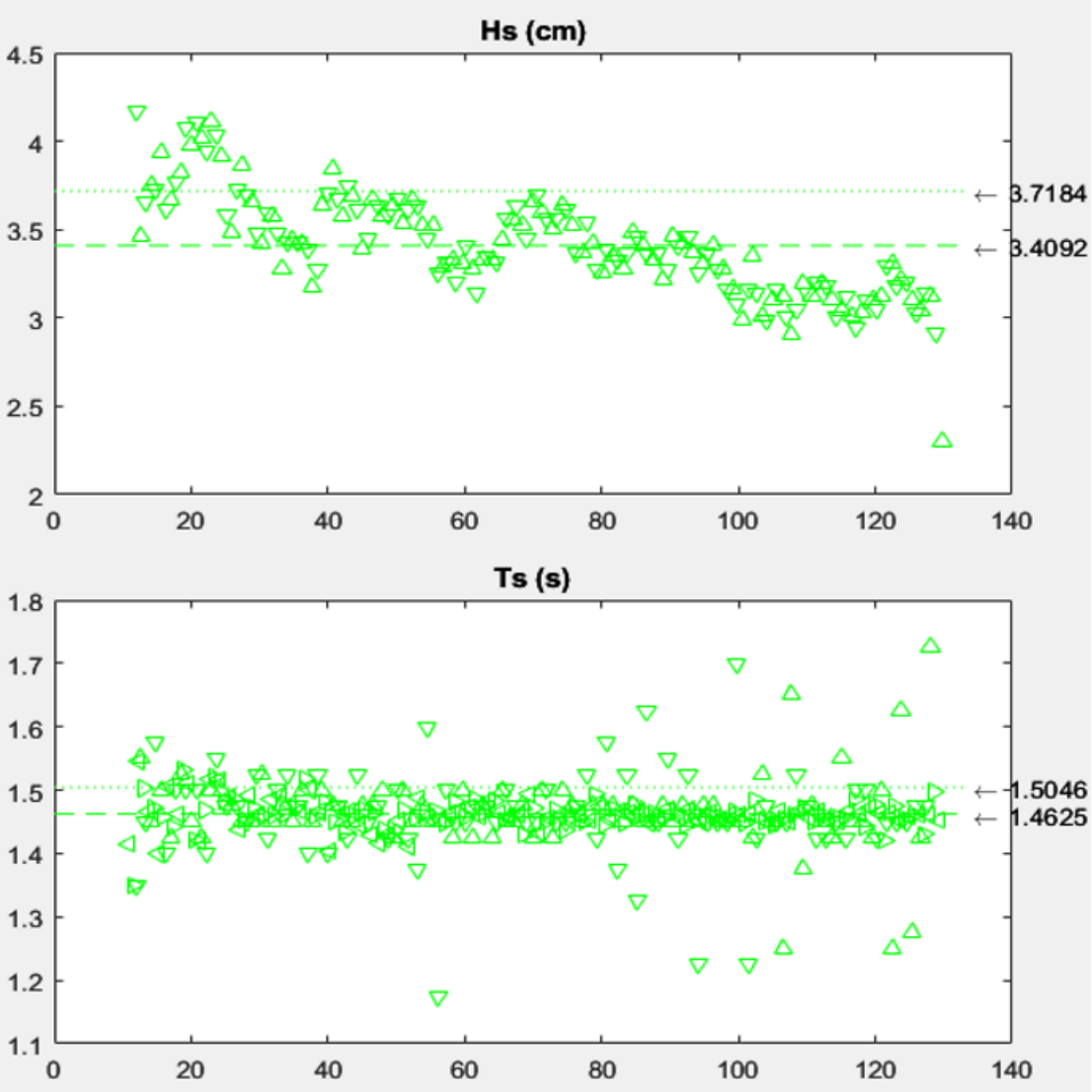


Gráfico 150: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.9	9.7	5.8	1.37	0.72898	0.10272

Tabla 114: Conversión de oleaje real

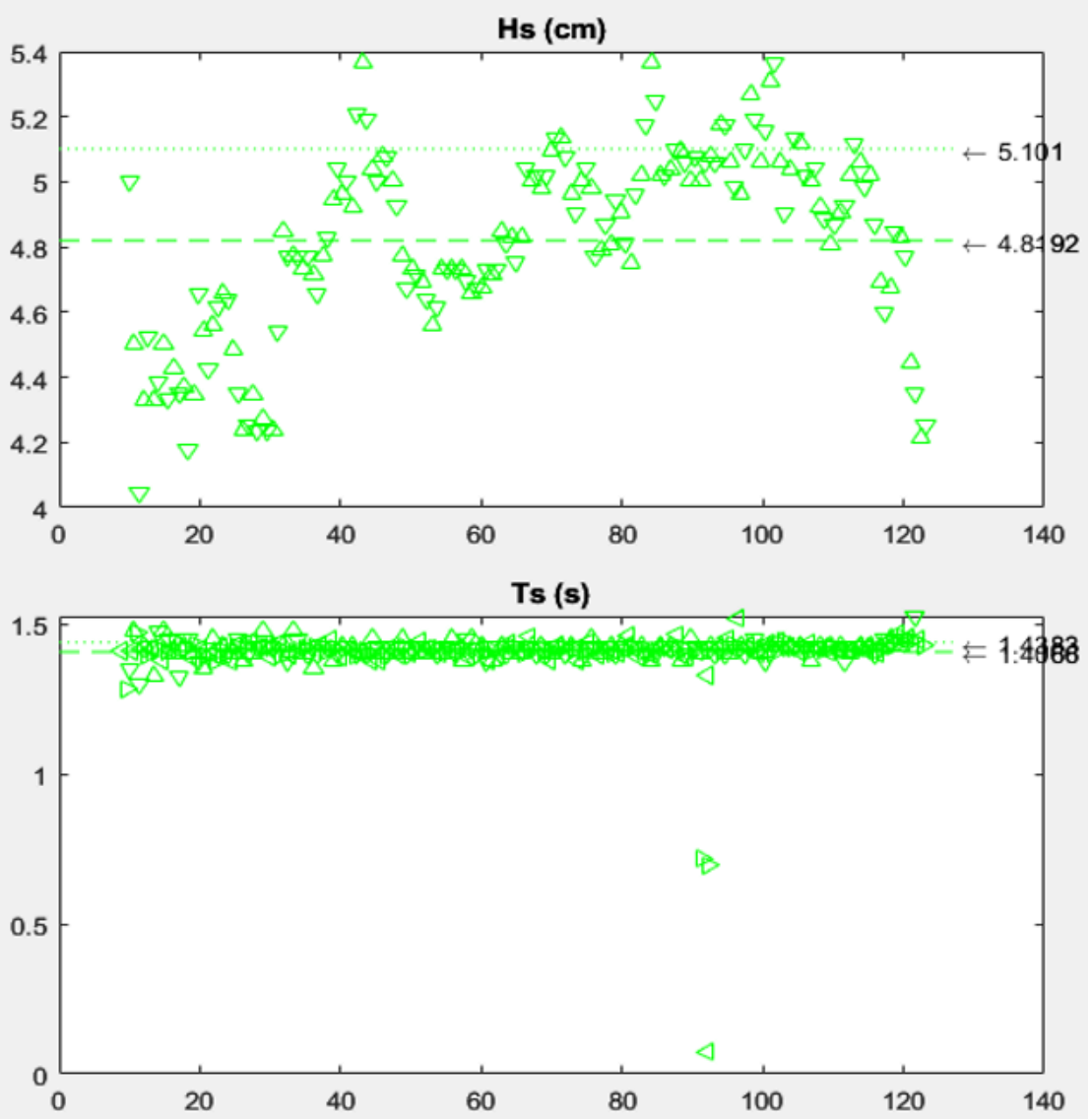


Gráfico 151: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

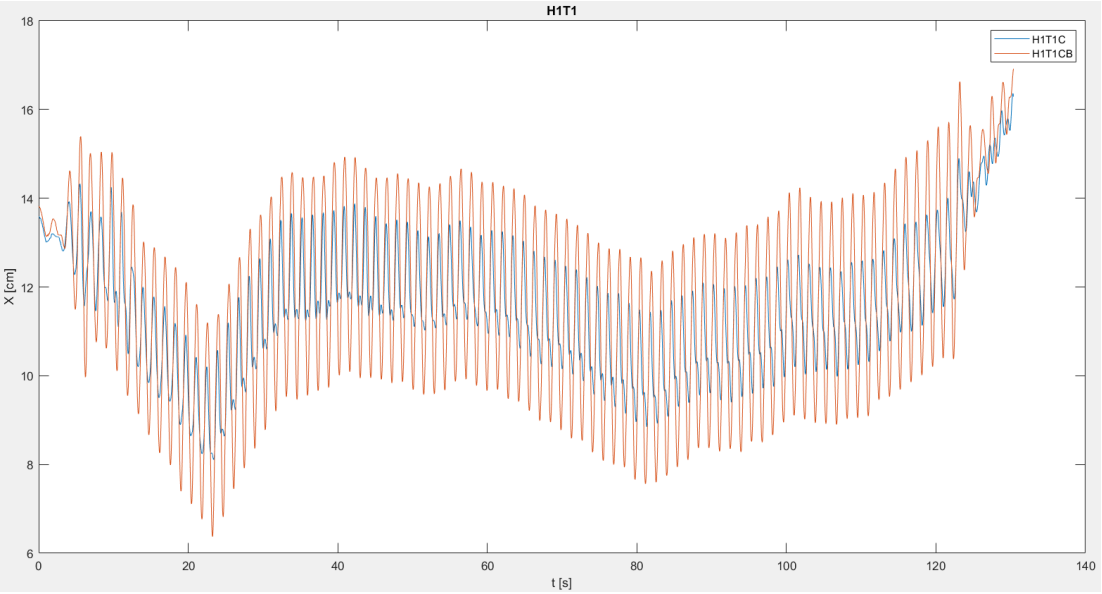


Gráfico 152: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

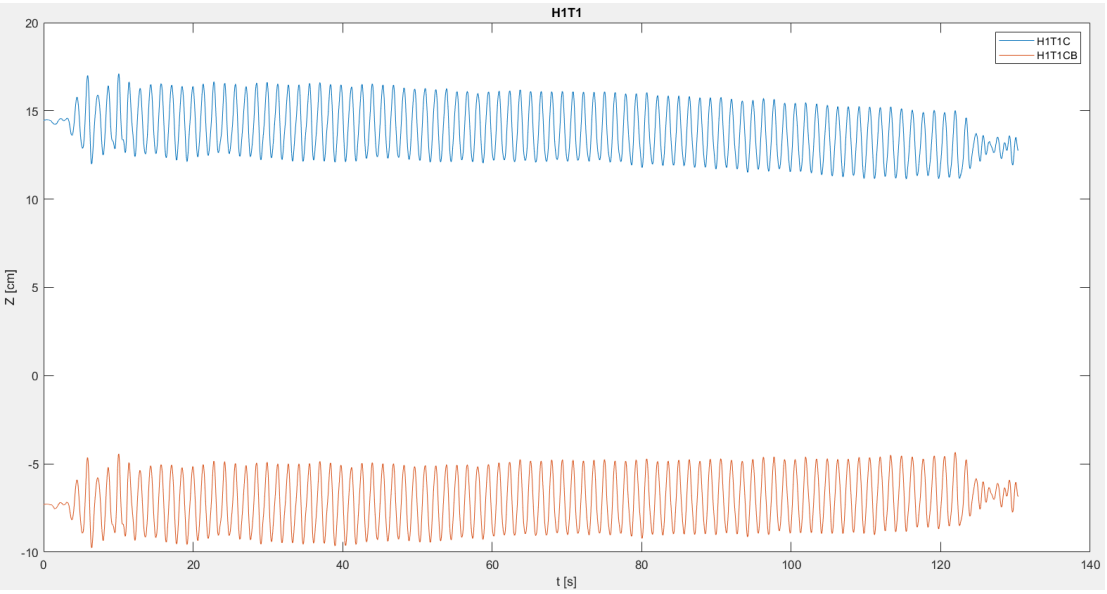


Gráfico 153: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

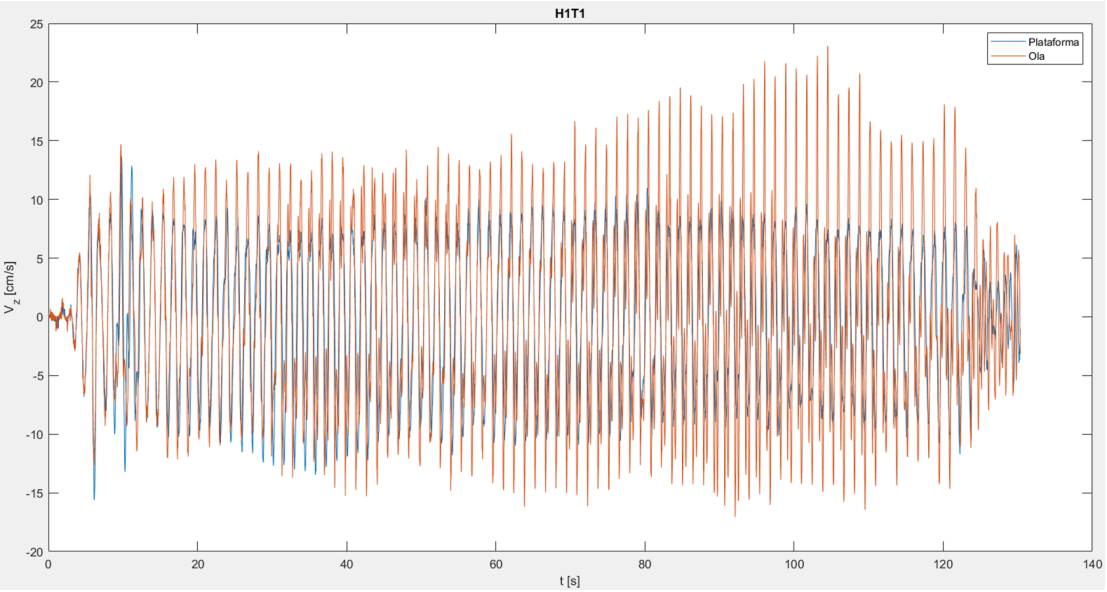


Gráfico 154: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.28. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H1T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.6	20.8	19%

Tabla 115: Condiciones de laboratorio T3 65%, H1T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	10.9	5	1.56	0.64282	0.10418

T*abla 116: Conversión de oleaje ideal*

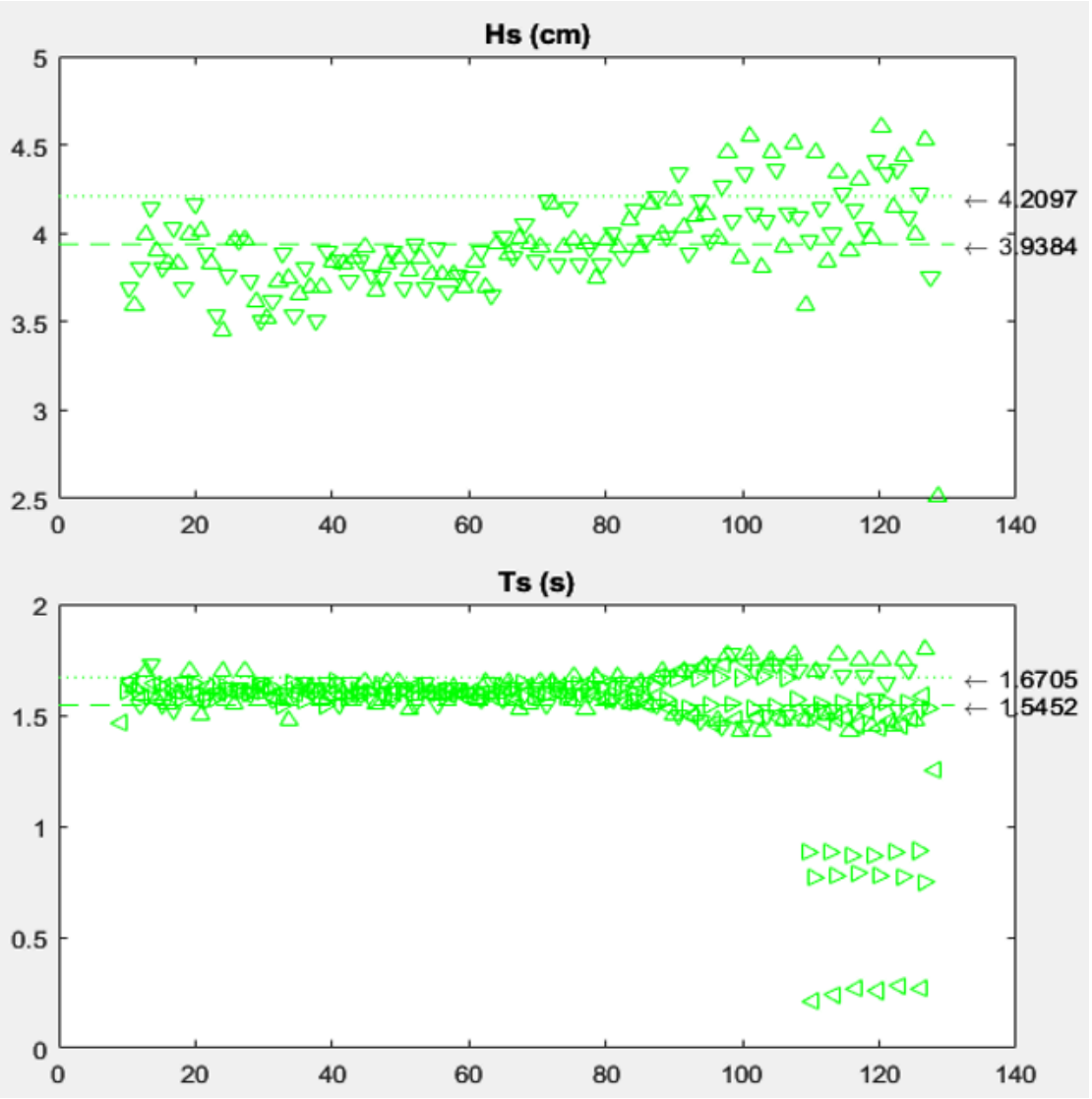


Gráfico 155: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3	10.5	6	1.49	0.67344	0.11786

Tabla 117: Conversión de oleaje real

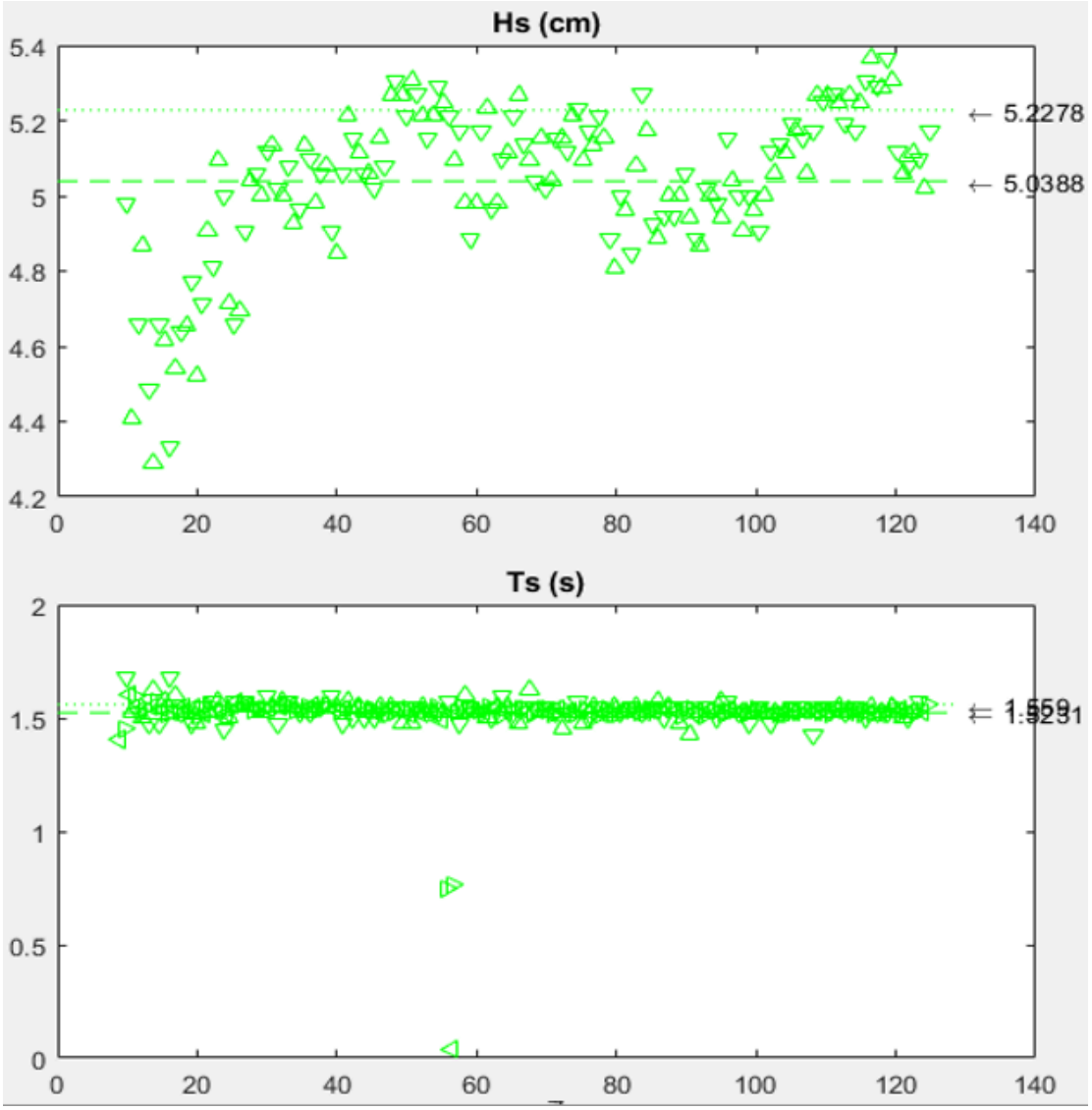


Gráfico 156: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

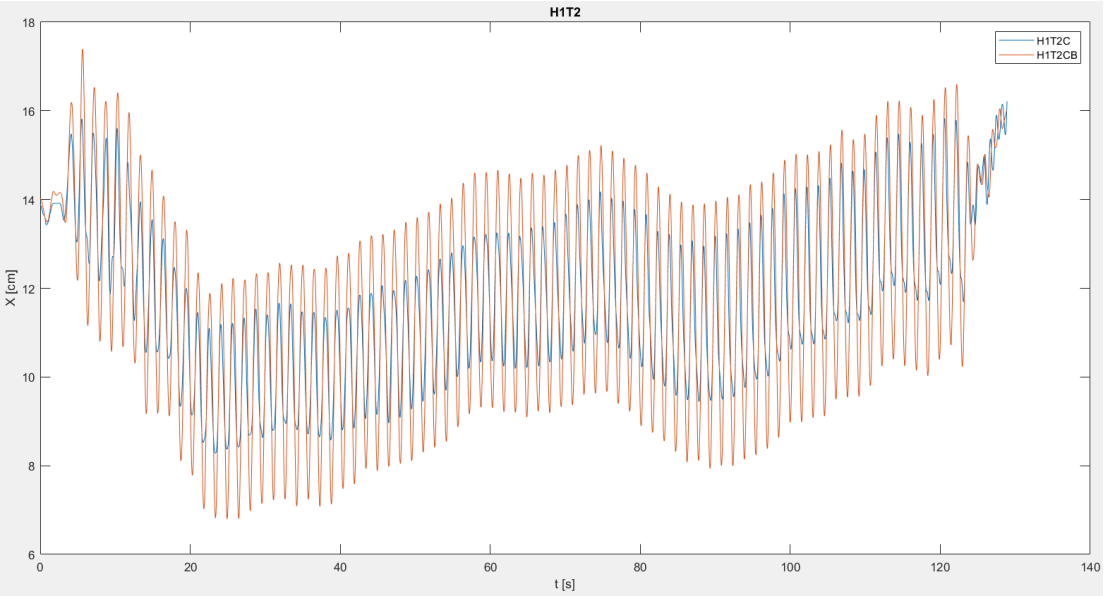


Gráfico 157: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

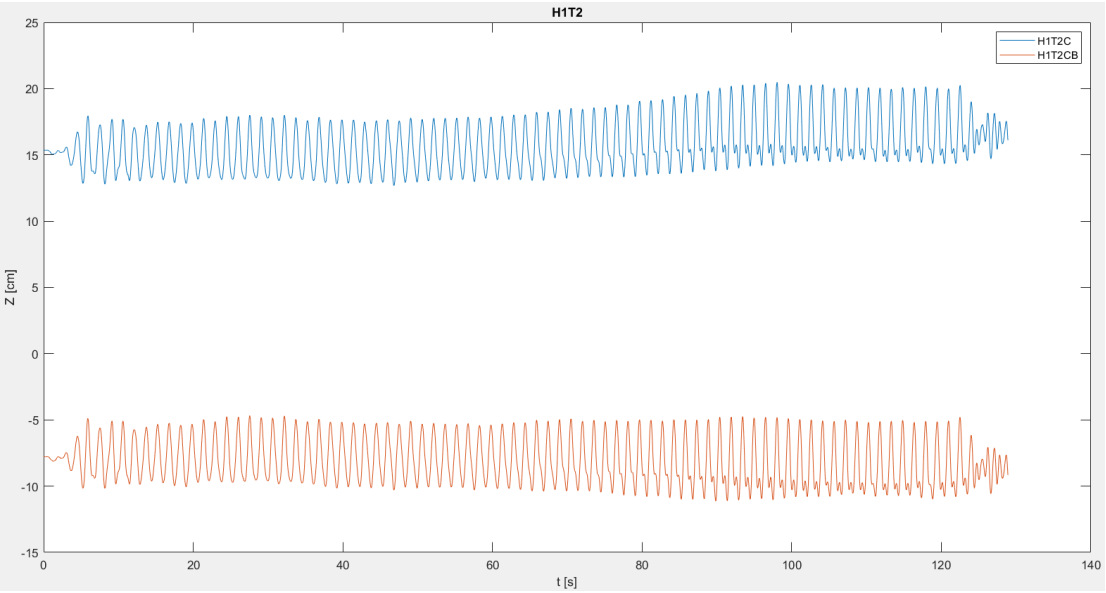


Gráfico 158: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

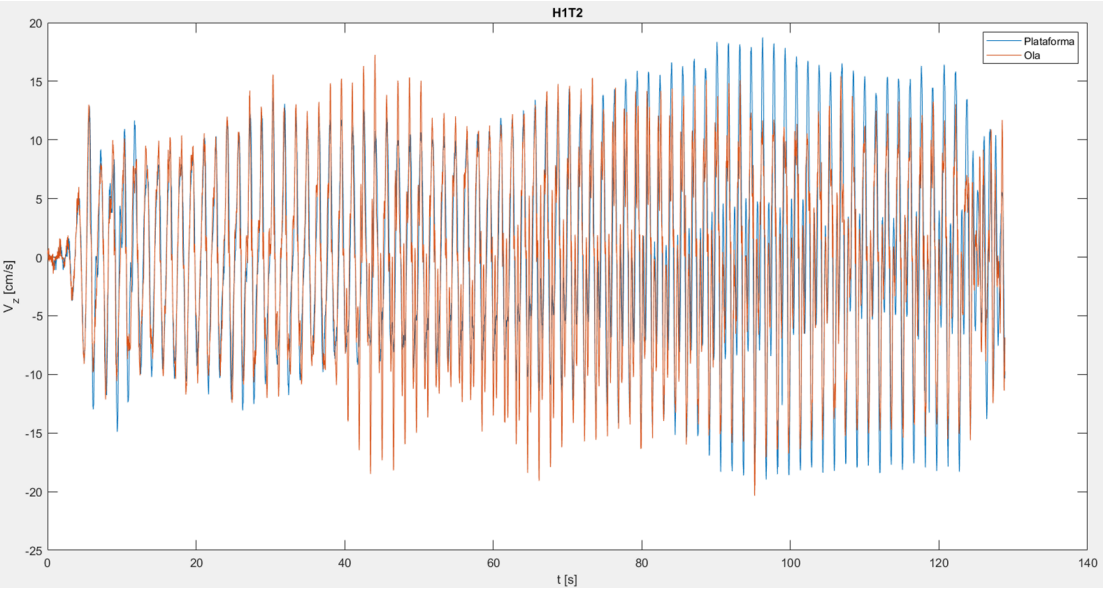


Gráfico 159: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.29. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H1T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.4	20.6	18%

Tabla 118: Condiciones de laboratorio T3 65%, H1T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.5	12.7	5	1.79	0.55678	0.1241

T*abla 119: Conversión de oleaje ideal*

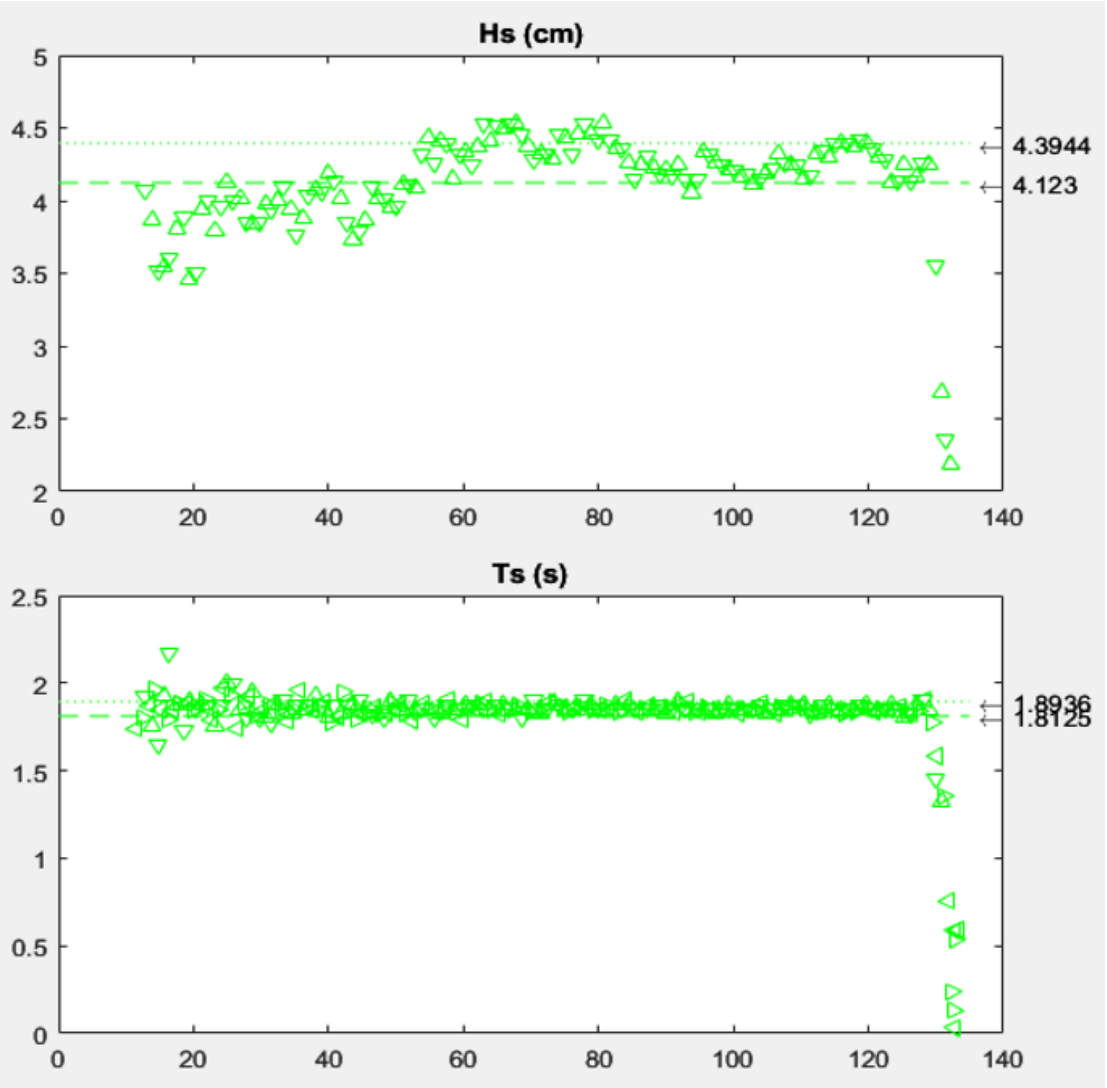


Gráfico 160: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
2.8	12.2	5.6	1.73	0.5796	0.13248

T*abla 120: Conversión de oleaje real*

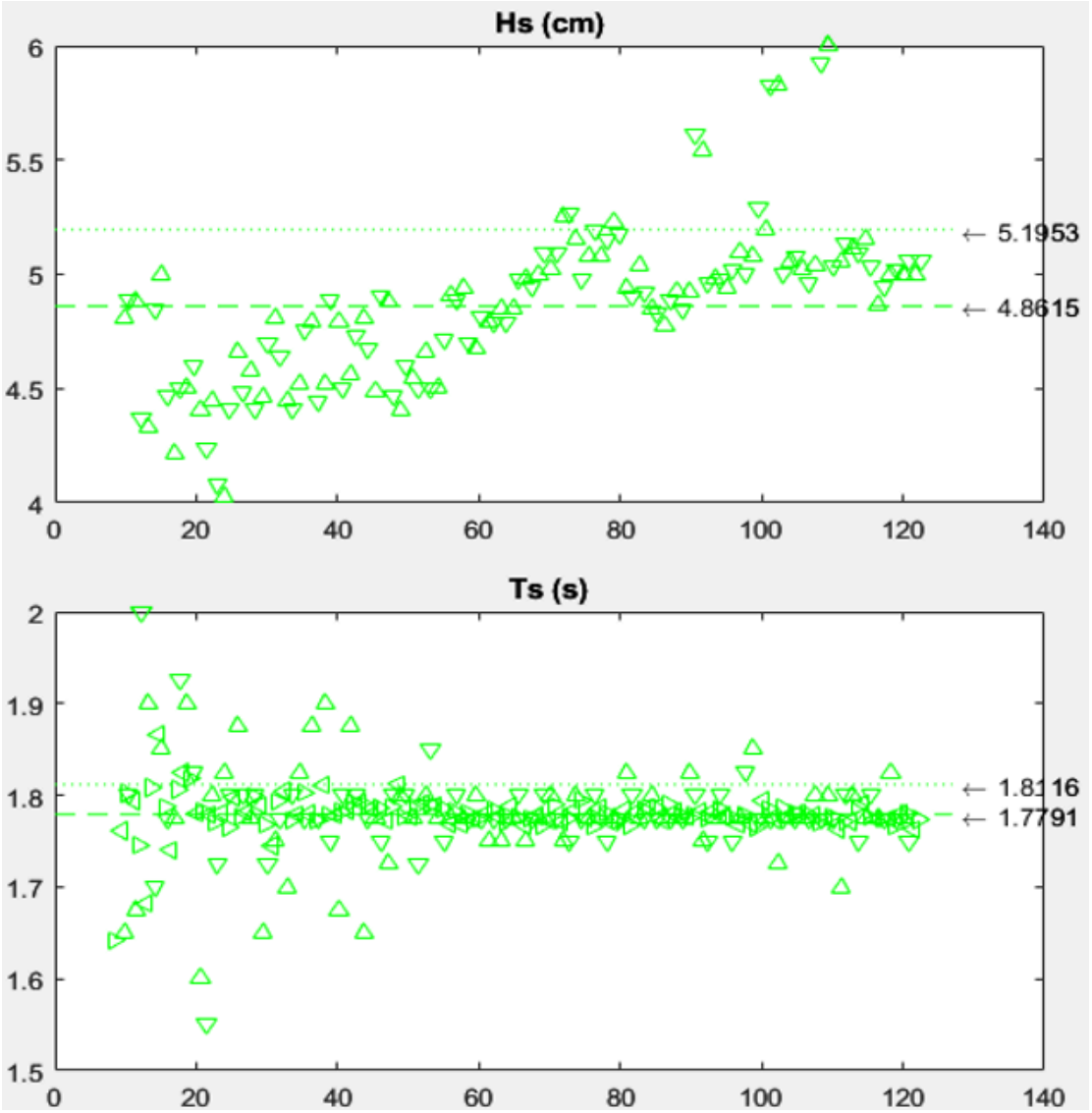


Gráfico 161: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

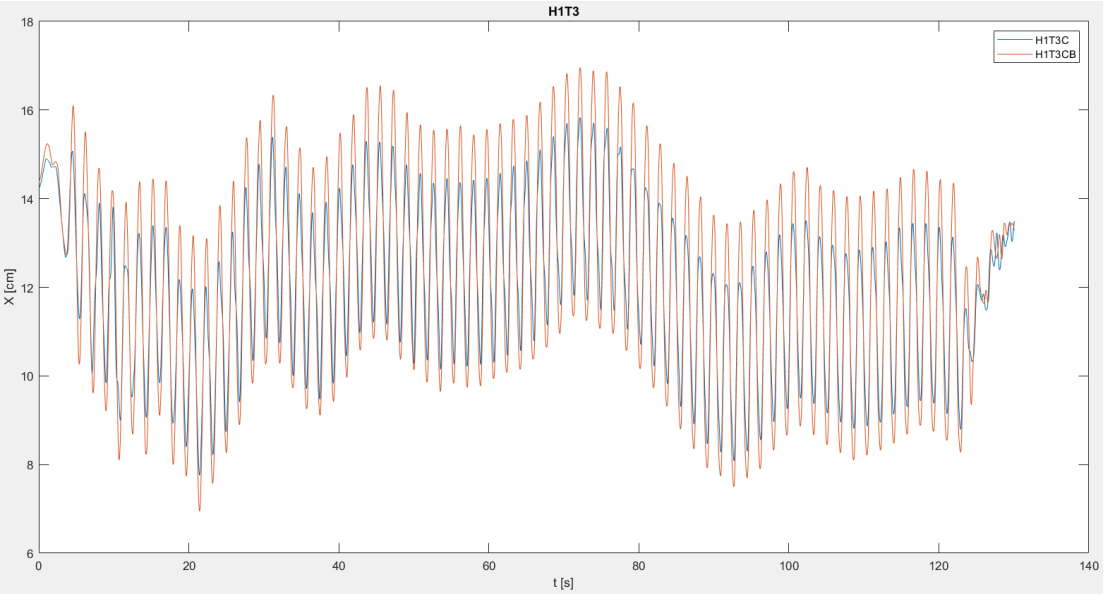


Gráfico 162: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

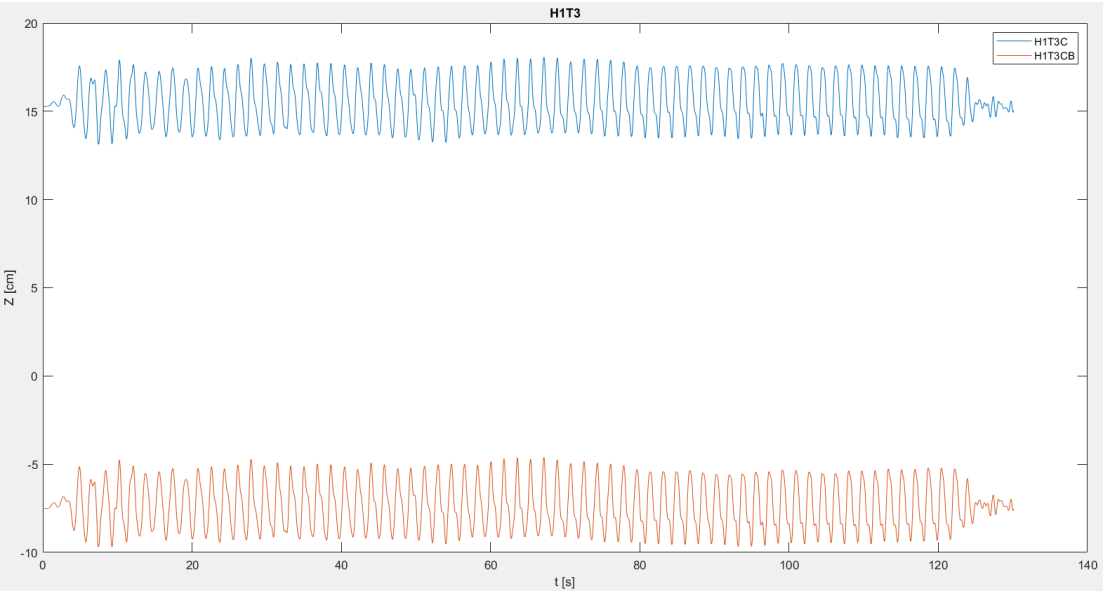


Gráfico 163: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

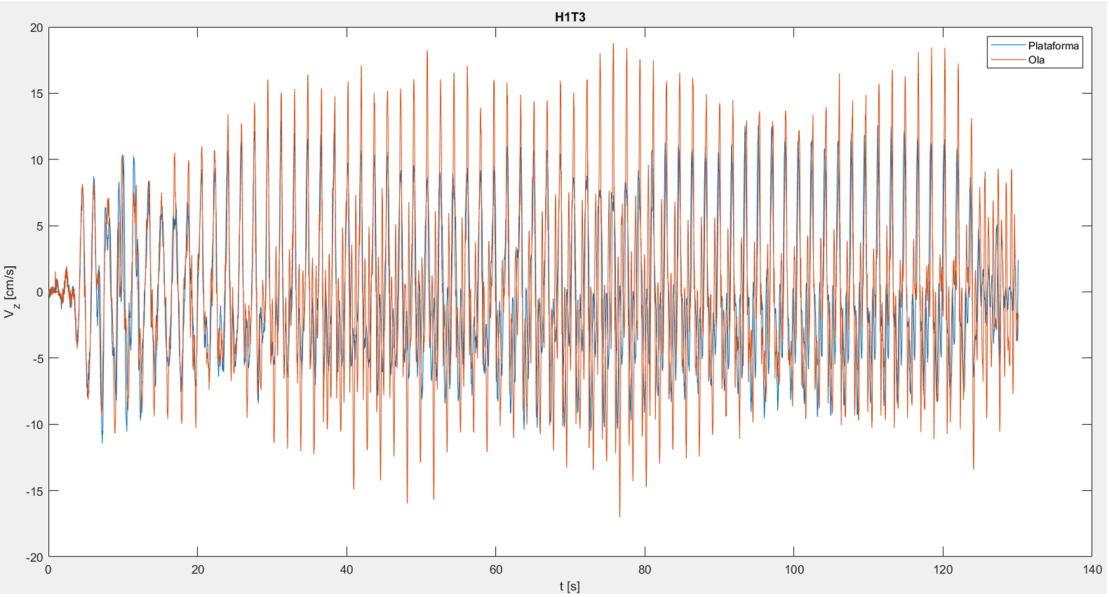


Gráfico 164: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.30. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H2T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20	20.2	19%

Tabla 121: Condiciones de laboratorio T3 65%, H2T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10	7.8	1.41	0.70711	0.14752

T*abla 122: Conversión de oleaje ideal*

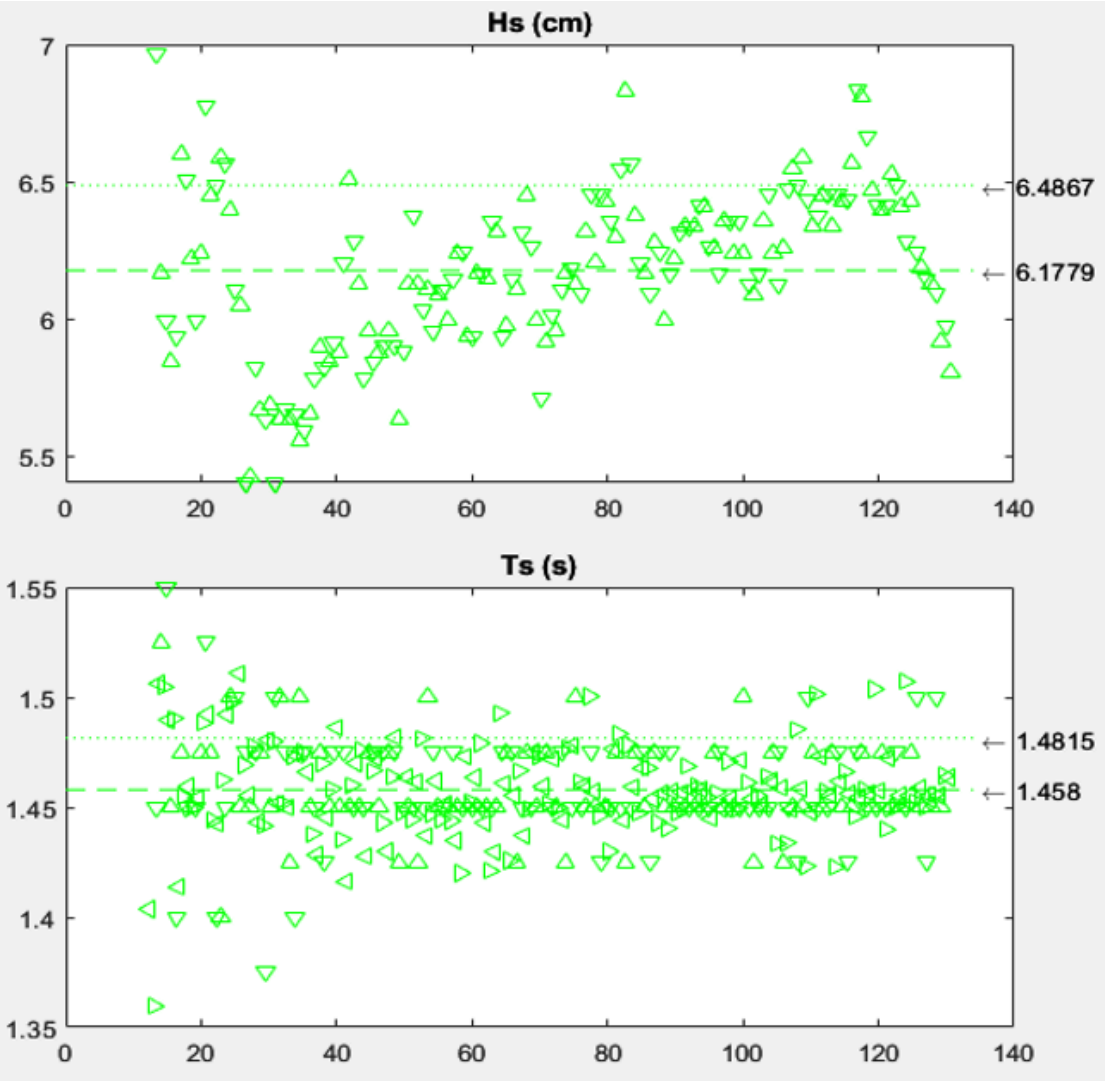


Gráfico 165: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
5.1	9.6	10.2	1.36'	0.73657	0.17817

Tabla 123: Conversión de oleaje real

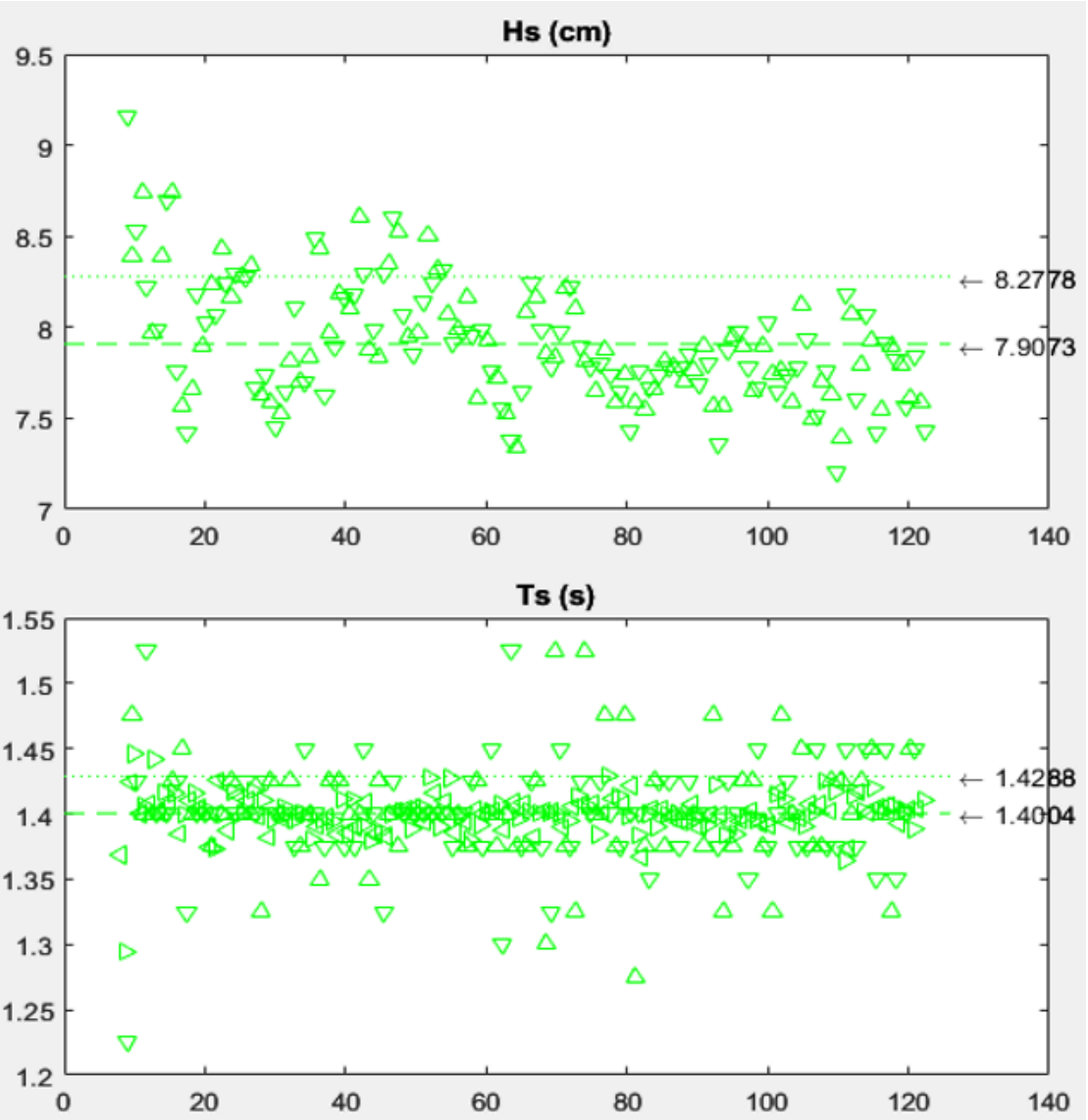


Gráfico 166: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

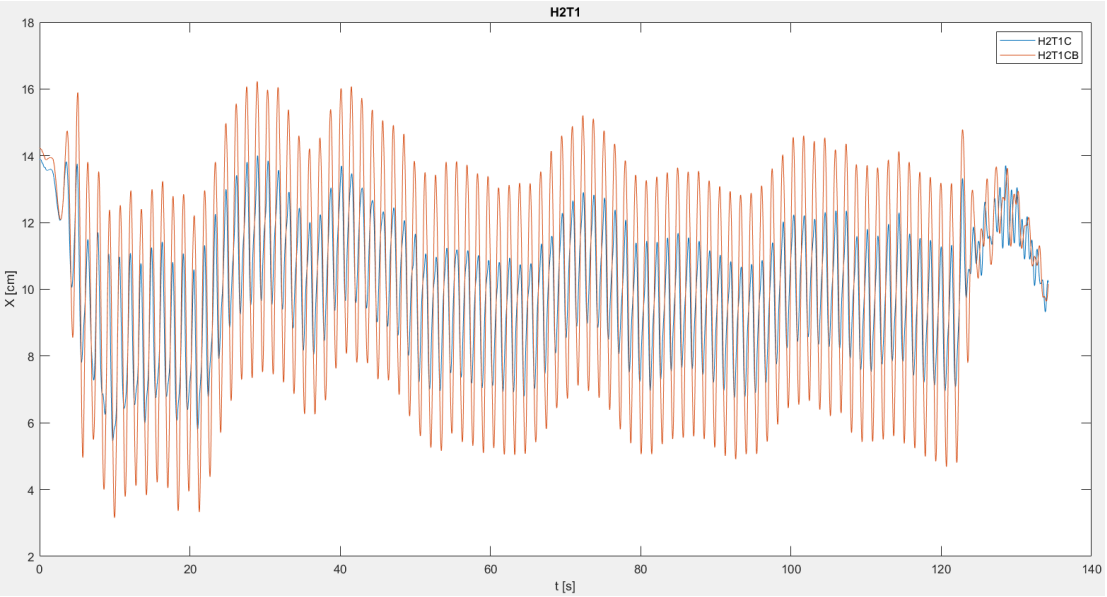


Gráfico 167: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

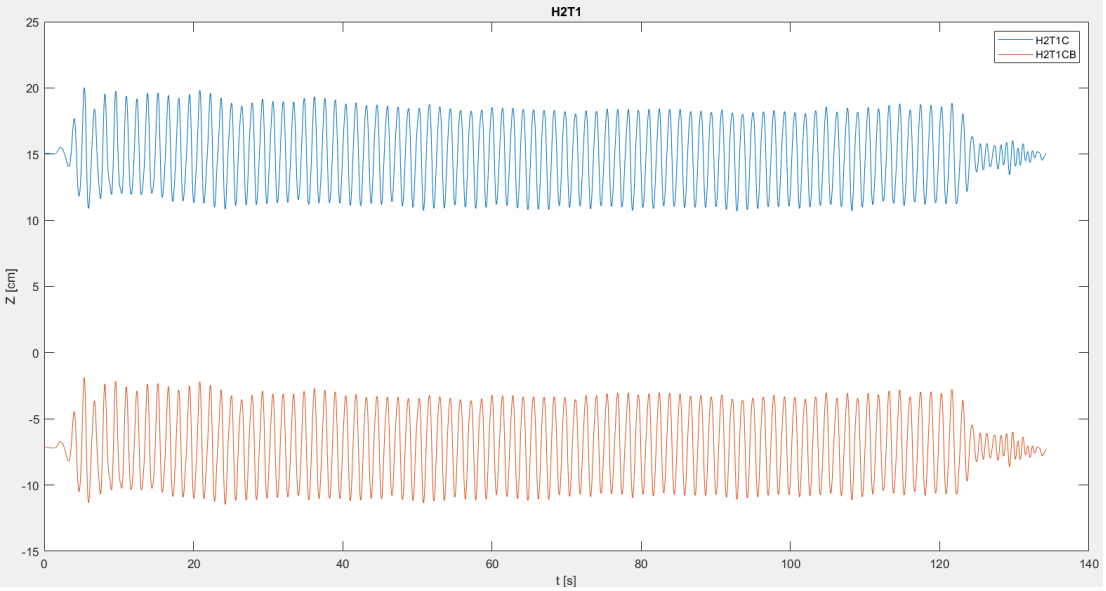


Gráfico 168: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

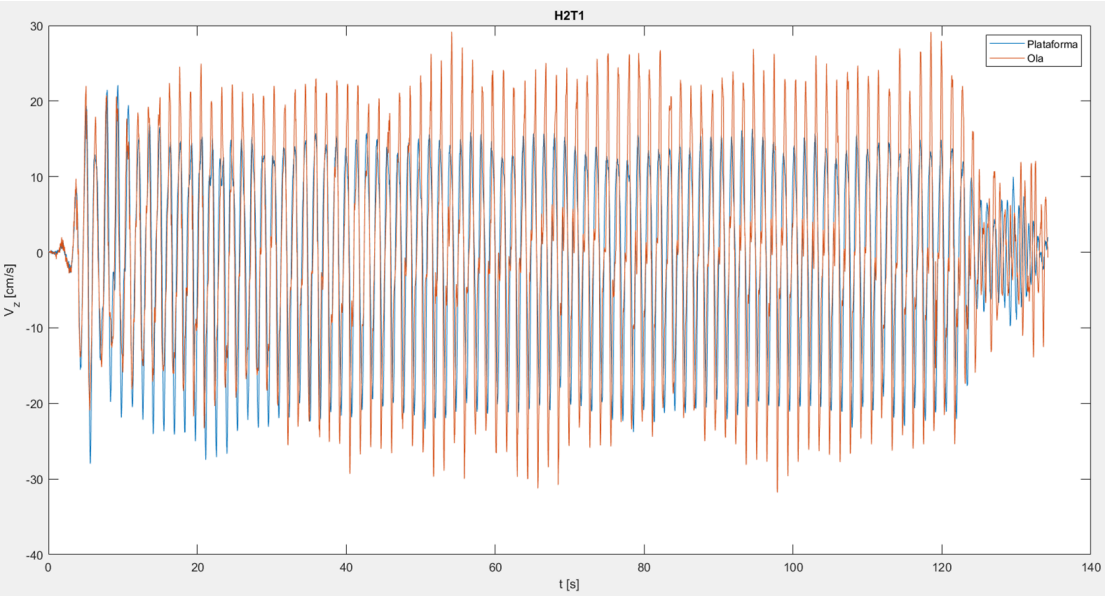


Gráfico 169: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.31. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H2T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21	21.2	19%

Tabla 124: Condiciones de laboratorio T3 65%, H2T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	10.9	7.8	1.56	0.64282	0.16668

T*abla 125: Conversión de oleaje ideal*

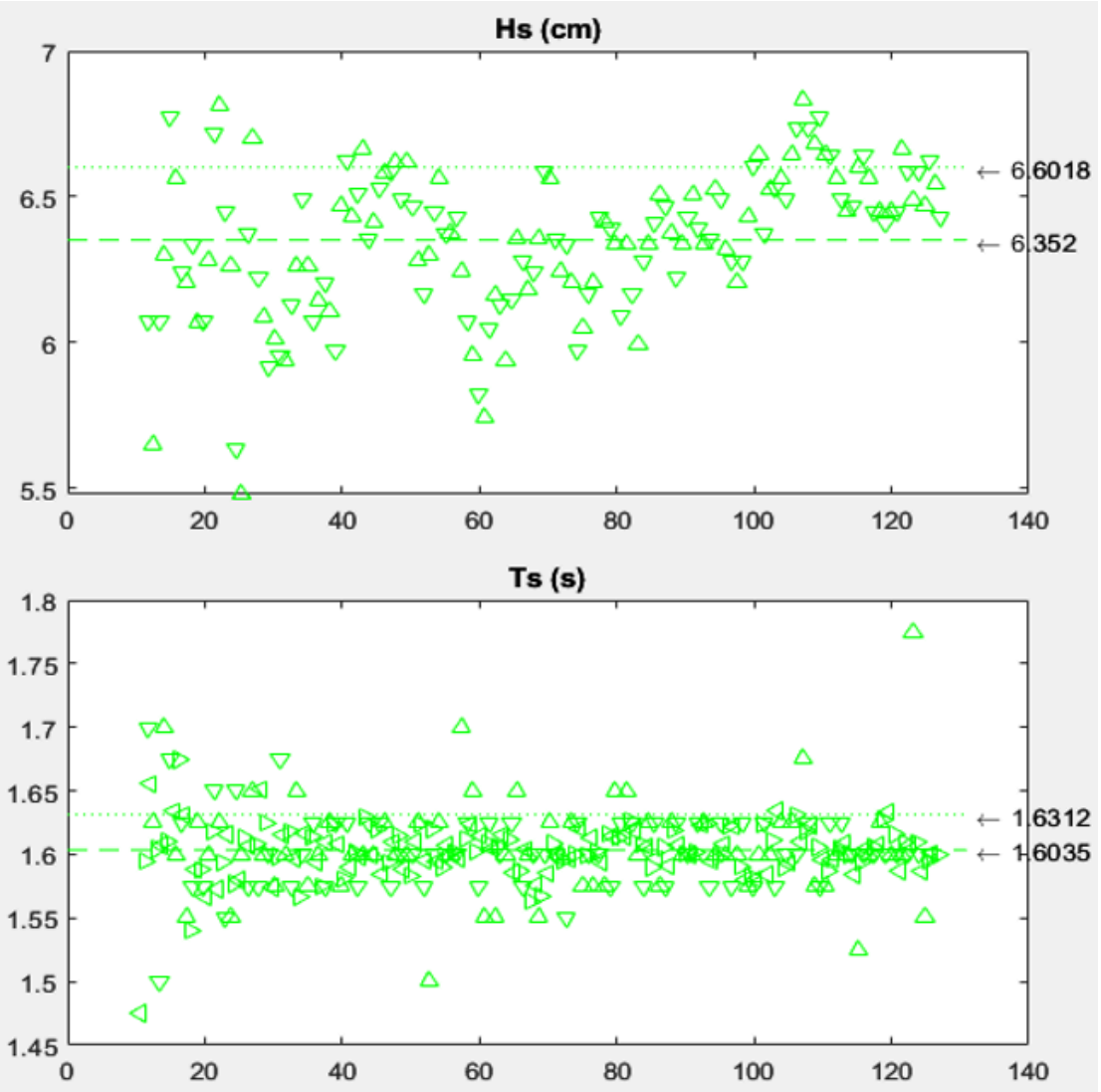


Gráfico 170: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.6	10.5	9.2	1.49	0.67344	0.18072

Tabla 126: Conversión de oleaje real

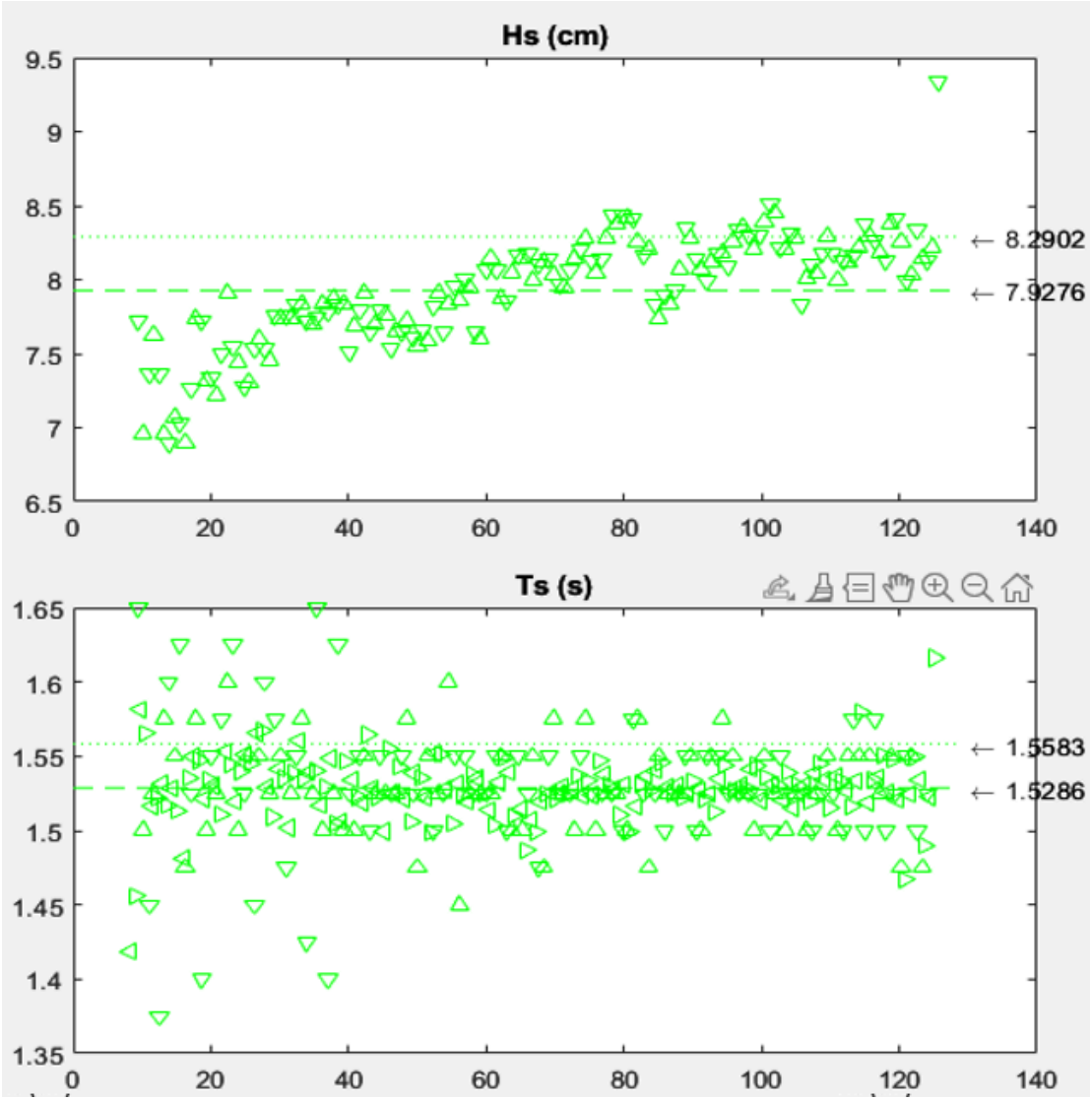


Gráfico 171: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

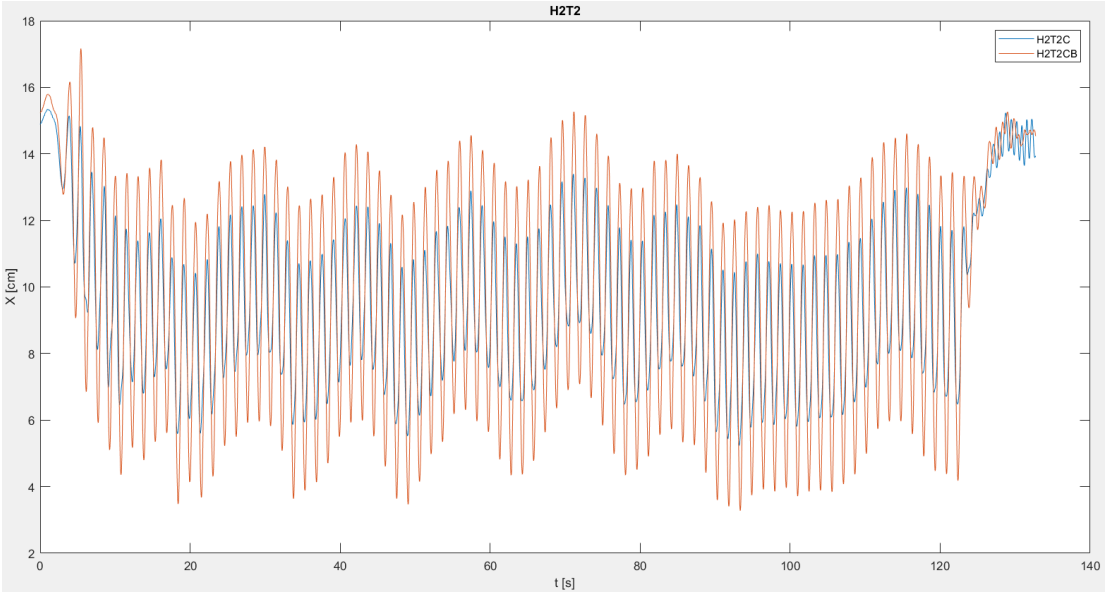


Gráfico 172: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

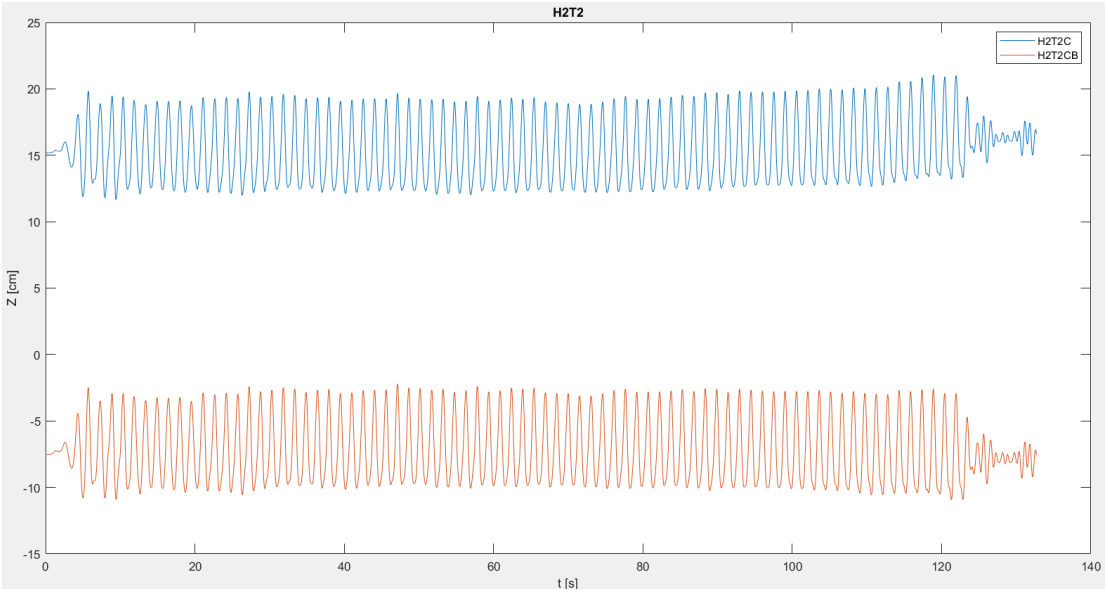


Gráfico 173: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

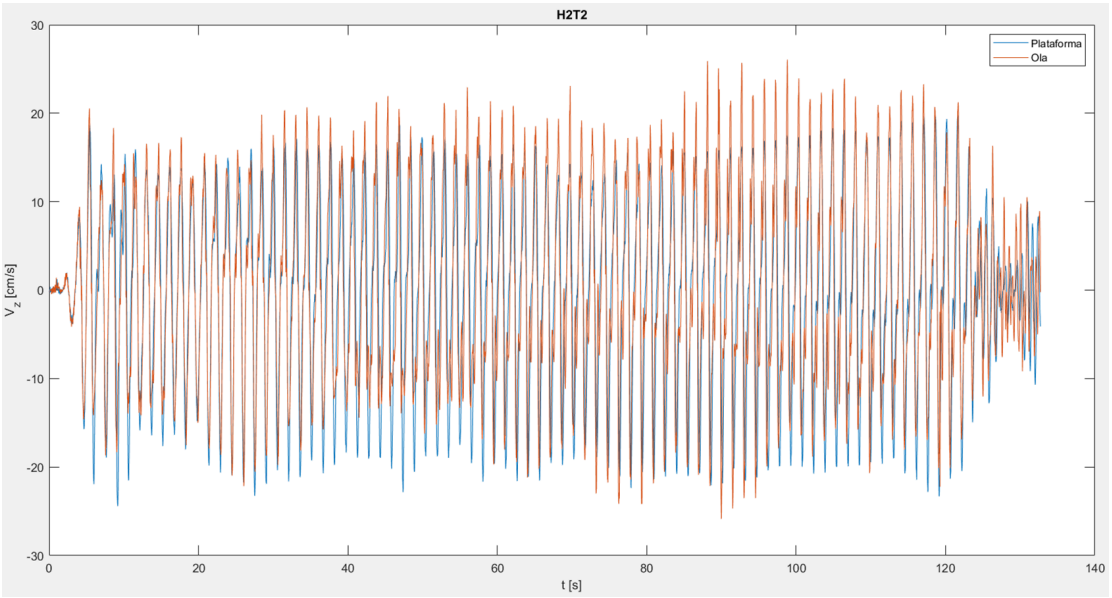


Gráfico 174: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.32. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H2T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21.6	21.8	19%

Tabla 127: Condiciones de laboratorio T3 65%, H2T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
3.9	12.7	7.8	1.79	0.55678	0.19855

Tabla 128: Conversión de oleaje ideal

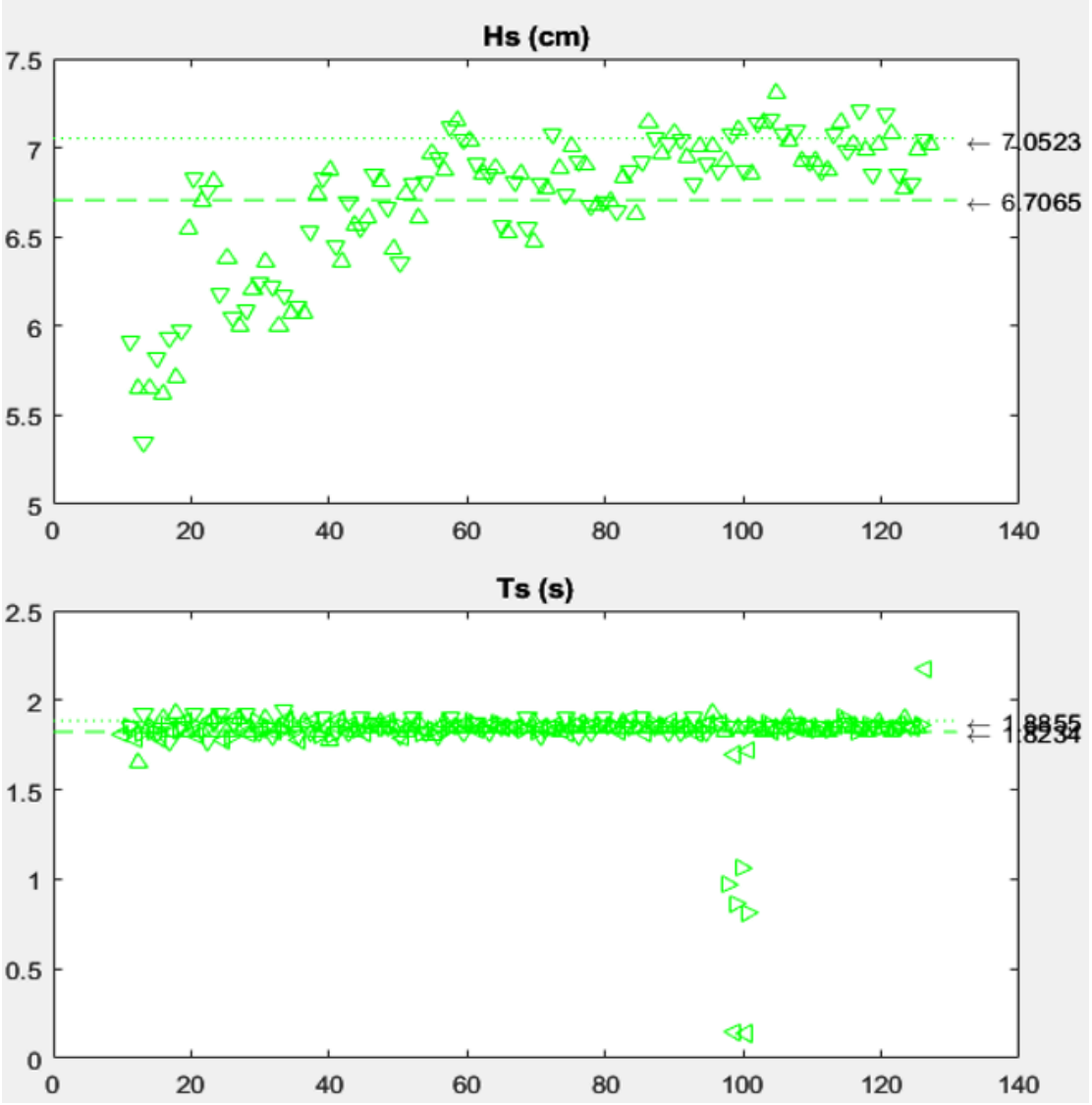


Gráfico 175: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
4.7	12.2	9.4	1.73	0.5796	0.22238

Tabla 129: Conversión de oleaje real

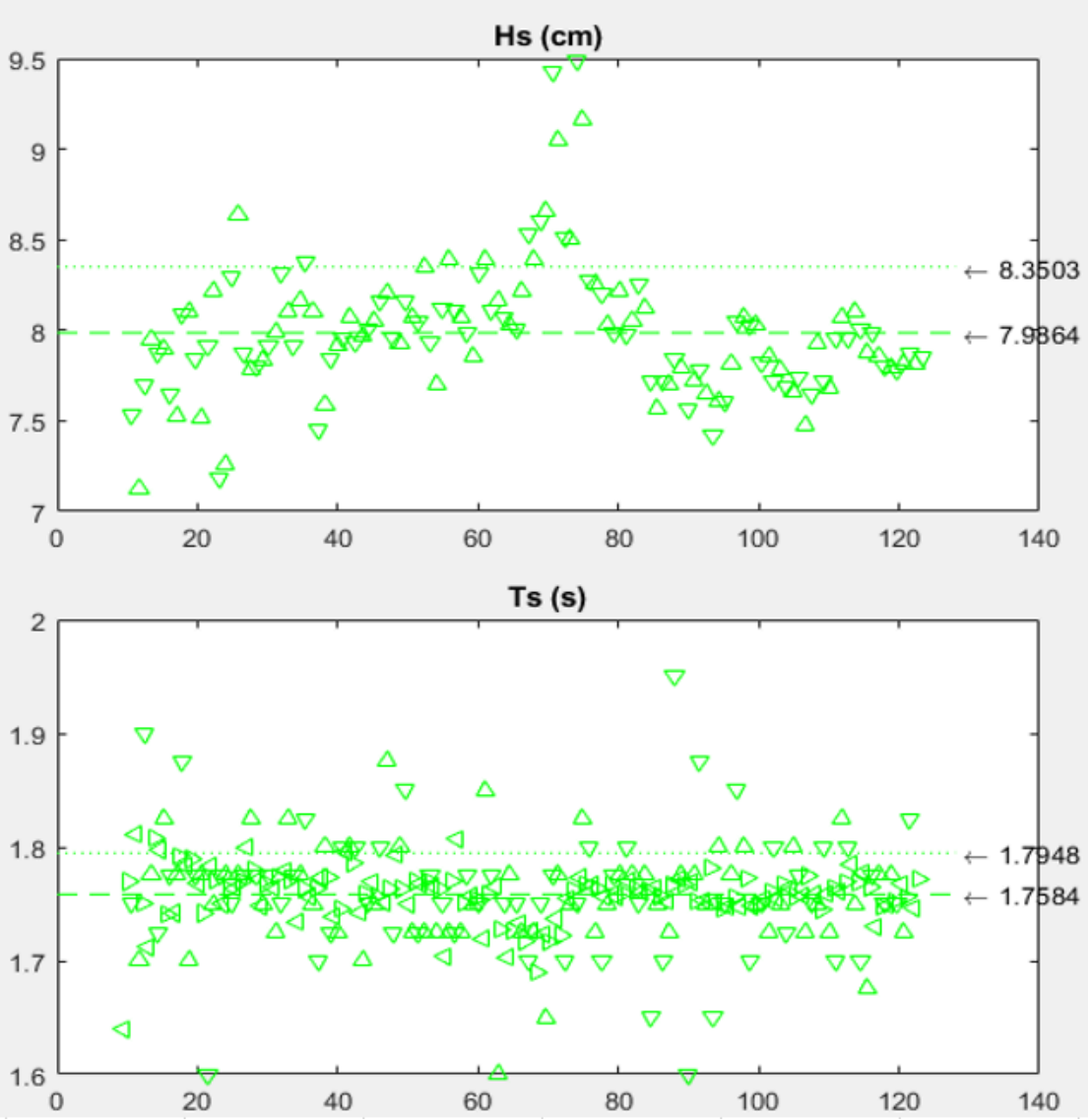


Gráfico 176: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

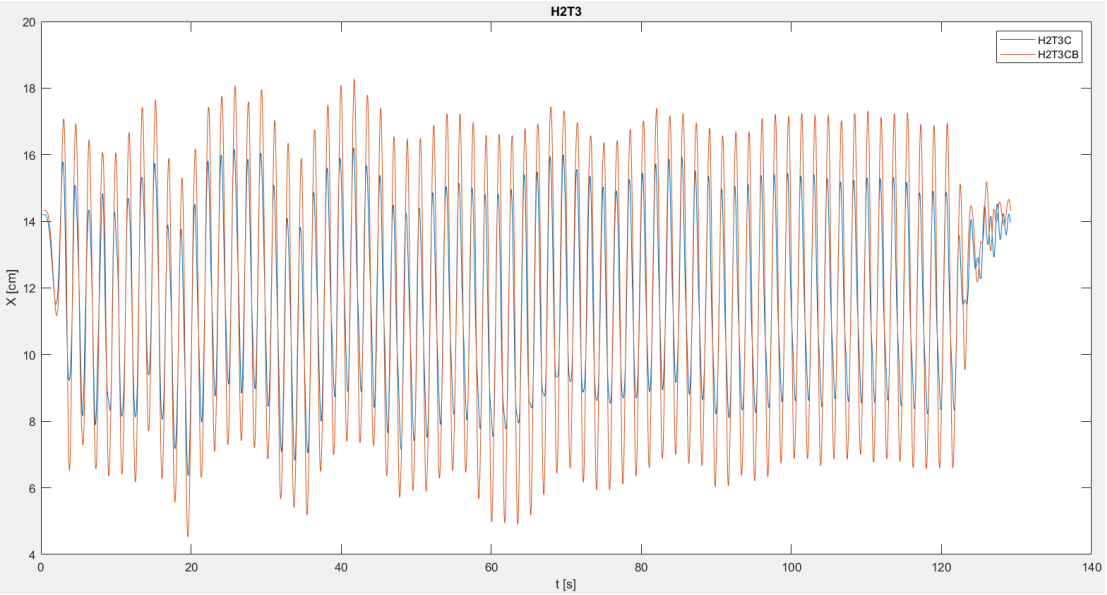


Gráfico 177: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

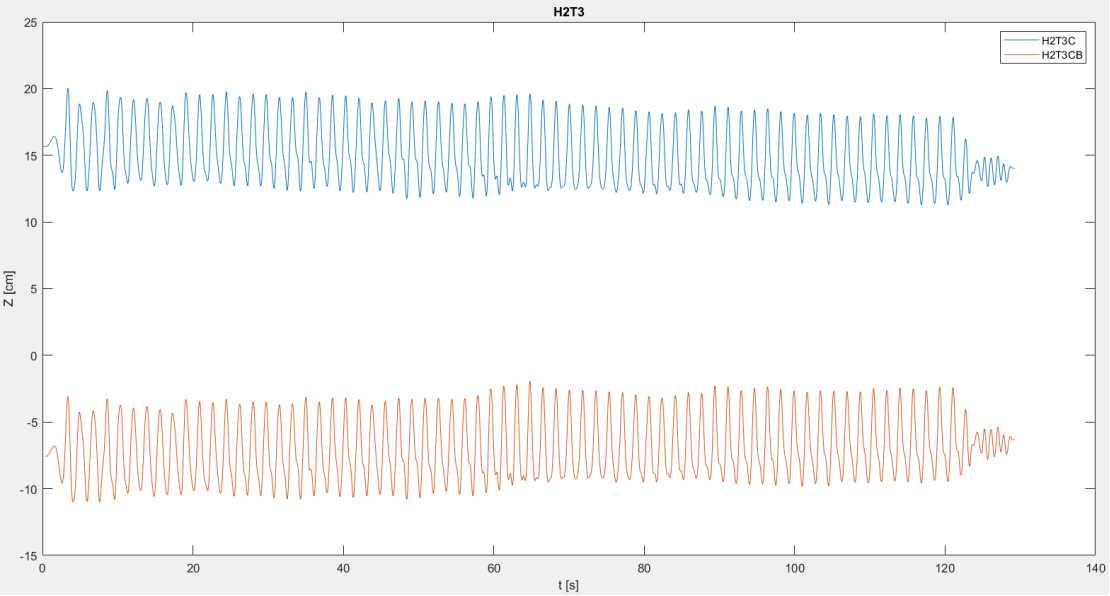


Gráfico 178: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

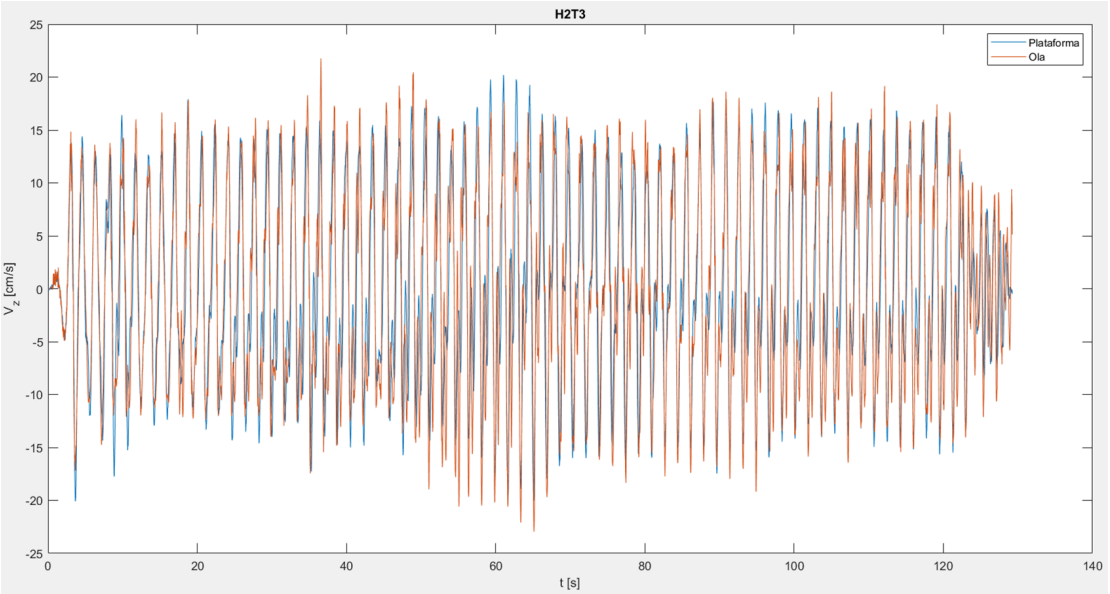


Gráfico 179: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.33. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H3T1

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21.3	21.5	18%

Tabla 130: Condiciones de laboratorio T3 65%, H3T1

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10	14.4	1.41	0.70711	0.26553

Tabla 131: Conversión de oleaje ideal

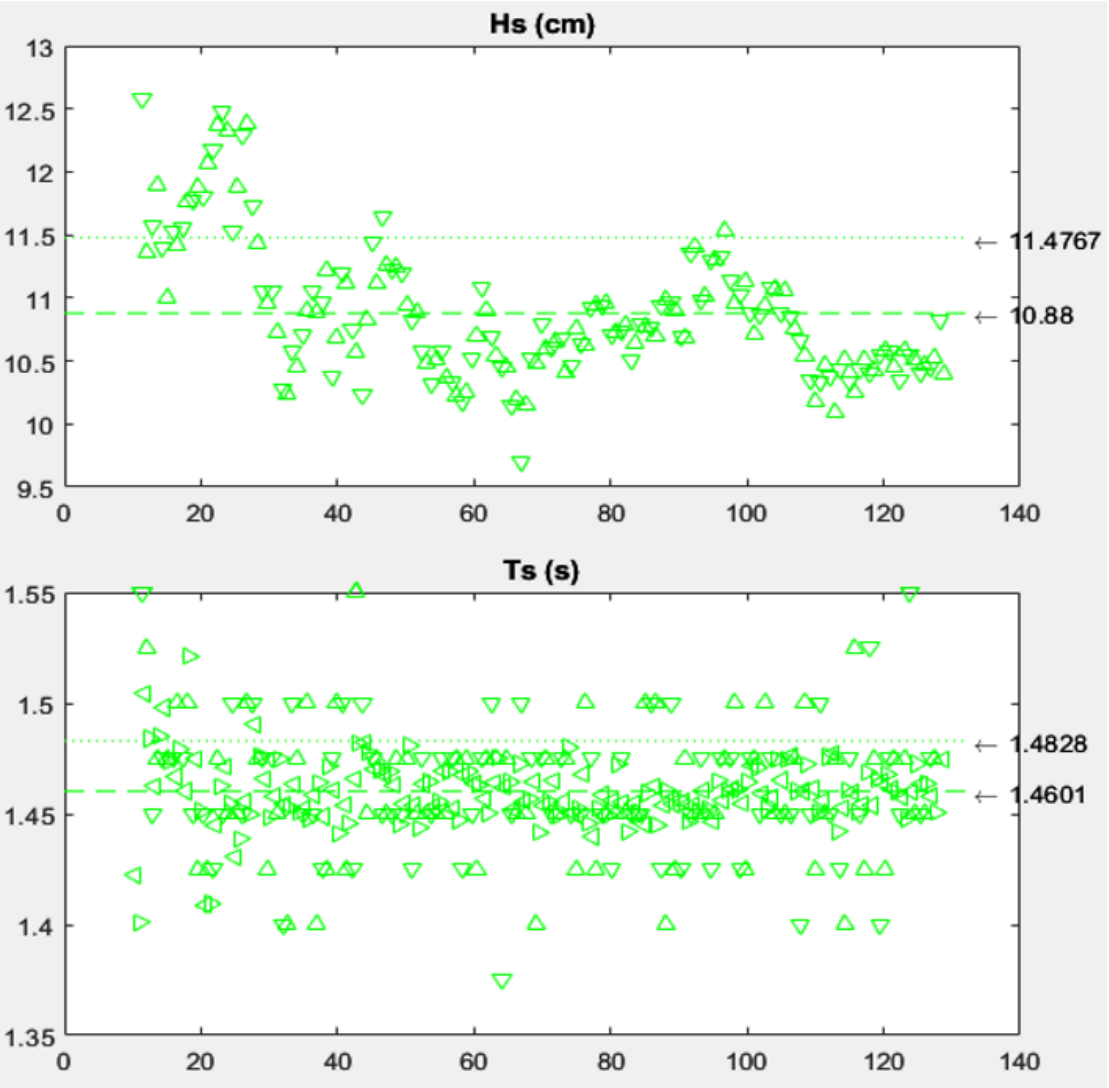


Gráfico 180: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.5	9.6	17	1.36	0.73657	0.29695

Tabla 132: Conversión de oleaje real

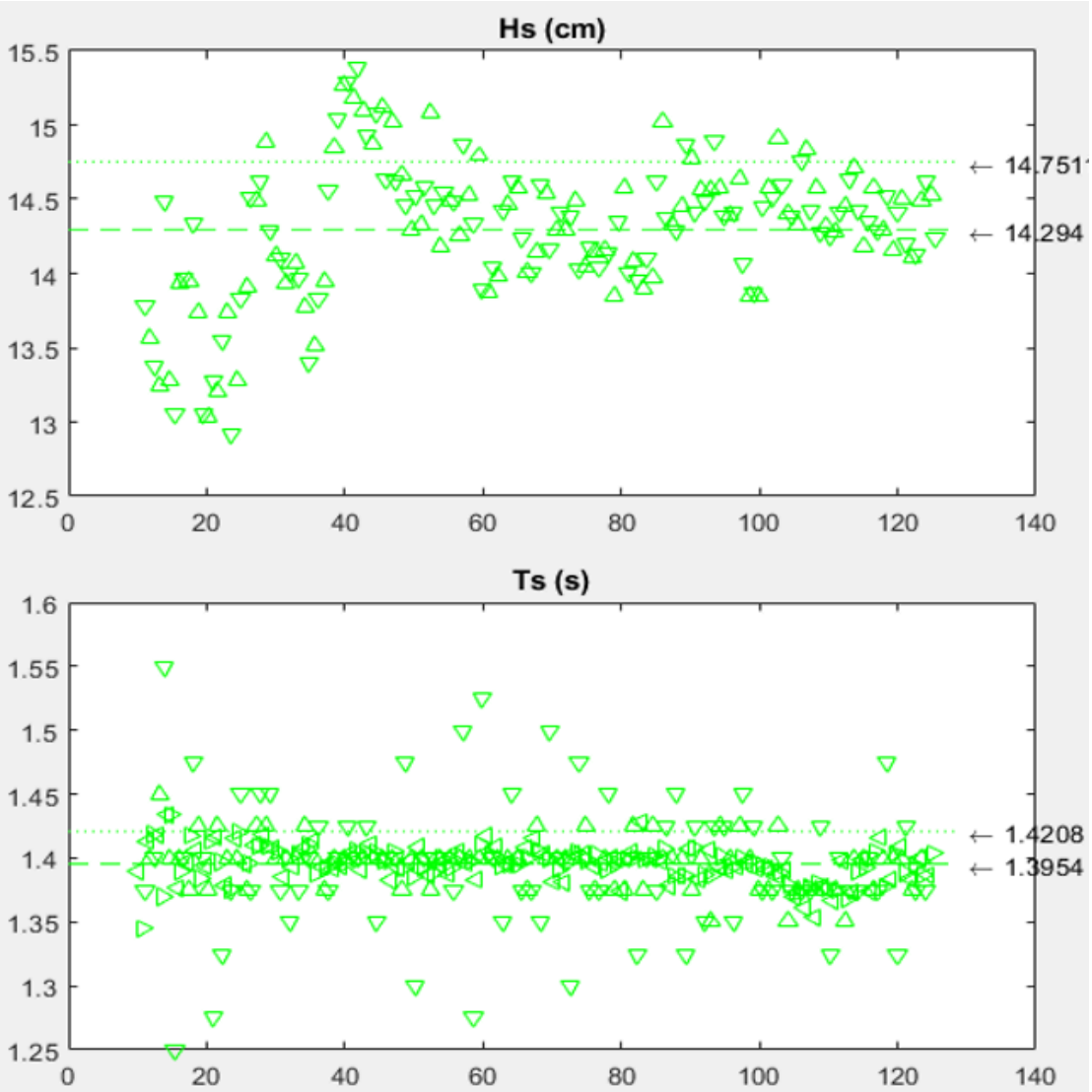


Gráfico 181: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

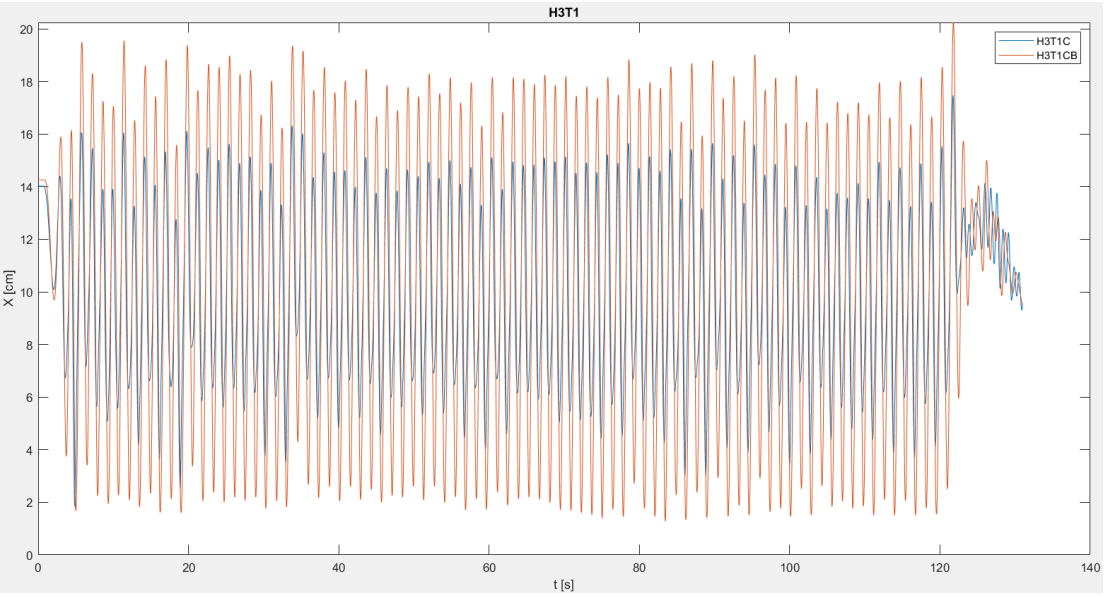


Gráfico 182: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

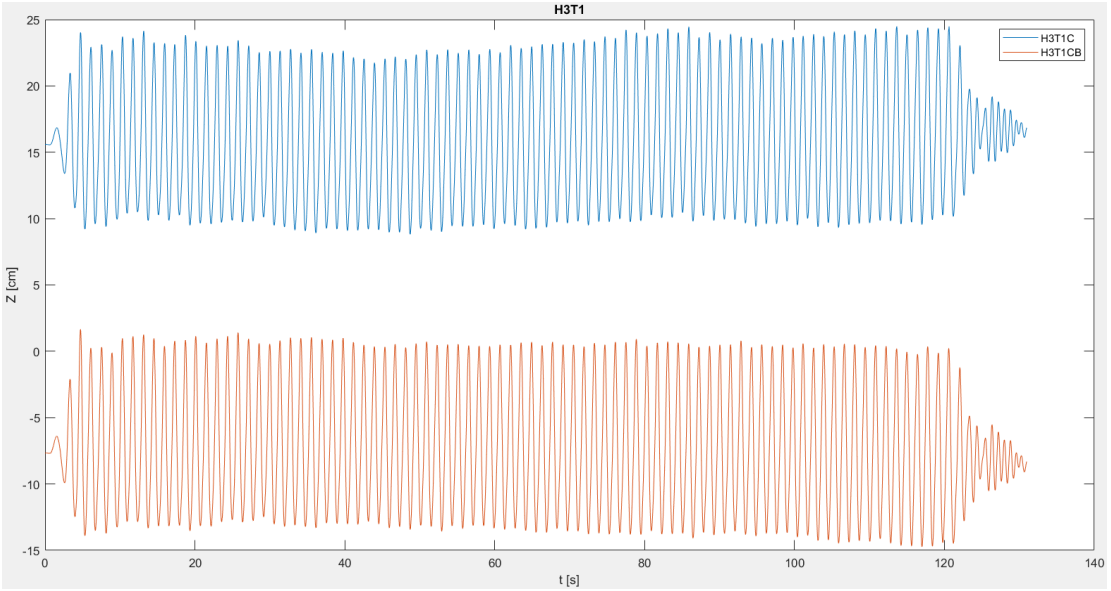


Gráfico 183: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

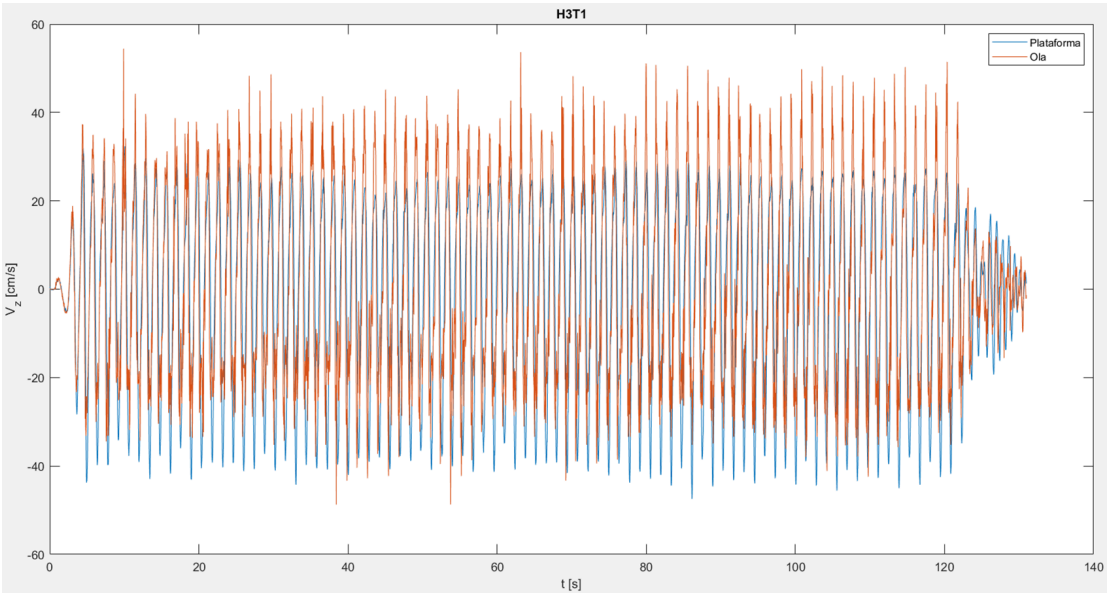


Gráfico 184: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.34. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H3T2

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
20.8	21	18%

Tabla 133: Condiciones de laboratorio T3 65%, H3T2

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	10.9	14.4	1.56	0.64282	0.30003

Tabla 134: Conversión de oleaje ideal

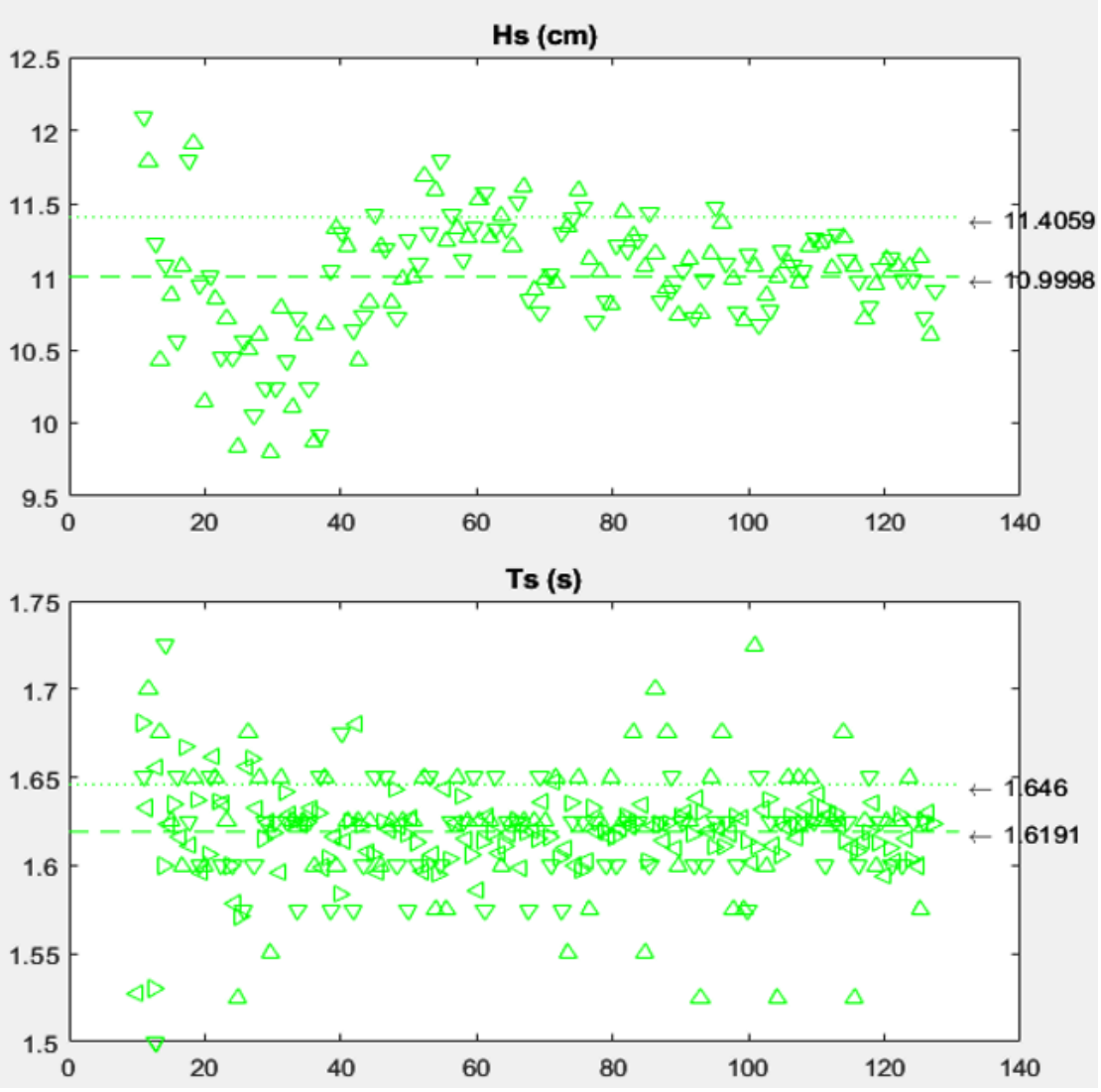


Gráfico 185: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8	10.5	16	1.49	0.67344	0.31429

Tabla 135: Conversión de oleaje real

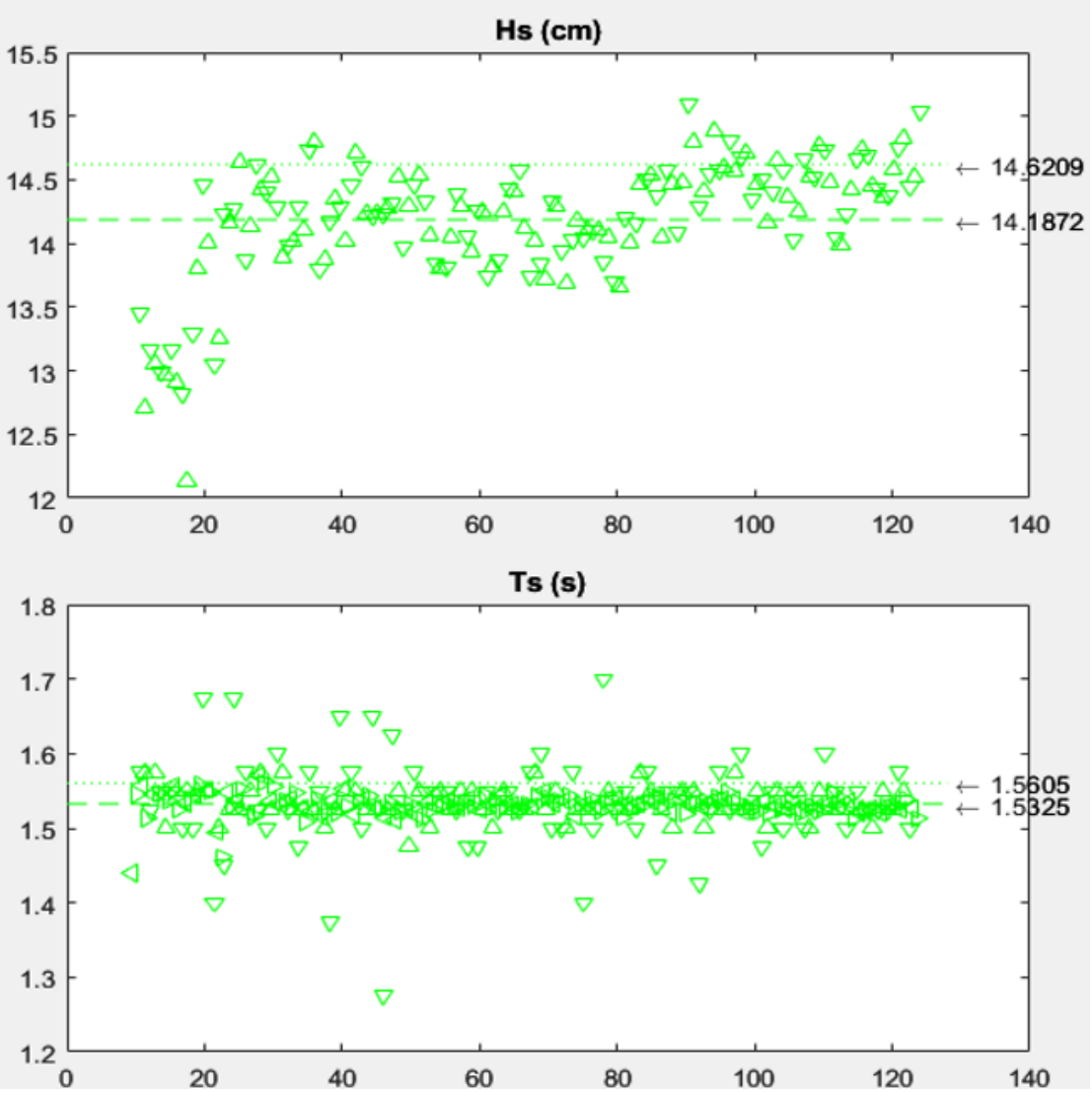


Gráfico 186: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

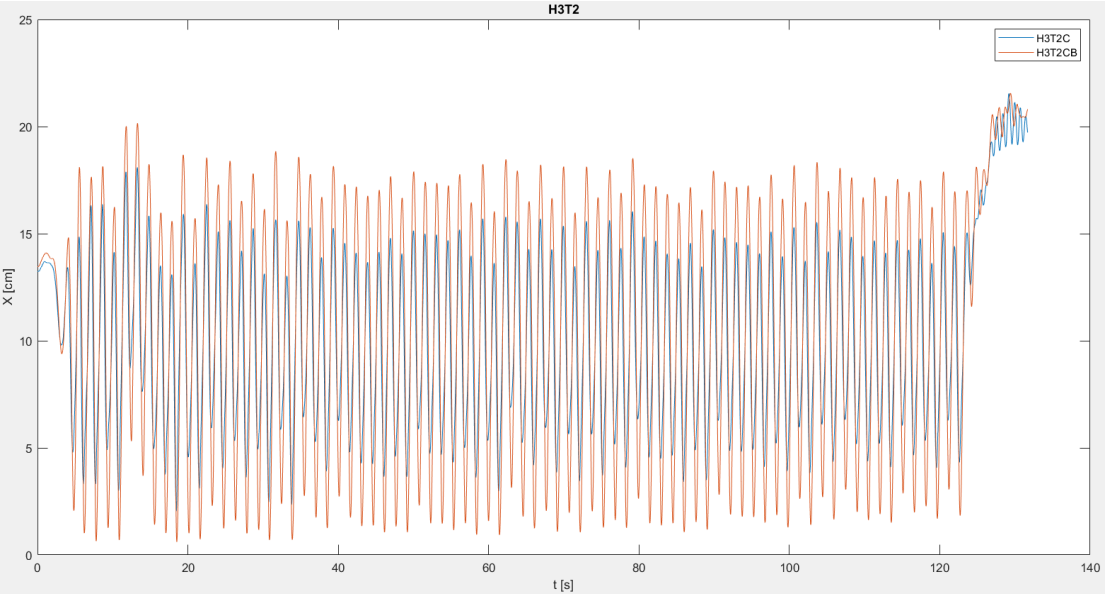


Gráfico 187: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

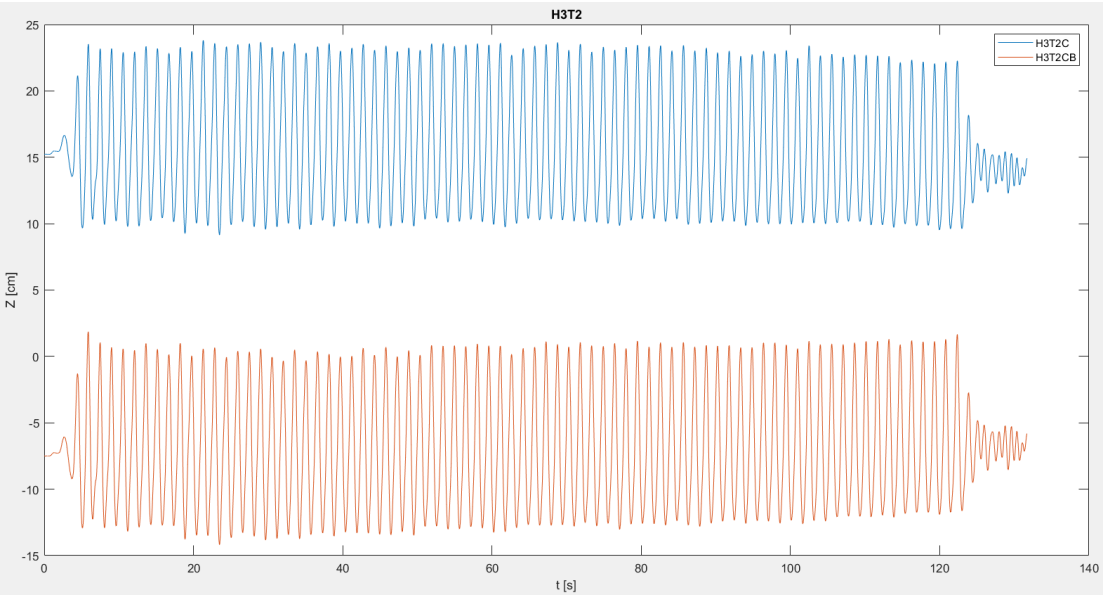


Gráfico 188: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

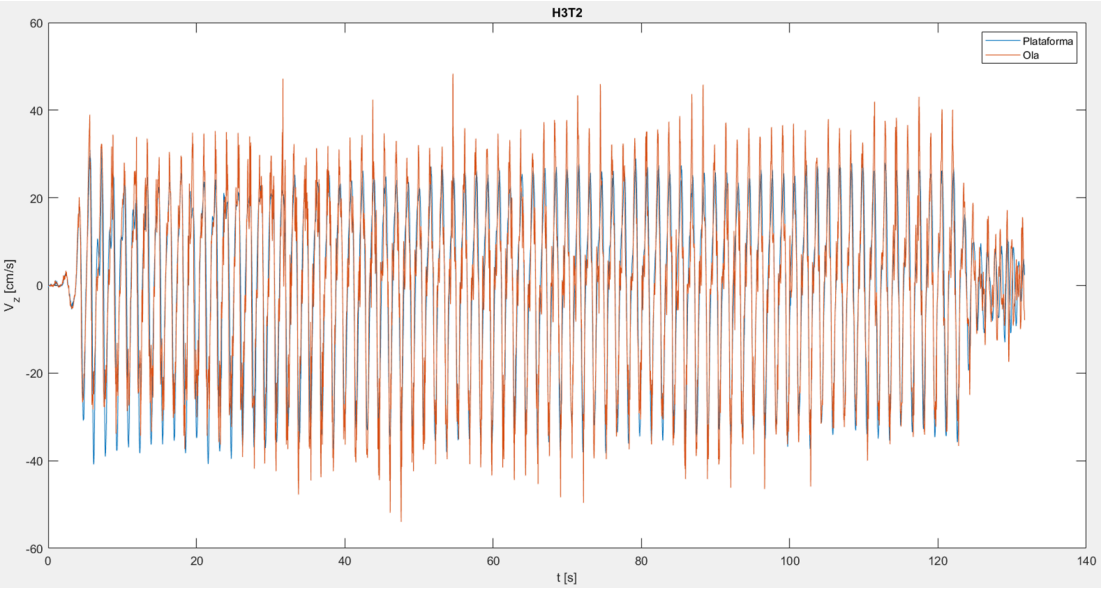


Gráfico 189: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo

10.1.35. T3

Porcentaje calado: 65%
Estado de mar: H3T3

Condiciones de laboratorio:

Temperatura ambiental [°C]	Temperatura del agua [C°]	Humedad relativa
21.1	21.3	18%

Tabla 136: Condiciones de laboratorio T3 65%, H3T3

Conversión de oleaje ideal:

En la siguiente tabla se presenta el estado de mar prototipo, el estado de mar escalado y los parámetros que le llega al motor para realizar el oleaje. El gráfico del resistor N°2 que se muestra a continuación es el promedio de oleaje y periodo que fue registrado con estos parámetros ideales.

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
7.2	12.7	14.4	1.79	0.55678	0.3574

T*abla 137: Conversión de oleaje ideal*

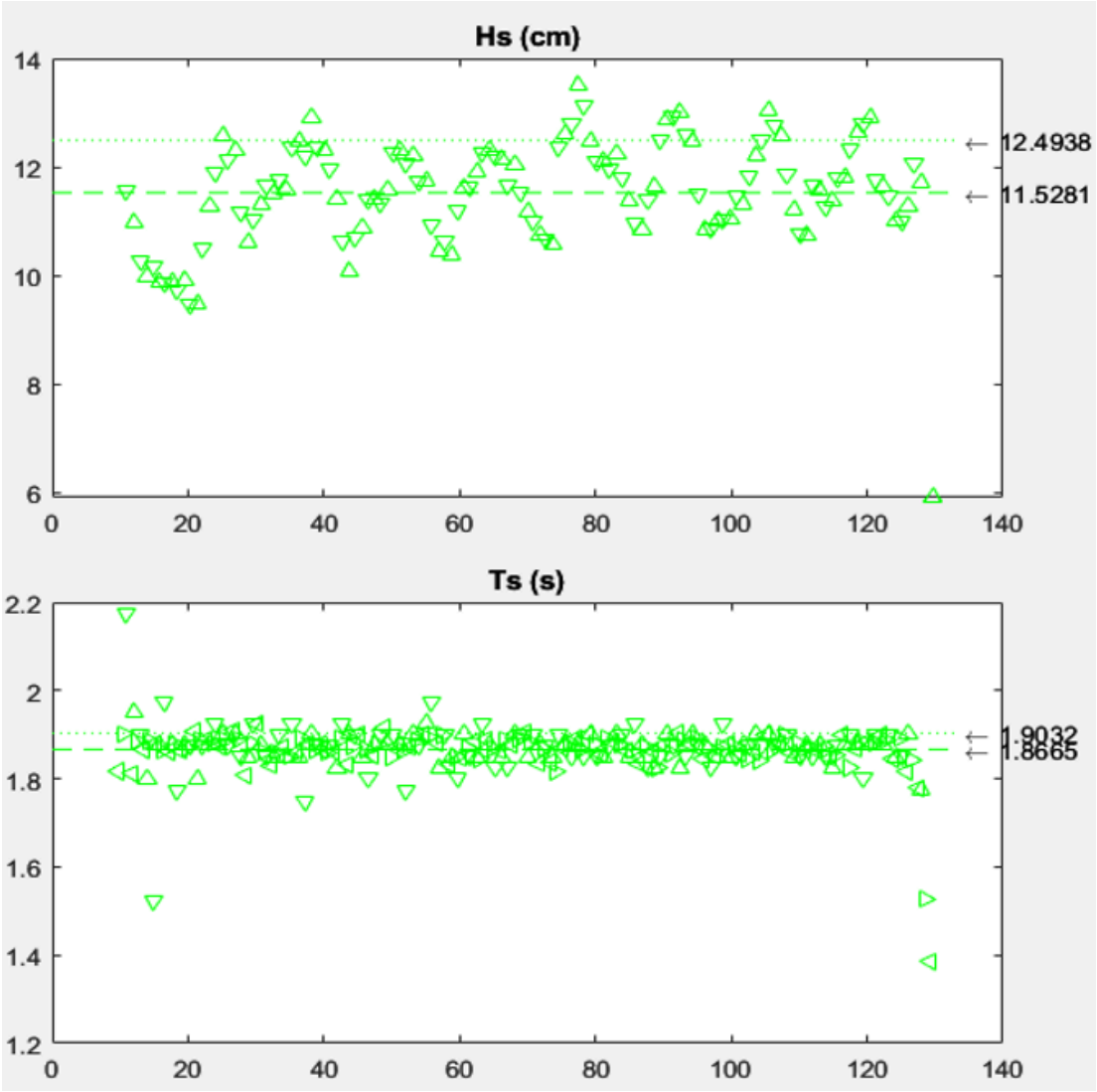


Gráfico 190: Altura y periodo significativos promedios ideales del resistor N°2

Conversión de oleaje real:

Estado de mar		Estado de mar escalado		Parámetros de motor	
Altura [m]	Periodo [s]	Altura [cm]	Periodo [s]	Amplitud [V]	Frecuencia [Hz]
8.3	12.2	16.6	1.73	0.5796	0.39271

Tabla 138: Conversión de oleaje real

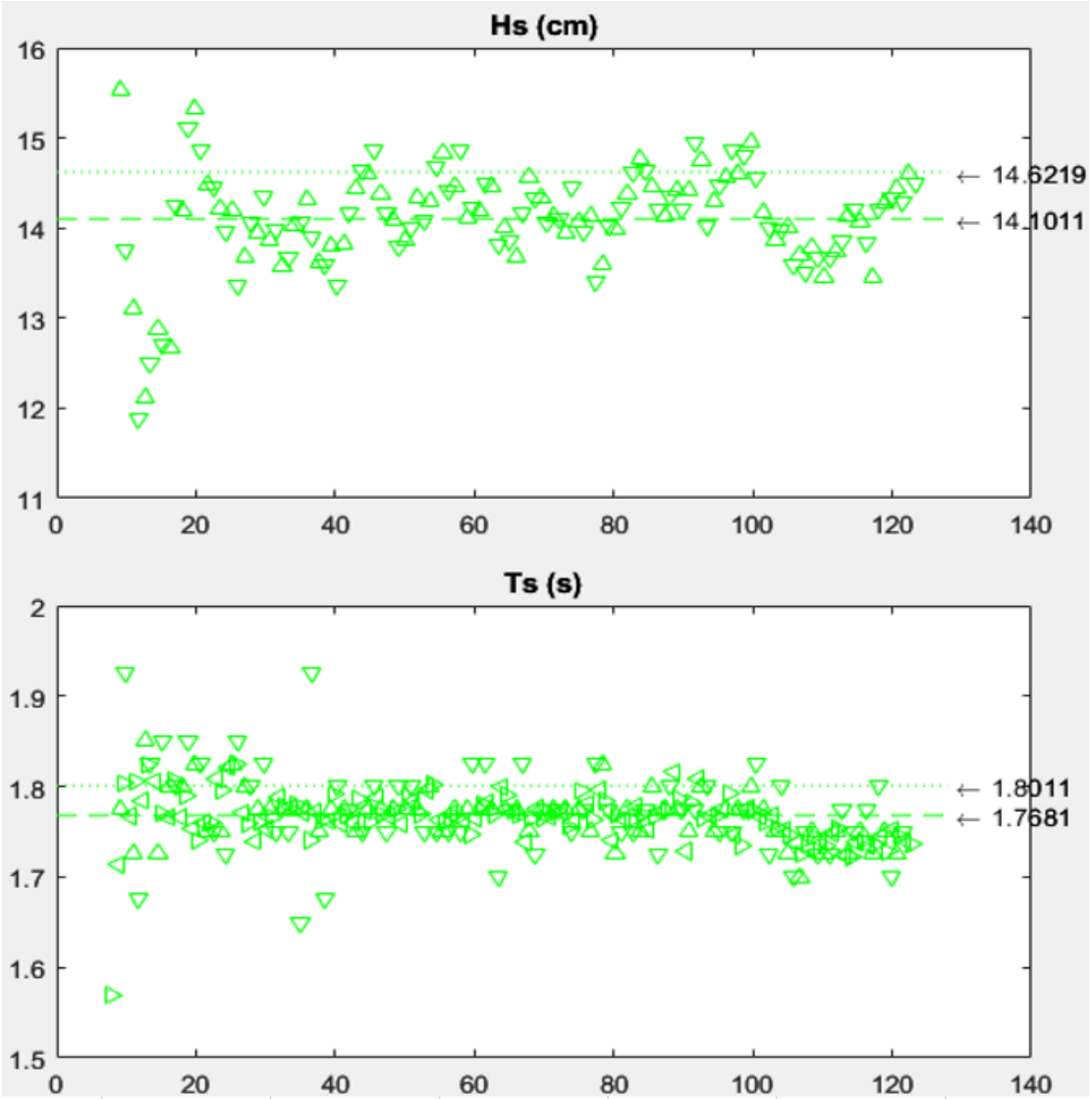


Gráfico 191: Altura y periodo significativos promedios reales del resistor N°2

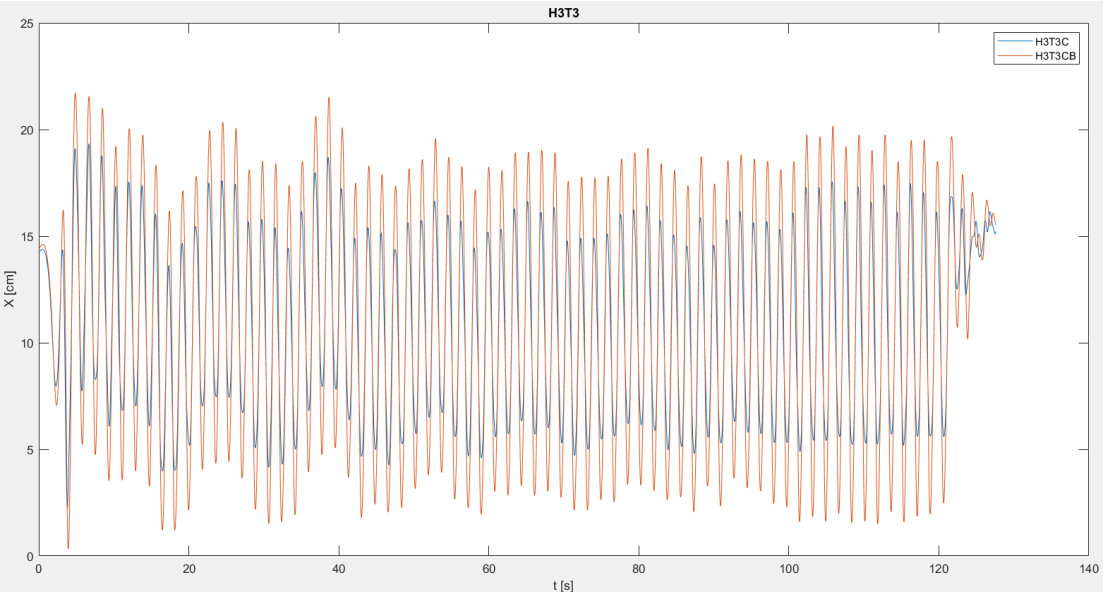


Gráfico 192: Posición en eje X del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

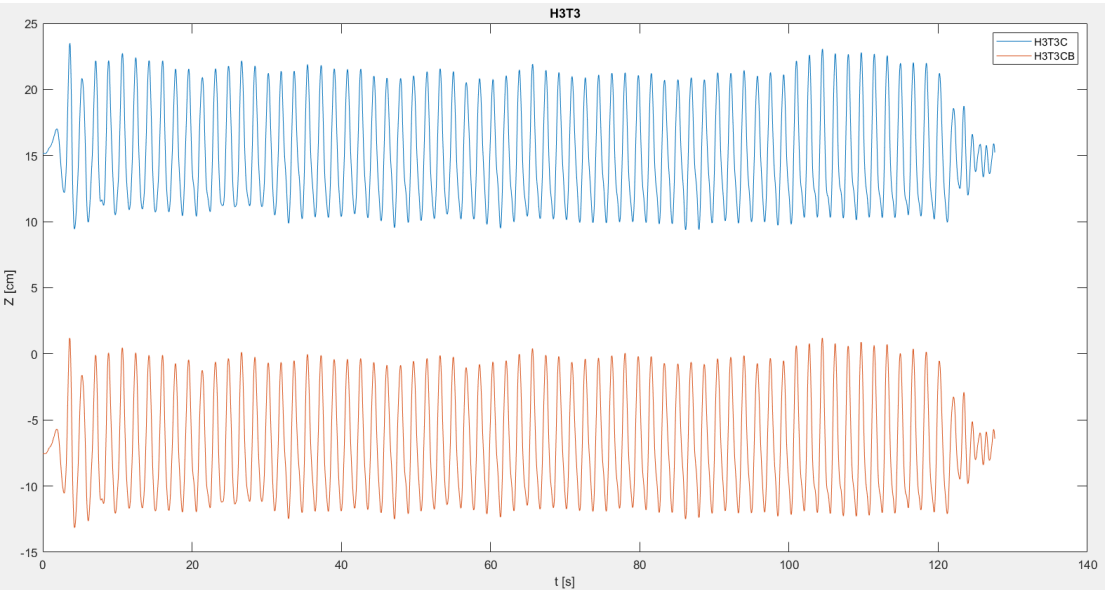


Gráfico 193: Posición en eje Z del punto superior de la plataforma y el punto inferior en el tiempo

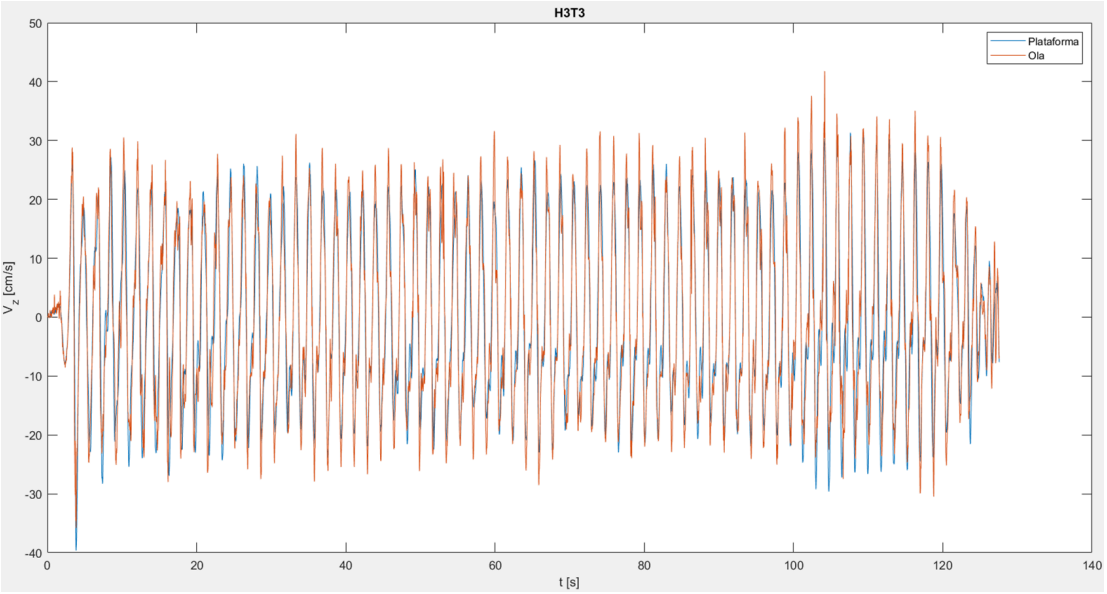


Gráfico 194: Velocidad en eje Z de la plataforma y el oleaje en el tiempo