

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***EVALUACIÓN COMPUTACIONAL DEL
COMPORTAMIENTO DE UN CAPTADOR DE
ENERGÍA DE LAS OLAS DE TIPO BOYA
FLOTANTE***

Alumno/Alumna: <Alcibar, Apraiz, Inés>

Director/Directora: <Esteban, Alcalá, Gustavo Adolfo>

Curso: <2017-2018>

Fecha: <Lunes, 18, junio, 2018>

RESUMEN

Tanto el crecimiento de la población como el aumento del nivel de vida de muchas personas en los países en desarrollo generan un fuerte crecimiento en la demanda de energía. Además, la mayoría de las fuentes de energía explotadas son combustibles fósiles: fuentes contaminantes y no renovables. Por lo tanto, parece claro en este punto que los métodos tradicionales de generación de electricidad son insostenibles, y que se deben encontrar nuevas fuentes de energía. La energía de las olas, extensa e inagotable, ha sido considerada por mucho tiempo como una de las fuentes de energía renovable más prometedoras. Los conversores WEC transforman la energía de las olas en electricidad. El objetivo principal del presente trabajo es realizar una evaluación computacional de un WEC de tipo boya flotante (RM3) mediante un simulador llamado WEC-Sim. Para obtener el rendimiento del dispositivo, se genera una matriz de potencia, característica del área elegida (BiMEP).

Palabras clave: energía, olas, WEC-Sim

Both population growth and increasing standards of living for many people in developing countries will cause strong growth in energy demand. Furthermore, most of the exploited energy sources are fossil fuels: polluting and nonrenewable sources. Thus, it seems clear at this point that traditional methods of generating electricity are unsustainable, and that new energy sources must be found. Vast and reliable, wave power has long been considered as one of the most promising renewable energy sources. Wave Energy Converters (WECs) convert wave power into electricity. The main objective of the present work is to make a computational evaluation of a sparbuoy WEC (RM3) by means of a simulator called WEC-Sim. In order to obtain the performance of the device a power matrix, characteristic for the chosen area (BiMEP), is generated.

Key words: energy, waves, WEC-Sim

Laburpena

Biztanleriaren hazkundearen eta garapen bidean dauden herrialdeetako biztanleen bizimoduaren hobekuntzaren ondorioz energia eskaera hadituko da. Gainera, erabiltzen diren energia-iturri gehienak erregai fosilak dira: iturri kutsatzaileak eta berriztaezinak. Hori dela-eta, elektrizitatea sortzeko metodo berriak aurkitu behar dira. Olatuen energia, zabala eta agortezina, aspalditik energia iturri berriztagarrietariko bat izan da. WEC gailuak olatuen energia elektrizitate bihurtze dute. Lan honen helburu nagusia RM3 gailuaren ebaluazio konputazionala egitea da, WEC-Sim izeneko simulagailua erabiliz. Honen errendimendua lortzeko, matrize elektriko bat sortuko da, hautatutako eremuaren ezaugarriaren arabera (BiMEP).

Gako hitzak: energia, olatuak, WEC-Sim

ÍNDICE

1. Memoria.....	10
1.1. Introducción.....	10
1.2. Contexto.....	11
1.3. Objetivos y alcance del trabajo	15
1.4. Beneficios que aporta el trabajo.....	16
1.5. Análisis del estado del arte	17
1.5.1. Historia del desarrollo de los captadores de olas	17
1.5.2. Tipos de dispositivos	19
1.6. Análisis de riesgos	25
2. Metodología seguida en el desarrollo del trabajo	26
2.1. Planificación del proyecto.....	26
2.1.1. Tareas	26
2.1.2. Hitos	28
2.1.3. Diagrama de Gantt	29
2.2. Contexto teórico	31
2.2.1. ¿Qué son las olas? ¿Cómo se generan?	31
2.2.2. Teorías para definir el oleaje	35
2.2.3. Potencial.....	53
2.3. Herramienta de simulación: WEC-Sim.....	56
2.3.1. WEC-Sim.....	56
2.3.2. Teoría de WEC-Sim.....	58
2.3.3. Tipos de olas en WEC-Sim.....	66
2.4. Dispositivo a analizar: captador puntual RM3	70
2.4.1. Modelo de Simulink	73
2.4.2. Sistema de extracción de potencia (PTO) hidráulico	75
2.4.3. Archivo de entrada: <i>wecSimInputFile.m</i>	84
2.4.4. Archivo de entrada para PTO: <i>ptoSimInputFile.m</i>	85

2.4.5.	Archivo de post-procesamiento	85
2.5.	Ejecución de WEC-Sim	86
2.6.	Descripción de la zona BiMEP	87
2.7.	Descripción de los cálculos y resultados	95
2.7.1.	Evaluación del dispositivo RM3: $H_s = 1.67$ m y $T_e = 9.03$ s	96
2.7.2.	Análisis global del dispositivo RM3.....	101
2.7.3.	Matrices representativas.....	113
3.	Aspectos económicos: Descargo de gastos	117
3.1.	Horas internas.....	117
3.2.	Amortizaciones.....	117
3.3.	Gastos.....	118
3.4.	Total	118
4.	Conclusiones	119
	Bibliografía	120
	Anexo I: Planos, esquemas, diseño de detalle o de bajo nivel, código	121
	Sistema RM3	122
	Modelo de Simulink	122
	Archivo de entrada <i>wecSimInputFile.m</i>	123
	Archivo de post-procesamiento <i>userDefinedFunctions.m</i>	124
	Archivo para ejecutar WEC-Sim <i>ejecutar.m</i>	125
	Subsistema PTO	126
	Modelo de Simulink del bloque PTO-Sim	126
	Código <i>ptoSimInputFile.m</i>	135
	Función del motor hidráulico <i>variableMotorVolume.m</i>	136
	Anexo II: Gráficas relevantes obtenidas en las ejecuciones del simulador	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Evolución del consumo mundial de energía. Fuente: <i>www.bp.com</i>	11
Ilustración 2. Evolución de las emisiones globales de CO ₂ . Fuente: <i>www.epa.gov</i>	11
Ilustración 3. Eficiencia de los sistemas hidrodinámicos de olas. Fuente: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information	13
Ilustración 4. Boya Masuda [1].....	18
Ilustración 5. Buque Kaimei [1]	18
Ilustración 6. Distintos dispositivos de conversión de energía undimotriz [1].....	19
Ilustración 7. Clasificación de los dispositivos por su ubicación [1]	20
Ilustración 8. Sistema TAPCHAN. Fuente: OPT (Ocean Power Technologies)	20
Ilustración 9. Wavedragon. Fuente: Maritime Journal	21
Ilustración 10. Dispositivos Pelamis en array. Fuente: Maritime Journal	21
Ilustración 11. Power Buoy. Fuente: OPT (Ocean Power Technologies)	22
Ilustración 12. Instalaciones de columna oscilante de agua (OWC) [1].....	23
Ilustración 13. Turbina Wells [3].....	23
Ilustración 14. Turbina birradial [3].....	24
Ilustración 15. Diagrama de Gantt.....	30
Ilustración 16. Generación de las olas. Fuente: <i>fondear.org</i>	31
Ilustración 17. Fetch y mar de fondo. Fuente: <i>sailandtrip.com</i>	32
Ilustración 18. Movimiento de las moléculas de agua en las olas [1].....	33
Ilustración 19. Símil del movimiento de las olas con una cuerda [1].....	33
Ilustración 20. Parámetros principales de una ola [6].....	35
Ilustración 21. Superposición de ondas [6].....	36
Ilustración 22. Sistema de referencia en la teoría de Airy [6].....	37
Ilustración 23. Aguas poco profundas y aguas profundas [6]	40
Ilustración 24. Registro real del oleaje $\eta(t)$, descomposición en n ondas y espectro frecuencial discreto [6].....	46
Ilustración 25. Espectro frecuencial [6]	46
Ilustración 26. Shoaling [6].....	48
Ilustración 27. Coeficiente de Shoaling en función de la profundidad [6].....	49
Ilustración 28. Curvas ortogonales o rayos [6]	49
Ilustración 29. Refracción en un tren de olas [6]	50
Ilustración 30. Reflexión [6].....	51
Ilustración 31. Difracción de las olas al encontrar un saliente marino [6].....	51

Ilustración 32. Energía de las olas (kW/m) en función de latitudes. Fuente: <i>sciencedirect.com</i>	54
Ilustración 33. Distribución global de la energía de las olas (kW/m ²) [1].....	54
Ilustración 34. Comportamiento de las partículas de agua bajo la superficie del mar [1]	55
Ilustración 35. Pasos para construir y ejecutar un modelo WEC-Sim [elaboración propia]	57
Ilustración 36. Sistema de referencia de WEC-Sim [7].....	59
Ilustración 37. Diseño y dimensiones del dispositivo RM3 [6]	70
Ilustración 38. Esquema del concepto del diseño del captador puntual [6].....	71
Ilustración 39. Representación de los cuerpos y del sistema global de referencia en Simulink.....	73
Ilustración 40. Conjunto completo de bloques para el RM3 y una vista del bloque de restricción con sus puntos de conexión a base (B) y seguidor (F).....	74
Ilustración 41. Sistema de extracción de potencia (PTO) hidráulico [7].....	75
Ilustración 42. Esquema del pistón	78
Ilustración 43. Esquema de la válvula rectificadora.....	80
Ilustración 44. Esquema del acumulador de alta presión	81
Ilustración 45. Esquema del acumulador de baja presión	81
Ilustración 46. Esquema del motor hidráulico.....	82
Ilustración 47. Esquema del generador rotativo	83
Ilustración 48. Zona BiMEP [9].....	87
Ilustración 49. Batimetría de BiMEP [9].....	87
Ilustración 50. Potencia anual por metro accesible que atraviesa perpendicularmente las batimetrías de 30, 60 y 100 metros [10].....	88
Ilustración 51. Distribución Hs [4].....	89
Ilustración 52. Distribución Te [4].....	90
Ilustración 53. Rosas Hs [4]	91
Ilustración 54. Rosas Te [4]	91
Ilustración 55. Rango de Te para Hs [4].....	91

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Potencia absorbida, potencia mecánica y potencia eléctrica	96
Gráfica 2. Acumuladores de alta y baja presión	97
Gráfica 3. Potencia eléctrica Vs. Diferencia de presiones	98
Gráfica 4. Respuesta del cuerpo 1: desplazamiento, velocidad y aceleración	98
Gráfica 5. Respuesta del cuerpo 2: desplazamiento, velocidad y aceleración	99
Gráfica 6. Fuerzas en el cuerpo 1	99
Gráfica 7. Fuerzas en el cuerpo 2	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características energéticas de las distintas energías renovables [1].....	12
Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de la extracción de energía undimotriz [1].....	13
Tabla 3. Niveles de madurez de la tecnología (TRL) [5].....	16
Tabla 4. Escala Douglas	33
Tabla 5. Variación de las funciones hiperbólicas. [6].....	41
Tabla 6. Clasificación del oleaje según la profundidad y la longitud de onda. [6]	41
Tabla 7. Aproximaciones de parámetros. [6].....	41
Tabla 8. Superposición de ondas [6].....	42
Tabla 9. Tipos de ola en WEC-Sim [elaboración propia]	66
Tabla 10. Características geométricas del flotador [7].....	71
Tabla 11. Características geométricas de la columna y placa-base circular [7].....	72
Tabla 12. Hs media y máxima y media de la dirección del oleaje por meses [4]	90
Tabla 13. Hs-Te-Ocurrencia 1 [4].....	93
Tabla 14. Hs-Te-Ocurrencia 2 [4].....	94
Tabla 15. Matriz de potencia del RM3 (1) [elaboración propia]	103
Tabla 16. Matriz de potencia del RM3 (2) [elaboración propia]	104
Tabla 17. Matriz de potencia del RM3 x ocurrencia (1) [elaboración propia]	105
Tabla 18. Matriz de potencia del RM3 x ocurrencia (2) [elaboración propia]	106
Tabla 19. Potencia por metro de ancho de ola 1 [elaboración propia].....	109
Tabla 20. Potencia por metro de ancho de ola 2 [elaboración propia].....	110
Tabla 21. Potencia por metro de ancho de ola x ocurrencia 1 [elaboración propia]...	111
Tabla 22. Potencia por metro de ancho de ola x ocurrencia 2 [elaboración propia]...	112
Tabla 23. Ocurrencia [elaboración propia]	113
Tabla 24. Potencia RM3 (kW) [elaboración propia]	114
Tabla 25. Potencia RM3 x Ocurrencia [elaboración propia]	115
Tabla 26. Horas internas.....	117
Tabla 27. Tasa horaria del ordenador	117
Tabla 28. Amortizaciones	117

1. MEMORIA

1.1. Introducción

En este trabajo se presenta el proyecto de la evaluación computacional de un captador de energía de las olas (RM3) mediante Matlab y Simulink.

En primer lugar, se describen el contexto del trabajo, los objetivos y el alcance del proyecto. Asimismo, se presentan los beneficios que éste aporta, el análisis del estado del arte y el análisis de riesgos. Seguido, se planifican todos los trabajos a realizar, viendo las diferentes relaciones entre las tareas a llevar a cabo.

A continuación, se procede a mostrar el apartado técnico del proyecto: contexto teórico, herramienta de simulación, dispositivo a analizar, ejecución del simulador y descripción de la zona BiMEP.

Posteriormente, se presenta la descripción de los cálculos junto con los resultados obtenidos. También se presenta la parte económica del proyecto: se calcula el descargo de gastos, tras la finalización del trabajo, donde se incluyen las horas internas, las amortizaciones y los gastos.

Se da fin al informe presentando un resumen de las conclusiones del mismo. En este apartado se hace una recapitulación de los factores más destacables.

1.2. Contexto

La forma de vida a la que se tiende hoy en día sólo es posible gracias al aumento de las necesidades energéticas del planeta. En la siguiente ilustración puede observarse como incrementa el consumo mundial de la energía según las distintas fuentes de generación.

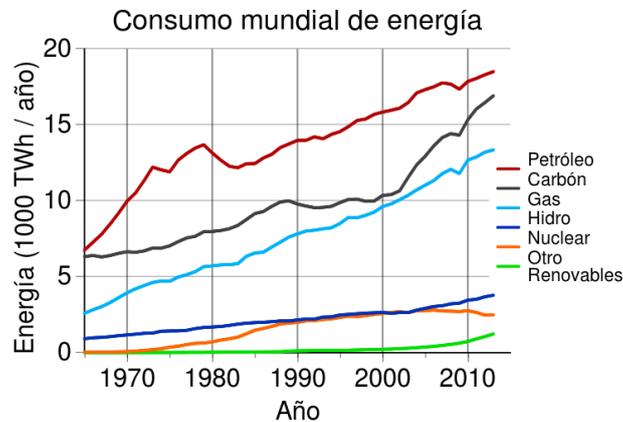


Ilustración 1. Evolución del consumo mundial de energía. Fuente: www.bp.com

El crecimiento de la población mundial y el desarrollo del consumo crean una situación en la que nuevas formas de generar energía son necesarias. El desarrollo de estas tecnologías es muy importante, sobre todo, en los países energéticamente dependientes.

Otro factor que promueve este panorama es el hecho de que las fuentes más explotadas son las procedentes de los combustibles fósiles: fuentes contaminantes y no renovables. Debido al uso abusivo de los recursos naturales, éstos podrían agotarse.

Asimismo, las descomunales cantidades de CO₂ que se arrojan a la atmósfera favorecen el cambio climático y la contaminación atmosférica. Estas emisiones están en continuo crecimiento, como se representa en la siguiente gráfica.

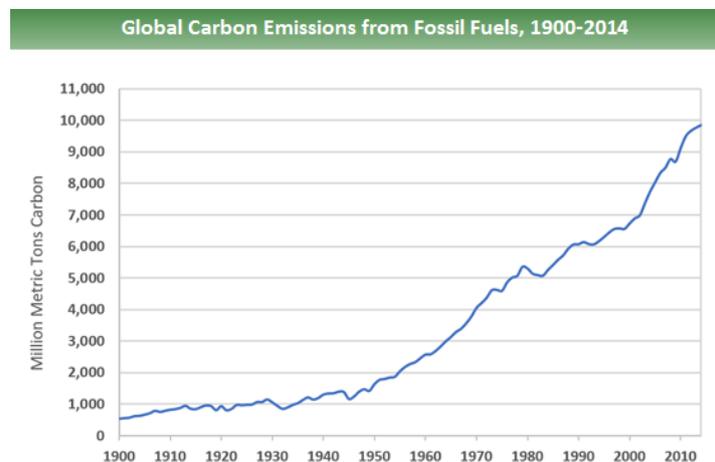


Ilustración 2. Evolución de las emisiones globales de CO₂. Fuente: www.epa.gov

Ante esta situación, las energías renovables proporcionan una solución que a largo plazo podría ser muy beneficiosa. A Europa, como comunidad energéticamente dependiente, le interesa profundamente el desarrollo de este tipo de fuentes de energía tanto por motivos medioambientales como económicos. De hecho, la UE con proyectos como Horizonte 2020 está financiando la investigación en energía segura, limpia y eficiente.

Dentro del estudio de energías renovables, es de gran interés el estudio de la interacción ola-estructura. Esto se debe a que mientras que la energía solar solo se puede generar durante el día y la energía eólica tiende a disminuir durante la mañana, el oleaje produce energía a lo largo de todo el día. En consecuencia, el uso del mar como fuente de generación de energía es un concepto que surgió hace más de 800 años.

En la siguiente tabla se puede comparar la energía de las olas con otras energías renovables: solar y eólica. Se puede observar que el potencial de la energía del oleaje es menor que el de las otras dos energías. Este hecho se debe a que la energía del oleaje sólo se encuentra en grandes cantidades en zonas concretas de los mares y de los océanos. Al contrario, la energía solar tiene una potencia aproximadamente constante a lo largo de cada latitud. La energía eólica, por su parte, se puede encontrar en cualquier parte del mundo, en mayor o menor medida.

Energía Características	Solar	Eólica	Oleaje
Recursos disponibles	120.000 TW	300-870 TW	3-3,5 TW
Recursos aprovechables	300 TW	72 TW	2 TW
Intensidad media	100-200 W/m ²	400-600 W/m ²	2.000-30.000 W/m²

Tabla 1. Características energéticas de las distintas energías renovables [1]

No obstante, se puede aprovechar un mayor porcentaje del potencial de la energía del oleaje: dos terceras partes. En la siguiente imagen queda reflejado que la potencia de las olas queda reducida por las pérdidas de radiación de las olas, por las pérdidas por viscosidad y por las pérdidas en el sistema de extracción de potencia. En cambio, la

energía eólica aprovecha entre una quinta y una décima parte del potencial y la energía solar únicamente una de cada cuatrocientas partes.

Wave system (hidrodinamic)

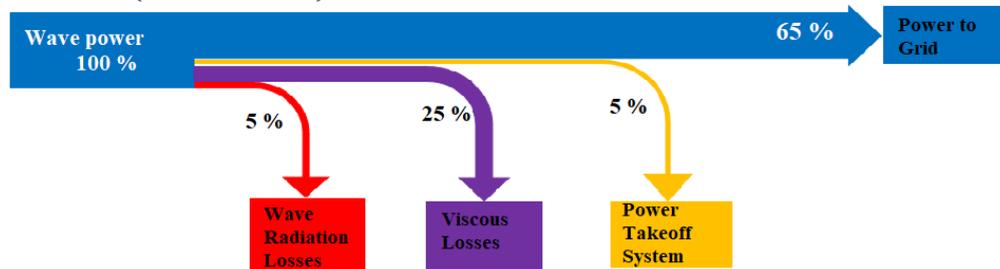


Ilustración 3. Eficiencia de los sistemas hidrodinámicos de olas. Fuente: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information

Respecto a la intensidad media, la energía de las olas es, con diferencia, superior en este aspecto, a pesar del amplio rango que abarca. Además, cabe destacar que ésta se podría considerar energía eólica concentrada, pues su origen es el propio viento.

Sin embargo, la explotación de la energía del oleaje todavía no está muy desarrollada, pero a medida que se vaya invirtiendo capital en investigación irá convirtiéndose en un recurso más factible. En la siguiente tabla se recogen las ventajas y los inconvenientes que se presentan:

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente renovable: limpia e inagotable • Potencial energético altamente aprovechable • Fenómeno predecible, constante y de elevada concentración • Punto de instalación flexible
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> • Costes de instalación y funcionamiento • Tecnología en fase de pruebas • Poca resistencia frente a temporales • Impacto ambiental (básicamente en localizaciones costeras)

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de la extracción de energía undimotriz [1]

El inconveniente más importante es el coste de instalación y funcionamiento, ya que hasta que no se consiga competir con las otras fuentes de energía, su desarrollo será muy lento. En cuanto al impacto medioambiental, es mucho mayor en instalaciones cercanas a la costa que en zonas de aguas profundas; pero, a su vez, éstas últimas presentan más complicaciones.

En conclusión, apostar por el desarrollo de la tecnología para la captación de energía del oleaje puede ser esencial para lograr un futuro limpio y sostenible, un futuro mejor.

1.3. Objetivos y alcance del trabajo

El principal objetivo del presente trabajo es evaluar computacionalmente el comportamiento de un captador de olas de tipo boya flotante (RM3) ante un oleaje entrada característico de la zona a analizar. Asimismo, se aplicará un protocolo de evaluación de dispositivos mediante el que se podría comparar distintos dispositivos, si fuera necesario.

Para ello, previamente es necesario estudiar el comportamiento del oleaje y conocer el estado del arte de este tipo de obtención de energía. Además, se debe analizar el recurso de olas energéticamente disponible, principalmente en el golfo de Bizkaia, más concretamente en la zona BiMEP [4] (zona acondicionada para respaldar el ensayo a escala real de dispositivos).

Por otro lado, antes de realizar el análisis computacional conviene comprender el funcionamiento del dispositivo WEC y el modo en el que es capaz de extraer la energía del oleaje. En el alcance de este trabajo no se encuentra el diseño del dispositivo, por lo que se utilizarán los datos de un ejemplo proporcionado por el simulador.

Finalmente, mediante el simulador WEC-Sim y los datos del dispositivo a analizar, se quiere obtener la matriz de potencia del captador objeto de estudio, que contempla todas las posibles combinaciones de altura de ola y periodo que se dan en BiMEP. Para ello, se ejecutarán 158 casos en el simulador. Además, para cada combinación se obtiene la información relevante que representa el comportamiento del dispositivo. Partiendo de la matriz de potencia se obtendrá la potencia eléctrica esperada, el factor de capacidad y la anchura de ola captadora.

1.4. Beneficios que aporta el trabajo

La investigación de la tecnología en el campo de las energías es imprescindible para el desarrollo del país. Concretamente, gran parte de la península Ibérica está en contacto con el océano Atlántico, por lo que la explotación de energías marinas podría permitir que muchas regiones costeras sean autosuficientes.

Siguiendo los niveles de madurez de la tecnología (TRL¹), las energías marinas están en una reciente etapa de maduración TRL 7. Como se explica a lo largo del trabajo, en la zona BiMEP, por ejemplo, se pueden probar prototipos directamente en el mar en una zona acondicionada para el análisis de su comportamiento. Por ello, el estudio de esta tecnología es muy atractivo, en el sentido en el que da la posibilidad de ser referentes mundiales en esta área de la tecnología.

Por otro lado, en el futuro las plantas de energía undimotriz pueden tener un rol importante desde el punto de vista de la protección de la costa.

TRL 1	<ul style="list-style-type: none"> Principios básicos observados y reportados
TRL 2	<ul style="list-style-type: none"> Concepto y/o aplicación de la tecnología formulada
TRL 3	<ul style="list-style-type: none"> Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica
TRL 4	<ul style="list-style-type: none"> Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio
TRL 5	<ul style="list-style-type: none"> Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno relevante
TRL 6	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante
TRL 7	<ul style="list-style-type: none"> Demostración de sistema o prototipo en un entorno real
TRL 8	<ul style="list-style-type: none"> Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones
TRL 9	<ul style="list-style-type: none"> Sistema probado con éxito en entorno real

Tabla 3. Niveles de madurez de la tecnología (TRL) [5]

¹ TRL: Technology Readiness Levels. Este concepto surge en la NASA pero posteriormente se generaliza para poder aplicarse a cualquier tipo de proyecto, desde su idea original hasta su despliegue.

1.5. Análisis del estado del arte

El movimiento de las olas puede convertirse en energía mecánica, y posteriormente en energía eléctrica mediante los sistemas adecuados. Los convertidores de energía del oleaje generalmente se denominan dispositivos WEC, que es el acrónimo de *Wave Energy Converter*.

Ante el gran potencial del oleaje se han diseñado todo tipo de dispositivos para captar esta fuente de energía. Sin embargo, solo una pequeña proporción ha sido ensayada, y muy pocos han alcanzado la fase comercial. El desarrollo de estos aparatos está condicionado por:

- La irregularidad en la amplitud, fase y dirección de las olas dificulta la obtención de la máxima eficiencia del dispositivo en todo el rango de frecuencias de excitación.
- La carga estructural en el caso de condiciones climáticas extremas, tales como huracanes, puede superar a la carga media en más de 100 veces.
- Es necesario acoplar el lento ($f \approx 0,1\text{Hz}$) e irregular movimiento de una ola con una mayor frecuencia de excitación (500 veces mayor) de los generadores eléctricos.

1.5.1. Historia del desarrollo de los captadores de olas

Los primeros datos sobre el aprovechamiento de la energía undimotriz se encuentran en China, donde ya en el siglo XIII empiezan a operar molinos por acción del oleaje. Más tarde, en 1799, el parisino Girard y su hijo escriben la primera patente de un dispositivo de aprovechamiento del oleaje: consistía en una balsa situada fuera de la costa, donde los movimientos de ascenso y descenso de la balsa estaban conectados por numerosos alambres y poleas a algún aparato de la orilla. No obstante, la mayoría de las ideas surgidas en el siglo XIX nunca se llevaron a cabo.

A principios del siglo XX, el francés Bouchaux-Pacei suministra electricidad a su casa mediante un sistema neumático, parecido a las actuales columnas oscilantes de agua. Desde 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60 m con una potencia de 400 W.

Uno de los precursores de este campo fue el japonés Yoshio Masuda, que en 1960 desarrolló un sistema, llamado Boya Masuda, que permitía cargar las baterías en boyas de navegación mediante una turbina de aire de 60 W.

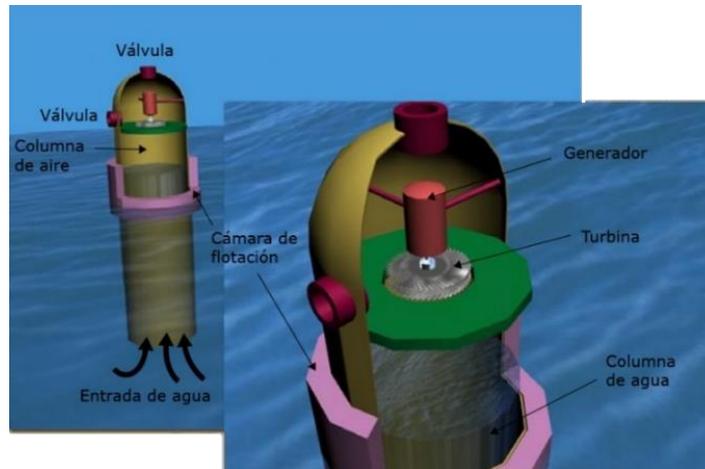


Ilustración 4. Boya Masuda [1]

A continuación, en los años 70 se construye en Japón el buque Kaimei, de 80 m de largo y 12 m de ancho, que alberga 11 cámaras para ensayos de turbinas de aire.



Ilustración 5. Buque Kaimei [1]

Sin embargo, hasta 1974 no se inicia la investigación a gran escala. En varios centros del Reino Unido se estudian sistemas para grandes aprovechamientos, actividad que por falta de recursos económicos se abandona prácticamente por completo en 1982.

Finalmente, a mediados de los años 80 entran en servicio varias plantas piloto de distintos tipos en Europa y Japón. A partir de los años 90, un gran número de empresas de todo el mundo se involucran en el diseño y desarrollo de dispositivos captadores de la energía de las olas.

1.5.2. Tipos de dispositivos

Existe una gran variedad de diseños de dispositivos de conversión de energía undimotriz, puesto que todavía no se ha llegado a un consenso de diseño universal que destaque sobre el resto de los dispositivos en todos los escenarios posibles.

En la siguiente figura se pueden ver distintos tipos de dispositivos, aunque son solo unos pocos de la gran variedad de patentes existentes. Hay sistemas estáticos basados en turbinas de aire o turbinas hidráulicas, sistemas dinámicos basados en el desplazamiento de un flotador y sistemas hidrodinámicos basados en el efecto Bernoulli.

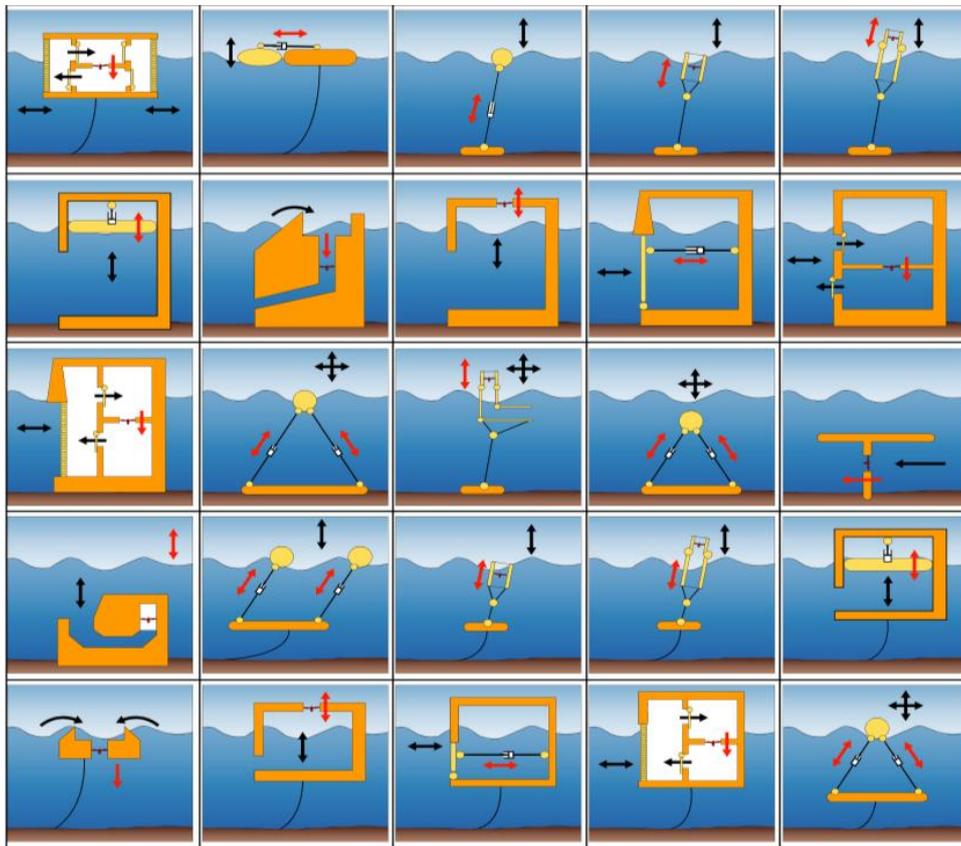


Ilustración 6. Distintos dispositivos de conversión de energía undimotriz [1]

Asimismo, existen múltiples criterios para clasificar a los distintos dispositivos que se han diseñado:

- Por su ubicación: en la costa, cercanos a la costa y en alta mar. A mayor profundidad, mayor capacidad para extraer energía, debido al efecto *shoaling* que se explica más adelante. No obstante, el transporte de energía eléctrica por cable se encarece a medida que el dispositivo está más alejado de la costa.

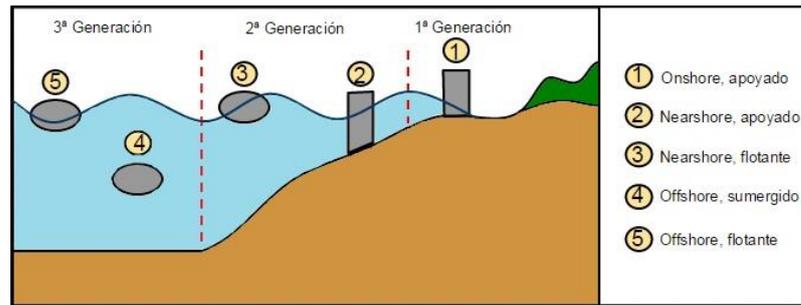


Ilustración 7. Clasificación de los dispositivos por su ubicación [1]

- Por su capacidad de extracción.
- Por su posición relativa respecto del oleaje:
 - Los totalizadores tienen su eje principal paralelo al frente de olas para extraer la energía de una sola vez, mediante las turbinas Kaplan, aprovechando la energía potencial de las olas. Existen dos tipos de dispositivos, los de estructura fija y los de estructura flotante.

En los convertidores de estructura fija situada en la costa, las olas incidentes entran a un depósito situado a una cota superior a la del mar a través de una rampa, para después pasar por unas turbinas acopladas a unos generadores eléctricos. Un ejemplo de estos dispositivos es el TAPCHAN.

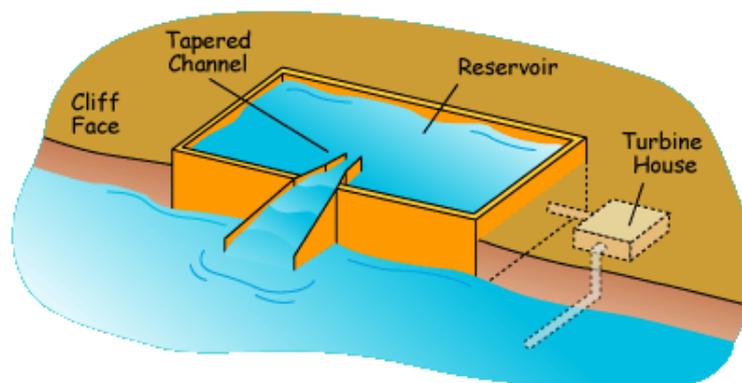


Ilustración 8. Sistema TAPCHAN. Fuente: OPT (Ocean Power Technologies)

Por otro lado, entre los dispositivos de estructura flotante, cuyo comportamiento es parecido al de los anteriores, destaca el Wavedragon. Este convertidor está caracterizado por tener un reflector que dirige las olas incidentes por una rampa hasta un depósito situado en la parte posterior por encima del nivel del mar.



Ilustración 9. Wavedragon. Fuente: Maritime Journal

- Los atenuadores tienen su eje principal paralelo a la dirección del movimiento de las olas y extraen la energía progresivamente. Estos dispositivos capturan energía mediante el movimiento relativo de dos estructuras mecánicas unidas. El dispositivo Pelamis de la siguiente ilustración es un ejemplo que se basa en la estructura articulada que dispone entre sus nodos de unión un sistema hidráulico que actúa sobre un generador eléctrico.



Ilustración 10. Dispositivos Pelamis en array. Fuente: Maritime Journal

- Los captadores puntuales son dispositivos aislados que aprovechan la concentración y convergencia del oleaje. Estos captadores son básicamente de traslación, como por ejemplo las boyas Power Buoy de la siguiente ilustración. Las boyas obtienen energía del movimiento relativo entre el flotador y la columna oscilante mediante un sistema hidráulico que acciona un generador. La salida eléctrica se transforma de baja a media tensión en una subestación submarina conectada mediante una línea eléctrica a la subestación de la costa.

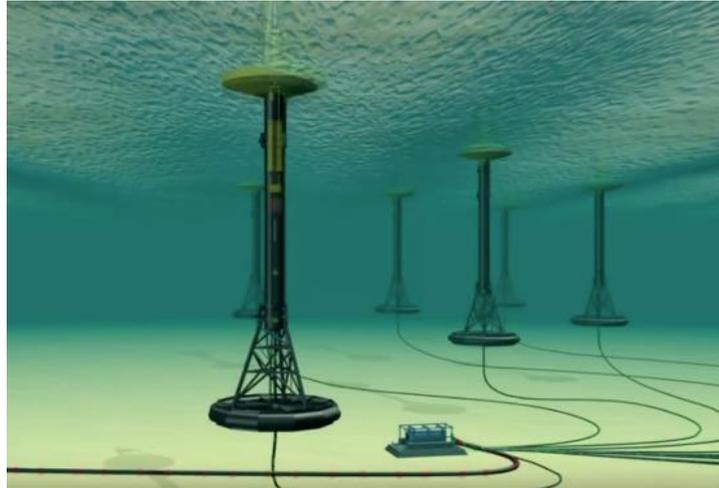


Ilustración 11. Power Buoy. Fuente: OPT (Ocean Power Technologies)

- Por su movimiento relativo respecto de las olas: con estructura fija y flotantes o semi-sumergidos. Aunque los dispositivos pueden instalarse en distintas localizaciones del océano, la mayoría se han ubicado cerca de la costa. Los dispositivos de estructura fija se anclan al fondo del mar de forma que la estructura principal no se mueve. No obstante, disponen de elementos que pueden desplazarse respecto de ella y convierten la energía del oleaje en energía mecánica, que es generalmente transformada en energía eléctrica. Estos dispositivos son más fáciles de fabricar y mantener que los dispositivos flotantes; pero, presentan varios inconvenientes:
 - El reducido número de zonas de la costa donde se pueden instalar.
 - Capturan mucha menos energía debido a que las olas en aguas profundas disponen de más energía que las olas de las aguas más cercanas a la costa.

Los sistemas ubicados en tierra más conocidos son las columnas oscilantes de agua (OWC: *Oscillating Water Column*). Las OWC consisten en una estructura hueca, parcialmente sumergida y abierta al mar por su parte inferior. Esta estructura encierra una columna de aire en la parte superior de la columna de agua.

Cuando las olas inciden, la columna de agua sube y baja, con lo que columna de aire se comprime y descomprime alternativamente. Así, este aire atrapado fluye a través de una turbina, puede extraerse energía mecánica del sistema y generar electricidad acoplando a la turbina un generador eléctrico.

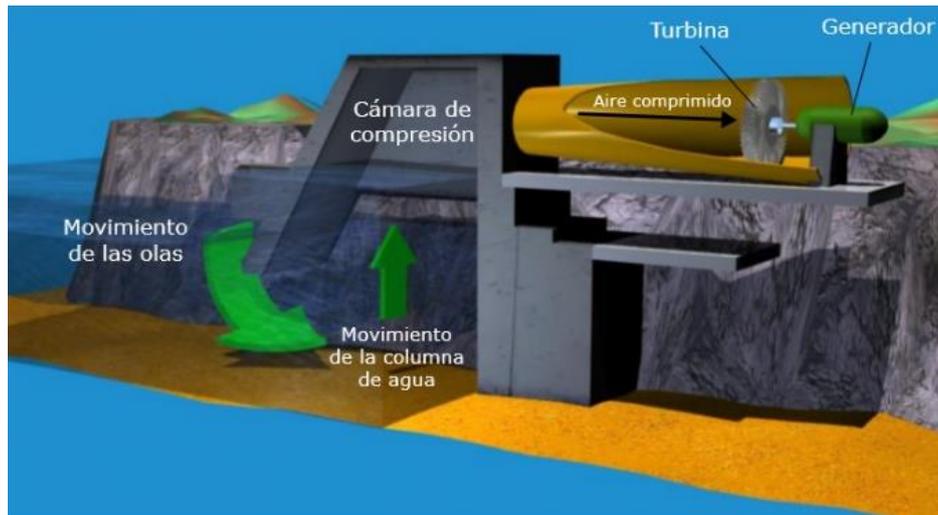


Ilustración 12. Instalaciones de columna oscilante de agua (OWC) [1]

Las turbinas más utilizadas son las turbinas Wells: tienen la ventaja de rotar en el mismo sentido independientemente del sentido en el que el aire pase. Esto es debido a que estas turbinas poseen unos álabes de perfil simétrico situados perpendicularmente al eje de rotación.

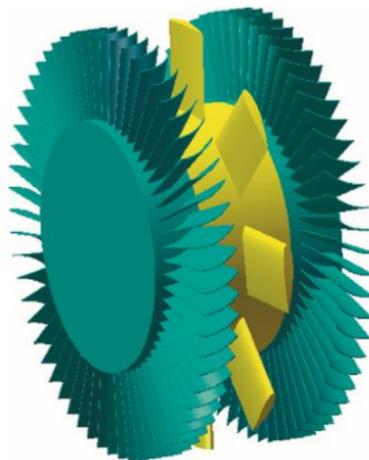


Ilustración 13. Turbina Wells [3]

El perfil simétrico y el posicionamiento de los álabes de las turbinas Wells provocan dos efectos: un menor rendimiento y la imposibilidad de autoarranque. Sin embargo, al funcionar con flujos de aire en ambos sentidos, el rendimiento neto de la turbina Wells es superior al de una turbina unidireccional. Respecto a la dificultad de arranque, se resuelve con la utilización de generadores asíncronos que puedan funcionar como motores para iniciar el movimiento.

Otro tipo de turbina utilizada es la turbina birradial. Esta turbina presenta álabes simétricos posicionados en la dirección del eje de rotación. Dos anillos de toberas,

situados a ambos lados de la turbina, orientan el flujo de aire de modo que en cualquiera de los dos sentidos de circulación de aire se impulse al rotor en el mismo sentido de giro. El conjunto de posicionamiento de las toberas y de los álabes de la turbina permite el autoarranque.

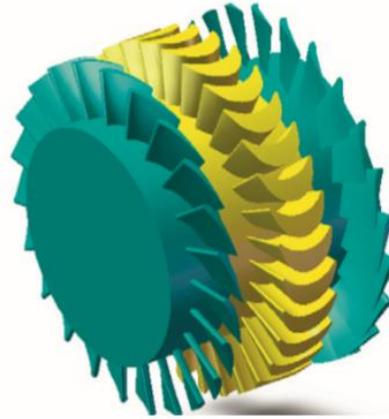


Ilustración 14. Turbina birradial [3]

Cabe destacar que el Instituto Técnico Superior de Lisboa realiza estudios y análisis de estas turbinas.

Finalmente, en el presente trabajo, se analiza un captador de energía de las olas flotante. El mencionado problema de bidireccionalidad se resuelve mediante una bomba oleohidráulica de doble efecto con válvulas rectificadoras, cuyo rendimiento es superior al de las turbinas citadas. No obstante, su coste de mantenimiento es algo superior.

1.6. Análisis de riesgos

En todos los proyectos es imprescindible realizar un análisis de riesgos respecto a la implantación del sistema propuesto.

En el presente trabajo el sistema es un captador de energía de las olas llamado RM3. Los riesgos de la implantación de este proyecto se pueden dividir en 2 grupos: riesgos producidos a lo largo de la trayectoria de las distintas etapas del proyecto y riesgos que surgen una vez implantado sistema captador de energía.

Como todo proyecto de investigación, a lo largo del desarrollo del mismo se pueden dar muchos problemas: algunos previsible y otros completamente impredecibles. En primer lugar, estos proyectos suelen tener una duración de muchos años, por lo que la financiación existente en un primer momento puede ir reduciéndose a medida que transcurre el tiempo. Asimismo, la tecnología que se está desarrollando puede quedar obsoleta por la aparición de tecnologías más rentables. También es posible que prototipos a pequeña escala den resultados positivos y al aumentar el tamaño del dispositivo los resultados sean tan distintos que haya que volver a repetir todo el proceso.

Por otro lado, una vez implantado el sistema también hay riesgos que hay que tener en cuenta. El dispositivo puede interferir con las trayectorias naturales de la fauna marina, y de la misma manera podría ocasionar accidentes de buques mercantes. Por ello, es preciso seleccionar correctamente la ubicación en la que implementar el proyecto. Además, los dispositivos pueden perjudicar el paisaje o un gran temporal podría llevarse el captador de energía de las olas si no está correctamente amarrado.

En consecuencia, antes de implementar el proyecto es necesario tener todos estos factores en cuenta y tomar las medidas pertinentes para reducir las posibilidades de que los riesgos potenciales se conviertan en realidades.

2. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1. Planificación del proyecto

La planificación es la base para monitorizar y controlar el trabajo. Por este motivo, en las próximas líneas vienen se describen las tareas y los hitos que se han definido para la realización del proyecto.

2.1.1. Tareas

El desarrollo del proyecto se divide en 5 tareas principales. A continuación, se detalla cada tarea, incluyendo el nombre y la descripción de la tarea, los recursos humanos y técnicos necesarios, la carga de trabajo, la duración en días naturales y los entregables a generar dentro de cada tarea.

T.1. Estudio de la teoría del oleaje

- Descripción: Estudio de las distintas teorías para definir el oleaje. En primer lugar, se estudia la teoría de Airy junto con los fenómenos de propagación del oleaje (shoaling, refracción, reflexión, difracción y rotura de la ola). A continuación, se ahonda la descripción espectral del oleaje. Finalmente, se analiza el cálculo del potencial de las olas.
- Duración: 1 mes.
- Responsable y recursos humanos: Una estudiante de cuarto curso del grado en Ingeniería en Tecnología Industrial
- Carga de trabajo: 25 horas
- Recursos técnicos: un ordenador
- Entregable UE.1.: Para dar por finalizada la tarea se deberá entregar un documento que recoja el estudio completo de la teoría del oleaje.

T.2. Estudio del estado del arte

- Descripción: Realización del estudio de los diferentes dispositivos convertidores de energía undimotriz existentes.
- Duración: 1 mes.

- Responsable y recursos humanos: Una estudiante de cuarto curso del grado en Ingeniería en Tecnología Industrial
- Carga de trabajo: 20 horas
- Recursos técnicos: un ordenador
- Entregable UE.2.: Para dar por finalizada la tarea se deberá entregar un documento que recoja un resumen del estado del arte de los dispositivos WEC.

T.3. Aprendizaje del empleo del simulador

- Descripción: Esta tarea está dedicada entender cómo funciona el simulador WEC-Sim. Para ello, se realiza una comprensión del código completo y se simulan los dispositivos disponibles en los tutoriales.
- Duración: 4 mes.
- Responsable y recursos humanos: estudiante de cuarto curso del grado en Ingeniería en Tecnología Industrial
- Carga de trabajo: 60 horas
- Recursos técnicos: un ordenador y la licencia de Matlab/Simulink
- Entregable: ---

T.4. Creación del modelo

- Descripción: Definición y creación del modelo del dispositivo WEC mediante la programación en Matlab y los modelos de Simulink.
- Duración: 1 mes.
- Responsable y recursos humanos: Una estudiante de cuarto curso del grado en Ingeniería en Tecnología Industrial
- Carga de trabajo: 30 horas
- Recursos técnicos: un ordenador y la licencia de Matlab/Simulink
- Entregable UE.4.: Para dar por finalizada la tarea se deberán entregar el archivo que contiene el modelo y los códigos para poder ejecutar la simulación.

T.5. Simulación

- Descripción: Se realiza la simulación del modelo creado en todos los posibles escenarios. Asimismo, se analizan los resultados obtenidos y se obtienen las conclusiones.
- Duración: 2 mes.
- Responsable y recursos humanos: Una estudiante de cuarto curso del grado en Ingeniería en Tecnología Industrial
- Carga de trabajo: 45 horas
- Recursos técnicos: un ordenador y la licencia de Matlab/Simulink
- Entregable UE.4.: Para dar por finalizada la tarea se deberán entregar un documento que recoja los gráficos obtenidos de las simulaciones, así como un documento que explique los resultados obtenidos.

2.1.2. Hitos

Para el control del progreso del proyecto se definen 3 hitos, que permiten hacer una evaluación del estado del proyecto al finalizar cada etapa del proyecto.

H.1. Estudio finalizado

- Descripción: Queda completado el estudio y la recopilación de información sobre las olas y los dispositivos capaces de extraer energía de ellas.
- Predecesores: T.1. y T.2.

H.2. Funcionamiento del simulador entendido

- Descripción: El empleo de la herramienta de simulación WEC-Sim queda dominado.
- Predecesores: T.3.

H.3. Simulación completada

- Descripción: La simulación finaliza correctamente
- Predecesores: T.4.

2.1.3. Diagrama de Gantt

El proyecto comienza el 20 de septiembre y finaliza el 29 de mayo, con tiempo suficiente para poder redactar y entregar el trabajo de fin de grado a finales de junio. A continuación, se presenta el diagrama de Gantt.

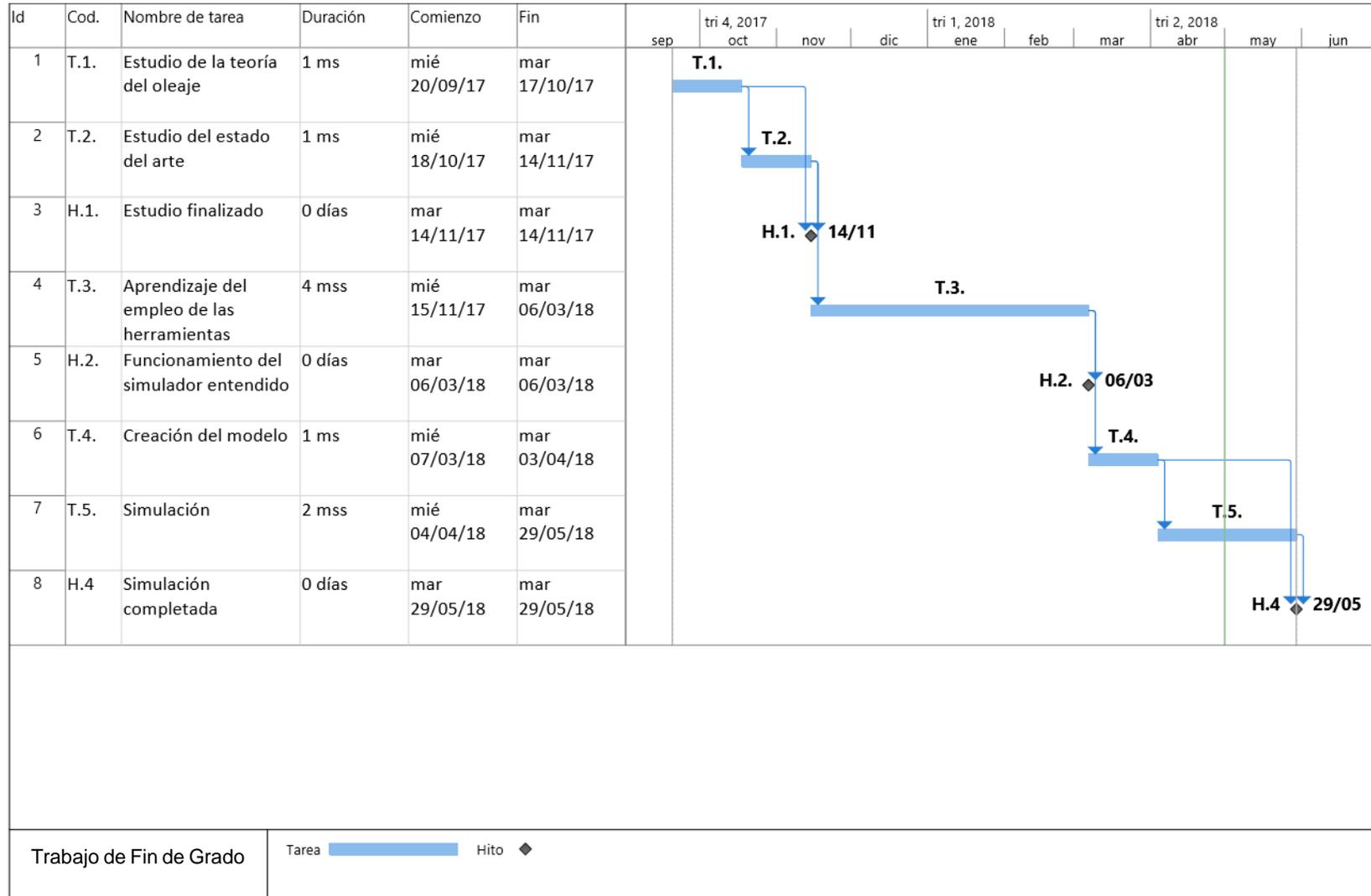


Ilustración 15. Diagrama de Gantt

2.2. Contexto teórico

Para poder realizar y entender el presente trabajo, es imprescindible asentar una base teórica mínima. Por ello, en este apartado se describen la generación de las olas, la teoría de Airy o teoría de Stokes de primer orden y la teoría espectral del oleaje. Finalmente, se explica el potencial del oleaje, concepto en el que se basan los cálculos del proyecto.

Los documentos sobre los que se apoya este apartado son «Capítulo 22: Energía del oleaje» [1] y «Descripción, medida y análisis del oleaje» [6].

2.2.1. ¿Qué son las olas? ¿Cómo se generan?

Todo tipo de oscilación en la superficie del agua que sea periódica se denomina ola. Las olas de los océanos son originadas por diversas causas. Entre estas causas cabe destacar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la luna y el sol sobre las masas oceánicas, los maremotos y las tormentas.

No obstante, de todas ellas, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes y de mayor densidad energética. El viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre. Cuando el viento sopla sobre la superficie del mar, se genera una fuerza entre el agua y el aire que da lugar a pequeños rizos (olas de capilaridad), aumentando así la superficie de contacto y la fricción. De esta forma, el viento transmite más energía a las olas y éstas van incrementando su tamaño.

Una vez formadas las olas pequeñas, el viento que sigue soplando produce torbellinos tras cada cresta que, al provocar pequeñas sobrepresiones, aumentan su altura.

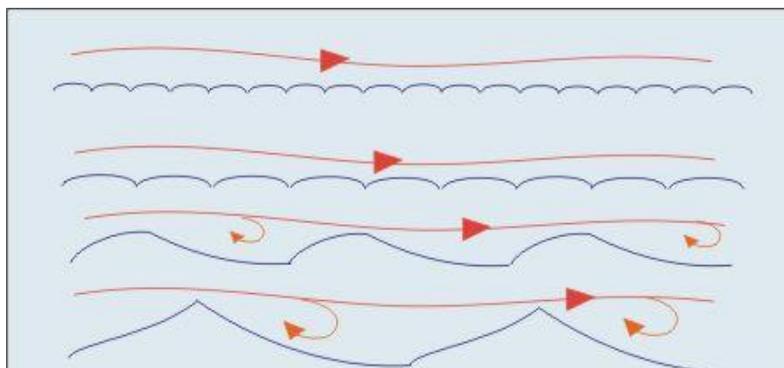


Ilustración 16. Generación de las olas. Fuente: *fondear.org*

La relación entre la velocidad del viento, su dirección constante y la distancia recorrida entre dos puntos se denomina *Fetch*. Se mide en millas y cuanto mayor sea, mayor será la altura de las olas. El número de horas que el viento ha estado soplando en la misma dirección se llama persistencia.

Cuando las olas se han generado en medio del océano o en aguas profundas, la ola no encuentra resistencia y puede transportarse cientos de millas, mucho más allá de la zona de viento donde fue generada, y solo perderá su fuerza cuando entre en contacto con la superficie del lecho marino al acercarse a la costa o si se encuentra en su camino con vientos contrarios.

Si no encuentran resistencia alguna, estas olas pueden llegar a costas bastante alejadas produciendo, así, el mar de fondo. Éstas olas son grandes, aparentemente lentas, regulares y suaves, pues las olas más pequeñas desaparecen al abandonar el área de generación.

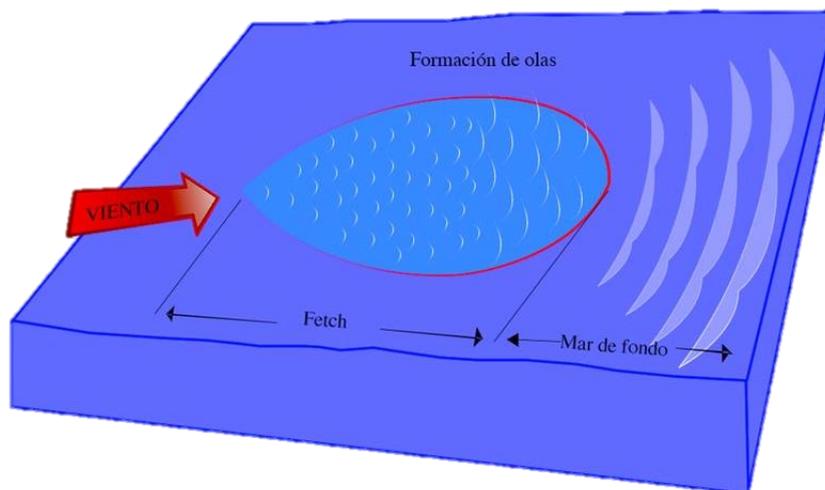


Ilustración 17. Fetch y mar de fondo. Fuente: *sailandtrip.com*

Una ola oceánica en aguas profundas aparenta un objeto en movimiento: una cresta de agua que viaja a través de la superficie del mar. Sin embargo, esto no es así. Una ola oceánica es el movimiento de la energía; es decir, el agua de la superficie se mueve hacia arriba y hacia abajo, no hacia la orilla. En otras palabras, el comportamiento de las olas es similar al de una cuerda fija en un extremo y con movimiento vertical en el otro.

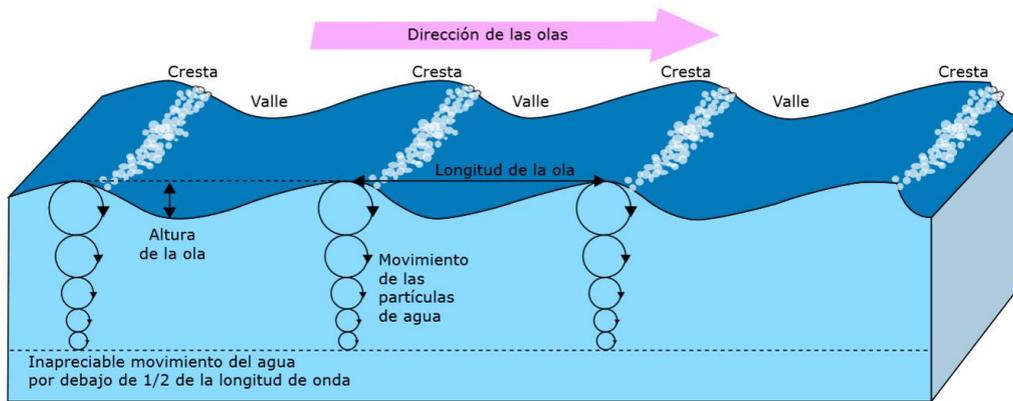


Ilustración 18. Movimiento de las moléculas de agua en las olas [1]

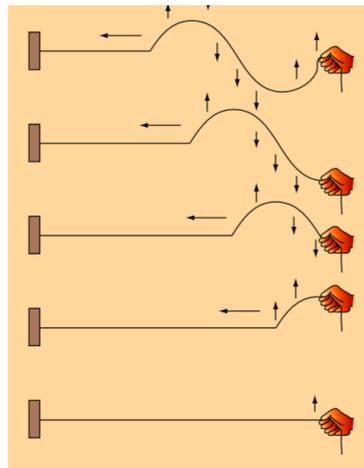


Ilustración 19. Símil del movimiento de las olas con una cuerda [1]

Por otro lado, la escala Douglas es una escala que clasifica los diferentes estados del mar en 10 grados, tomando como referencia el tamaño de las olas.

Grado	Altura (m)	Denominación
0	0	Mar llana o en calma
1	0 – 0,1	Mar rizada
2	0,1 – 0,5	Marejadilla
3	0,5 – 1,25	Marejada
4	1,25 – 2,5	Fuerte marejada
5	2,5 – 4	Mar gruesa
6	4 – 6	Mar muy gruesa
7	6 – 9	Arbolada
8	9 – 14	Montañosa
9	> 14	Enorme

Tabla 4. Escala Douglas

En conclusión, podría decirse que la energía que poseen las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. En este sentido, las olas oceánicas constituyen una forma de almacenar energía solar.

2.2.2. Teorías para definir el oleaje

El estudio de las ondas reales es muy complejo, según se van adoptando simplificaciones su estudio resulta más abordable y más alejado de la realidad. Las más conocidas son la teoría de Airy y la descripción espectral del oleaje.

2.2.2.1. Teoría de Airy

La teoría de Airy (onda lineal o de pequeña amplitud), o teoría de Stokes de primer orden, hace las siguientes simplificaciones:

1. Fluido homogéneo e incompresible $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$
2. Se desprecia la tensión superficial, el efecto de Coriolis y la viscosidad
3. Fluido irrotacional $\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0$
4. La presión en la superficie libre es uniforme y constante
5. Fondo plano, profundo e impermeable
6. La onda es regular y bidimensional (no evoluciona en el tiempo ni en el espacio)
7. La ola no interactúa con ningún otro movimiento del fluido y no hay pérdida de energía.
8. La amplitud de la onda es pequeña con relación a la longitud de onda y al fondo.

En esta teoría el perfil de ola en altamar es simétrico y describe una función senoidal. Los parámetros principales que definen esta ola son:

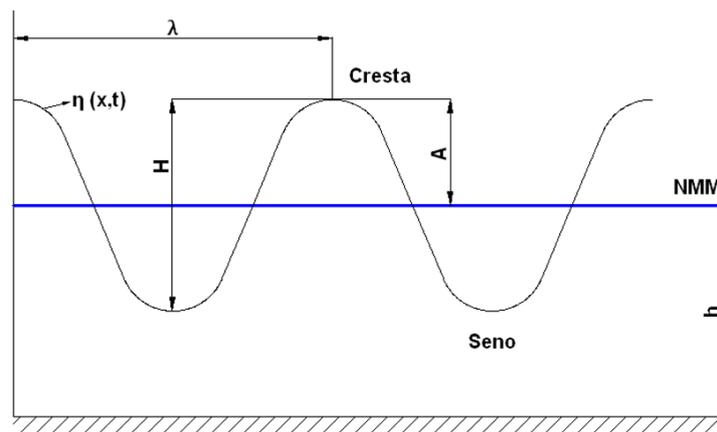


Ilustración 20. Parámetros principales de una ola [6]

- NMM: nivel medio del mar

- η : elevación de la superficie libre a partir de $z = 0$

- A: amplitud de la ola
- $H=2A$: altura de la ola
- h: profundidad del mar
- λ : longitud de la ola
- k: número de ola $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- T: período de la ola, equivale al tiempo que tarda la ola en recorrer la distancia equivalente a una longitud de ola
- c: velocidad de propagación de la ola (celeridad) $c = \lambda/T = \omega/k$
- ω : Es la frecuencia angular $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Lo que se observa en la superficie del mar es la superposición de ondas. La envolvente de estas olas viaja a una velocidad distinta a la de las ondas individuales y se denomina velocidad de grupo, c_g . En aguas profundas la velocidad de grupo va rezagada con respecto la velocidad individual de una ola, mientras que en aguas poco profundas ambas velocidades se igualan.

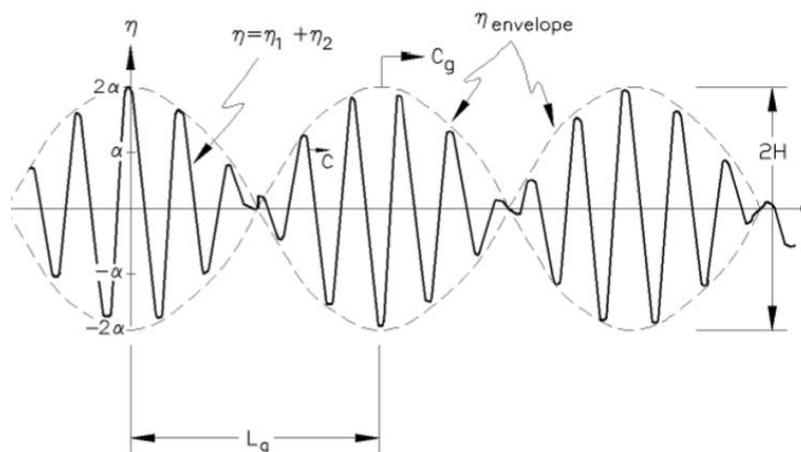


Ilustración 21. Superposición de ondas [6]

Las ecuaciones de la onda de Airy se obtienen integrando las ecuaciones de conservación de masa y de momento.

- Ecuación laplaciana de conservación de masa. Siendo ϕ la función potencial de velocidad: horizontal u , vertical ϖ .

$$u(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

$$\varpi(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2)$$

- Ecuación de conservación de momento. Siendo P : presión, ρ_ω : densidad del fluido (agua) y g : gravedad.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_\omega} + g \cdot z = 0 \quad (3)$$

- Condiciones de contorno.

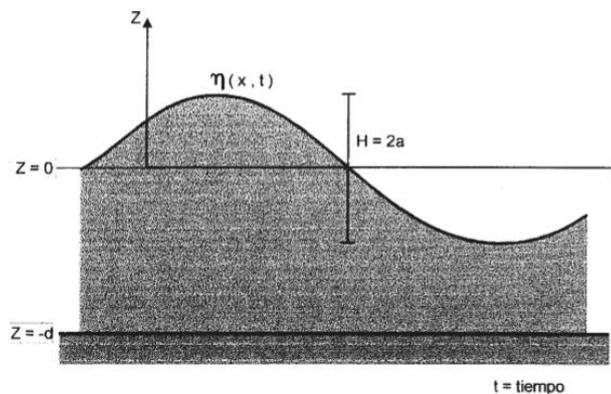


Ilustración 22. Sistema de referencia en la teoría de Airy [6]

1. Presión atmosférica en la superficie libre:

$$\left. \begin{array}{l} z = \eta \\ P = 0 \end{array} \right\} -\frac{\partial \phi}{\partial t} + g \cdot \eta = 0 \quad (4)$$

2. Al no existir transporte de fluido en la superficie libre, la velocidad vertical de la superficie libre ha de coincidir con la del fluido:

$$\varpi = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (5)$$

Para $z = \eta$, al ser la amplitud pequeña con relación a L , puede asumirse $\frac{\partial \eta}{\partial x}$ es pequeña:

$$\varpi = \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (6)$$

3. Análogamente, no puede haber movimiento vertical en el fondo al suponerse éste sólido, rígido e impermeable.

$$\text{Para } z = -d \rightarrow \varpi = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Así, la ecuación a integrar es:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l}
 -\frac{\partial \phi}{\partial t} + g \cdot \eta = 0, \quad z=0 \\
 \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad z=0 \\
 -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z=-d
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \text{Aplicando estas condiciones e integrando:} \\
 \phi(x, z, t) = \frac{ag}{\omega} \cdot \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh[kd]} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (9)
 \end{array}$$

La ecuación que define la superficie (línea) de separación entre el agua y el aire, la superficie libre, $\eta(x,t)$, que cumple como condición de contorno: $-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g \cdot \eta = 0, z=0$

$$\eta = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0} = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t) = \frac{H}{2} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x - \frac{2\pi}{T} \cdot t \right) \quad (10)$$

Así pues, la superficie libre del cuerpo de agua oscilante viene definida por: H, λ y T .

Por otro lado, se obtiene:

$$\left. \begin{array}{l}
 -\frac{\partial \phi}{\partial t} + g \cdot \eta = 0, \quad z=0 \\
 \varpi = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad z=0
 \end{array} \right\} \omega^2 = g \cdot k \cdot \text{tgh}(k \cdot d), \quad z = 0 \quad (11)$$

Lo que significa que existe una relación única, en las ondas lineales, entre ω, k y d ; es decir, entre periodo (T), longitud de onda (λ) y profundidad (d). Conocidas 2 de ellas, se deduce la tercera:

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \text{tgh} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \right) \quad (12)$$

Ecuaciones del movimiento orbital de las partículas en el modelo de Onda Lineal de pequeña amplitud de Airy:

-Componente horizontal de velocidad orbital: $u(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$

-Componente vertical de velocidad orbital: $w(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial z}$

Sustituyendo y derivando ϕ :

$$u = \frac{A \cdot g \cdot k}{\omega} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (13)$$

$$w = \frac{A \cdot g \cdot k}{\omega} \cdot \frac{\sinh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{cos}(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (14)$$

El movimiento de desplazamiento horizontal y vertical de una partícula puede definirse:

$$\xi = \int u dt = \frac{A \cdot g \cdot k}{\omega^2} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{cos}(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (15)$$

$$\zeta = \int w dt = \frac{A \cdot g \cdot k}{\omega^2} \cdot \frac{\sinh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \text{sen}(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (16)$$

Sustituyendo en la expresión:

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \text{tgh}(k \cdot d) \quad (17)$$

Resulta:

$$\frac{\xi^2}{A^2} + \frac{\zeta^2}{B^2} = 1 \quad (18)$$

$$A = A \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\sinh(k \cdot d)} \quad (19)$$

$$B = A \cdot \frac{\sinh[k \cdot (d + z)]}{\sinh(k \cdot d)} \quad (20)$$

Ecuación que representa una elipse de semieje horizontal A y semieje vertical B.

Así pues, en la teoría de onda lineal de pequeña amplitud, las partículas se mueven en órbitas elípticas cerradas, que en aguas profundas $A=B$ se transforman en circunferencias.

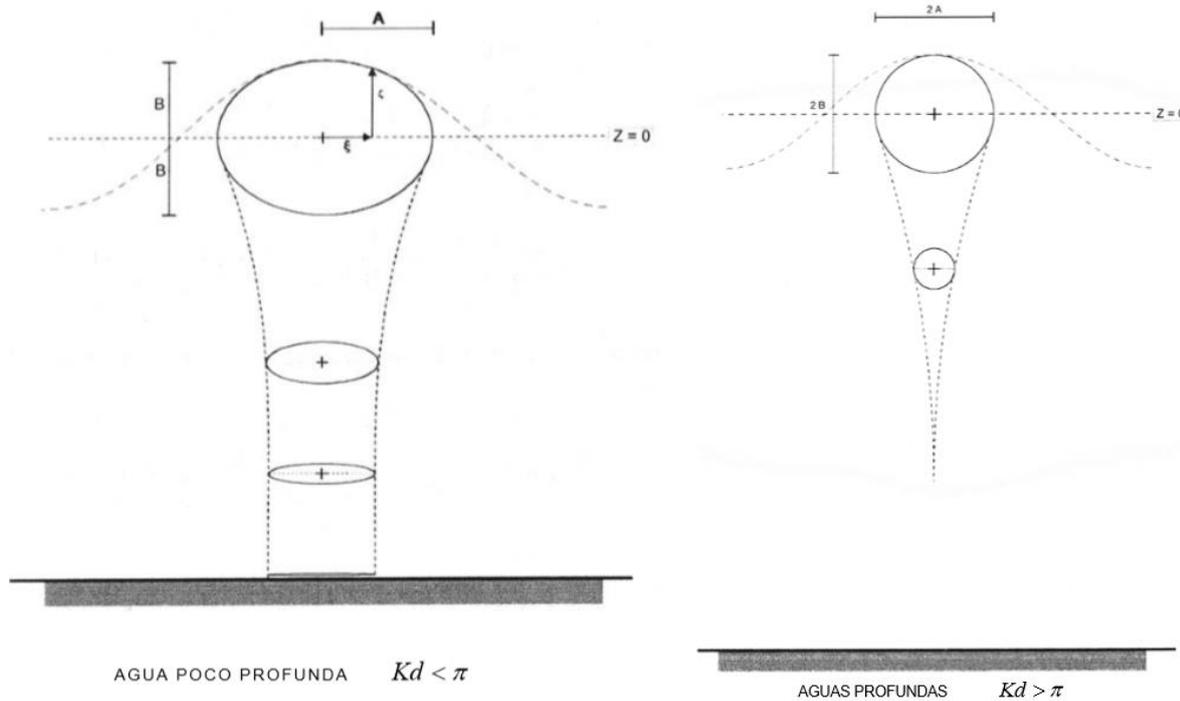


Ilustración 23. Aguas poco profundas y aguas profundas [6]

En aguas poco profundas las órbitas cada vez son más alargadas con la profundidad y en el fondo, la condición de borde $\varpi = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$ para $z=-d$, supone que: $\frac{\xi}{\zeta} \rightarrow \infty$, tienden a degenerar en segmentos rectilíneos.

- Presión en un punto

La influencia del oleaje sobre el fondo es despreciable para profundidades mayores de $\lambda/2$

$$k_p = \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \quad (21)$$

$$\frac{P}{\rho_\omega \cdot g} = k_p \cdot \eta - z \quad (22)$$

$$k_p(z = 0) = 1$$

$$k_p(z = -\lambda/2) = 0.04$$

El oleaje, caracterizado por su longitud de onda, (λ o k) y la profundidad d , permiten clasificarlo en aguas someras, de transición y profundas, pudiendo emplear distintas expresiones simplificadas según el caso.

Variación Funciones Hiperbólicas	$k \cdot d \rightarrow 0$	$k \cdot d \rightarrow \infty$
$\sinh(kd)$	kd	$e^{kd/2}$
$\cosh(kd)$	1	$e^{kd/2}$
$\tanh(kd)$	kd	1

Tabla 5. Variación de las funciones hiperbólicas. [6]

$k \cdot d$	d/L	CLASIFICACIÓN	
0 a $\pi/10$	0 a 1/20	AGUAS SOMERAS	$d \leq L/20$
$\pi/10$ a π	1/20 a 1/2	AGUAS INTERMEDIAS	$L/2 > d > L/20$
π a ∞	1/2 a ∞	AGUAS PROFUNDAS	$d \geq L/2$

Tabla 6. Clasificación del oleaje según la profundidad y la longitud de onda. [6]

Con esta clasificación pueden realizarse las aproximaciones siguientes:

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

Tabla 7. Aproximaciones de parámetros. [6]

2.2.2.1.1. Celeridad de grupo (Cg) y trenes de onda:

La ecuación de la superficie de una onda de Airy es:

$$\eta = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t) = \frac{H}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x - \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \quad (23)$$

Supongamos, por ejemplo, dos ondas, de igual amplitud (a) pero de diferente frecuencia ω_1 y ω_2 . Al admitir la onda de Airy el principio de superposición, la ecuación de la superficie libre será:

$$\begin{aligned} \eta &= A \cdot \text{sen}(k_1x - \omega_1t) + A \cdot \text{sen}(k_2x - \omega_2t) \\ &= 2A \cos[0.5(k_1 - k_2)x - 0.5(\omega_1 - \omega_2)t] \text{sen}[0.5(k_1 + k_2)x - 0.5(\omega_1 + \omega_2)t] \end{aligned} \quad (24)$$

Amplitud variable del nuevo tren de ondas: $2A \cos[0.5(k_1 - k_2)x - 0.5(\omega_1 - \omega_2)t]$

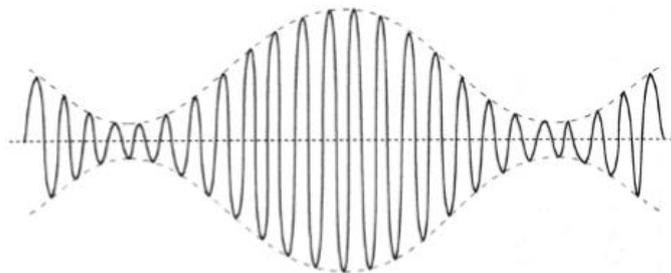


Tabla 8. Superposición de ondas [6]

La elevación de la superficie libre η es cero cuando la amplitud es cero, lo que ocurre para:

$$\frac{1}{2}(k_1 - k_2)x - \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t = (2m + 1) \cdot \frac{\pi}{2}, \text{ siendo } m \text{ un número entero } (0,1,2,3\dots)$$

El valor de x en los puntos de evaluación nula, nodos, es:

$$x_{nodo} = \left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \right] \cdot t + \frac{(2m + 1) \cdot \pi}{k_1 - k_2} \quad (25)$$

Y la velocidad de propagación del nodo, la celeridad de grupo, será:

$$Cg = \frac{dx_{nodo}}{dt} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \quad (26)$$

En el límite, y cuando ω_1 se aproxima a ω_2 :

$$Cg = \frac{d\omega}{dk} \quad (27)$$

Recordando la expresión: $\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)$

Y derivando se obtiene:

$$C_g = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \cdot c \quad (28)$$

Expresión que vale $\frac{1}{2}$ en aguas profundas y 1 en aguas someras.

De esta forma, en aguas someras las ondas individualmente se propagan a la velocidad del grupo; mientras que en aguas profundas el grupo, y la energía del oleaje, se propagan a mitad de velocidad que las ondas individualmente.

Por otro lado, puesto que el número de olas, si no se rompen, ha de ser el mismo en un tiempo dado entre dos puntos, los periodos T se conservan y por tanto la celeridad C y la longitud de onda

Finalmente, diversas investigaciones concluyen que la Teoría Lineal es razonablemente aproximada, siempre que la profundidad no varíe más de un 10-15% en $\lambda/2$.

2.2.2.2. OLEAJE REAL

El oleaje real, a diferencia de las ondas teóricas, es impredecible. No obstante, es analizable en términos de probabilidad; es decir, es un proceso estocástico, que varía de forma aleatoria en el espacio y en el tiempo.

Para el estudio de la componente de fluctuación del oleaje se hace la hipótesis de que es un proceso estacionario y homogéneo. Evidentemente, el oleaje real evoluciona en el tiempo: puede pasar de estar en calma a haber un temporal en un par de horas. Tampoco es homogéneo, pues sus principales características varían en el dominio del espacio. Por este motivo, el estudio del oleaje debe hacerse durante un periodo de tiempo suficientemente corto como para poder considerar que su contenido energético no ha variado sustancialmente, pero a su vez suficiente largo como para que la muestra del oleaje considerada resulte estadísticamente significativa. Por ejemplo, se podría hacer el estudio del oleaje con un periodo de unos 20 minutos (alrededor de 100 olas). Estos registros o acotaciones se denominan estados de mar.

2.2.2.2.1. DESCRIPCIÓN ESPECTRAL DEL OLEAJE

Los desplazamientos de la superficie libre del mar respecto de su nivel medio, tomados a intervalos iguales se ajustan a una distribución normal, por lo que el proceso aleatorio es definido como Gaussiano.

El teorema central del límite indica que, en condiciones muy generales, si S_n es la suma de n variables aleatorias independientes y de varianza no nula pero finita, entonces la función de distribución de S_n «se aproxima bien» a una distribución normal (distribución gaussiana, nuestro caso).

Consecuentemente, en realidad el océano no se compone de ondas senoidales puras, sino más bien son una superposición de muchas de ellas, cuya superficie puede ser reconstruida como suma de ondas de amplitud variable, llamada análisis espectral.

$$S_n = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n \quad (29)$$

Debido a que x_i son variables estadísticamente independientes, la distribución de probabilidad de la variable S_n , que es desconocida, tiene como media 0, y como varianza $n\sigma^2$ (momento de 2º orden), siendo n un número grande.

Se puede estandarizar la variable aleatoria en una nueva variable z :

$$z = \frac{\eta}{\sqrt{n \cdot \sigma}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\sqrt{n \cdot \sigma}} \right) \quad (30)$$

Si la función característica de x es $\phi_x(t)$, la función característica de z es:

$$\phi_z(t) = \left[\phi_x \left(\frac{t}{\sqrt{n \cdot \sigma}} \right) \right]^n \quad (31)$$

para $n \rightarrow \infty$ $\phi_2(t) = e^{-\frac{t^2}{2}}$

Mediante el desarrollo en serie de Fourier, la variación en un determinado lapso de tiempo en un punto concreto, de la superficie del mar, $\eta(t)$, puede describirse con aproximación suficiente mediante la suma de un número finito de ondas lineales de diferentes amplitudes (a_i), y frecuencias (ω_i) y fases (ϕ_i):

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (32)$$

La energía de una onda lineal, por unidad de anchura de cresta es:

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot L \quad (33)$$

Y la energía por unidad de área, denominada energía específica:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \quad (34)$$

Al ser aceptable el principio de superposición lineal, la energía específica de las n ondas que componen la serie de Fourier del caso del oleaje real es:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot \sum_{i=1}^n H_i^2 \quad (35)$$

Es decir:

$$\frac{\bar{E}}{\rho_w \cdot g} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n H_i^2 = \frac{\text{Energía específica}}{\text{densidad del agua x gravedad}} = \text{ENERGÍA [m}^2\text{]} \quad (36)$$

Sabemos que: $\frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n H_i^2 = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n a_i^2 = \sigma^2$, siendo σ^2 la varianza del registro (que se expresa en unidades de superficie).

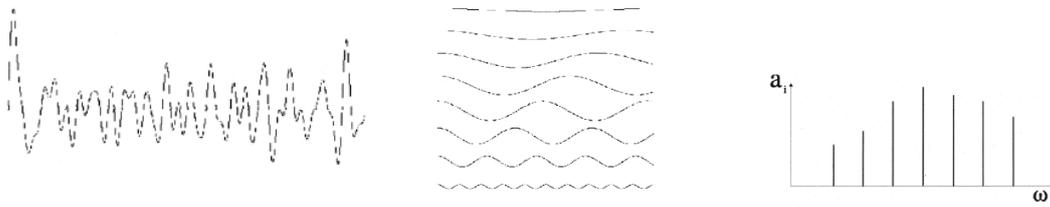


Ilustración 24. Registro real del oleaje $\eta(t)$, descomposición en n ondas y espectro frecuencial discreto [6]

Si se hiciese una descomposición con $n \rightarrow \infty$, el espectro frecuencial sería una función continua. A la función $S(\omega)$ se le denomina espectro frecuencial.

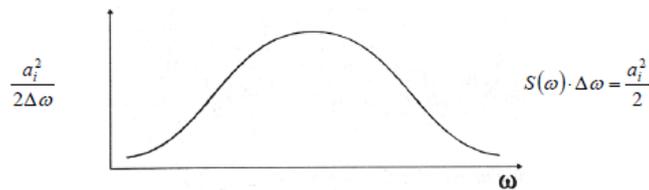


Ilustración 25. Espectro frecuencial [6]

La varianza del registro coincide con el área del espectro:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \frac{\bar{E}}{\rho_w \cdot g} \quad (37)$$

De esta forma, la varianza del espectro σ^2 tiene la ventaja de ser descriptiva del contenido energético del oleaje dado por unidad de superficie, y puede obtenerse a partir de un registro del mismo. Por ello, se puede considerar:

$$E = \frac{\bar{E}}{\rho_w \cdot g} = \sigma^2 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (38)$$

A partir de σ^2 no se pueden reconstruir las oscilaciones de la superficie libre del mar, pero es representativo del contenido energético de un determinado estado de mar. La obtención de σ^2 se hace midiendo en un punto durante un intervalo de tiempo, lo que supone aceptar la hipótesis previamente descrita de que el oleaje es un proceso estacionario y homogéneo.

Suponiendo que el oleaje tiene dos componentes de evolución en el tiempo: una rápida, que varía en segundos (componente de fluctuación) y otra en horas (componente de estado). La varianza espectral del registro (σ^2) es un valor representativo de la

componente de estado del oleaje en un instante y lugar dado, obtenida por la integración de las ondas que componen el análisis de Fourier.

No obstante, la descomposición espectral $\eta(t) = \sum_{i=1}^n a_i(\text{sen } \omega_i t + \phi_i)$ no considera la dirección de propagación. Un oleaje propagándose, según diferentes direcciones θ_i , admite la siguiente descomposición espectral:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \text{sen}[k_i(x \cos \theta_i + y \text{sen} \theta_i) - \omega_i t + \phi_i] \quad (39)$$

De esta descomposición puede definirse el espectro direccional $S(\theta)$ y la varianza espectral: θ^2 . Considerando el espectro completo $S(\omega, \theta)$:

$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (40)$$

Resulta habitual admitir que el espectro $S(\omega, \theta)$ admite la descomposición en el producto del espectro frecuencial $S(\omega)$ por el espectro direccional $S(\theta)$, cumpliendo el espectro direccional $S(\theta)$ la condición: $\int_0^{2\pi} S(\theta) d\theta = 1$. En este caso la varianza espectral τ^2 puede expresarse como:

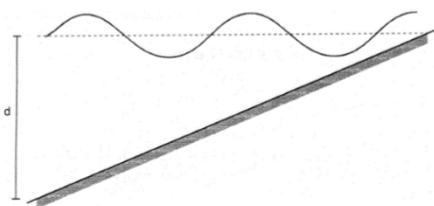
$$\tau^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) \cdot S(\theta) d\omega d\theta \quad (41)$$

2.2.2.3. Fenómenos de propagación del oleaje:

Cuando las olas se propagan ceden energía al agua que atraviesan y al aire, por lo que se van amortiguando progresivamente. Las olas más cortas son las primeras en desaparecer mientras que las más largas se propagan más lejos, atenuándose cada vez más de manera que su perfil llega a parecerse al de una senoide.

A medida que las olas se acercan a la costa, sus características se ven afectadas cuando la profundidad del agua comienza a ser menor que $\lambda/2$. Teniendo en cuenta que el número de olas, si no se rompen, ha de ser el mismo en un tiempo dado entre dos puntos, los periodos T se conservan y por tanto la celeridad C y la longitud de onda λ disminuyen (la velocidad ha de bajar desde $2 \cdot Cg_0$ a Cg), por causa de los fenómenos de propagación del oleaje. Estos fenómenos son el efecto shoaling, la refracción, la difracción, la reflexión y la rotura de ola.

2.2.2.3.1. Shoaling: efecto de rozamiento con el fondo

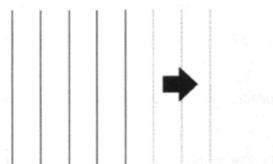


Como se ha explicado anteriormente, la energía por unidad de longitud de cresta es:

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot L$$

Y la energía por unidad de área, denominada energía específica:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2$$



BATIMETRÍA PARALELA A LA DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN

Ilustración 26. Shoaling [6]

El flujo de energía, también denominado Potencia del oleaje será:

$$\bar{P} = \bar{E} \cdot Cg \quad (42)$$

Puesto que la energía que entra en una zona ha de ser igual a la que sale, sino hay pérdidas, $\bar{E}_0 \cdot Cg_0 = \bar{E} \cdot Cg$ ($Cg_0 = Cg$ profundidades grandes, $Cg = Cg$ en la zona considerada).

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{Cg_0}{Cg}} = K_S \quad (43)$$

K_S : Coeficiente de Shoaling

K_s al disminuir la profundidad vale algo menos de 1, y luego sube rápidamente por encima de 1.

Al aumentar H , (y disminuir λ , además) el peralte H/λ , aumenta hasta alcanzar la ola la inestabilidad del talud y romper.

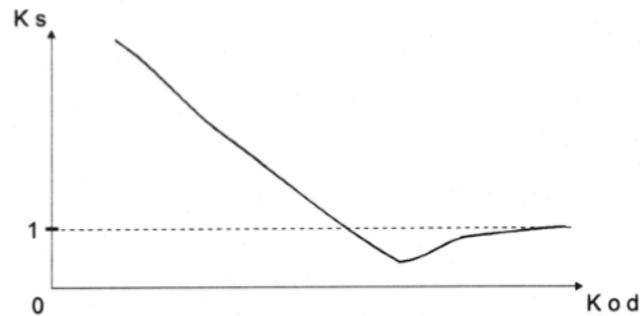


Ilustración 27. Coeficiente de Shoaling en función de la profundidad [6]

2.2.2.3.2. Refracción

Se define como el cambio de altura y dirección de propagación del frente de olas al acercarse a zonas de menor profundidad. El cambio de altura está relacionado con la variación de velocidad que a su vez está relacionada con la variación de la profundidad.

Si se supone un conjunto de rayos, que son las curvas ortogonales perpendiculares a los frentes de ola, que indican su dirección y que, están equiespaciados en aguas profundas, se observa que la dirección del frente de olas varía al variar la profundidad.

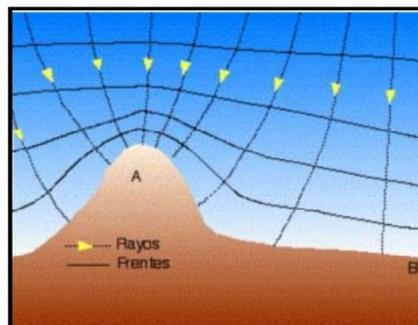


Ilustración 28. Curvas ortogonales o rayos [6]

De esta manera se comprueba que en zonas de menor profundidad se juntan, produciendo la convergencia de la energía de la ola, puesto que cada uno de ellos transporta la misma cantidad de energía, y en zonas de mayor profundidad se separan produciendo su divergencia, por lo que, estas variaciones en el frente de olas afectan a la distribución de la energía transportada por las olas a lo largo de la costa. En función

de cuál sea la concentración de energía por metro de frente de ola su altura aumenta o disminuye.

Comprobamos como la celeridad varía con la profundidad:

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \\ \omega^2 &= g \cdot k \cdot \operatorname{tgh}(k \cdot d) \end{aligned} \right\} C^2 = \frac{g}{k} \cdot \operatorname{tgh}(k \cdot d) \quad (44)$$

Si el frente de ondas se aproxima de forma oblicua a las líneas batimétricas, la profundidad será variable a lo largo de la cresta y por tanto la celeridad de onda también variará, como consecuencia las crestas se curvarán tendiendo a alinearse con las batimétricas.

Este fenómeno sigue la Ley de Snell que para batimetría recta y paralela es:

$$\frac{\operatorname{sen}\beta}{\operatorname{sen}\beta_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (45)$$

Donde:

β : ángulo comprendido entre el frente de ola y la curva de nivel de fondo en la zona de estudio.

β_0 : ángulo comprendido entre el frente de ola y la curva de nivel en la profundidad $h = \lambda/2$

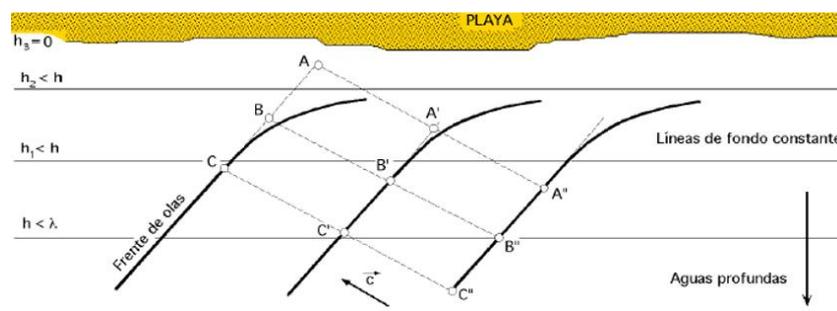


Ilustración 29. Refracción en un tren de olas [6]

Considerando la variación de velocidad del frente y la variación del ángulo de incidencia se obtiene la altura de ola como: $H = K_S K_R H_0$

Donde:

– H_0 : Es la altura de la ola en aguas profundas.

- K_S : Es un coeficiente para aguas poco profundas $K_S = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}}$ donde C_{g0} y C_g son las velocidades de grupo en aguas profundas y poco profundas respectivamente.

- K_R : Es el coeficiente de refracción $K_R = \sqrt{\frac{\cos\beta_0}{\cos\beta}}$

2.2.2.3.3. Reflexión

Este fenómeno se produce cuando la ola choca contra un obstáculo o barrera vertical, la ola se refleja con muy poca pérdida de energía. Así, si el tren de olas incidente es regular, se suman las ondas incidente y reflejada generando una onda estacionaria en la que se anulan mutuamente los movimientos horizontales permaneciendo únicamente los movimientos verticales, de doble altura (y doble energía).

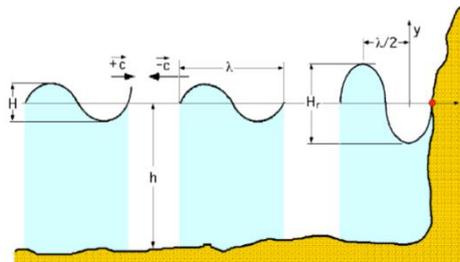


Ilustración 30. Reflexión [6]

2.2.2.3.4. Difracción

Este fenómeno consiste en la dispersión de la energía del tren de olas a sotavento de una barrera, con lo que se generan pequeños trenes de olas secundarios en que se disminuye la altura mientras que la velocidad y la longitud de onda no se modifican. Esta altura queda definida por el ángulo del oleaje incidente con respecto de la barrera, la longitud de la barrera, la profundidad del agua y la situación del punto, en la zona de difracción.



Ilustración 31. Difracción de las olas al encontrar un saliente marino [6]

2.2.2.3.5. Rotura de la ola

La rotura de una ola es un proceso que tiene lugar cuando la altura de la ola alcanza un valor crítico, generalmente por la acción del lecho marino, a partir del cual tienen lugar una serie de procesos que producen la pérdida de energía en la misma. Este factor es importante para conocer la altura máxima de la ola incidente, especialmente para el diseño de estructuras situadas en zonas de poca profundidad.

La rotura de ola se produce cuando ocurre alguna de las siguientes condiciones:

- La velocidad de las partículas de la cresta sobrepasa la celeridad de la onda.
- La presión de la superficie libre, dada por la ecuación de Bernoulli, es incompatible con la presión atmosférica.
- La aceleración de las partículas en la cresta tiende a separarlas de la superficie de la masa de agua.
- La superficie libre se pone vertical.

Entre muchos autores que analizaron este fenómeno, Iribarren y Nogales definieron el parámetro adimensional IR. Si $IR < 2,3$ las olas rompen y el coeficiente de reflexión es menor que 1. A medida que el parámetro IR se reduce, lo hace también el coeficiente de reflexión.

$$IR = \frac{m}{\sqrt{\frac{H}{\lambda_0}}} = \frac{\sqrt{m^2 \pi}}{k_0 A} \quad (46)$$

Donde:

- H: Es la altura de la ola.
- m: Es la pendiente del lecho marino.
- λ_0 : Es la longitud de la ola en grandes profundidades.
- K_0 : Es el número de onda en grandes profundidades.
- A: Es la amplitud de la ola.

2.2.3. Potencial

El potencial energético de las olas es enorme. Diversos estudios estiman que la energía mundial explotable es de 2 TWh/año y que las aguas europeas podrían cubrir más del 50 % del consumo de potencia del continente.

El tamaño y la energía que alcanzan las olas depende de tres factores básicos: la intensidad, la duración y el alcance. Además, aunque el viento sople constantemente las olas no crecen indefinidamente: para una velocidad concreta existen unos valores mínimos de duración y alcance, en que la energía que absorben las olas del viento se equilibra con la que pierden. Una vez llegado a este punto, las olas dejan de crecer por rompimiento de la cresta, dando lugar al océano en completo desarrollo.

La potencia P , en kW por metro de ancho de ola, contenida en una ola idealizada puede expresarse según la siguiente ecuación:

$$P = \frac{g^2 \cdot \rho_w \cdot H^2 \cdot T}{32\pi \cdot 1000} \quad (47)$$

Donde:

- g : aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)
- ρ_w : densidad del agua del mar (1025 kg/m³)
- H : altura de la ola (m)
- T : periodo de la ola (s)

La potencia total en cada metro de frente de ola del mar irregular es la suma de las potencias de todos sus componentes. Como no es posible medir todas las alturas y periodos, se estima la potencia total mediante una media. Utilizando dispositivos de medida de las características de las olas o satélites se puede recopilar la variación del nivel de la superficie del mar. Con esta información se puede calcular:

- la altura significativa de las olas H_s : altura promedio de la tercera parte de las olas más altas
- el periodo energético o periodo de nivel cero T_e : periodo de tiempo que transcurre entre valores sucesivos el paso de una ola dos veces consecutivas por una línea imaginaria situada a la mitad de la distancia entre una cresta y un valle.

En un mar irregular habitual, la potencia media total en kW/m es:

$$P_s = \frac{g^2 \cdot \rho_w \cdot H_s^2 \cdot T_e}{64\pi \cdot 1000} \approx 0,49 \cdot H_s^2 \cdot T_e \quad (48)$$

Sin embargo, el potencial de las olas se encuentra distribuido de forma desigual: aquellos lugares sujetos a vientos regulares son los que disponen de mayor energía del oleaje. Así, la actividad de las olas se ve incrementada entre las latitudes 30° y 60° de ambos hemisferios. Los vientos procedentes del Golfo de México, con dirección predominante del noroeste, cruzan el Atlántico y tienen varios miles de kilómetros para transferir energía al Océano Atlántico, creando grandes olas que llegan a la costa europea.

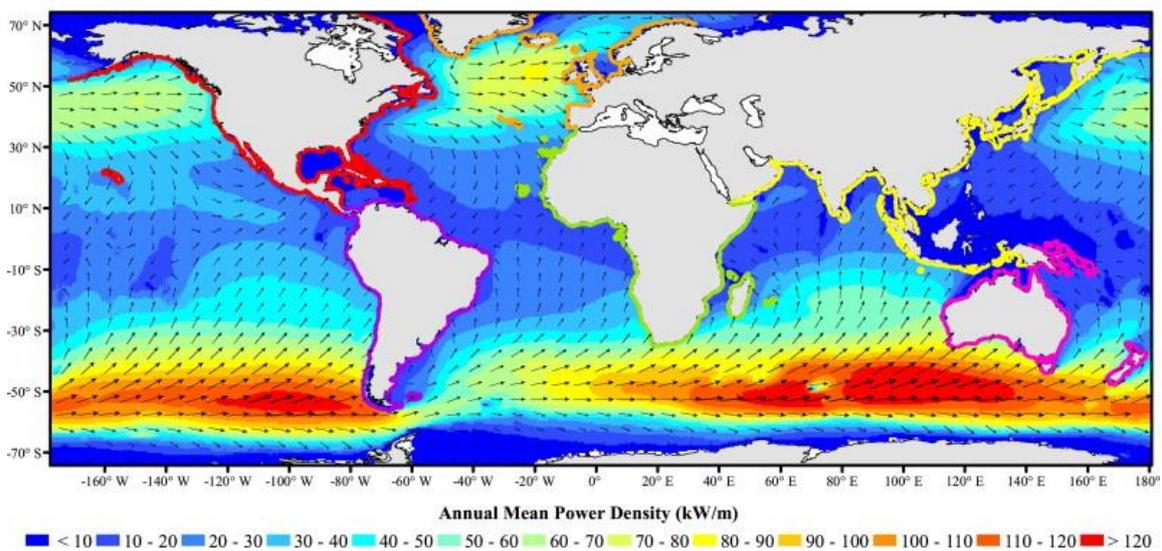


Ilustración 32. Energía de las olas (kW/m) en función de latitudes. Fuente: *sciencedirect.com*

En la siguiente ilustración se muestra una distribución global de la energía de las olas en kW por metro de ancho de ola, en varios lugares del mundo.

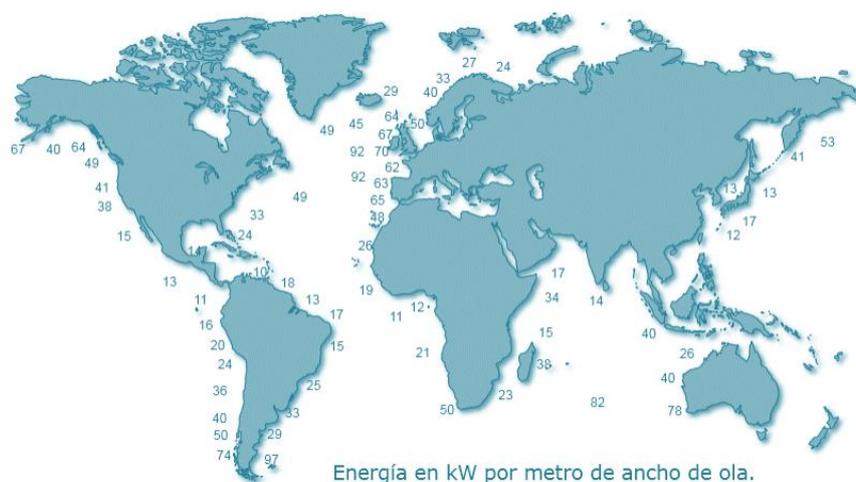


Ilustración 33. Distribución global de la energía de las olas (kW/m²) [1]

Para absorber la máxima energía de una ola los dispositivos deberían diseñarse para interceptar completamente los movimientos circulares de las partículas de agua, es decir, desde la superficie hasta las profundidades. No obstante, a la hora de decidir cuanto debe introducirse, bajo la superficie del mar, un dispositivo, hay que tener presente que el 95% de la energía de una ola se encuentra en la franja comprendida entre la superficie y una profundidad de un cuarto de longitud de onda.

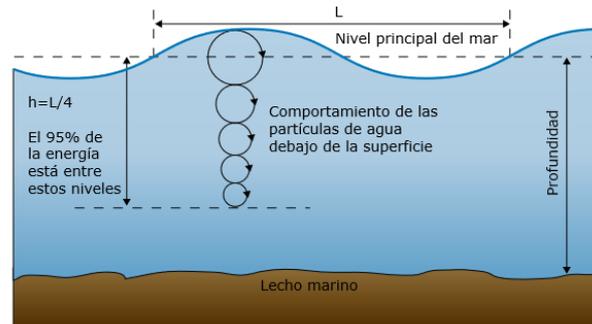


Ilustración 34. Comportamiento de las partículas de agua bajo la superficie del mar [1]

Finalmente, en aguas poco profundas la ola pierde gradualmente su potencia, debido a la fricción que se produce entre las partículas de agua más profundas y el fondo del mar.

2.3. Herramienta de simulación: WEC-Sim

En esta sección del trabajo se explica y desarrolla el funcionamiento del simulador utilizado para la realización de la evaluación computacional del dispositivo objeto de estudio RM3, que será analizado más adelante.

La documentación sobre la que se apoya este apartado es la página web «WEC-Sim» [7].

2.3.1. WEC-Sim

WEC-Sim (Wave Energy Converter Simulator) es un código abierto de simulación computacional destinado al análisis y la optimización de dispositivos de captación de energía del oleaje. Este simulador es una herramienta que surge por la colaboración del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) y de los Laboratorios Nacionales de Sandia, que fue fundada por el departamento del gobierno estadounidense de Tecnologías de Potencia de las Energía del Agua. Además, debido a su naturaleza *open-source*, WEC-Sim tiene muchos colaboradores externos.

Este código está desarrollado en Matlab/Simulink utilizando el *solver* de dinámica de cuerpos múltiples Simscape Multibody. Así, es capaz de modelizar dispositivos compuestos por sólidos rígidos, sistemas de extracción de potencia (PTO²) y sistemas de anclaje. Las simulaciones se llevan a cabo en el dominio del tiempo mediante la resolución de las ecuaciones de movimiento del dispositivo en los 6 grados de libertad.

Uno de los datos de entrada que WEC-Sim necesita imprescindiblemente para la simulación son los coeficientes hidrodinámicos: la masa añadida, el amortiguamiento por radiación y los coeficientes de excitación del oleaje. Estos coeficientes se obtienen mediante la ejecución de procesadores BEM³ como WAMIT, AQWA y Nemoh. No obstante, posteriormente se describen y explican estos coeficientes.

La versión 1.0 de este simulador se hizo pública en 2014. A medida que transcurrió el tiempo, fue necesario un módulo que modelizara con más precisión los distintos PTOs, por lo que surgió el módulo PTO-Sim (Power Take Off Simulator). PTO-Sim consiste en una librería de Simulink que alberga bloques que se pueden acoplar a distintos

² PTO es el acrónimo de Power Take Off y representa el sistema de extracción de potencia que tienen los convertidores de energía de las olas, como por ejemplo el pistón hidráulico.

³ BEM es el acrónimo de Boundary Element Method, que corresponde a softwares que emplean métodos de elementos finitos.

dispositivos WEC para modelizar distintos sistemas de extracción de potencia. La siguiente ilustración muestra los pasos que hay que llevar a cabo para poder realizar una simulación.

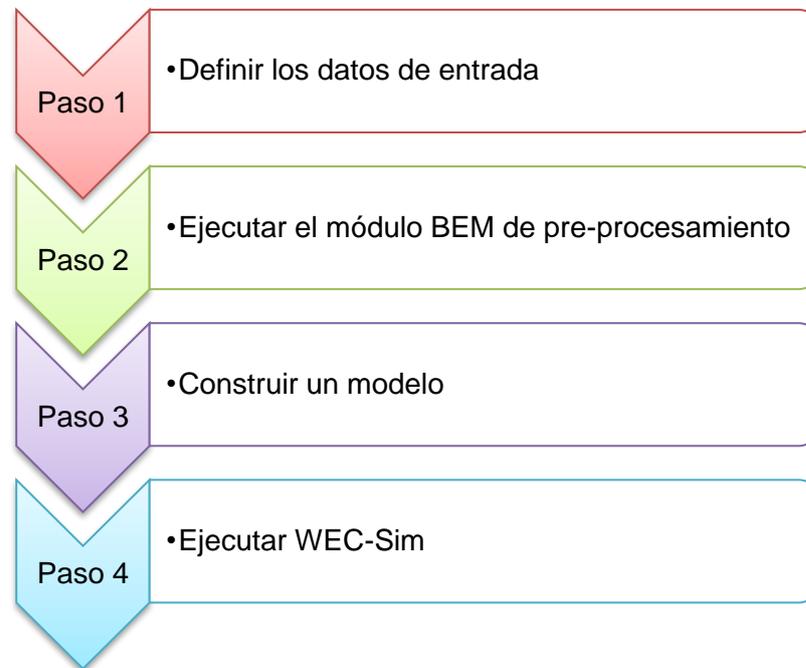


Ilustración 35. Pasos para construir y ejecutar un modelo WEC-Sim [elaboración propia]

Paso 1: Especificar los datos de entrada para el modelo del dispositivo: masa, momento de inercia de los sólidos y centro de gravedad. También hay que definir las especificaciones del oleaje: periodo, altura significativa (H_s) y el espectro del oleaje (en el caso de las olas irregulares).

Paso 2: Se utilizan los datos del paso 1 para ejecutar el preprocesador BEM que determina los coeficientes hidrodinámicos del sistema.

Paso 3: Construir un modelo Simulink del dispositivo con la dinámica de cuerpos múltiples con dominio en el tiempo, mediante la librería de WEC-Sim. Los modelos se crean arrastrando los bloques de la librería: cuerpos rígidos, restricciones y conexiones.

Paso 4: Una vez creado el modelo, ejecutar la simulación desde Matlab. El módulo SimMechanics ejecuta la simulación sumando las fuerzas con dominio en el tiempo a cada paso, y avanzando en el tiempo mediante el sistema de integración de Runge-Kutta de cuarto orden.

2.3.2. Teoría de WEC-Sim

Modelizar un dispositivo conversor de energía undimotriz implica la interacción entre las olas incidentes, el movimiento del dispositivo y el sistema de extracción de potencia (PTO).

WEC-Sim utiliza un método de radiación y difracción para poder predecir la potencia del diseño y su optimización. Este método obtiene las fuerzas hidrodinámicas mediante un método de elementos finitos (BEM) en el dominio de la frecuencia utilizando los coeficientes lineales para resolver el sistema dinámico en el dominio del tiempo. Estos coeficientes lineales sirven para modelizar las componentes de fuerzas de las olas.

2.3.2.1. Sistema de referencia

El sistema de coordenadas de la Ilustración 36 muestra un absorbedor puntual sujeto a las olas incidentes en el agua. La figura también define los 6 grados de libertad en los que se puede mover el dispositivo y que son utilizados por WEC-Sim. Los diferentes grados de libertad se comentan a continuación con más detalle.

El sistema de coordenadas asume que la dirección positiva del eje X coincide con la dirección de la propagación de las olas. El eje Z muestra el movimiento vertical y la dirección Y queda definida por la regla del sacacorchos. Estas tres direcciones se conocen como: avance o retroceso (x: *surge*), deriva (y: *sway*) y arfada (z: *heave*). Corresponden al primer, segundo y tercer grado de libertad, respectivamente.

De la misma manera, balance o rolo (Rx: *roll*), cabeceo (Ry: *pitch*) y guiñada de rumbo (Rz: *yaw*) corresponden al cuarto, quinto y sexto grado de libertad, respectivamente.

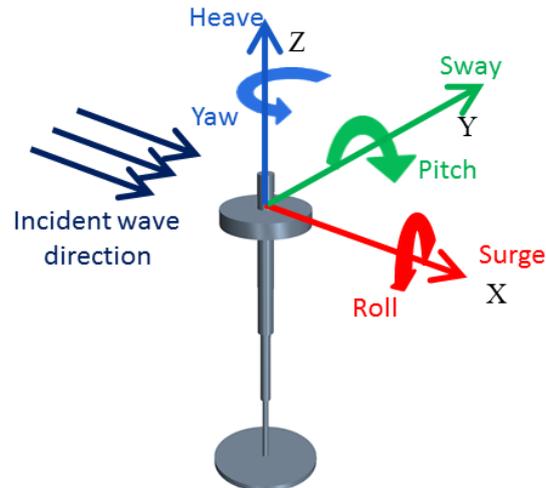


Ilustración 36. Sistema de referencia de WEC-Sim [7]

Por otro lado, la ola incidente queda definida como:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (49)$$

Donde:

- H : altura de ola [m]
- ω : frecuencia de ola [rad/s]
- K : número de ola [rad/m]
- Φ : fase de ola para las olas irregulares [rad]

Finalmente, todas las unidades dentro de WEC-Sim están en el sistema MKS (metros-kilogramos-segundos) y las medidas de ángulos se definen en radianes (excepto la dirección del oleaje, que se describe en grados).

2.3.2.2. Método de elementos finitos (BEM)

Generalmente se utiliza como aproximación para determinar las fuerzas hidrodinámicas la teoría lineal de las olas. Esta teoría asume que la ola se puede estudiar como la suma sus componentes de incidencia, radiación y difracción.

En WEC-Sim, estas componentes son modelizadas utilizando coeficientes lineales mediante los softwares BEM, transformando así las fuerzas hidrodinámicas en el dominio de la frecuencia en fuerzas hidrodinámicas con dominio en el tiempo. Las soluciones de BEM se obtienen resolviendo la ecuación de Laplace para la velocidad potencial, que asume que la corriente es no-viscosa, incompresible e irrotacional.

Los coeficientes hidrodinámicos adimensionales son importados o creados por WEC-Sim desde un archivo con formato *.h5*, que se obtiene a partir de la ejecución de procesadores BEM como WAMIT, AQWA y Nemoh y que únicamente contiene los datos hidrodinámicos del sistema. A continuación, WEC-Sim escala los coeficientes según las siguientes ecuaciones:

$$|\overline{F_{exc}(\omega)}| = \frac{|F_{exc}(\omega)|}{\rho g} \quad (50)$$

$$\overline{A(\omega)} = \frac{A(\omega)}{\rho} \quad (51)$$

$$\overline{B(\omega)} = \frac{B(\omega)}{\rho \omega} \quad (52)$$

$$\overline{K_{hs}} = \frac{K_{hs}}{\rho g} \quad (53)$$

Donde:

- ρ : densidad del agua [Kg/m^3]
- ω : frecuencia de ola [rad/s]
- g : aceleración de la gravedad [m/s^2]
- F_x , $A(\omega)$, $B(\omega)$: representan vectores de coeficientes adimensionales de incidencia, refracción y difracción

2.3.2.3. Método numérico con dominio en el tiempo

La respuesta dinámica del dispositivo se calcula mediante la resolución de las ecuaciones de movimiento para el dispositivo WEC. La ecuación (54) define el movimiento para un cuerpo flotante sobre su centro de gravedad. En las siguientes subsecciones se explica cada término de dicha expresión con más detalle y por separado.

$$m\ddot{X} = F_{exc}(t) + F_{rad}(t) + F_{PTO}(t) + F_v(t) + F_{ME}(t) + F_B(t) + F_m(t) \quad (54)$$

Donde:

- m : masa [kg]
- \ddot{X} : vector de aceleración traslacional y rotacional [m/s^2]
- $F_{exc}(t)$: vector de fuerza de excitación de ola [N]
- $F_{rad}(t)$: vector de fuerza resultante por radiación de la ola [N]
- $F_{PTO}(t)$: vector de fuerza por sistema de extracción de potencia [N]
- $F_v(t)$: vector de fuerza de amortiguamiento [N]
- $F_{ME}(t)$: vector de fuerza de elementos de Morison (inercia + arrastre) [N]
- $F_B(t)$: vector de fuerza de flotabilidad neta de restauración [N]
- $F_m(t)$: vector de fuerza de amarre [N]

$F_{exc}(t)$, $F_{rad}(t)$ y $F_B(t)$ se calculan usando los coeficientes hidrodinámicos de incidencia (F_{exc} y $B(\omega)$) y de radiación ($A(\omega)$) proporcionados por el método de elementos finitos (BEM). La fuerza de radiación incluye coeficientes de masa añadida y de amortiguamiento de la ola asociados a la aceleración y velocidad del cuerpo flotante, respectivamente. La fuerza de excitación incluye las componentes de la fuerza de Froude-Krylov generados por las olas incidentes no perturbadas y componentes de difracción que resultan de la presencia del sólido flotante.

Se puede utilizar WEC-Sim para simulaciones con olas regulares e irregulares, pero las dos fuerzas de excitación y de radiación se calculan de distinta forma para los diferentes escenarios de simulación. La respuesta estacionaria sinusoidal se emplea a menudo para dispositivos más simples con oleaje regular. No obstante, para simulaciones de olas aleatorias o de cualquier simulación en la que los efectos de memoria del fluido son esenciales, es recomendable utilizar el método de la integral de convolución para

representar las fuerzas sobre el cuerpo flotante. Éste último escenario está fuera del alcance del presente trabajo.

2.3.2.3.1. Fuerzas de excitación

El perfil de la superficie libre se basa en la teoría lineal de las olas para una altura significativa, frecuencia y profundidad dada. La fuerza de excitación de un oleaje regular se obtiene según la siguiente ecuación:

$$F_{exc}(t) = \mathcal{R} \left[R_f \frac{H}{2} F_{exc}(\omega) e^{i(\omega t)} \right] \quad (55)$$

Donde:

- \mathcal{R} : denota la parte real
- R_f : función rampa
- H : altura de ola [m]
- $F_{exc}(\omega)$: vector de excitación de la ola, incluyendo la magnitud y la fase de la fuerza [N]

La función rampa (R_f) es necesaria para evitar fuertes flujos transitorios en los primeros segundos de la simulación, por eso se utiliza para calcular la fuerza de excitación de las olas. La función rampa queda definida en la siguiente ecuación:

$$R_f = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\pi + \frac{\pi t}{4} \right) \right), & \frac{t}{t_r} < 1 \\ 1, & \frac{t}{t_r} \geq 1 \end{cases} \quad (56)$$

Donde:

- t : tiempo de simulación [s]
- t_r : tiempo de rampa [s]

2.3.2.3.2. Fuerzas de radiación

Para simulaciones con olas regulares su puede utilizar la aproximación que asume que la respuesta del sistema tiene una forma estacionaria sinusoidal. La fuerza de radiación se puede calcular a partir de la masa añadida y el amortiguamiento por radiación, para una frecuencia de ola dada:

$$F_{rad}(t) = -A(\omega)\ddot{X} - B(\omega)\dot{X} \quad (57)$$

Donde:

- $A(\omega)$: matriz de masa añadida
- $B(\omega)$: matriz de amortiguamiento por radiación
- ω : frecuencia de ola [rad/s]
- \dot{X} : vector de velocidad traslacional y rotacional del cuerpo flotante [m/s]
- \ddot{X} : vector de aceleración traslacional y rotacional del cuerpo flotante [m/s]

Masa virtual (o añadida)

En mecánica de fluidos la masa virtual o masa añadida es la inercia añadida al sistema debido a que un cuerpo que acelera o decelera inmerso en un fluido debe mover (o desviar) un cierto volumen del fluido que lo rodea. La masa virtual es una cuestión muy común porque un objeto y el fluido envolvente no pueden ocupar simultáneamente el mismo espacio físico. Para simplificar el problema, se puede modelizar el sistema como si parte del fluido se moviera con el objeto.

El coeficiente de masa virtual adimensional es el cociente de la masa añadida y la masa de fluido desplazado (producto del volumen del cuerpo y la densidad del fluido). Generalmente, la masa virtual es un tensor de segundo orden, que relaciona el vector de aceleración del fluido con el vector de la fuerza resultante en el cuerpo.

2.3.2.3.3. Fuerzas del sistema de extracción de potencia: PTO hidráulico

Como bien se ha explicado antes, PTO es el acrónimo de Power Take Off y representa el sistema de extracción de potencia que tienen los convertidores de energía de las olas.

WEC-Sim permite utilizar varios tipos de PTOs como son el amortiguador lineal tipo resorte o el sistema mecánico. Sin embargo, el mecanismo convertidor de energía unidimotriz del sistema objeto de estudio es modelizado como un sistema hidráulico. Éste se explica más detenidamente en el apartado 2.4.2. La fuerza de reacción para el sistema hidráulico viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_{PTO} = \Delta P_{pistón} A_{pistón} \quad (58)$$

Donde:

- $\Delta P_{pistón}$: diferencia de presión del pistón hidráulico [N/m²]
- $A_{pistón}$: área del pistón [m²]

Por otro lado, la potencia absorbida por el sistema de extracción de potencia se expresa de la siguiente manera:

$$P_{PTO} = -F_{PTO}\dot{X}_{rel} \quad (59)$$

2.3.2.3.4. Fuerzas de amortiguamiento

Las fuerzas amortiguadoras lineales y cuadráticas aportan flexibilidad a la definición de las fuerzas viscosas:

$$F_v = -C_{ld}\dot{X} + \frac{1}{2}C_d\rho A_D\dot{X}|\dot{X}| \quad (60)$$

Donde:

- C_{ld} : coeficiente de amortiguamiento lineal
- C_d : coeficiente cuadrático de arrastre viscoso
- ρ : densidad del fluido [kg/m^3]
- A_D : área característica para el cálculo de la fuerza de arrastre [m^2]

Teniendo en cuenta que los códigos de BEM desprecian los efectos de la viscosidad, es necesario incluir F_v para poder modelizar el comportamiento del dispositivo de forma más precisa. Sin embargo, puede ser complicado seleccionar coeficientes representativos, pues éstos dependen de la geometría y tamaño del dispositivo y de la velocidad relativa entre el cuerpo y el flujo envolvente. Es posible encontrar tablas publicadas con estos coeficientes, pero normalmente están limitadas a geometrías simples evaluadas en escalas y condiciones de flujos limitados. Por ello, para geometrías menos sencillas es recomendable el uso de códigos de mecánica de fluidos computacional (CFD).

2.3.2.3.5. Fuerzas de elementos de Morison

Las dos principales fuerzas del oleaje que actúan sobre una estructura *offshore* son las fuerzas de arrastre y las fuerzas de inercia. La fuerza de arrastre surge por los efectos de la viscosidad del fluido. La fuerza de inercia, por otro lado, es la suma de dos partes:

- la masa hidrodinámica o añadida del cuerpo estructural en movimiento, que representa la fuerza generada por el cuerpo en movimiento en el fluido que le rodea. Esta masa añadida tiene el efecto de incrementar la masa actual del cuerpo estructural y puede representarse como la fuerza en la dirección contraria a la del movimiento del cuerpo.

- la fuerza de inercia que ejerce el fluido acelerado sobre el cuerpo estructural fijo. Esta fuerza nace de la diferencia de presiones en el fluido acelerado, la cual causa distorsiones en las líneas de corriente alrededor del cuerpo fijo.

La ecuación de Morison es una ecuación semiempírica de la fuerza sobre un cuerpo en línea con el flujo oscilatorio. De esta forma, la ecuación de Morison es la suma de dos componentes de fuerza: una fuerza de inercia en fase con la aceleración local del flujo y una fuerza de arrastre proporcional al cuadrado (con signo) de la velocidad de flujo instantáneo. La fuerza de inercia es la forma funcional como se encuentra en la teoría de flujo potencial, mientras que la fuerza de arrastre tiene la forma para un cuerpo situado en un flujo constante.

La ecuación de Morison asume que las fuerzas del fluido en un flujo oscilante incidente en estructuras de cilindros finos u otras geometrías similares surgen en parte por los efectos de la presión del flujo potencial y en parte por los efectos de viscosidad. Un cilindro fino implica que el diámetro, D , es pequeño con relación a la longitud de ola, $\lambda\omega$: $D/\lambda\omega < 0.1-0.2$.

Si no se da esta condición, se deberán tener en cuenta los efectos de difracción de las olas, pues se producen cambios en la forma de la ola. Asumiendo que la geometría es fina, la fuerza resultante se puede aproximar modificando la ecuación de Morison en cada elemento:

$$F_{ME} = \rho \forall \dot{v} + \rho \forall C_a (\dot{v} - \ddot{X}) + \frac{1}{2} C_d \rho A D (v - \dot{X}) |v - \dot{X}| \quad (61)$$

Donde:

- v : velocidad de partícula del fluido
- C_a : coeficiente de masa virtual
- \forall : volumen desplazado

El primer término es la fuerza de Froude-Krylov, el segundo la fuerza de masa hidrodinámica y el tercero la fuerza de arrastre.

Nota: WEC-Sim no considera los efectos de flotabilidad cuando calcula las fuerzas de los elementos de Morison.

2.3.3. Tipos de olas en WEC-Sim

La clase “olas” contiene toda la información necesaria para definir las condiciones de las ondas incidentes para la simulación. En el archivo *wecSimInputFile.m*, que se explica en el apartado 2.4.3, se debe inicializar la clase de ola (waveClass) y especificar el tipo de ola incluyendo la siguiente línea:

```
waves = waveClass('tipo');
```

En función del tipo seleccionado, es imprescindible especificar las siguientes propiedades:

Tipo de Ola	Propiedades Requeridas
noWave	waves.T
noWaveCIC	-----
Regular	waves.H, waves.T
regularCIC	waves.H, waves.T
Irregular	waves.H, waves.T, waves.spectrumType
spectrumImport	waves.spectrumDataFile
etaImport	waves.etaDataFile

Tabla 9. Tipos de ola en WEC-Sim [elaboración propia]

Además, es posible obtener más información a cerca de todas estas propiedades:

- escribiendo en la ventana de comandos de MATLAB: doc. waveClass
- abriendo el archivo waveClass.m

En los siguientes subapartados se explican los distintos tipos de olas y las líneas de código que deben ser escritas para el correcto funcionamiento de la simulación.

2.3.3.1. NoWave

Este caso sirve para ejecutar simulaciones sin olas y con coeficientes de masa virtual y de amortiguación de radicación constantes. Generalmente se utiliza para ejecutar ensayos de decaimiento. Es preciso aportar los coeficientes hidrostáticos del BEM antes de ejecutar la simulación y especificar el periodo con el que se han obtenido.

La manera de introducir la información del oleaje en este caso es la siguiente:

```
waves = waveClass('noWave');  
waves.T = <periodo de los datos usados en BEM para los coeficientes hidrodinámicos [s]>;
```

2.3.3.2. NoWaveCIC

Este caso es el mismo que el noWave, pero con la incorporación del cálculo de convolución integral (CIC⁴: Convolution Integral Calculation). La única diferencia es que las fuerzas de radiación se calculan utilizando el CIC y la masa añadida de frecuencia infinita.

Como se ha mencionado antes, el método de la integral de convolución queda fuera del alcance de este proyecto, por lo que no se entra en detalles. La manera de introducir la información del oleaje en este caso es la siguiente:

```
waves = waveClass('noWaveCIC');
```

2.3.3.3. Regulares

El caso de olas regulares es para ejecutar simulaciones con olas regulares y con coeficientes de amortiguamiento de masa añadida y radiación constantes. Utilizando esta opción, el simulador asume que la respuesta del sistema dinámico es una senoide en estado estacionario, donde los coeficientes de amortiguamiento de masa añadida y radiación constantes se usan para calcular las fuerzas de la radiación de ola (en vez de mediante la integral de convolución).

La manera de introducir la información del oleaje en este caso es la siguiente:

```
waves = waveClass('regular');  
waves.T = <periodo de ola especificado por el usuario [m]>;  
waves.H = <altura de ola especificado por el usuario [s]>;
```

⁴ En matemáticas y, en particular, análisis funcional, una convolución es un operador matemático que transforma dos funciones f y g en una tercera función que representa la magnitud en la que se superponen f y una versión trasladada e invertida de g . Una convolución es un tipo muy general de media móvil.

2.3.3.4. Regulares CIC

Este caso es igual al anterior, pero con la incorporación del cálculo de convolución integral (CIC: Convolution Integral Calculation). La única diferencia es que las fuerzas de radiación se calculan utilizando el CIC y la masa añadida de frecuencia infinita.

Como se ha mencionado antes, el método de la integral de convolución queda fuera del alcance de este proyecto, por lo que no se entra en detalles. La manera de introducir la información del oleaje en este caso es la siguiente:

```
waves = waveClass('regularCIC');  
waves.T = <periodo de ola especificado por el usuario [m]>;  
waves.H = <altura de ola especificado por el usuario [s]>;
```

2.3.3.5. Irregulares

En el caso de olas irregulares se utilizan los espectros PM (Pierson Moskowitz), BS (Bretschneider) o JS (JONSWAP).

La manera de introducir la información del oleaje en este caso es la siguiente:

```
waves = waveClass('irregular');  
waves.T = <periodo de ola especificado por el usuario [m]>;  
waves.H = <altura de ola especificado por el usuario [s]>;  
waves.spectrumType = <tipo de espectro especificado por el usuario: PM, BS o JS>;
```

2.3.3.6. Espectro importado

Para poder cargar este tipo de oleaje en el sistema hay que crear una tabla (.txt) con dos filas. La primera fila es para las frecuencias (ω : rad/s) y la segunda es para la densidad de energía espectral $S(\omega)$ (m^2/Hz). Hay páginas web en las que se pueden obtener directamente estos archivos con los datos de boya (por ejemplo, la página NDBC en EE.UU.)

La manera de introducir la información del oleaje en este caso es la siguiente:

```
waves = waveClass('spectrumImport');  
waves.spectrumDataFile = '<archivo de espectro de ola>.txt';
```

2.3.3.7. Importadas en tabla

Para poder cargar este tipo de oleaje en el sistema hay que crear una tabla (.mat) con dos columnas. La primera columna es la relativa al tiempo: cuanto más pequeño sea el

intervalo la evaluación será más precisa, pero requerirá más tiempo de procesamiento. La segunda columna contiene datos de la altura de la superficie de la ola.

También es importante saber cuál es la capacidad de muestreo de las sondas utilizadas. Por ejemplo, la sonda de altura de ola AKAMINA AWP-24-3 toma una muestra cada 5ms. No obstante, con intervalo de una centésima de segundo es más que suficiente.

Esta tabla de datos puede contener un número de filas prácticamente ilimitado. Sin embargo, para la simulación no es necesario utilizar todos los datos: en el archivo de inputs se elige el rango temporal a evaluar.

La manera de introducir la información del oleaje en este caso es la siguiente:

```
waves = waveClass('etaImport');  
waves.spectrumDataFile = '<archivo eta>.mat';
```

2.4. Dispositivo a analizar: captador puntual RM3

El captador puntual de olas RM3, también conocido como boya de potencia del oleaje, fue diseñado para un sitio de referencia ubicado cerca de la costa de Eureka en el condado de Humboldt, California.

El concepto de diseño de este dispositivo se inspiró en el dispositivo llamado Power Buoy de OPT (Ocean Power Technologies), que es un captador puntual de dos cuerpos diseñado para convertir la energía de las olas oceánicas en potencia eléctrica. El diseño del dispositivo consiste en un flotador de superficie que se oscila con el movimiento relativo de la ola con respecto a la columna vertical flotante (spar), que está conectada a una placa-base circular de reacción subsuperficial.

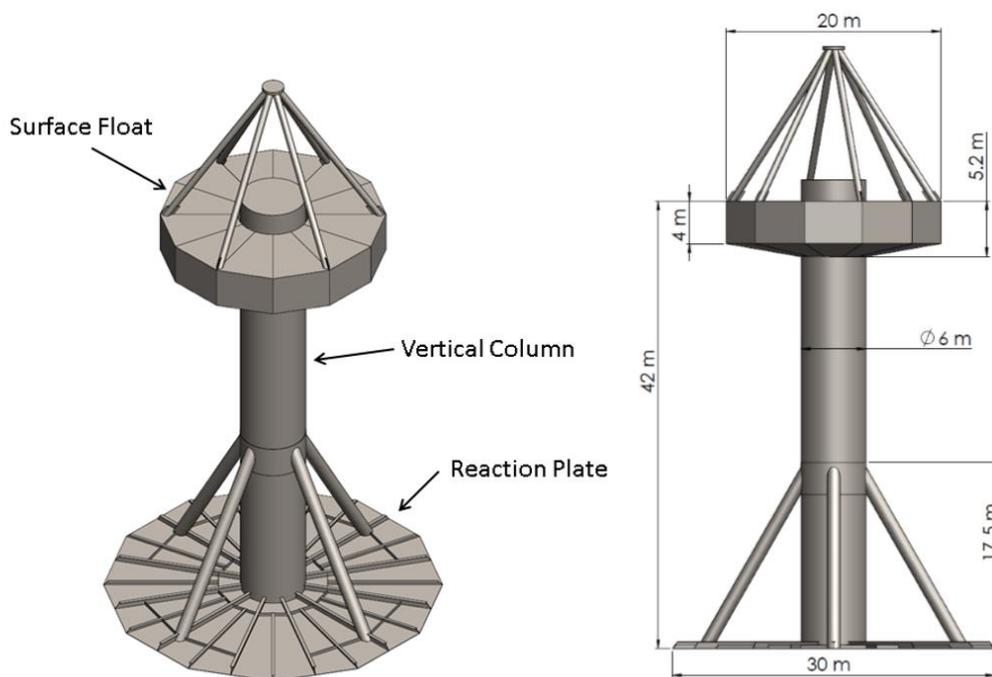


Ilustración 37. Diseño y dimensiones del dispositivo RM3 [6]

Este captador convierte la energía del oleaje en energía eléctrica predominantemente a partir de la oscilación del dispositivo en el eje vertical (heave) inducida por el oleaje incidente. El cuerpo flotador está diseñado para oscilar arriba y abajo del eje hasta un máximo de 4 metros. La parte inferior de la placa-base de reacción está unos 35 m por debajo de la superficie del agua. Este dispositivo está destinado para su uso en profundidades de 40 m a 100 m.

Por otro lado, en el diseño del RM3 se adopta un sistema de conversión de potencia hidráulico mediante un pistón, el cual se explica más adelante. Este PTO está situado

dentro de la columna vertical. No obstante, en la documentación pública no queda constancia de cómo se une el pistón interno con el flotador externo.

La extracción de energía óptima de un captador de olas puntual ocurre cuando el sistema entra en resonancia; en otras palabras, cuando la velocidad del cuerpo oscilante está en fase con la fuerza de excitación hidrodinámica de la ola.

Además, el captador puntual está conectado a un sistema de amarre para mantener el dispositivo flotante en su posición. No obstante, el análisis del sistema de anclaje no está dentro del alcance del proyecto, por lo que no será analizado.

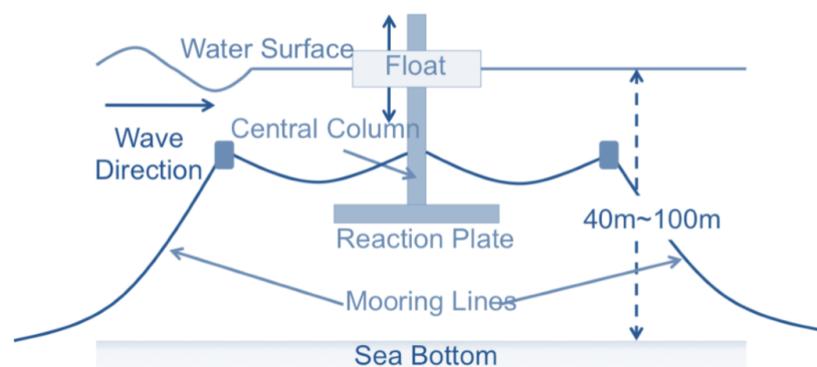


Ilustración 38. Esquema del concepto del diseño del captador puntual [6]

Las características másicas e inerciales de cada cuerpo quedan recogidas en las siguientes tablas. Como bien queda reflejado, tanto la masa como los momentos de inercia de la columna oscilante y placa-base circular (cuerpo 2) son muy superiores a los del flotador (cuerpo 1). Debido a que el objetivo del dispositivo es obtener un movimiento relativo entre ambos sólidos, el sólido 2 tiene que ser muy estable (intentado aproximarse a ser un sólido fijo), mientras que el cuerpo 1 debe moverse en resonancia.

Flotador				
Centro de Gravedad [m]	Masa [ton]	Momento de Inercia [kg·m ²]		
0	727,01	20.907.301	0	0
0		0	21.306.091	0
-0,72		0	4305	37.085.481

Tabla 10. Características geométricas del flotador [7]

Columna y placa-base circular				
Centro de Gravedad [m]	Masa [ton]	Momento de Inercia [kg·m ²]		
0	878,30	94.419.615	0	0
0		0	94.407.091	217.593
-21,29		0	217.593	28.542.225

Tabla 11. Características geométricas de la columna y placa-base circular [7]

Finalmente, para la evaluación computacional del RM3 son necesarios los siguientes archivos en el mismo directorio:

- Modelo de Simulink: *RM3_cHydraulic_PTO.slx*
- Archivo de entrada de WEC-Sim: *wecSimInputFile.m*
- Archivos de geometría para cada cuerpo: *float.stl* y *plate.stl*
- Archivo de datos hidrodinámicos: *rm3.h5*
- Archivo de post-procesamiento definido por el usuario: *userDefinedFunction.m*
- Archivo de entrada de PTO-Sim: *ptoSimInputFile.m*
- Tabla de datos del generador rotativo: *table (table.eff, table.Tpu, table.omegapu)*
- Archivo de funcionamiento del motor: *variableMotorVolume.m*

La totalidad de estos archivos queda recogida en el anexo I con el fin de poder consultarlos como ayuda a la comprensión del presente trabajo.

2.4.1. Modelo de Simulink

Para poder hacer simulaciones en WEC-Sim es necesario construir un archivo en Simulink con el modelo del dispositivo arrastrando y soltando bloques de la librería de WEC-Sim y PTO-Sim. Este archivo puede ser utilizado con distintas geometrías del dispositivo, por lo que podría ser reutilizado en futuros proyectos. En este proyecto el modelo de Simulink se llama *RM3_cHydraulic_PTO.slx*. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Descargar la librería de WEC-Sim, abrirla en Simulink y crear un nuevo modelo.
2. Seleccionar dos cuerpos rígidos (*Rigid Body*), uno por cada cuerpo del sistema de estudio, y arrastrarlos a la ventana del modelo Simulink. Para poder distinguir ambos cuerpo es preciso renombrarlos como '*body(1)*' y '*body(2)*'.
3. Arrastrar también el sistema global de referencia (Global Reference Frame) desde la librería WEC-Sim al modelo. Este bloque representa el fondo del mar con el que todos los cuerpos están relacionados mediante uniones o restricciones.

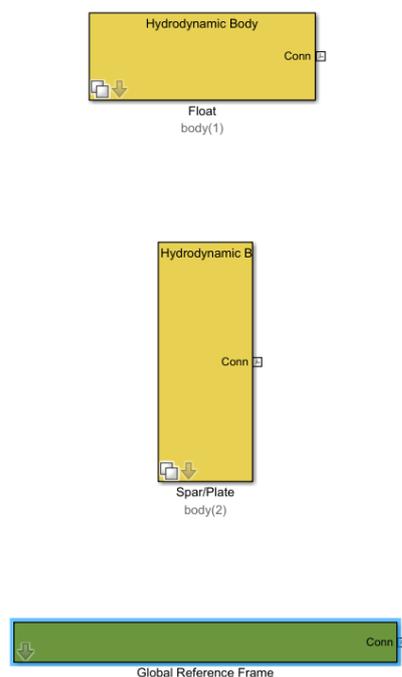


Ilustración 39. Representación de los cuerpos y del sistema global de referencia en Simulink

4. De entre las restricciones disponibles en la librería de WEC-Sim, seleccionar una restricción traslacional (*Translational constraint*) para conectar la columna oscilante al fondo marino. Esta restricción únicamente permite el movimiento vertical en el eje z (heave) del cuerpo 2.

5. En los sistemas de PTO de la librería, seleccionar el bloque *Translational PTO Actuation Force*, denominado pto(1), para conectar el flotador con la columna oscilante. De esta forma, el flotador puede moverse exclusivamente respecto de la columna oscilante en el eje vertical (el eje de la columna).

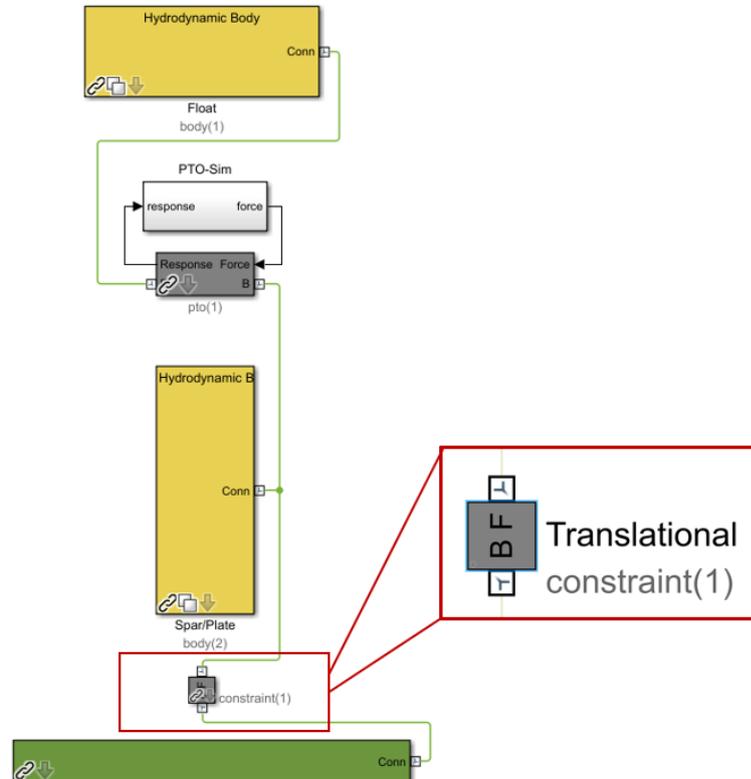


Ilustración 40. Conjunto completo de bloques para el RM3 y una vista del bloque de restricción con sus puntos de conexión a base (B) y seguidor (F)

Para cada bloque de unión o de restricción existe una conexión de base y seguidor⁵. Se debe tener mucho cuidado al crear las conexiones para que se ajusten a lo que se quiere modelizar. Por ejemplo, para la restricción entre la columna y el fondo marino: la base de la conexión es el fondo marino y el seguidor es la columna.

6. El sistema de extracción de potencia (PTO) representa la transformación existente entre la potencia mecánica del dispositivo y la potencia eléctrica extraída por el generador rotativo. Para poder detallar todas las transformaciones intermedias, es necesario incluir un subsistema específico (PTO-Sim) para el dispositivo objeto de estudio, como se puede ver en la Ilustración 40.

⁵ La base y seguidor se diferencian con las letras B (*Base*) y F (*Follower*) en los extremos del bloque.

2.4.2. Sistema de extracción de potencia (PTO) hidráulico

Un sistema de extracción de potencia o PTO (Power Take-Off) es uno de los varios métodos para extraer energía de una fuente de potencia y transmitirla a otra aplicación, como a un implento acoplado o a otra máquina separada. En este caso, la fuente de alimentación es la potencia del oleaje y la aplicación a la que se transmite la energía es un generador.

Existen muchos tipos de PTO para los dispositivos captadores de olas. Por ejemplo, el PTO mecánico *Direct Drive* absorbe la potencia directamente sin ningún tipo de reducción intermedia, mediante un conjunto de imanes (en el flotador) y de bobinas (en la columna oscilante). Otro ejemplo completamente distinto es el sistema de extracción de potencia hidráulico que se describe a continuación.

Hay dos formas de modelizar un PTO hidráulico: con fluidos hidráulicos compresibles e incompresibles. El modelo de fluido compresible utiliza propiedades del fluido como el módulo de Bulk efectivo y la densidad, mientras que el de fluido incompresible no. En el modelo objeto de estudio se utiliza un fluido compresible de tipo ISO HM 46, cuyo módulo de Bulk es de 1,9 GPa.

El sistema de extracción de potencia de este dispositivo consiste en un pistón, una válvula rectificadora (o anti-retorno), dos acumuladores hidráulicos (uno de alta presión y otro de baja presión) y un motor hidráulico acoplado a un generador rotativo.

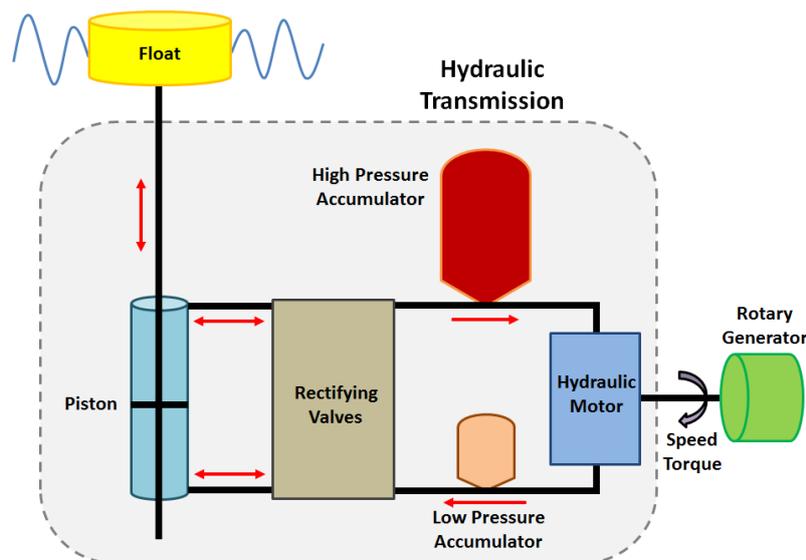


Ilustración 41. Sistema de extracción de potencia (PTO) hidráulico [7]

El pistón actúa como una bomba oleohidráulica de doble efecto. En la válvula rectificadora hay impulsión tanto en la válvula de avance como en la de retroceso: bombea en las dos carreras. Esto obliga a que la circulación sea en un único sentido.

De este modo, se garantiza que el eje de salida del motor hidráulico gire en un solo sentido. Como es bien sabido, el motor hidráulico es una máquina volumétrica que transforma el movimiento del fluido hidráulico en rotación de un eje de salida.

Para paliar la irregularidad del fluido, se instalan un acumulador de alta presión, a la entrada del motor hidráulico, y otro de baja presión, a la salida. Así, la velocidad de rotación del eje del motor hidráulico es aproximadamente constante y la calidad de la corriente eléctrica producida en el generador rotativo es homogénea.

En el siguiente diagrama de flujo se puede apreciar como interactúan unos elementos con otros (en el anexo I la imagen está ampliada y puede leerse con más comodidad). Este conjunto de bloques respresenta internamente el bloque PTO-Sim de la Ilustración 40.

La posición y la velocidad de los selectores se utilizan como inputs del pistón. Este bloque también necesita conocer los flujos volumétricos superior e inferior que llegan de la válvula rectificadora. Los outputs del pistón son la fuerza del PTO y las presiones del pistón.

La válvula rectificadora, a su vez, utiliza las presiones del piston y de los acumuladores. Ambos acumuladores actuan en función de los flujos volumétricos de la válvula rectificadora y del motor hidráulico. Finalmente, el motor hidráulico utiliza las presiones de los 2 acumuladores y el par generador del generador rotativo.

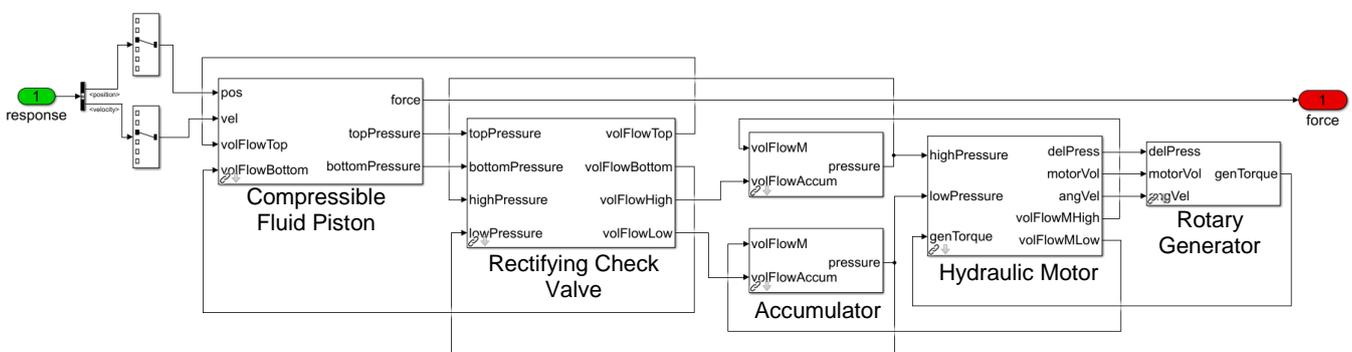


Diagrama de Flujo 1. Sistema de extracción de potencia del RM3 (bloque PTO-Sim de la Ilustración 40)

A continuación se describen los procesos internos de cada elemento:

- Pistón
- Válvula rectificadora
- Acumuladores de alta y baja presión
- Motor hidráulico
- Generador rotativo

En este apartado se exponen únicamente las ecuaciones que rigen cada componente del sistema de extracción de potencia. Para mayor detalle en los diagramas de bloque de Simulink consultar el anexo I.

Pistón

El pistón que utiliza el RM3 es de doble efecto, pues tiene dos cámaras independientes. A medida que el flotador oscila los cilindros hidráulicos se extienden y se comprimen. La extensión oscilante y la compresión del cilindro impulsan un fluido hidráulico (en este caso ISO HM 46) a través del sistema, creando un flujo a presión. El movimiento del pistón se rige mediante las siguientes ecuaciones:

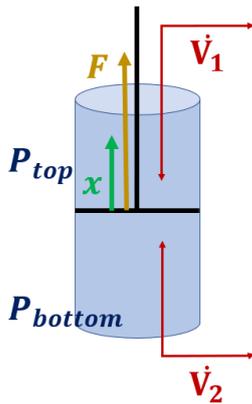


Ilustración 42.

Esquema del pistón

$$\dot{V}_3 = \dot{x} \cdot A_p \quad (62)$$

$$P_{top} = \int \frac{\beta_e \cdot (\dot{V}_1 + \dot{V}_3)}{V_o - A_p \cdot x} dt \quad (63)$$

$$P_{bottom} = \int \frac{\beta_e \cdot (\dot{V}_2 - \dot{V}_3)}{V_o + A_p \cdot x} dt \quad (64)$$

$$F = A_p \cdot (P_{top} - P_{bottom}) \quad (65)$$

$$Pot_{abs} = -\dot{x} \cdot F \quad (66)$$

Donde:

- x, \dot{x} : desplazamiento y velocidad del pistón, respectivamente
- \dot{V}_1, \dot{V}_2 (*volFlowTop*, *volFlowBottom*): flujo volumétrico superior e inferior procedente de (o dirigido a) la válvula rectificadora
- P_{top}, P_{bottom} : presión en la cámara superior e inferior del pistón, respectivamente
- F : fuerza generada por la diferencia de presiones
- Pot_{abs} : potencia absorbida por el dispositivo
- Módulo de Bulk efectivo: $\beta_e = 1,9 \text{ GPa}$
- Área del pistón: $A_p = 0,0378 \text{ m}^2$
- Volumen del pistón: $V_o = 15 \text{ m} \times 0,0378 \text{ m}^2 = 0,567 \text{ m}^3$

Como queda reflejado en el Diagrama de Flujo 1, los datos de entrada son el desplazamiento y la velocidad del pistón, y los flujos volumétricos superior e inferior. Por otro lado, los datos de salida son la presión superior, la presión inferior y la fuerza generada.

Válvula Rectificadora (o anti-retorno)

Se necesita una válvula anti-retorno para dejar el paso del fluido en circulación en un sentido y cerrar por completo el paso en el sentido contrario. Generalmente, se utilizan en líneas hidráulicas de alta presión para evitar golpes de ariete⁶. La válvula rectificadora se rige por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_1 = C_d \cdot & \left[\left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} + A_{min} \right) + \left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} \right) \right. \\
 & \left. \cdot \tanh \left(k_2 \cdot \left(-\frac{p_{max} + p_{min}}{2} + P_{top} - P_{high} \right) \right) \right] \\
 & \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{top} - P_{high}) \cdot \tanh(k_1 \cdot (P_{top} - P_{high}))}{\rho}}
 \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_2 = C_d \cdot & \left[\left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} + A_{min} \right) + \left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} \right) \right. \\
 & \left. \cdot \tanh \left(k_2 \cdot \left(-\frac{p_{max} + p_{min}}{2} + P_{bottom} - P_{high} \right) \right) \right] \\
 & \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{bottom} - P_{high}) \cdot \tanh(k_1 \cdot (P_{bottom} - P_{high}))}{\rho}}
 \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_3 = C_d \cdot & \left[\left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} + A_{min} \right) + \left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} \right) \right. \\
 & \left. \cdot \tanh \left(k_2 \cdot \left(-\frac{p_{max} + p_{min}}{2} + P_{low} - P_{bottom} \right) \right) \right] \\
 & \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{low} - P_{bottom}) \cdot \tanh(k_1 \cdot (P_{low} - P_{bottom}))}{\rho}}
 \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_4 = C_d \cdot & \left[\left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} + A_{min} \right) + \left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} \right) \right. \\
 & \left. \cdot \tanh \left(k_2 \cdot \left(-\frac{p_{max} + p_{min}}{2} + P_{low} - P_{top} \right) \right) \right] \\
 & \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{low} - P_{top}) \cdot \tanh(k_1 \cdot (P_{low} - P_{top}))}{\rho}}
 \end{aligned} \quad (70)$$

⁶ El golpe de ariete se origina debido a que el fluido es compresible: cuando se cierra bruscamente una válvula, las partículas del fluido que quedan bloqueadas son empujadas por aquellas que van inmediatamente detrás, y siguen aún en movimiento, generando una sobrepresión.

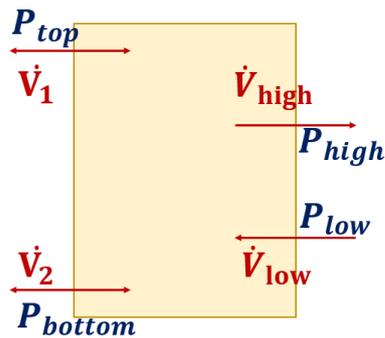


Ilustración 43. Esquema de la válvula rectificadora

$$\dot{V}_1 = \dot{Q}_4 - \dot{Q}_1 \quad (71)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{Q}_3 - \dot{Q}_2 \quad (72)$$

$$\dot{V}_{high} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (73)$$

$$\dot{V}_{low} = -\dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 \quad (74)$$

Donde:

- P_{high}, P_{low} : presión en los acumuladores de alta y baja presión, respectivamente
- $\dot{V}_{high}, \dot{V}_{low}$: flujo volumétrico que la válvula intercambia con los acumuladores de alta y baja presión, respectivamente.
- Coeficiente de descarga C_d : 0,61 [-]
- Área máxima de la válvula A_{max} : 0,002 m²
- Área mínima de la válvula A_{min} : 10⁻⁸ m²
- Máxima diferencia de presión en la válvula p_{max} : 1,5·10⁶ Pa
- Mínima diferencia de presión de la válvula p_{min} : 0 Pa
- Densidad del fluido hidráulico ρ : 850 kg/m³
- Características del diseño de la válvula k_1 y k_2 : 200 y 8,1374·10⁻⁶

Como queda reflejado en el Diagrama de Flujo 1, los datos de entrada son las presiones de las cámaras del pistón superior e inferior, y las presiones de los acumuladores de alta y baja presión. Por otro lado, los datos de salida son los 4 flujos volumétricos: 2 relacionados con el pistón y 2 con los acumuladores de presión.

Acumuladores de alta y baja presión

Con el fin de preservar el buen funcionamiento del generador, normalmente los circuitos hidráulicos utilizan acumuladores de alta y baja presión. En otras palabras, para reducir las fluctuaciones de presión del motor, se usan dos acumuladores hidráulicos para suavizar las sobrepresiones asociadas al movimiento oscilante de los cuerpos. Ambos acumuladores se rigen por las mismas ecuaciones:

$$P = \frac{P_{Iprecharged}}{\left(\frac{1 - \int (\dot{V}_M + \dot{V}_{accum}) \cdot dt}{V_{I0}}\right)^{1.4}} \quad (75)$$

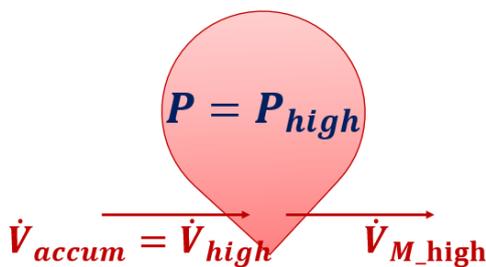


Ilustración 44. Esquema del acumulador de alta presión

Donde:

- Volumen inicial $V_{I0}(\text{high})$: $8,5 \text{ m}^3$
- Presión inicial precargada $P_{Iprecharged}(\text{high})$: $19,2 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- \dot{V}_{M_high} : flujo volumétrico que va al motor hidráulico

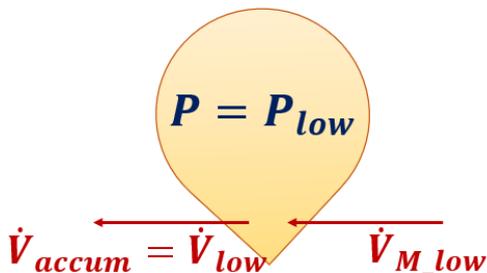


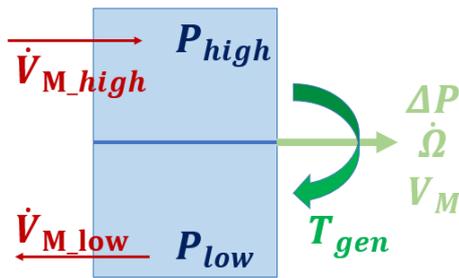
Ilustración 45. Esquema del acumulador de baja presión

- Volumen inicial $V_{I0}(\text{low})$: 6 m^3
- Presión inicial precargada $P_{Iprecharged}(\text{low})$: $9,6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- \dot{V}_{M_low} : flujo volumétrico procedente del motor hidráulico

Como queda reflejado en el Diagrama de Flujo 1, los datos de entrada para cada acumulador de presión son los flujos volumétricos de la válvula rectificadora y del motor hidráulico. Por otro lado, los datos de salida son las presiones de cada acumulador.

Motor Hidráulico

Para poder convertir el movimiento del flujo en energía eléctrica es necesario un motor hidráulico que convierta el movimiento del fluido en un movimiento rotativo. Este motor se debe dimensionar de forma que coincida con la entrada del generador, eliminando así la necesidad de un sistema de reducción de engranajes. El motor hidráulico se rige por las siguientes ecuaciones:



$$\Delta P = P_{high} - P_{low} \quad (76)$$

$$V_{motor} = f_{varmotorvol}(\Delta P) \quad (77)$$

$$\dot{\Omega} = \int \frac{\Delta P \cdot V_{motor} - T_{gen}(1 + fr)}{J} dt \quad (78)$$

$$\dot{V}_{Mlow} = \dot{\Omega} \cdot V_{motor} \quad (79)$$

$$\dot{V}_{Mhigh} = -\dot{\Omega} \cdot V_{motor} \quad (80)$$

Ilustración 46. Esquema del motor hidráulico

Donde:

- ΔP : diferencia de presiones entre ambos acumuladores
- V_{motor} : Volumen dentro del motor
- T_{gen} : par generado por el motor hidráulico (o par resistente del generador)
- $\dot{\Omega}$: velocidad angular del eje que conecta el motor hidráulico con el generador
- Momento total de inercia del motor y del generador J: 20 kg·m²
- Fricción fr: 0,05 kg·m²/s
- $f_{varmotorvol}$: función característica del motor hidráulico definida en *variableMotorVolume.m* definida en el anexo I.

Como queda reflejado en el Diagrama de Flujo 1, los datos de entrada para el motor hidráulico son las presiones de los acumuladores de alta y baja presión y el par generado por el motor. Por otro lado, los datos de salida son la diferencia presión de los acumuladores, la velocidad angular del eje y el volumen en el interior del motor.

Generador Rotativo

Para poder generar energía eléctrica a partir del movimiento de las olas es imprescindible un generador rotativo que convierta la energía cinemática del eje del motor hidráulico en energía eléctrica. El generador rotativo se rige por las siguientes ecuaciones:

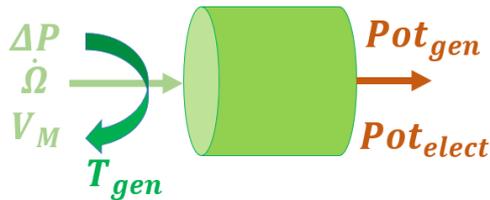


Ilustración 47. Esquema del generador rotativo

$$T_{gen} = \frac{\Delta P \cdot V_M}{1.05 \cdot \dot{\Omega}_{deseada}} \cdot \dot{\Omega} \quad (81)$$

$$Pot_{gen} = T_{gen} \cdot \dot{\Omega} \quad (82)$$

$$\frac{\dot{\Omega}}{\dot{\Omega}_{base}} \ \& \ \frac{-T_{gen}}{T_{genbase}} \rightarrow \text{Lookup Table} \quad (83)$$

$$\rightarrow \eta_{gen}$$

$$Pot_{elect} = \eta_{gen} \cdot \eta_{drive} \cdot Pot_{gen} \quad (84)$$

Donde:

- Pot_{gen} : potencia generada por el generador rotativo
- η_{gen} : eficiencia del generador rotativo
- Pot_{elect} : potencia eléctrica generada por el generador
- Velocidad angular deseada para el generador $\dot{\Omega}_{deseada}$: 150 rad/s
- Velocidad base del generador $\dot{\Omega}_{base}$: 300 rad/s
- Par base del generador $T_{genbase}$: 2000 N·m
- Eficiencia del *drive* η_{drive} : 0,98

Lookup Table es una función de Simulink, en la que partiendo de unos datos de entrada busca en una tabla de datos el valor de salida (en caso de ser necesario se hacen interpolaciones). La tabla de datos utilizada en este caso es la tabla de datos de generadores eléctricos de ABB con código M3BJ315SMC, donde en una matriz se recoge la eficiencia para cada pareja de par generado y velocidad angular.

Como queda reflejado en el Diagrama de Flujo 1, los datos de entrada para el generador rotativo son la diferencia presión de los acumuladores, la velocidad angular del eje y el volumen en el interior del motor. Por otro lado, el dato de salida es el par generado.

2.4.3. Archivo de entrada: *wecSimInputFile.m*

Para poder ejecutar la simulación es necesario generar un archivo de entrada en WEC-Sim que contenga la información necesaria: parámetros de simulación, datos del oleaje, información del dispositivo y restricciones entre cuerpos. Este archivo tiene que estar ubicado en el mismo directorio que el resto de los archivos y debe llamarse *wecSimInputFile.m*. Este archivo está adjunto en el anexo I.

En la primera parte del *script* se especifican los parámetros de la clase simulación (*simulationClass*): modelo de Simulink, tiempos de inicio y fin de la simulación, intervalo de tiempo entre puntos simulados y tiempo de rampa aplicada.

En la segunda parte se especifica la información del oleaje. Como se ha explicado previamente, se pueden definir varios tipos de olas según los distintos códigos. En este trabajo se utiliza el oleaje regular. Asimismo, es necesario conocer tanto la altura de ola significativa como el periodo. En este caso, en el oleaje que se analiza existen 158 posibles combinaciones Hs-Te, por lo que para no tener que ejecutar uno a uno cada caso, mediante otro *script* se ejecuta un bucle que permite ejecutar automáticamente un conjunto de distintas combinaciones.

Para no saturar el ordenador, se ha escogido evaluar las simulaciones por grupos: éstos se dividen en función de la altura de ola significativa. De esta forma, para cada altura significativa se evalúa el dispositivo para los distintos periodos. Esto es posible gracias al archivo *ejecutar.m*, recogido en el anexo I.

En la tercera parte, se presenta la información de los cuerpos: el flotador es el cuerpo 1 (*body(1)*) y la columna oscilante el cuerpo 2 (*body(2)*). Estos se definen mediante la masa, inercia, datos de geometría (archivo *.stl*) y datos hidrodinámicos (archivo *.h5*).

Finalmente, en la cuarta parte, se describe la información de las uniones y restricciones del sistema. La restricción que existe es la de la columna oscilante con respecto al fondo del mar, y se debe poner su ubicación respecto del sistema global de referencia de WEC-Sim. En cuanto al sistema PTO que restringe el movimiento entre ambos sólidos, a parte de su ubicación, hay que especificar tanto el amortiguamiento (c) como la rigidez (k) del sistema PTO.

2.4.4. Archivo de entrada para PTO: *ptoSimInputFile.m*

En esta sección se debe definir completamente el archivo de entrada para el módulo PTO-Sim. Esto corresponde a definir los parámetros que definen al pistón, a la válvula rectificadora, a los acumuladores, al motor hidráulico y al generador rotatorio, según los parámetros que se han explicado en el apartado 2.4.2. El archivo *ptoSimInputFile.m* está adjunto en el anexo I.

Normalmente estos valores corresponden a variables, y se podría realizar un análisis más extenso del circuito hidráulico, pero no está dentro de los alcances de este proyecto.

2.4.5. Archivo de post-procesamiento

El archivo de post-procesamiento sirve para poder crear todas las gráficas relevantes en el análisis. Asimismo, se pueden generar datos numéricos como medias o puntos máximos y mínimos. Este archivo se llama *userDefinedFunctions.m*, y está recogido en el anexo I.

Las gráficas que se obtienen en el presente trabajo son los siguientes:

- Potencia absorbida, mecánica y eléctrica
- Desplazamiento, velocidad y aceleración de ambos sólidos en el eje z (heave)
- Fuerzas en ambos sólidos en el eje z (heave)

En el *script* se puede observar cómo algunas de las gráficas, aparte de generarlas y mostrarlas, también se guardan en formato *.jpg* con el objetivo de poder adjuntarlas a los anexos del trabajo y de poder realizar un análisis más extenso y visualmente más ilustrativo.

Por otro lado, también se analizan datos numéricos:

- Potencia eléctrica media tras la estabilización del sistema
- Presiones medias de ambos acumuladores tras la estabilización del sistema
- Desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximas de ambos sólidos

2.5. Ejecución de WEC-Sim

La simulación de WEC-Sim se ejecuta mediante el comando 'wecSim' que debe escribirse en la ventana de comandos de Matlab. Para que la ejecución sea posible, es necesario que se realice desde el directorio donde se encuentra el archivo *wecSimInputFile.m*, que es donde se encuentran todos los archivos previamente mencionados.

No obstante, en este trabajo se deben analizar 158 combinaciones de Hs-Te. Por ello, como se ha explicado en el apartado 2.4.3, con el fin de automatizar el proceso de ejecución se crea otro *script* (*ejecutar.m*) que ejecuta la simulación por grupos en los que se comparte la misma altura significativa. Este archivo se incluye en el anexo I.

Se podrían haber realizado todas las simulaciones de una sola vez mediante un bucle dentro de otro bucle, pero para no saturar al ordenador se decide realizar la evaluación computacional por partes.

Además, en este *script* se crean *arrays* con los datos numéricos necesarios para el análisis del presente trabajo, que se han descrito en el apartado 2.4.5.

2.6. Descripción de la zona BiMEP

Situada en Arminza, BiMEP (Biscay Marine Energy Platform) es un espacio en mar abierto reservado para respaldar la investigación, el ensayo técnico y la viabilidad técnico-comercial de los prototipos a escala real de captadores de energías marinas.

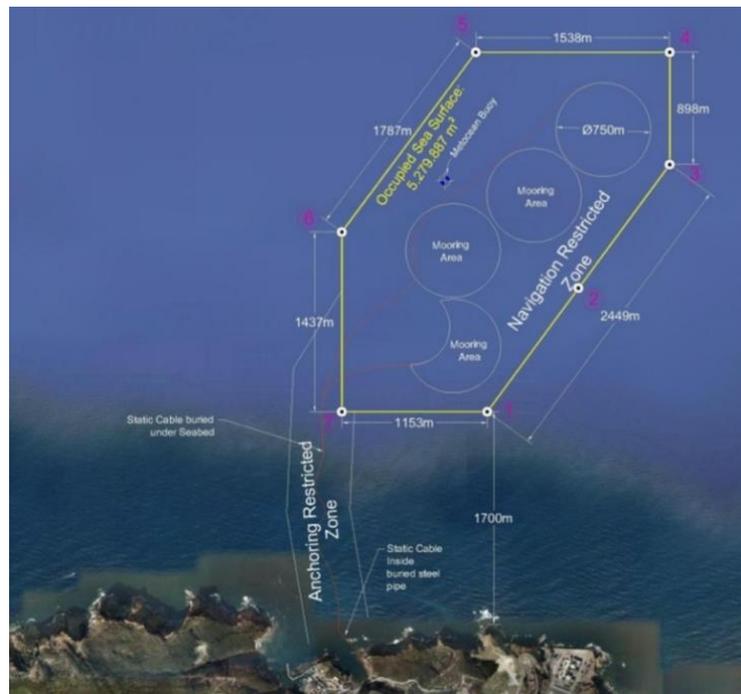


Ilustración 48. Zona BiMEP [9]

El centro de ensayo cubre una superficie total de 5.2 km², con profundidades de entre 50 y 90 metros. Esta zona de la costa vasca es una de las áreas con mayor energía potencial (21 kW/m). Además, cuenta con 4 puntos de conexión para WECs y con un centro de investigación asociado.

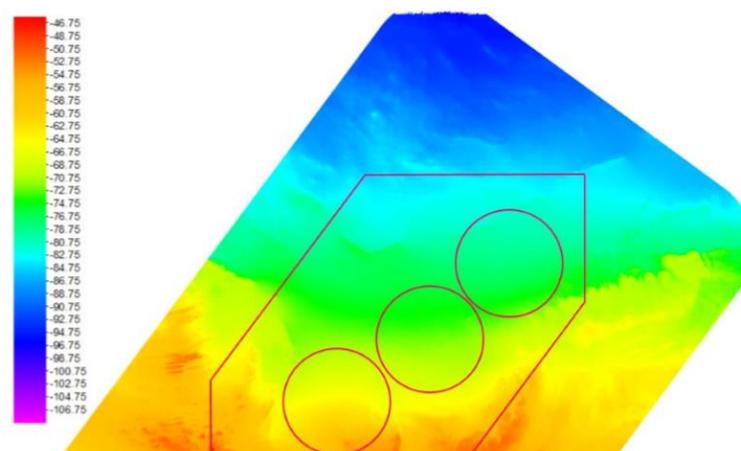


Ilustración 49. Batimetría de BiMEP [9]

Por otro lado, BiMEP tiene unas modernas instalaciones submarinas de conexión a la red eléctrica en tierra y de un sistema de telecomunicaciones para recoger y analizar sistemáticamente los datos de los sistemas que se ensayan.

Unas boyas de balizamiento delimitan la zona de mar reservada y una boya oceanográfica monitoriza las condiciones atmosféricas y de oleaje de la zona. Cuatro cables submarinos de potencia y control de 5 MW conectan los 4 puntos de conexión a la subestación en tierra.

Las características del mar Cantábrico crean unas condiciones excepcionales para probar la eficacia de nuevos mecanismos y tecnologías para el aprovechamiento energético de las olas que están desarrollando empresas de toda Europa.

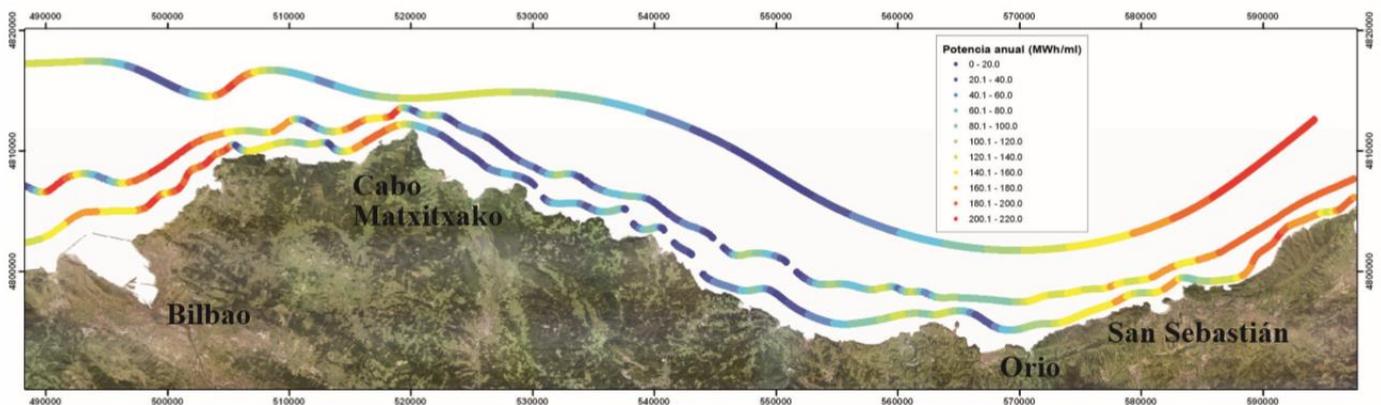


Ilustración 50. Potencia anual por metro accesible que atraviesa perpendicularmente las batimetrías de 30, 60 y 100 metros [10]

Según el informe «Metocean Analysis of BiMEP for Offshore Design» [4] realizado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, las características del oleaje de la zona BiMEP se resumen de la siguiente forma:

- La media de altura significativa de ola es 1.67 m y el intervalo de altura significativa con mayor frecuencia de ocurrencia está entre 1-1.5 m.
- La distribución normal logarítmica es la que mejor se ajusta a la altura de ola significativa, con $\mu = 0.35$ y $\sigma = 0.56$.
 - La distribución normal logarítmica es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo está normalmente distribuido. Es decir, si X es una variable aleatoria con distribución normal, entonces $\exp(X)$ tiene una distribución log-normal.
 - Mediana = $\exp(\mu) = 1.42 \rightarrow$ La mediana representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

- Desviación estándar geométrica = $\exp(\sigma) = 1.75 \rightarrow$ La desviación estándar geométrica describe cómo dispersa un conjunto de números cuyo promedio de referencia es la media geométrica (adimensional).

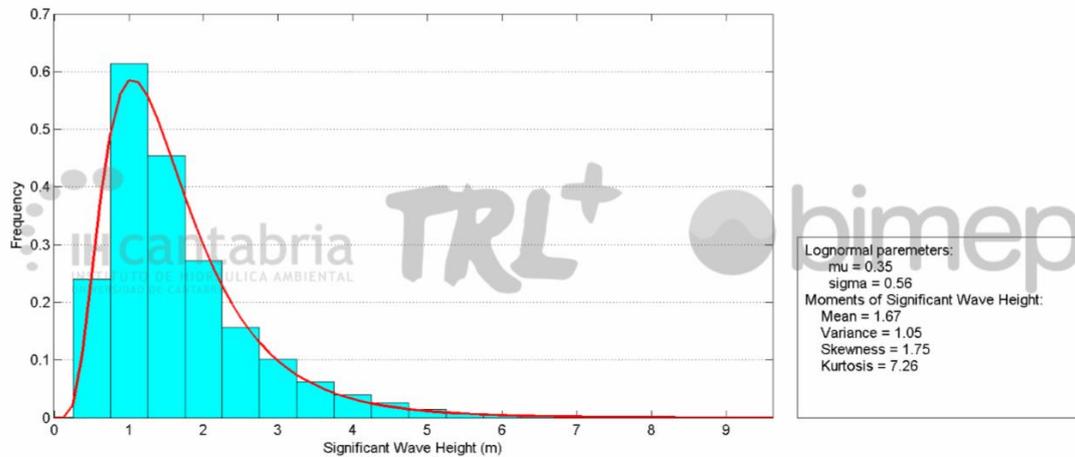


Ilustración 51. Distribución Hs [4]

- El periodo medio es de 9.03 s y el intervalo del periodo de energía con mayor ocurrencia está entre 8-9 s.
- La distribución gamma es la distribución que mejor se ajusta al periodo de energía, con $a=11.68$ y $b=0.77$.
 - La distribución gamma modeliza valores de datos positivos que sean asimétricos a la derecha y mayores que 0. Se utiliza comúnmente en estudios de supervivencia de fiabilidad. Por ejemplo, cuando fallará un componente concreto de un dispositivo.
 - La distribución gamma es una distribución continua que se define por sus parámetros de forma (a) y escala (θ).
 - $a > 0 \rightarrow$ Cuanto mayor sea el parámetro de forma (a), más a la derecha y más centrado está el pico de la distribución y éste es menos puntiagudo.
 - $b = 1/\theta, b > 0 \rightarrow$ Cuanto más grande es el factor de escala (θ), menor es b y más dispersa es la distribución.
 - Como se puede ver en la siguiente ilustración, el pico de la distribución gamma del periodo de energía está considerablemente desplazado a la derecha y prácticamente centrado.

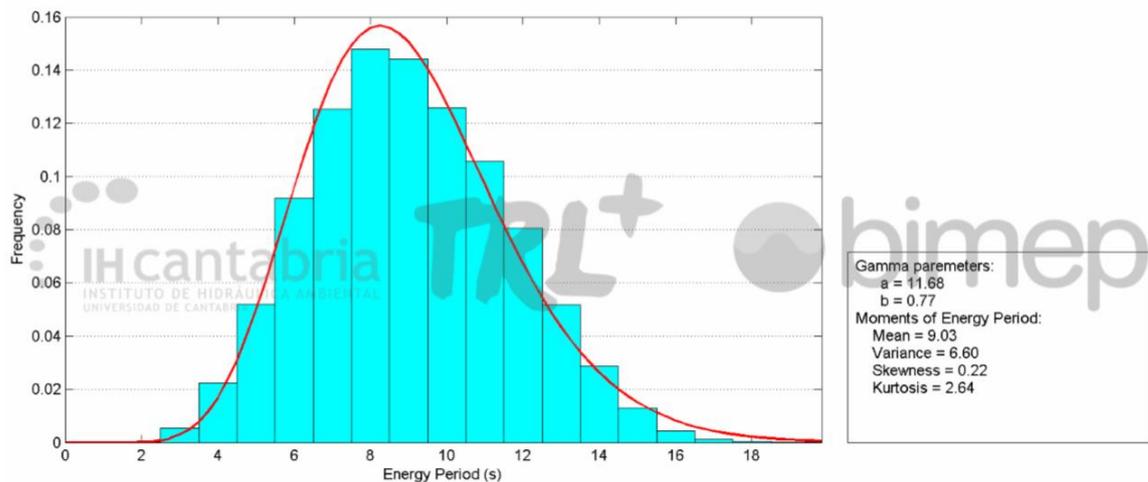


Ilustración 52. Distribución T_e [4]

- Las medias de altura de ola significativas más altas ocurren en enero y febrero y son de más de 2 m.

	Average wave height	Maximum wave height	Average wave direction
Average	1,67	9,62	320,82
January	2,34	9,41	318,47
February	2,20	9,62	320,11
March	1,92	9,43	321,91
April	1,67	7,72	321,72
May	1,28	5,37	321,56
June	1,15	4,07	321,34
July	1,15	4,54	319,89
August	1,17	4,24	321,84
September	1,33	6,42	324,14
October	1,66	5,87	318,84
November	2,08	8,38	320,69
December	2,13	8,84	319,25

Tabla 12. Hs media y máxima y media de la dirección del oleaje por meses [4]

- El régimen predominante de olas viene del noroeste.

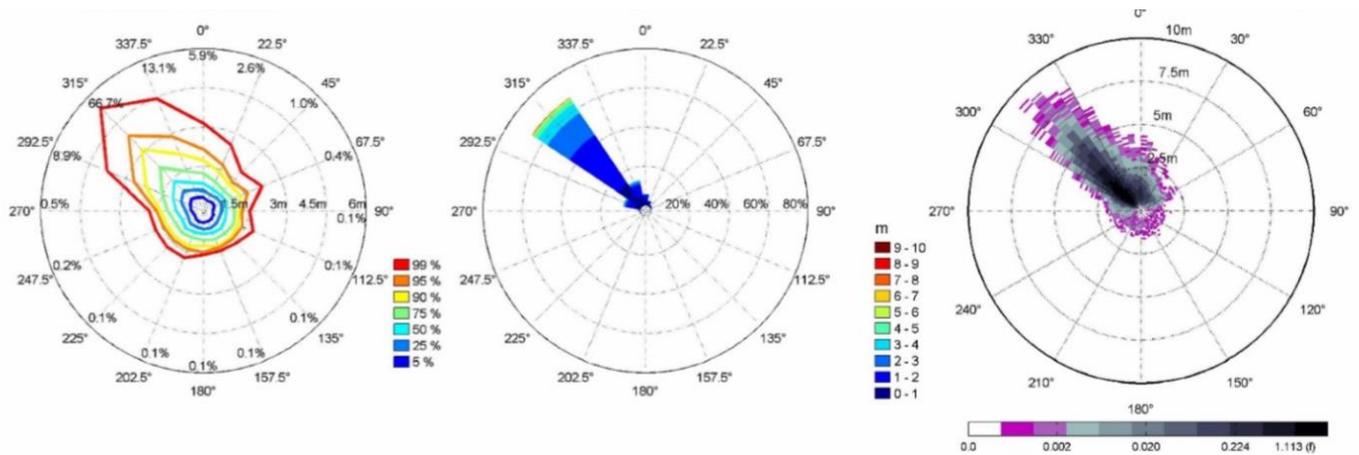


Ilustración 53. Rosas Hs [4]

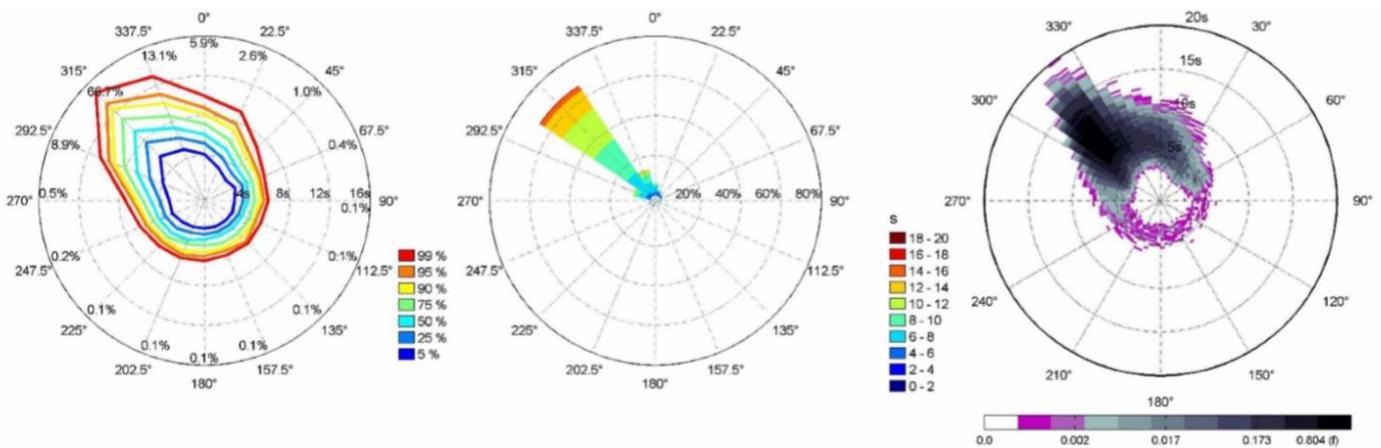


Ilustración 54. Rosas Te [4]

- El pico de energía en el espectro de ola media ocurre en 14 s y con dirección noroeste.
- En la siguiente figura se representa el rango de periodos existentes para Hs, formando una banda de posibles tipos de oleaje que se pueden dar en BiMEP.

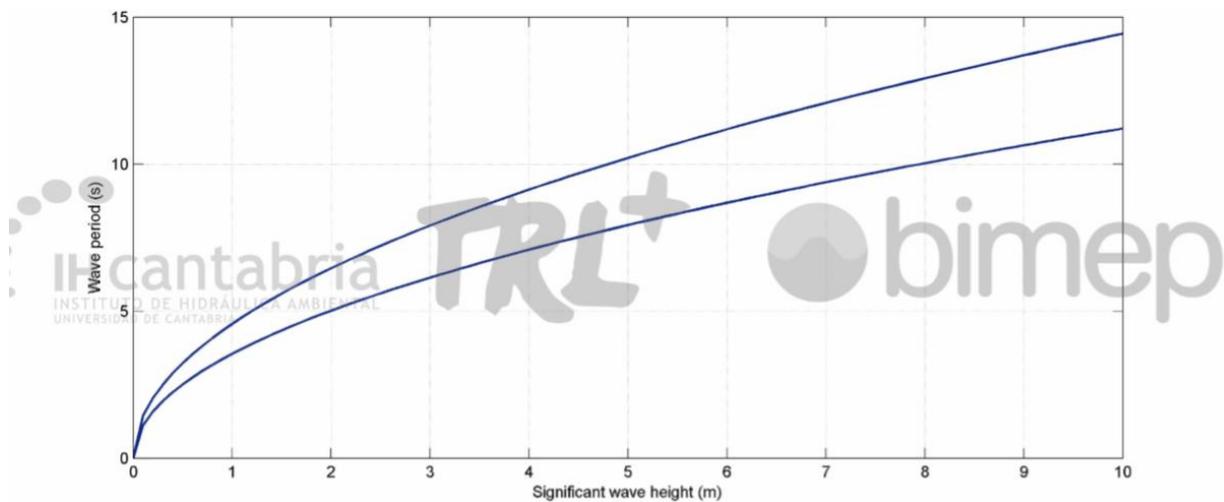


Ilustración 55. Rango de Te para Hs [4]

Finalmente, en la siguiente tabla se define la frecuencia de ocurrencia de cada posible combinación de Hs y Te. Los valores no nulos son aquellos marcados de color amarillo, y suman un total de 158 combinaciones Hs-Te. Para una mejor visualización se divide la tabla en dos páginas. Además, cabe destacar que debido a los decimales no mostrados en la publicación del IH Cantabria [4], el total de ocurrencia no suma un 100 %, sino un 99.93 %.

Frecuencia (%)		Periodo de energía, Te (s)											
		0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	6 – 7	7 – 8	8 – 9	9 – 10	10 – 11	11 – 12
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.00	0.00	0.08	0.34	0.53	0.51	0.47	0.25	0.12	0.05	0.01	0.01
	0,5-1	0.00	0.00	0.07	0.82	2.24	3.98	5.29	5.62	3.74	1.89	0.9	0.36
	1-1,5	0.00	0.00	0.00	0.05	0.78	2.02	3.55	4.77	5.85	5.07	3.31	1.56
	1,5-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.50	1.29	2.13	2.63	3.15	3.18	2.59
	2-2,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.31	0.83	1.21	1.39	1.76	1.90
	2,5-3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.31	0.58	0.84	0.93	1.15
	3-3,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.33	0.49	0.58	0.69
	3,5-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.17	0.32	0.38	0.42
	4-4,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.16	0.25	0.26
	4,5-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.15	0.17
	5-5,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.10
	5,5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06
	6-6,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05
	6,5-7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	7-7,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	7,5-8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8-8,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8,5-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
>9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total (%)	0.00	0.00	0.15	1.21	3.58	7.06	10.97	14.01	14.67	13.44	11.55	9.35	
Media Hs (m)		0.24	0.49	0.64	0.79	0.94	1.06	1.22	1.43	1.68	1.95	2.28	

Tabla 13. Hs-Te-Ocurrencia 1 [4]

Frecuencia (%)											
		12 – 13	13 – 14	14 – 15	15 – 16	16 – 7	17 – 18	18 – 19	>19	Total (%)	
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.37
	0,5-1	0.15	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.11
	1-1,5	0.70	0.24	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.97
	1,5-2	1.40	0.55	0.16	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	17.67
	2-2,5	1.62	0.84	0.26	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	10.27
	2,5-3	1.07	0.86	0.32	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	6.23
	3-3,5	0.73	0.64	0.29	0.12	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	3.99
	3,5-4	0.41	0.40	0.24	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	2.48
	4-4,5	0.26	0.31	0.16	0.10	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	1.61
	4,5-5	0.17	0.18	0.09	0.07	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.96
	5-5,5	0.10	0.10	0.09	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52
	5,5-6	0.09	0.06	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
	6-6,5	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
	6,5-7	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
	7-7,5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
	7,5-8	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
	8-8,5	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	8,5-9	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
>9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total (%)	6.80	4.32	1.79	0.70	0.29	0.04	0.00	0.00	0.00	99.93	
Media Hs (m)	2.59	2.97	3.35	3.80	4.08	4.20	4.34	4.15	4.15	1.67	

Tabla 14. Hs-Te-Ocurrencia 2 [4]

2.7. Descripción de los cálculos y resultados

En esta sección del trabajo se procede a la evaluación del comportamiento del dispositivo. Primero, se analiza el caso concreto en el que el dispositivo RM3 se somete a las condiciones medias de $H_s = 1.67$ m y $T_e = 9.03$ s. A continuación, se realiza un análisis del desempeño global del dispositivo. Además, en el anexo II se recogen al completo los resultados obtenidos de todas las posibles combinaciones de condiciones del oleaje.

Como bien se ha explicado anteriormente, el simulador WEC-Sim permite obtener todas aquellas salidas de datos que se consideren necesarias. Para la evaluación realizada en este proyecto se seleccionan las salidas más relevantes, que son de dos tipos: datos numéricos y gráficas.

- Datos numéricos: potencia eléctrica media, presión media de los acumuladores de alta y baja presión, máximo desplazamiento vertical de los cuerpos 1 y 2, máxima velocidad vertical de los cuerpos 1 y 2, y máxima aceleración vertical de los cuerpos 1 y 2.
- Gráficas: potencia absorbida, potencia mecánica y potencia eléctrica, presión de los acumuladores de alta y baja presión, repuesta vertical del cuerpo 1 (desplazamiento, velocidad y aceleración), repuesta vertical del cuerpo 2 (desplazamiento, velocidad y aceleración), fuerzas verticales en el cuerpo 1 y fuerzas verticales en el cuerpo 2.

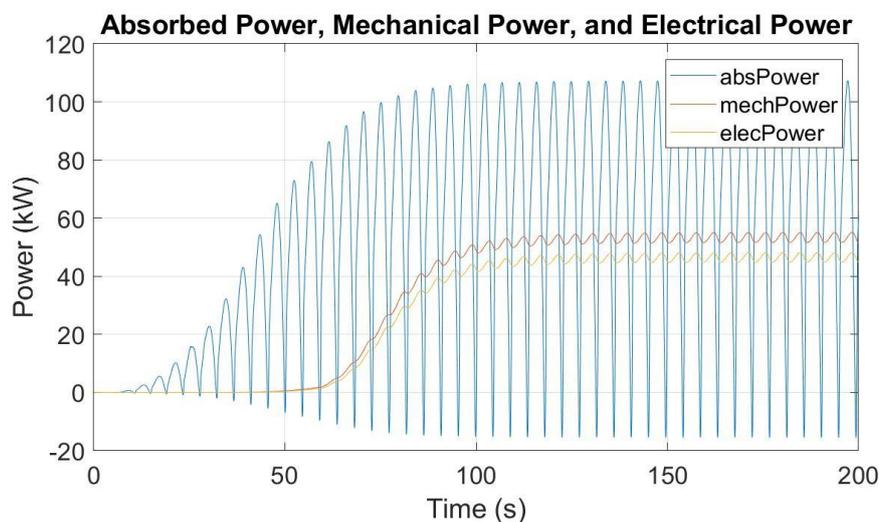
Finalmente, cabe destacar que no todos los datos se han empleado para los posteriores cálculos: únicamente se utilizan las potencias eléctricas. Sin embargo, todas las salidas obtenidas, sirven como representativas del comportamiento del dispositivo, pues en función de los cálculos que se quieran realizar son imprescindibles unos u otros datos.

2.7.1. Evaluación del dispositivo RM3: $H_s = 1.67$ m y $T_e = 9.03$ s

Con objeto de simplificar la explicación, únicamente se analizan las características del dispositivo en las condiciones medias de oleaje: $H_s = 1.67$ m y $T_e = 9.03$ s. Sin embargo, para realizar los cálculos que más adelante son expuestos, se emplean los datos de las 158 combinaciones H_s - T_e que se dan en la zona de BiMEP. Las gráficas más relevantes de las ejecuciones de dichas simulaciones quedan recogidas en el anexo II.

En estas condiciones de oleaje, y tras la estabilización del sistema, se obtienen los siguientes valores:

- Potencia eléctrica media: 46.4843 kW
- Presión media del acumulador de alta presión: 23.3161 MPa
- Presión media del acumulador de baja presión: 17.6557 MPa
- Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (cuerpo 1): 0.7762 m, 0.5359 m/s y 0.4322 m/s²
- Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (cuerpo 2): 0.1369 m, 0.0956 m/s y 0.0766 m/s²

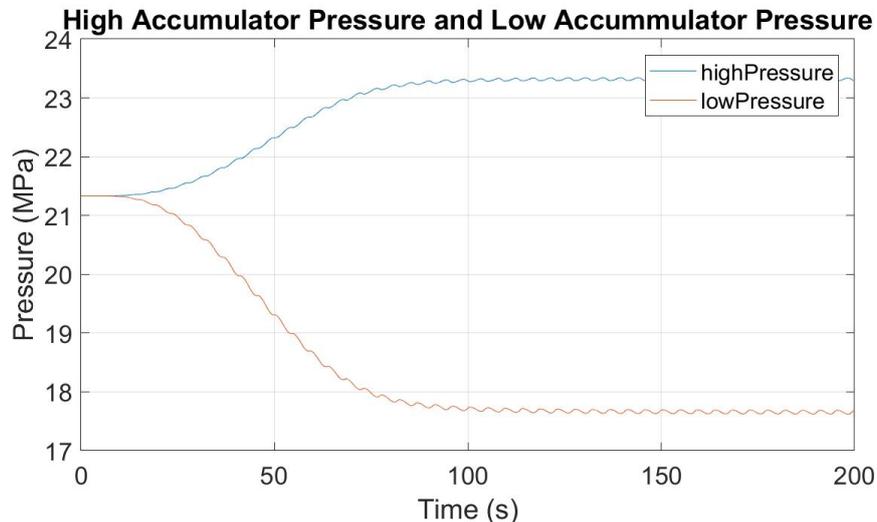


Gráfica 1. Potencia absorbida, potencia mecánica y potencia eléctrica

En esta gráfica, se puede observar como la potencia mecánica y la potencia eléctrica crecen hasta que llegan a un límite en el que se estabilizan y se mantienen más o menos constantes. Son dos los motivos por los que ocurre esto:

1. El simulador comienza con una rampa (hasta los 50 segundos) que hace que el impacto del oleaje sobre el dispositivo sea gradual. De esta manera, se consigue que no se colapse el simulador.

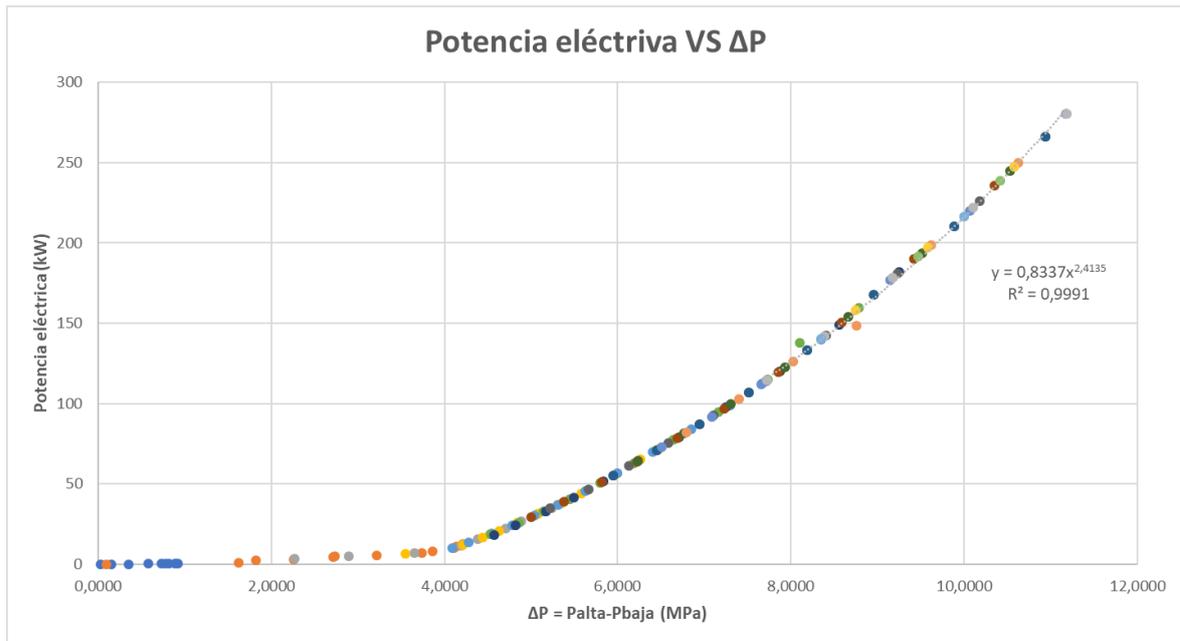
- Por otro lado, cuando el dispositivo comienza a funcionar, los acumuladores de presión están a la misma presión (21.33 MPa) y necesitan un tiempo para ajustarse a las condiciones a las que se le somete.



Gráfica 2. Acumuladores de alta y baja presión

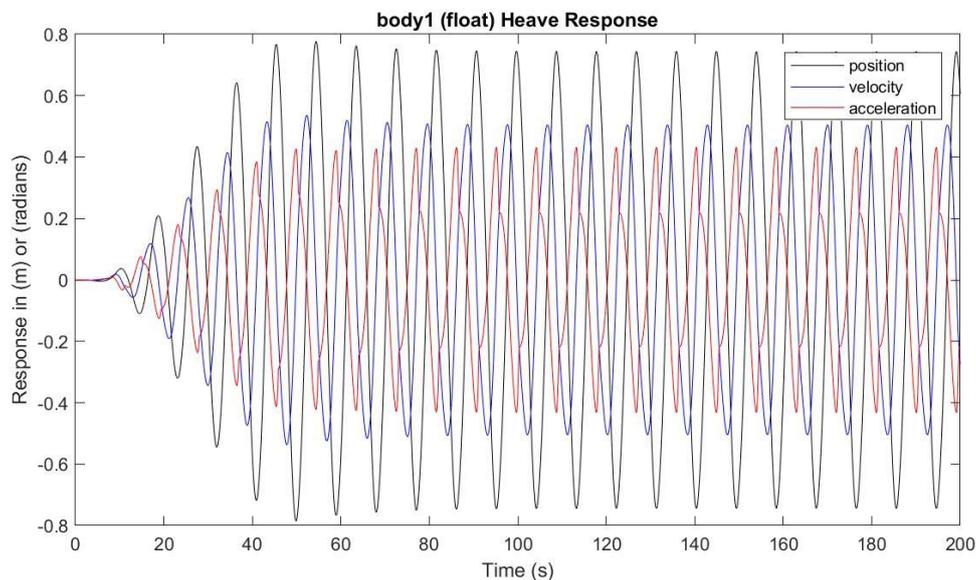
También cabe destacar que la potencia absorbida alcanza valores negativos, la explicación de este fenómeno se debe a que el dispositivo en su comportamiento vertical recorre un desplazamiento mayor al restaurar su posición de equilibrio.

Por otro lado, en la siguiente gráfica se puede apreciar como la diferencia de presiones entre los acumuladores de alta y de baja presión está directamente relacionada con la potencia eléctrica extraída. Para poder realizar el cálculo, se coge la media de cada acumulador de presión, ya que como se puede ver en la Gráfica 2 ambos valores oscilan con el propósito de generar una potencia eléctrica aproximadamente constante. Insertando una línea de regresión, la que más se aproxima es la forma potencial ($y=0.8337x^{2.4135}$), y como queda demostrado en la gráfica se ajusta a la perfección ($R^2=0.9991$)

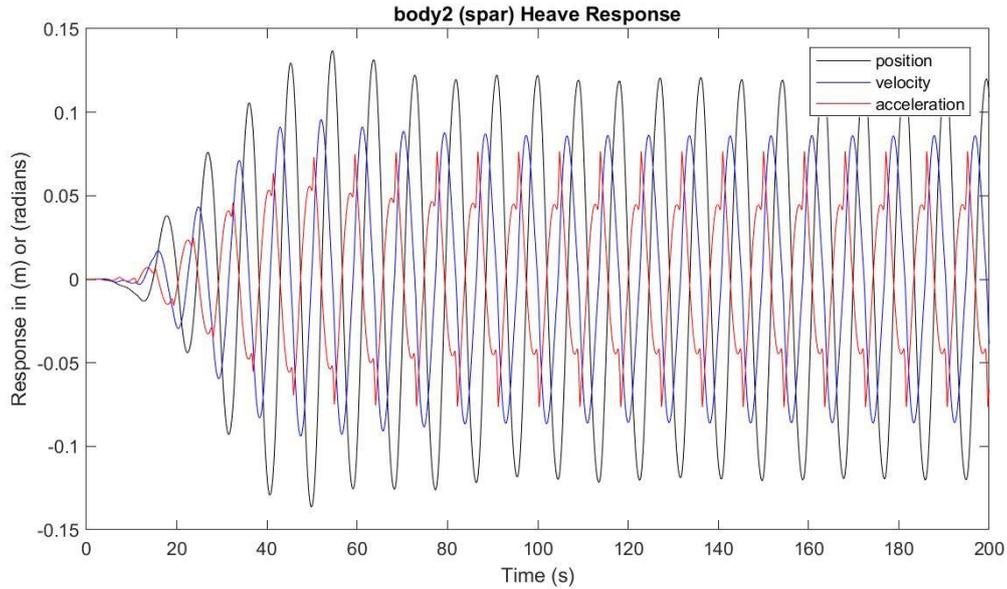


Gráfica 3. Potencia eléctrica Vs. Diferencia de presiones

En cuanto al desplazamiento de los sólidos, en las siguientes gráficas se aprecia como el cuerpo 1 tiene un desplazamiento máximo mucho mayor (0.7762 m), comparado con el del cuerpo 2 (0.1369 m). De esta forma, se consigue un movimiento entre ambos sólidos que permite la conversión de la energía de la ola en energía eléctrica.

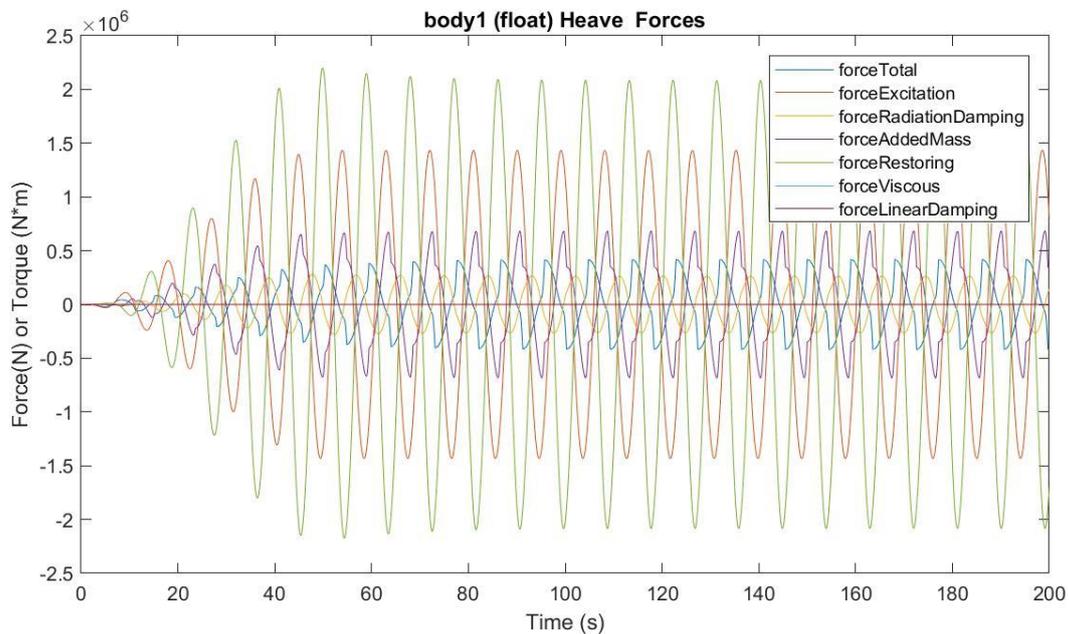


Gráfica 4. Respuesta del cuerpo 1: desplazamiento, velocidad y aceleración

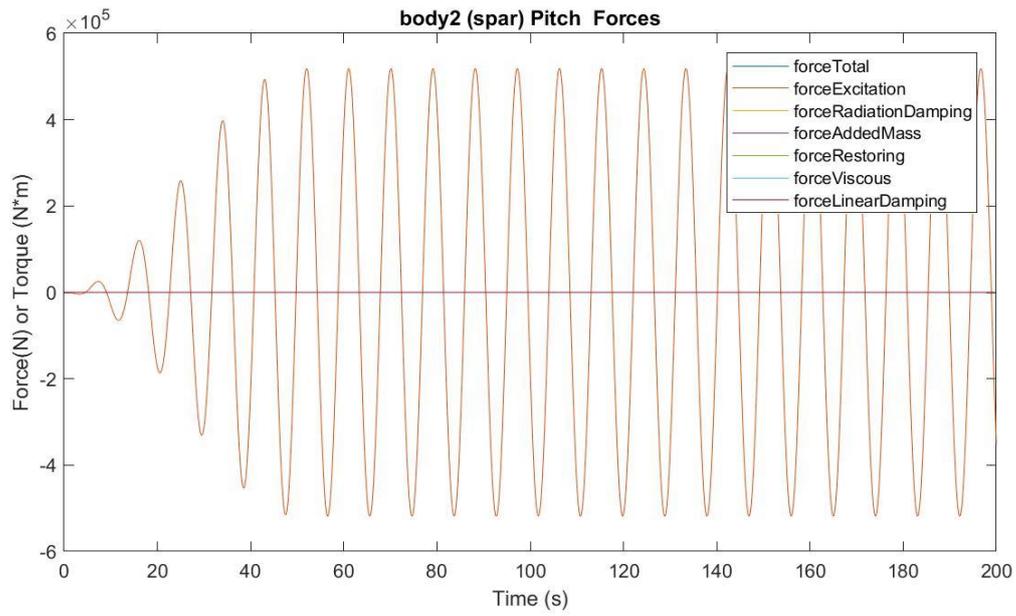


Gráfica 5. Respuesta del cuerpo 2: desplazamiento, velocidad y aceleración

Finalmente, respecto a las fuerzas a las que están sometidos los sólidos, cabe destacar que el flotador se ve sometido a muchas más fuerzas que la columna. Esto se debe a que con el diseño del dispositivo lo que se quiere conseguir es que el cuerpo 1 se mueva relativamente a un sólido “fijo” (cuerpo 2).



Gráfica 6. Fuerzas en el cuerpo 1



Gráfica 7. Fuerzas en el cuerpo 2

2.7.2. Análisis global del dispositivo RM3

Uno de los objetivos del presente trabajo es evaluar el desempeño del dispositivo RM3 y aplicar un protocolo de evaluación de dispositivos. El protocolo utilizado sigue los pasos expuestos en el artículo de Liliana Rusu llamado «The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power» [11].

En primer lugar, es preciso obtener la potencia eléctrica esperada (P_E). Este término hace referencia a la media ponderada de la potencia eléctrica que el dispositivo es capaz de extraer según la ocurrencia de cada tipo de oleaje. Para ello, es necesario generar una matriz de potencia y combinarla con la distribución bivariante de ocurrencia ($H_s - T_e$) de la Tabla 13 y de la Tabla 14 de la zona BiMEP.

La expresión matemática correspondiente a la potencia eléctrica esperada se puede definir de la siguiente forma:

$$P_E = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{nT} \sum_{j=1}^{nH} PW_{ij} \cdot PM_{ij}$$

Donde:

- PW_{ij} : es la frecuencia de ocurrencia de la distribución bivariante definida por la columna j y la fila i .
- PM_{ij} : es la potencia de la matriz de potencias definida por la misma columna j y la misma fila i .

Un modo de obtener la matriz de potencia del dispositivo WEC es a través de simulaciones de métodos numéricos, que en este caso se hacen a través de WEC-Sim. Mediante la aproximación teórica se puede obtener una estimación bastante realista. No obstante, esta aproximación no considera todas las condiciones en las que el sistema tiene pérdidas (algunas eficiencias sí se tienen en cuenta), por lo que los resultados teóricos de la potencia serán algo mayores que los de la realidad.

Teniendo en cuenta la distribución de ocurrencia bivariante ($H_s - T_e$), únicamente se han ejecutado las simulaciones de aquellas combinaciones de altura significativa y periodo en las que la frecuencia de ocurrencia no sea nula. Ante esta condición, se

simulan un total de 158 combinaciones distintas, cuyos resultados completos se muestran en el anexo II.

En las siguientes tablas (Tabla 15 y Tabla 16) se recogen únicamente los datos de potencia eléctrica, generando así la matriz de potencia correspondiente a este dispositivo (los huecos en blanco son aquellas combinaciones que no son características del oleaje de la zona BiMEP). A continuación, se muestran también las tablas de las matrices obtenidas a partir del producto $\frac{PW_{ij}}{100} \cdot PM_{ij}$ (Tabla 17 y Tabla 18).

Potencia RM3 (kw)			Periodo de energía, Te (s)										
			0 – 1 0.5	1 – 2 1,5	2 – 3 2.5	3 – 4 3.5	4 – 5 4.5	5 – 6 5.5	6 – 7 6.5	7 – 8 7.5	8 – 9 8.5	9 – 10 9.5	10 – 11 10.5
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25			0.0001	0.0058	0.0708	0.2472	0.4532	0.5816	0.6025	0.5402	0.4437
	0,5-1	0.75			0.0022	0.7761	4.8145	7.8235	11.2743	12.5368	12.0427	10.0893	6.9884
	1-1,5	1.25				3.2490	18.8172	32.9724	36.7635	35.0491	31.1906	26.6615	22.4389
	1,5-2	1.75					44.1059	70.8483	72.1339	65.4092	55.6631	46.0901	37.9012
	2-2,5	2.25						114.5157	112.0257	98.9939	83.9187	69.6960	56.6603
	2,5-3	2.75							159.7447	137.8987	114.8594	94.5794	77.2549
	3-3,5	3.25								182.1156	149.0725	120.1008	97.5336
	3,5-4	3.75								233.4000	192.1092	154.5010	122.8893
	4-4,5	4.25									235.4550	189.8369	150.6742
	4,5-5	4.75										225.9043	181.1635
	5-5,5	5.25										266.0349	210.3870
	5,5-6	5.75											244.7860
	6-6,5	6.25											280.2011
	6,5-7	6.75											
	7-7,5	7.25											
7,5-8	7.75												
8-8,5	8.25												
8,5-9	8.75												
>9													
Media Hs (m)			0.24	0.49	0.64	0.79	0.94	1.06	1.22	1.43	1.68	1.95	

Tabla 15. Matriz de potencia del RM3 (1) [elaboración propia]

Potencia RM3 (kw)												Media Te(s)	
			11 – 12	12 – 13	13 – 14	14 – 15	15 – 16	16 – 7	17 – 18	18 – 19	>19		
			11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5			
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25	0.3408										5.58
	0,5-1	0.75	5.5859	4.3035	3.1849	2.2266							7.07
	1-1,5	1.25	18.7110	15.3773	11.4868	6.7789	4.8609						8.48
	1,5-2	1.75	31.1417	25.5302	20.8183	16.6378	12.0637	6.6357					9.65
	2-2,5	2.25	45.5744	37.0677	30.1814	24.2361	19.0110	13.6306	9.9006				10.63
	2,5-3	2.75	62.7822	50.3851	40.5702	32.7520	25.9523	18.8253					11.23
	3-3,5	3.25	79.1828	64.4626	51.7006	41.5477	32.9438	24.0351	18.1639				11.64
	3,5-4	3.75	99.1662	80.6759	65.6879	52.5012	41.8769	31.6388					11.89
	4-4,5	4.25	119.3515	96.8645	78.6864	64.0275	51.0644	38.8138	29.4720				12.39
	4,5-5	4.75	142.5013	114.0442	92.5052	75.3162	61.1220	46.6596	34.7557				12.69
	5-5,5	5.25	167.9481	133.0436	107.0929	87.1231	71.1140	55.2086					12.98
	5,5-6	5.75	193.8086	154.1849	122.5171	99.5334	81.2927	64.2242					13.04
	6-6,5	6.25	220.0719	176.8555	139.8648	112.4877	91.9156	73.0609					13.12
	6,5-7	6.75	249.7943	198.5230	148.4692	126.2858	103.0056	82.1037					13.37
	7-7,5	7.25	280.4340	221.7650	178.1941	141.6599	114.4874						13.90
	7,5-8	7.75		247.4383	196.9487	157.8780							13.78
8-8,5	8.25			216.4507		140.1946						14.12	
8,5-9	8.75			238.6522	191.6894							14.05	
>9												14.13	
Media Hs (m)			2.28	2.59	2.97	3.35	3.80	4.08	4.20	4.34	4.15	1.67	

Tabla 16. Matriz de potencia del RM3 (2) [elaboración propia]

Potencia RM3 (kw) x ocurrencia /100			Periodo de energía, Te (s)										
			0 – 1 0.5	1 – 2 1,5	2 – 3 2.5	3 – 4 3.5	4 – 5 4.5	5 – 6 5.5	6 – 7 6.5	7 – 8 7.5	8 – 9 8.5	9 – 10 9.5	10 – 11 10.5
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0013	0.0021	0.0015	0.0007	0.0003	0.0000
	0,5-1	0.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0064	0.1078	0.3114	0.5964	0.7046	0.4504	0.1907	0.0629
	1-1,5	1.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0016	0.1468	0.6660	1.3051	1.6718	1.8247	1.3517	0.7427
	1,5-2	1.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0132	0.3542	0.9305	1.3932	1.4639	1.4518	1.2053
	2-2,5	2.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0573	0.3473	0.8216	1.0154	0.9688	0.9972
	2,5-3	2.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0958	0.4275	0.6662	0.7945	0.7185
	3-3,5	3.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1639	0.4919	0.5885	0.5657
	3,5-4	3.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0233	0.3266	0.4944	0.4670
	4-4,5	4.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0942	0.3037	0.3767
	4,5-5	4.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1581	0.2717
	5-5,5	5.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0266	0.1262
	5,5-6	5.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0734
	6-6,5	6.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0280
	6,5-7	6.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	7-7,5	7.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	7,5-8	7.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	8-8,5	8.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	8,5-9	8.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	>9		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Media Hs (m)			0.24	0.49	0.64	0.79	0.94	1.06	1.22	1.43	1.68	1.95	

Tabla 17. Matriz de potencia del RM3 x ocurrencia (1) [elaboración propia]

Potencia RM3 (kw) x ocurrencia /100													Media Te(s)	
			11 – 12 11.5	12 – 13 12.5	13 – 14 13.5	14 – 15 14.5	15 – 16 15.5	16 – 7 16.5	17 – 18 17.5	18 – 19 18.5	>19			
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.58
	0,5-1	0.75	0.0201	0.0065	0.0013	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.07
	1-1,5	1.25	0.2919	0.1076	0.0276	0.0041	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.48
	1,5-2	1.75	0.8066	0.3574	0.1145	0.0266	0.0060	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.65
	2-2,5	2.25	0.8659	0.6005	0.2535	0.0630	0.0133	0.0027	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.63
	2,5-3	2.75	0.7220	0.5391	0.3489	0.1048	0.0208	0.0056	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.23
	3-3,5	3.25	0.5464	0.4706	0.3309	0.1205	0.0395	0.0048	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.64
	3,5-4	3.75	0.4165	0.3308	0.2628	0.1260	0.0377	0.0127	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.89
	4-4,5	4.25	0.3103	0.2518	0.2439	0.1024	0.0511	0.0233	0.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.39
	4,5-5	4.75	0.2423	0.1939	0.1665	0.0678	0.0428	0.0233	0.0035	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.69
	5-5,5	5.25	0.1679	0.1330	0.1071	0.0784	0.0213	0.0166	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	12.98
	5,5-6	5.75	0.1163	0.1388	0.0735	0.0398	0.0244	0.0064	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.04
	6-6,5	6.25	0.1100	0.0884	0.0559	0.0225	0.0184	0.0073	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.12
	6,5-7	6.75	0.0500	0.0596	0.0297	0.0253	0.0103	0.0082	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.37
	7-7,5	7.25	0.0280	0.0222	0.0178	0.0142	0.0114	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.90
	7,5-8	7.75	0.0000	0.0247	0.0197	0.0158	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.78
8-8,5	8.25	0.0000	0.0000	0.0216	0.0000	0.0140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.12	
8,5-9	8.75	0.0000	0.0000	0.0239	0.0192	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.05	
>9			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.13	
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.03	
Media Hs (m)			2.28	2.59	2.97	3.35	3.80	4.08	4.20	4.34	4.15	1.67		

Tabla 18. Matriz de potencia del RM3 x ocurrencia (2) [elaboración propia]

Continuando con el cálculo de la potencia eléctrica esperada:

$$P_E = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{nT} \sum_{j=1}^{nH} PW_{ij} \cdot PM_{ij} = 39.8309 \text{ kW}$$

Con el fin de analizar el desempeño completo del dispositivo, se emplean algunos parámetros sintéticos.

El primer parámetro es el factor de capacidad (C_f), que es el cociente entre la energía real generada durante un periodo y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante el mismo periodo de tiempo. Es una indicación de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo y queda expresado en porcentaje y definido como:

$$C_f = 100 \cdot \frac{P_E}{RP}$$

Donde:

- P_E : es la potencia eléctrica esperada
- RP (rated power): se define como el valor máximo de la matriz de potencia del dispositivo

$$C_f = 100 \cdot \frac{39.8309 \text{ kW}}{280.4340 \text{ kW}} = 14.20\%$$

A la hora de comparar las alternativas de dispositivos a colocar en una zona determinada, este factor permite ordenarlos de forma que los que mejor se adecuan a las características del oleaje son aquellos que tienen un C_f mayor.

Como es bien sabido, el potencial de energía de las olas se expresa en energía por metro de frente de ola. Debido a esto, otro parámetro importante es la anchura captadora (en m), que se utiliza para estimar la porción del frente de ola de la que el dispositivo genera potencia:

$$C_W = \frac{P_E}{P_W}$$

Donde:

- P_E : es la potencia eléctrica esperada
- P_W : es la potencia de ola por metro de ancho de ola

Para obtener P_W se procede de forma similar que para la obtención de P_E . En primer lugar, se genera una matriz bivariante de potencias en función de $H_s - T_e$. Para ello, se utiliza la expresión previamente explicada:

$$P_W = \frac{g^2 \cdot \rho_w \cdot H_s^2 \cdot T_e}{64\pi \cdot 1000}$$

Aplicando esta ecuación a todas las posibles combinaciones se obtienen la Tabla 19 y la Tabla 20. El siguiente paso, igual que en el caso anterior, es generar otra matriz a partir del producto $\frac{P_{Wij}}{100} \cdot P_{Mij}$ (Tabla 21 y Tabla 22).

$$P_W = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{nT} \sum_{j=1}^{nH} P_{Wij} \cdot P_{Mij} = 20.65 \frac{kW}{m}$$

Y así:

$$C_W = \frac{P_E}{P_W} = \frac{39.8309 kW}{20.65 kW/m} = 1.928 m$$

Con respecto a este parámetro, se puede mencionar que un sitio con energía de ola moderada puede tener un ancho de captura mayor, lo que puede abrir paso al uso de los sistemas WEC en los sectores costeros donde los procesos de erosión representan un problema real, como en el caso de los mares cerrados.

De hecho, el dispositivo RM3 tiene un ancho mínimo de 6 m (columna) y un ancho máximo de 20 m (flotador) y de 30 m (placa-base inferior). Esto quiere decir, que el dispositivo absorbe parte de la potencia existente en su zona de alcance, como era de esperar.

Finalmente, la comparación con otros dispositivos permite observar una relación inversa entre los parámetros C_f y C_W , lo que puede interpretarse como que los WEC usan el frente de onda de manera más eficiente, al extraer más energía de un área más pequeña. Sin embargo, esta comparación no forma parte del alcance de este trabajo.

Potencia teórica por metro de ancho de ola(kw/m)			Periodo de energía, Te (s)											
			0 – 1 0.5	1 – 2 1, 5	2 – 3 2.5	3 – 4 3.5	4 – 5 4.5	5 – 6 5.5	6 – 7 6.5	7 – 8 7.5	8 – 9 8.5	9 – 10 9.5	10 – 11 10.5	11 – 12 11.5
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25	0.0153	0.0460	0.0767	0.1073	0.1380	0.1686	0.1993	0.2300	0.2606	0.2913	0.3220	0.3526
	0,5-1	0.75	0.1380	0.4139	0.6899	0.9659	1.2418	1.5178	1.7938	2.0697	2.3457	2.6217	2.8976	3.1736
	1-1,5	1.25	0.3833	1.1499	1.9164	2.6830	3.4496	4.2161	4.9827	5.7493	6.5158	7.2824	8.0490	8.8156
	1,5-2	1.75	0.7512	2.2537	3.7562	5.2587	6.7612	8.2636	9.7661	11.2686	12.7711	14.2735	15.7760	17.2785
	2-2,5	2.25	1.2418	3.7255	6.2092	8.6929	11.1766	13.6603	16.1440	18.6277	21.1113	23.5950	26.0787	28.5624
	2,5-3	2.75	1.8551	5.5653	9.2755	12.9857	16.6959	20.4061	24.1163	27.8265	31.5367	35.2469	38.9571	42.6673
	3-3,5	3.25	2.5910	7.7730	12.9550	18.1371	23.3191	28.5011	33.6831	38.8651	44.0471	49.2292	54.4112	59.5932
	3,5-4	3.75	3.4496	10.3487	17.2478	24.1470	31.0461	37.9452	44.8444	51.7435	58.6426	65.5418	72.4409	79.3400
	4-4,5	4.25	4.4308	13.2923	22.1539	31.0154	39.8770	48.7385	57.6001	66.4617	75.3232	84.1848	93.0463	101.9079
	4,5-5	4.75	5.5346	16.6039	27.6732	38.7425	49.8117	60.8810	71.9503	83.0196	94.0889	105.1581	116.2274	127.2967
	5-5,5	5.25	6.7612	20.2835	33.8058	47.3281	60.8504	74.3727	87.8950	101.4173	114.9396	128.4619	141.9842	155.5065
	5,5-6	5.75	8.1103	24.3309	40.5516	56.7722	72.9928	89.2135	105.4341	121.6547	137.8754	154.0960	170.3166	186.5372
	6-6,5	6.25	9.5821	28.7464	47.9107	67.0749	86.2392	105.4034	124.5677	143.7320	162.8962	182.0605	201.2247	220.3890
	6,5-7	6.75	11.1766	33.5298	55.8830	78.2362	100.5894	122.9426	145.2958	167.6490	190.0021	212.3553	234.7085	257.0617
	7-7,5	7.25	12.8937	38.6811	64.4686	90.2560	116.0434	141.8309	167.6183	193.4057	219.1931	244.9806	270.7680	296.5554
7,5-8	7.75	14.7335	44.2005	73.6674	103.1344	132.6014	162.0683	191.5353	221.0023	250.4692	279.9362	309.4032	338.8701	
8-8,5	8.25	16.6959	50.0877	83.4795	116.8713	150.2631	183.6549	217.0468	250.4386	283.8304	317.2222	350.6140	384.0058	
8,5-9	8.75	18.7810	56.3429	93.9049	131.4668	169.0288	206.5907	244.1527	281.7146	319.2766	356.8385	394.4005	431.9624	
>9														
Media Hs (m)			0.24	0.49	0.64	0.79	0.94	1.06	1.22	1.43	1.68	1.95	2.28	

Tabla 19. Potencia por metro de ancho de ola 1 [elaboración propia]

Potencia teórica por metro de ancho de ola(kw/m)											Media Te(s)	
			12 – 13 12.5	13 – 14 13.5	14 – 15 14.5	15 – 16 15.5	16 – 7 16.5	17 – 18 17.5	18 – 19 18.5	>19		
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25	0.3833	0.4139	0.4446	0.4753	0.5059	0.5366	0.5673			5.58
	0,5-1	0.75	3.4496	3.7255	4.0015	4.2775	4.5534	4.8294	5.1054			7.07
	1-1,5	1.25	9.5821	10.3487	11.1153	11.8818	12.6484	13.4150	14.1816			8.48
	1,5-2	1.75	18.7810	20.2835	21.7859	23.2884	24.7909	26.2934	27.7958			9.65
	2-2,5	2.25	31.0461	33.5298	36.0135	38.4972	40.9809	43.4645	45.9482			10.63
	2,5-3	2.75	46.3775	50.0877	53.7979	57.5081	61.2183	64.9285	68.6387			11.23
	3-3,5	3.25	64.7752	69.9572	75.1392	80.3212	85.5033	90.6853	95.8673			11.64
	3,5-4	3.75	86.2392	93.1383	100.0374	106.9366	113.8357	120.7348	127.6340			11.89
	4-4,5	4.25	110.7694	119.6310	128.4925	137.3541	146.2156	155.0772	163.9388			12.39
	4,5-5	4.75	138.3660	149.4352	160.5045	171.5738	182.6431	193.7123	204.7816			12.69
	5-5,5	5.25	169.0288	182.5511	196.0734	209.5957	223.1180	236.6403	250.1626			12.98
	5,5-6	5.75	202.7579	218.9785	235.1991	251.4198	267.6404	283.8610	300.0817			13.04
	6-6,5	6.25	239.5533	258.7175	277.8818	297.0460	316.2103	335.3746	354.5388			13.12
	6,5-7	6.75	279.4149	301.7681	324.1213	346.4745	368.8277	391.1809	413.5341			13.37
	7-7,5	7.25	322.3429	348.1303	373.9177	399.7052	425.4926	451.2800	477.0674			13.90
7,5-8	7.75	368.3371	397.8041	427.2710	456.7380	486.2050	515.6719	545.1389			13.78	
8-8,5	8.25	417.3976	450.7894	484.1812	517.5730	550.9648	584.3566	617.7484			14.12	
8,5-9	8.75	469.5244	507.0863	544.6483	582.2102	619.7722	657.3341	694.8961			14.05	
>9												14.13
Media Hs (m)			2.59	2.97	3.35	3.80	4.08	4.20	4.34	4.15	1.67	

Tabla 20. Potencia por metro de ancho de ola 2 [elaboración propia]

Potencia teórica por metro de ancho de ola(kw/m) x ocurrencia /100			Periodo de energía, Te (s)											
			0 – 1 0.5	1 – 2 1, 5	2 – 3 2.5	3 – 4 3.5	4 – 5 4.5	5 – 6 5.5	6 – 7 6.5	7 – 8 7.5	8 – 9 8.5	9 – 10 9.5	10 – 11 10.5	11 – 12 11.5
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25	0.00	0.00	0.0001	0.0004	0.0007	0.0009	0.0009	0.0006	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
	0,5-1	0.75	0.00	0.00	0.0005	0.0079	0.0278	0.0604	0.0949	0.1163	0.0877	0.0495	0.0261	0.0114
	1-1,5	1.25	0.00	0.00	0.00	0.0013	0.0269	0.0852	0.1769	0.2742	0.3812	0.3692	0.2664	0.1375
	1,5-2	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0020	0.0413	0.1260	0.2400	0.3359	0.4496	0.5017	0.4475
	2-2,5	2.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0068	0.0500	0.1546	0.2554	0.3280	0.4590	0.5427
	2,5-3	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0145	0.0863	0.1829	0.2961	0.3623	0.4907
	3-3,5	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0350	0.1454	0.2412	0.3156	0.4112
	3,5-4	3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0052	0.0997	0.2097	0.2753	0.3332
	4-4,5	4.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0301	0.1347	0.2326	0.2650
	4,5-5	4.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0736	0.1743	0.2164
	5-5,5	5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0128	0.0852	0.1555
	5,5-6	5.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0511	0.1119
	6-6,5	6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0201	0.1102
	6,5-7	6.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0514
	7-7,5	7.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0297
	7,5-8	7.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8-8,5	8.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8,5-9	8.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>9		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Media Hs (m)			0.24	0.49	0.64	0.79	0.94	1.06	1.22	1.43	1.68	1.95	2.28	

Tabla 21. Potencia por metro de ancho de ola x ocurrencia 1 [elaboración propia]

Potencia teórica por metro de ancho de ola(kw/m) x ocurrencia /100												Media Te(s)
			12 – 13	13 – 14	14 – 15	15 – 16	16 – 7	17 – 18	18 – 19	>19		
			12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5			
Altura de ola significativa, Hs (m)	0-0,5	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.58
	0,5-1	0.75	0.0052	0.0015	0.0004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.07
	1-1,5	1.25	0.0671	0.0248	0.0067	0.0012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.48
	1,5-2	1.75	0.2629	0.1116	0.0349	0.0116	0.0025	0.00	0.00	0.00	0.00	9.65
	2-2,5	2.25	0.5029	0.2817	0.0936	0.0269	0.0082	0.0043	0.00	0.00	0.00	10.63
	2,5-3	2.75	0.4962	0.4308	0.1722	0.0460	0.0184	0.00	0.00	0.00	0.00	11.23
	3-3,5	3.25	0.4729	0.4477	0.2179	0.0964	0.0171	0.0091	0.00	0.00	0.00	11.64
	3,5-4	3.75	0.3536	0.3726	0.2401	0.0962	0.0455	0.00	0.00	0.00	0.00	11.89
	4-4,5	4.25	0.2880	0.3709	0.2056	0.1374	0.0877	0.0155	0.00	0.00	0.00	12.39
	4,5-5	4.75	0.2352	0.2690	0.1445	0.1201	0.0913	0.0194	0.00	0.00	0.00	12.69
	5-5,5	5.25	0.1690	0.1826	0.1765	0.0629	0.0669	0.00	0.00	0.00	0.00	12.98
	5,5-6	5.75	0.1825	0.1314	0.0941	0.0754	0.0268	0.00	0.00	0.00	0.00	13.04
	6-6,5	6.25	0.1198	0.1035	0.0556	0.0594	0.0316	0.00	0.00	0.00	0.00	13.12
	6,5-7	6.75	0.0838	0.0604	0.0648	0.0346	0.0369	0.00	0.00	0.00	0.00	13.37
	7-7,5	7.25	0.0322	0.0348	0.0374	0.0400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.90
	7,5-8	7.75	0.0368	0.0398	0.0427	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.78
8-8,5	8.25	0.00	0.0451	0.00	0.0518	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.12	
8,5-9	8.75	0.00	0.0507	0.0545	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.05	
>9			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.13	
Media Hs (m)			2.59	2.97	3.35	3.80	4.08	4.20	4.34	4.15	1.67	

Tabla 22. Potencia por metro de ancho de ola x ocurrencia 2 [elaboración propia]

2.7.3. Matrices representativas

Como la cantidad de resultados obtenida es muy alta, la mejor forma de entender los datos es visualizándolos. Por ello, el motivo de este apartado es facilitar la comprensión de los resultados mediante matrices representativas.

La primera matriz representa la frecuencia de ocurrencia en función de la altura significativa y el periodo. La zona más oscura representa aquellas combinaciones Hs – Te que más frecuentemente se dan en la zona de BiMEP. La combinación que más veces ocurre, el 5.85% de las veces, es Hs = 1.25 m y Te = 8.5 s. Se puede observar los porcentajes más altos se encuentran alrededor de estos valores.

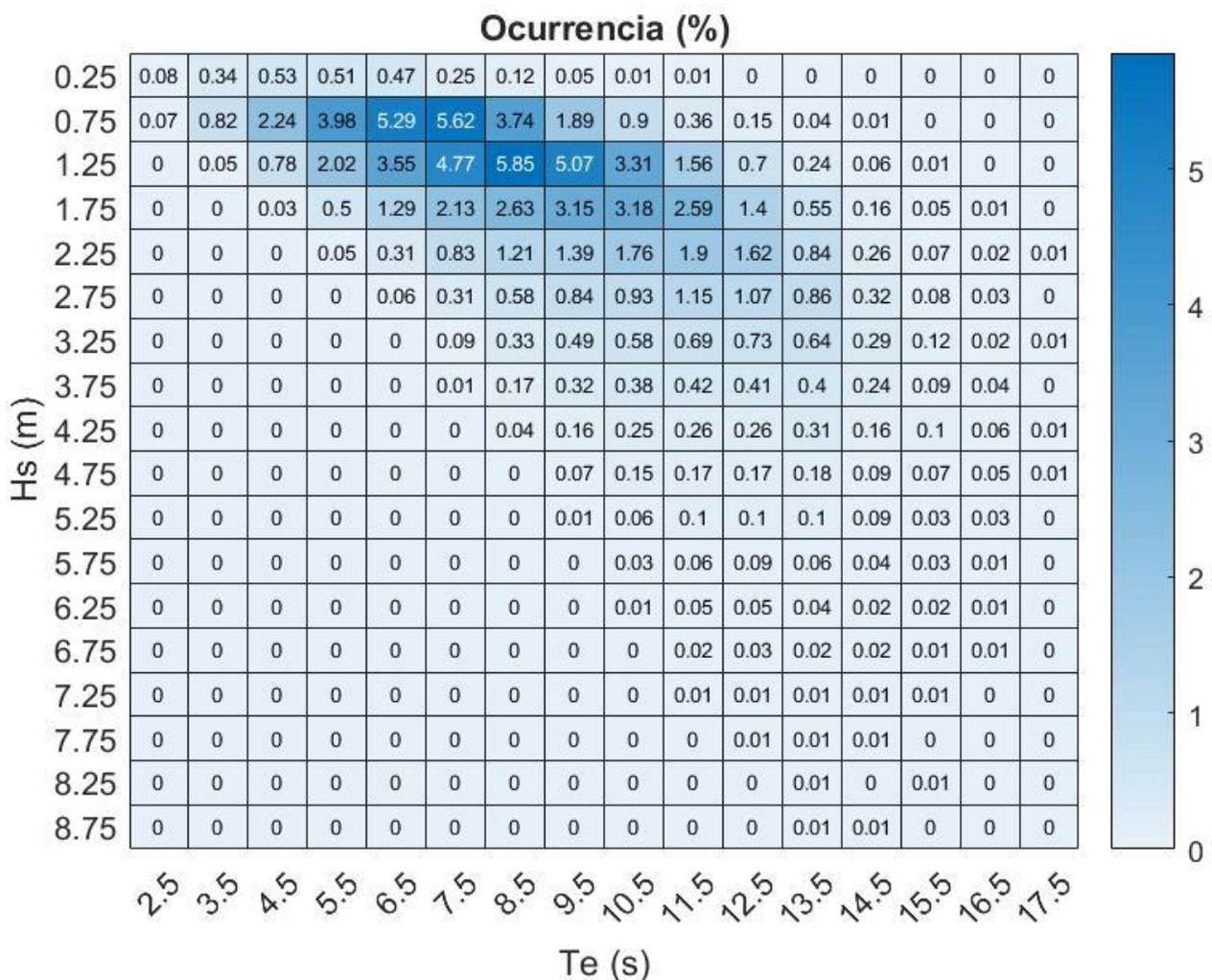


Tabla 23. Ocurrencia [elaboración propia]

Otra matriz muy representativa es la de la potencia eléctrica extraída por el dispositivo RM3. Se debe tener en cuenta que, como se ha explicado previamente, sólo se ha ejecutado la simulación para aquellas combinaciones de Hs – Te cuya frecuencia de ocurrencia no es nula. Por ello, algunos valores de la tabla son 0.

Se puede ver como este dispositivo es capaz de extraer más potencia en los valores centrales de la matriz. En otras palabras, el captador de energía undimotriz RM3 es óptimo para un oleaje con alturas de olas significativas comprendidas entre 3.75 y 9 m, y para un periodo comprendido entre 6.5 y 14.5 s. El valor máximo de la potencia extraída es 280.434 kW, para Hs = 7.25 m y Te = 11.5 s. Sin embargo, en BiMEP estas condiciones solo se dan el 0.01% del tiempo.

Por otro lado, como se ha explicado antes, la combinación que se da con más frecuencia es la de Hs = 1.25 m y Te = 8.5 s, para la que se obtiene 31.19 kW.

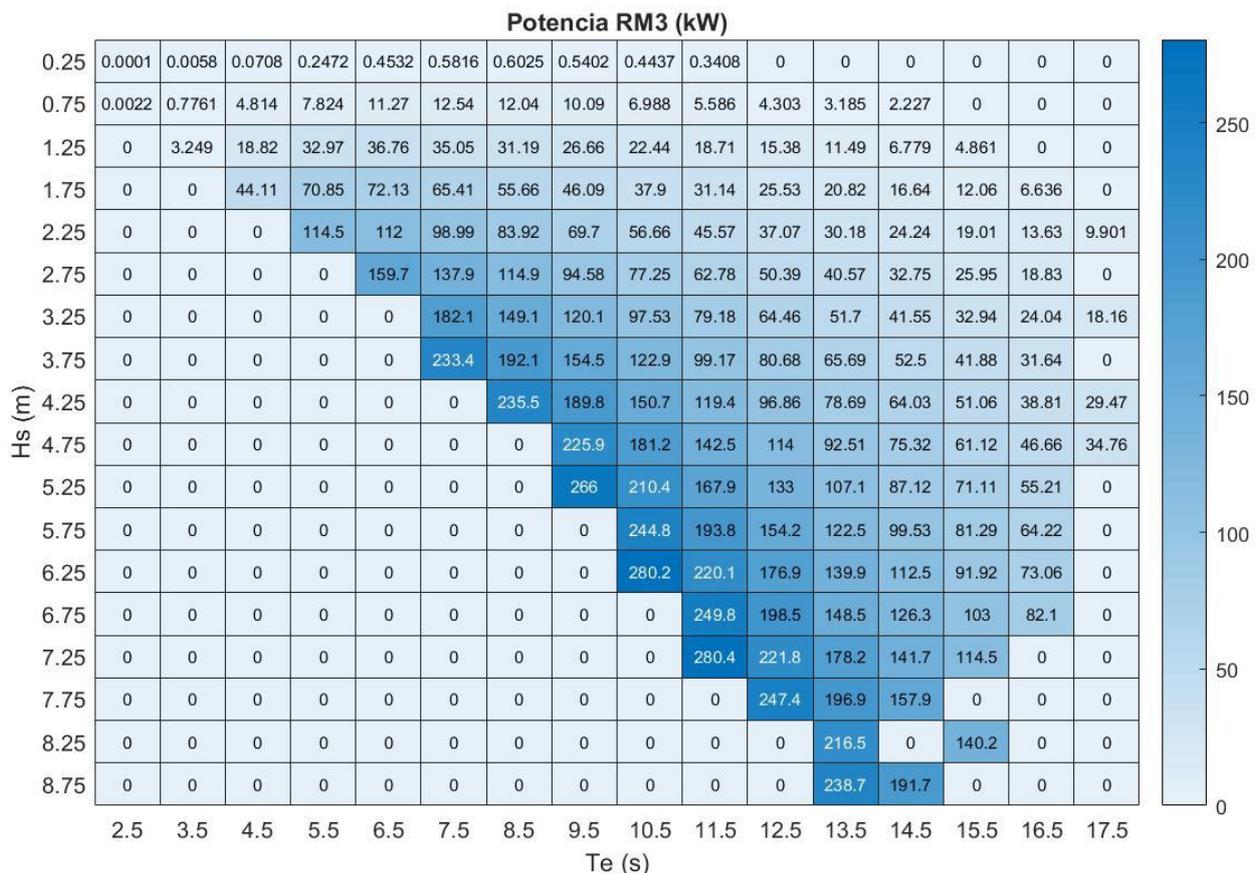


Tabla 24. Potencia RM3 (kW) [elaboración propia]

Finalmente, la tercera matriz muestra el producto de la potencia eléctrica extraída y la frecuencia de ocurrencia (en tanto por uno). De esta forma, es posible visualizar qué oleaje característico es del que más potencia se va a extraer. Teniendo en cuenta las zonas oscuras, se extrae más cuando los valores Hs y Te están alrededor de 1.25 m y 8.5 s, respectivamente.

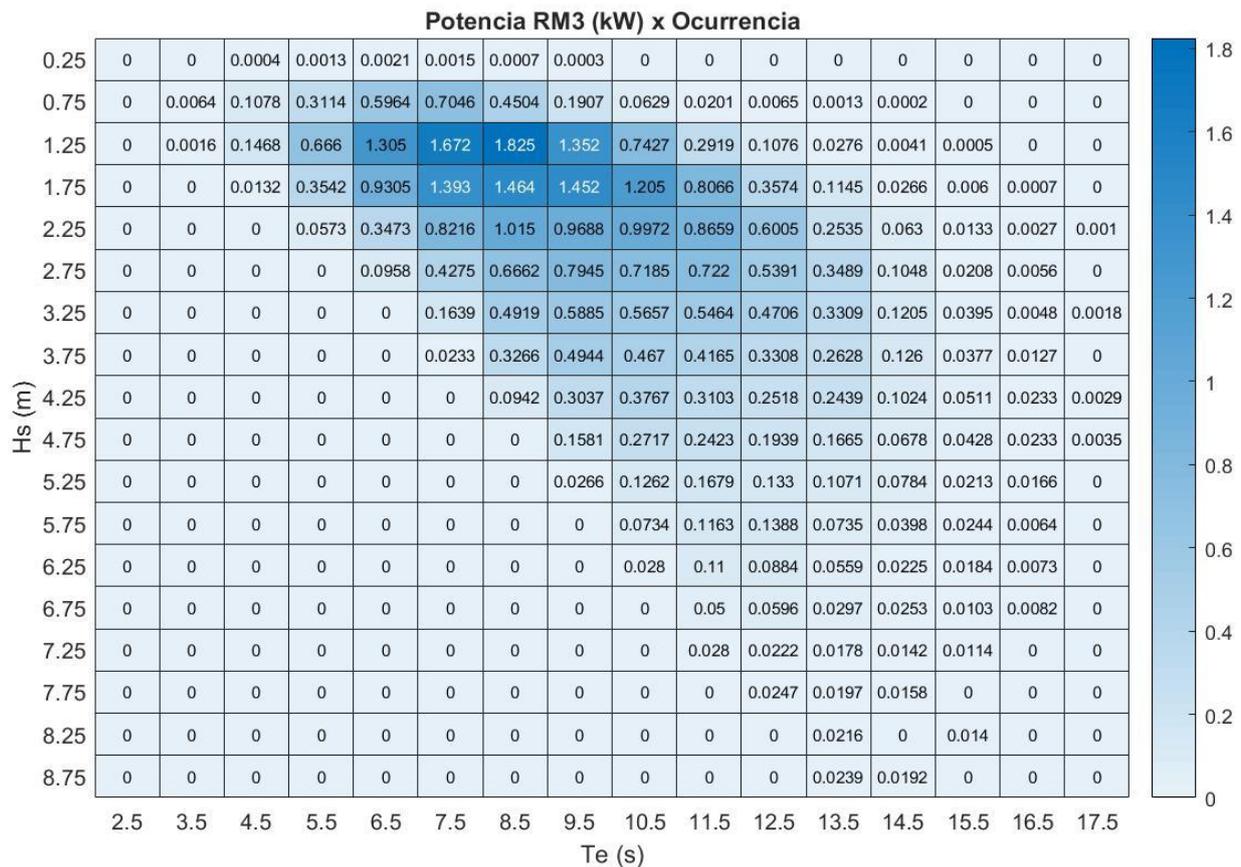


Tabla 25. Potencia RM3 x Ocurrencia [elaboración propia]

En conclusión, no se puede sacar el máximo rendimiento del dispositivo RM3 en la zona BiMEP, puesto que está diseñado para funcionar óptimamente con alturas de olas superiores a 3 metros y allí la altura media es de 1.67 m. No obstante, el objetivo del presente trabajo es aplicar un protocolo de evaluación de dispositivos, para poder comparar distintos dispositivos en futuros proyectos.

3. ASPECTOS ECONÓMICOS: DESCARGO DE GASTOS

En este apartado se desarrolla el desglose de los gastos que se han realizado durante el proyecto. El descargo de gastos se divide en horas internas, amortizaciones y gastos.

3.1. Horas internas

Las horas internas contabilizan las horas de trabajo de todo el personal necesario para el desarrollo del proyecto. En este caso, el proyecto se realiza por una sola persona: una estudiante de cuarto curso del grado en Ingeniería en Tecnología Industrial.

Concepto	Tasa Horaria (€/h)	Número de Horas (h)	Total (€)
Horas Internas	25,00	180	4.500,00 €

Tabla 26. Horas internas

3.2. Amortizaciones

Las amortizaciones valoran las pérdidas de valor de los activos fijos de los que se dispone debido a su utilización durante el proyecto. En este trabajo la única amortización es la del ordenador.

Para calcular la partida de amortizaciones primero es necesario calcular la tasa horaria del ordenador.

Concepto	Precio adquisición (€)	Vida útil (h)	Tasa horaria (€/h)
Ordenador	1000,00	8000	0,125 €/h

Tabla 27. Tasa horaria del ordenador

Concepto	Tasa Horaria (€/h)	Número de Horas (h)	Total (€)
Ordenador	0,125	180	22,50 €

Tabla 28. Amortizaciones

3.3. Gastos

La partida de gastos recoge todo lo utilizado exclusivamente para el proyecto. Para la realización de este trabajo el único gasto es la licencia de Matlab/Simulink, cuyo coste es de **100,43 €**.

3.4. Total

El descargo de gastos total corresponde a la suma de las horas internas, las amortizaciones, los gastos totales y los costes indirectos.

Descargo de gastos	
Horas Internas	4.500,00 €
Amortizaciones	22,50 €
Gastos	100,43 €
Costes totales	4.622,93 €
Costes indirectos (5%)	231,15 €
TOTAL	4.854,08 €

4. CONCLUSIONES

El proyecto se refiere a la instalación geográfica en la zona BiMEP ubicada en Armintza, habiéndose utilizado para los cálculos datos facilitados por el IH Cantabria [4].

En base a estos datos se han tomado en consideración las alturas significativas de ola de 0.25 m a 8.75 m y con periodos de 2.5 s a 17.5 s. Teniendo en cuenta las frecuencias de ocurrencia, se ha obtenido la potencia esperada de ola por metro de ancho de ola, que es de 20.65 kW/m.

Mediante el simulador WEC-Sim, para el dispositivo captador de energía undimotriz RM3, se han ejecutado las 158 posibles combinaciones de Hs-Te que se dan en BiMEP. El valor máximo de la potencia eléctrica extraída es 280.434 kW, para Hs = 7.25 m y Te = 11.5 s. Sin embargo, en BiMEP estas condiciones solo se dan el 0.01% del tiempo.

Por otro lado, se ha realizado la media ponderada de las potencias extraídas según todas las posibles combinaciones, resultando una potencia eléctrica esperada de 39.83 kW. Esto se debe a que la mayor parte de las olas se encuentran con características en torno a Hs = 1.25 m y Te = 8.5 s, con cuya combinación se obtienen 31.19 kW.

Si se realiza la división de la potencia eléctrica esperada entre la potencia esperada por metro de ancho de ola, se obtiene una anchura captadora de ola de 1.98 m. Asimismo, si se realiza la división de la potencia eléctrica esperada entre la potencia eléctrica máxima extraíble, se obtiene un factor de capacidad de 14.20 %.

Finalmente, no se puede sacar el máximo rendimiento del dispositivo RM3 en la zona BiMEP, puesto que está diseñado para funcionar óptimamente con alturas de olas superiores a 3 metros y allí la altura media es de 1.67 m. No obstante, el objetivo del presente trabajo es aplicar un protocolo de evaluación de dispositivos, para poder comparar distintos dispositivos en futuros proyectos.

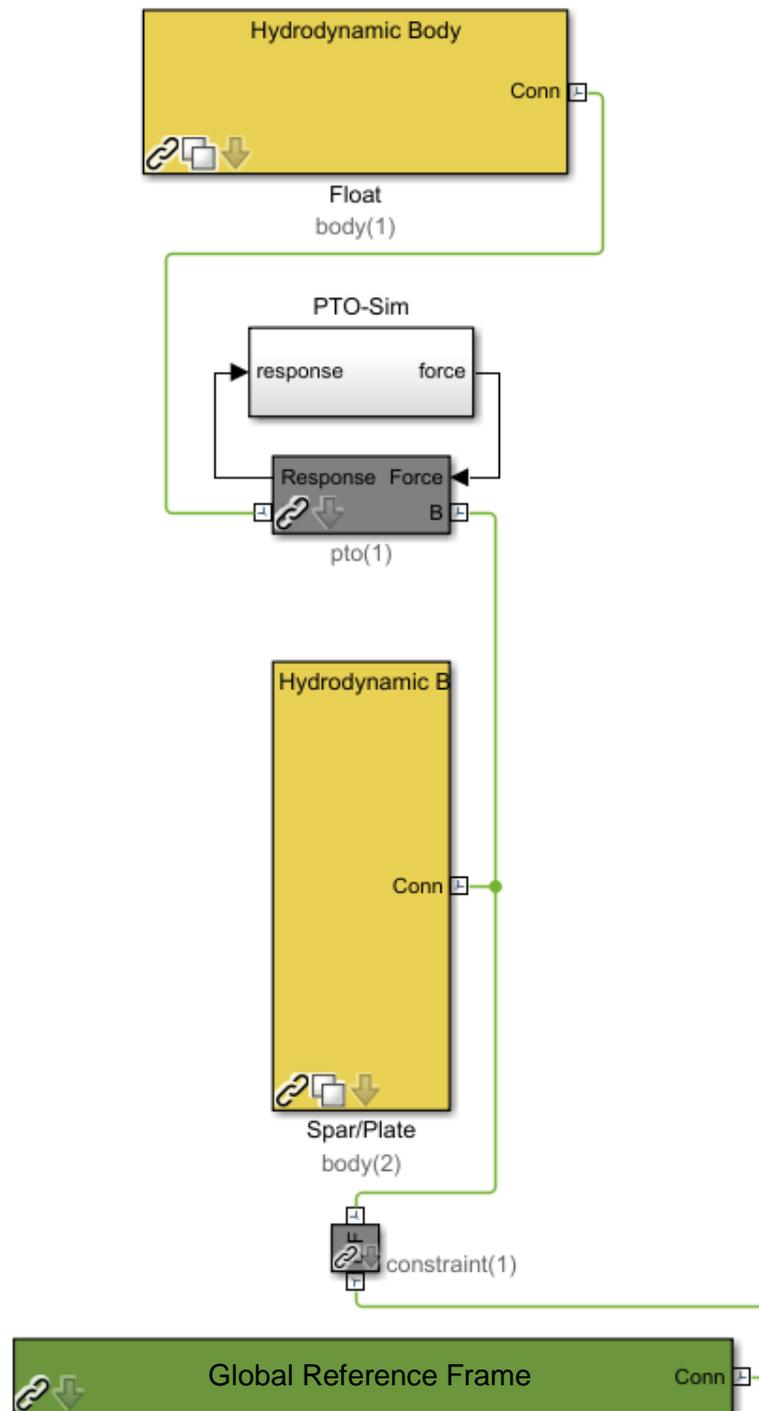
BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Capítulo 22: Energía del oleaje,» [En línea]. Available: <https://www.yumpu.com/es/document/view/14270282/22-energia-del-oleaje-eduambiental>. [Último acceso: 10 febrero 2018].
- [2] M. T. A. T. T. S. Shinya Okuhara, «Wells Turbine for Wave Energy Conversion — Improvement of the Performance by Means of Impulse Turbine for Bi-Directional Flow,» *Open Journal of Fluid Dynamic*, 2013. [1]
- [3] A. F. Falcão, «Air turbine choice and optimization for floating oscillating-water-column wave energy converter,» *ScienceDirect*, 2013.
- [4] IH Cantabria, «Metocean Analysis of BiMEP for Offshore Design,» Cantabria, 2017.
- [5] «Niveles de madurez de la tecnología technology readiness levels.trls. Una introducción,» [En línea]. Available: <http://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/393/NOTAS.pdf>. [Último acceso: 10 mayo 2018].
- [6] M. Palomino, J. Almazán, «Descripción, medida y análisis del oleaje,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid , 2000.
- [7] «WEC-Sim,» [En línea]. Available: <https://wecsim.github.io/WEC-Sim/>. [Último acceso: 11 marzo 2018].
- [8] Sandia National Laboratories, «Sandia Report SAND2014-9040: Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies,» Sandia, marzo 2014.
- [9] «BiMEP,» [En línea]. Available: bimep.com/. [Último acceso: 17 marzo 2018].
- [10] I. Galparsoro, P. Liria y I. Legorburu, «Atlas de energía del oleaje en la costa vasca. La planificación espacial marina como herramienta en la selección de zonas adecuadas para la instalación de captadores,» *Revista de investigación marina*, 2008.
- [11] Liliana Rusu, «The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.

ANEXO I: PLANOS, ESQUEMAS, DISEÑO DE DETALLE O DE BAJO NIVEL, CÓDIGO

Sistema RM3

Modelo de Simulink



Archivo de entrada *wecSimInputFile.m*

```

1  %% Simulation Data
2  simu = simulationClass();
3  % Location of Simulink Model File with PTO-Sim
4  simu.simMechanicsFile = 'RM3_cHydraulic_PTO.slx';
5  % Simulation Times
6  simu.startTime = 0;
7  simu.rampTime = 50;
8  simu.endTime=200;
9  simu.dt = 0.01;
10
11 %% Wave Information
12 %Regular Waves
13 waves = waveClass('regular');
14 waves.H = 1.67;
15 waves.T = olasperiodo;
16 % En el archivo ejecutar.m se define el array de periodos 'olasperiodo'
17
18 %% Body Data
19 % Float
20 body(1) = bodyClass('hydroData/rm3.h5');
21 body(1).geometryFile = 'geometry/float.stl';
22 body(1).mass = 'equilibrium';
23 body(1).momOfInertia = [20907301 21306090.66 37085481.11];
24
25 % Spar/Plate
26 body(2) = bodyClass('hydroData/rm3.h5');
27 body(2).geometryFile = 'geometry/plate.stl';
28 body(2).mass = 'equilibrium';
29 body(2).momOfInertia = [94419614.57 94407091.24 28542224.82];
30
31 %% PTO and Constraint Parameters
32 % Floating (3DOF) Joint
33 constraint(1) = constraintClass('Constraint1');
34 constraint(1).loc = [0 0 0];
35
36 % Translational PTO
37 pto(1) = ptoClass('PTO1');           % Initialize PTO Class for PTO1
38 pto(1).k = 0;                       % PTO Stiffness [N/m]
39 pto(1).c = 0;                       % PTO Damping [N/(m/s)]
40 pto(1).loc = [0 0 0];               % PTO Location [m]
41

```

Archivo de post-procesamiento *userDefinedFunctions.m*

```

1  %% Housekeeping
2  close all
3  clear table
4
5  %% Plots
6
7  set(0, 'DefaultFigureWindowState', 'docked')
8
9  figure();
10 plot(output.ptosim.time, output.ptosim.accumulator(1).pressure/1e6, ...
11       output.ptosim.time, output.ptosim.accumulator(2).pressure/1e6)
12 set(findall(gcf, 'type', 'axes'), 'fontsize', 16)
13 xlabel('Time (s)')
14 ylabel('Pressure (MPa)')
15 title('High Accumulator Pressure and Low Accumulator Pressure')
16 legend('highPressure', 'lowPressure')
17 grid on
18
19
20 figure();
21 plot(output.ptosim.time, output.ptosim.pistonCF.force/1e6)
22 set(findall(gcf, 'type', 'axes'), 'fontsize', 16)
23 xlabel('Time (s)')
24 ylabel('Force (MN)')
25 title('PTO Force')
26 grid on
27
28
29 figure();
30 plot(output.ptosim.time, output.ptosim.pistonCF.absPower/1e3, ...
31       output.ptosim.time, output.ptosim.rotaryGenerator.genPower/1e3, ...
32       output.ptosim.time, output.ptosim.rotaryGenerator.elecPower/1e3)
33 set(findall(gcf, 'type', 'axes'), 'fontsize', 16)
34 xlabel('Time (s)')
35 ylabel('Power (kW)')
36 title('Absorbed Power, Mechanical Power, and Electrical Power')
37 legend('absPower', 'mechPower', 'elecPower')
38 grid on
39
40
41 figure();
42 plot(output.ptosim.time, output.ptosim.hydraulicMotor.angVel)
43 set(findall(gcf, 'type', 'axes'), 'fontsize', 16)
44 xlabel('Time (s)')
45 ylabel('Speed (rad/s)')
46 title('Speed')
47 grid on
48
49
50 % Plot heave response for body 1
51 output.plotResponse(1, 3);
52 %Plot heave response for body 2
53 output.plotResponse(2, 3);
54 %Plot heave forces for body 1
55 output.plotForces(1, 3);
56 %Plot pitch moments for body 2
57 output.plotForces(2, 5);

```

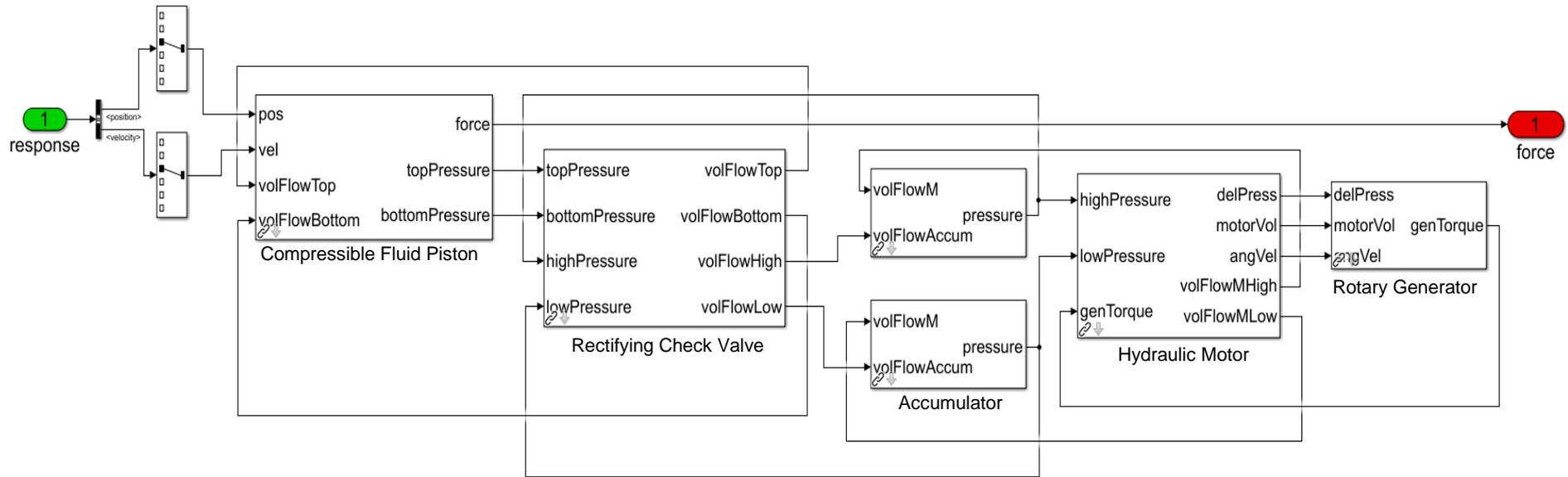
Archivo para ejecutar WEC-Sim *ejecutar.m*

```

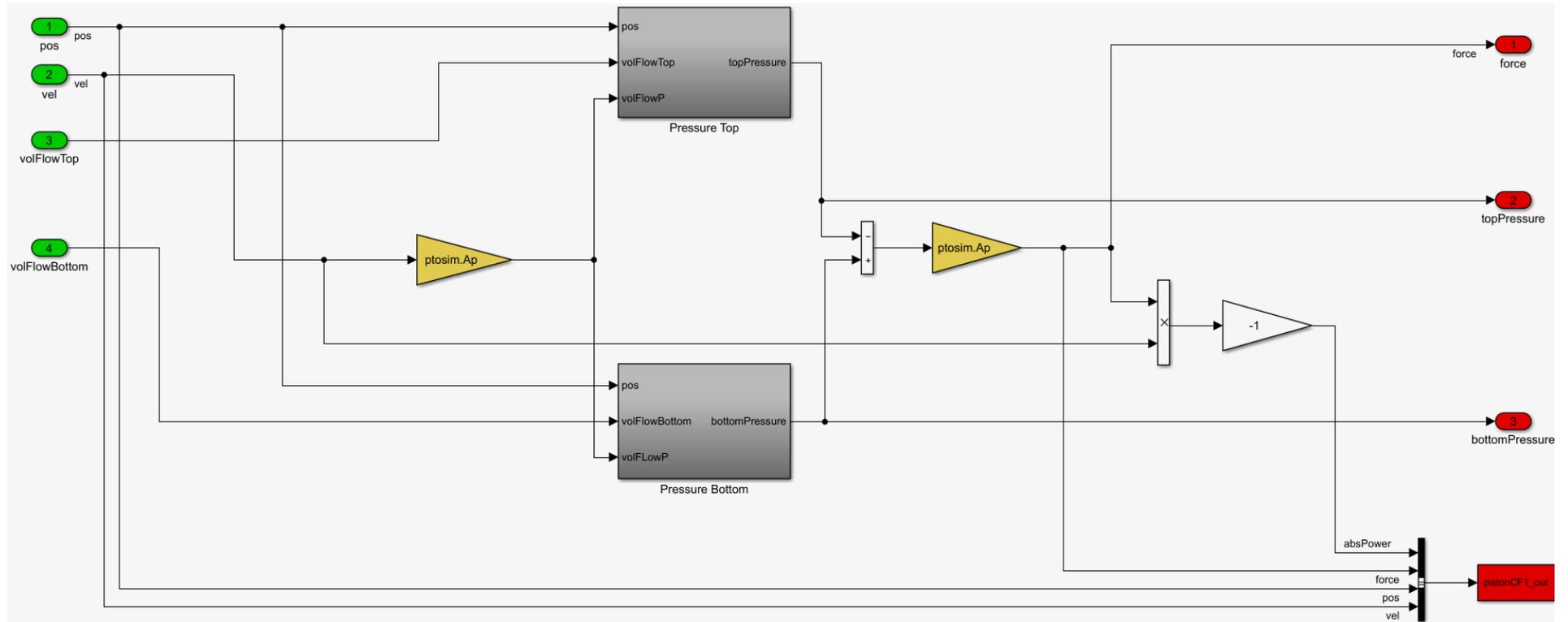
1  % Código para ejecutar el bucle para cada Te diferente con la misma Hs
2  periodoolas = [9.04];
3  potenciaelectrica = zeros(1,length(periodoolas));           % [kW]
4  presionAlta = zeros(1,length(periodoolas));                % [MPa]
5  presionBaja = zeros(1,length(periodoolas));                % [MPa]
6  desplazamientomax1 = zeros(1,length(periodoolas));
7  velocidadmax1 = zeros(1,length(periodoolas));
8  aceleracionmax1 = zeros(1,length(periodoolas));
9  desplazamientomax2 = zeros(1,length(periodoolas));
10 velocidadmax2 = zeros(1,length(periodoolas));
11 aceleracionmax2 = zeros(1,length(periodoolas));
12
13 for TEolas=1:length(periodoolas)
14   olasperiodo = periodoolas(TEolas);
15   wecSim
16   potenciaelectrica(TEolas)= mean(output.ptosim.rotaryGenerator.elecPower(16000:end))/1000;
17   % Just take into account the last 1/5 points, so the equilibrium is reached
18   presionAlta(TEolas) = mean(output.ptosim.accumulator(1).pressure(16000:end))/1e6;
19   presionBaja(TEolas) = mean(output.ptosim.accumulator(2).pressure(16000:end))/1e6;
20   desplazamientomax1(TEolas) = max(output.bodies(1).position(:,3)-...
21     output.bodies(1).position(1,3));
22   velocidadmax1(TEolas) = max(output.bodies(1).velocity(:,3));
23   aceleracionmax1(TEolas) = max(output.bodies(1).acceleration(:,3));
24   desplazamientomax2(TEolas) = max(output.bodies(2).position(:,3)-...
25     output.bodies(2).position(1,3));
26   velocidadmax2(TEolas) = max(output.bodies(2).velocity(:,3));
27   aceleracionmax2(TEolas) = max(output.bodies(2).acceleration(:,3));
28
29   % Save figures
30   nombrefigura= 'accumulator Hs=%dm Te=%ds.jpg';
31   saveas (figure (1), sprintf (nombrefigura,waves.H,waves.T));
32   nombrefigura= 'PTO force Hs=%dm Te=%ds.jpg';
33   saveas (figure (2), sprintf (nombrefigura,waves.H,waves.T));
34   nombrefigura= '1-Power Hs=%dm Te=%ds.jpg';
35   saveas (figure (3), sprintf (nombrefigura,waves.H,waves.T));
36   nombrefigura= '2-body 1 heave Hs=%dm Te=%ds.jpg';
37   saveas (figure (5), sprintf (nombrefigura,waves.H,waves.T));
38   nombrefigura= '3-body 2 heave Hs=%dm Te=%ds.jpg';
39   saveas (figure (6), sprintf (nombrefigura,waves.H,waves.T));
40   nombrefigura= '4-forces body 1 Hs=%dm Te=%ds.jpg';
41   saveas (figure (7), sprintf (nombrefigura,waves.H,waves.T));
42   nombrefigura= '5-forces body 2 Hs=%dm Te=%ds.jpg';
43   saveas (figure (8), sprintf (nombrefigura,waves.H,waves.T));
44
45   end
46
47   % Show the matrix
48   [periodoolas; potenciaelectrica;presionAlta;presionBaja;desplazamientomax1;...
49     velocidadmax1;aceleracionmax1;desplazamientomax2;velocidadmax2;aceleracionmax2]
  
```

Subsistema PTO

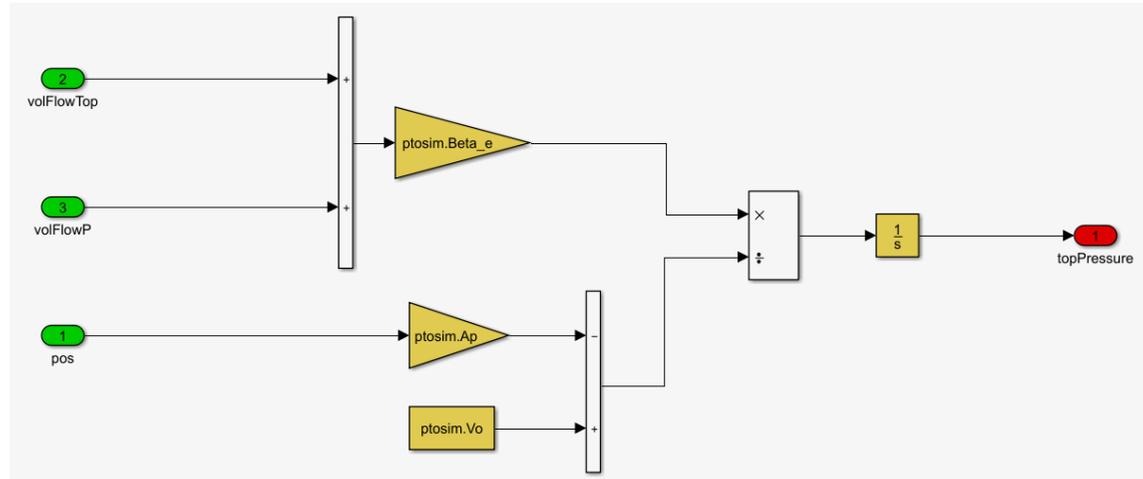
Modelo de Simulink del bloque PTO-Sim



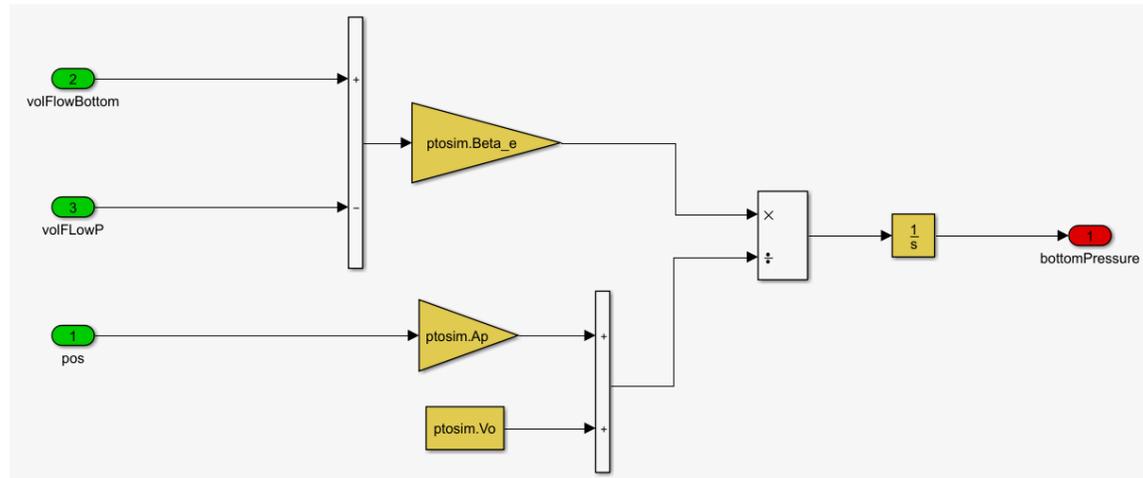
Modelo de Simulink del pistón



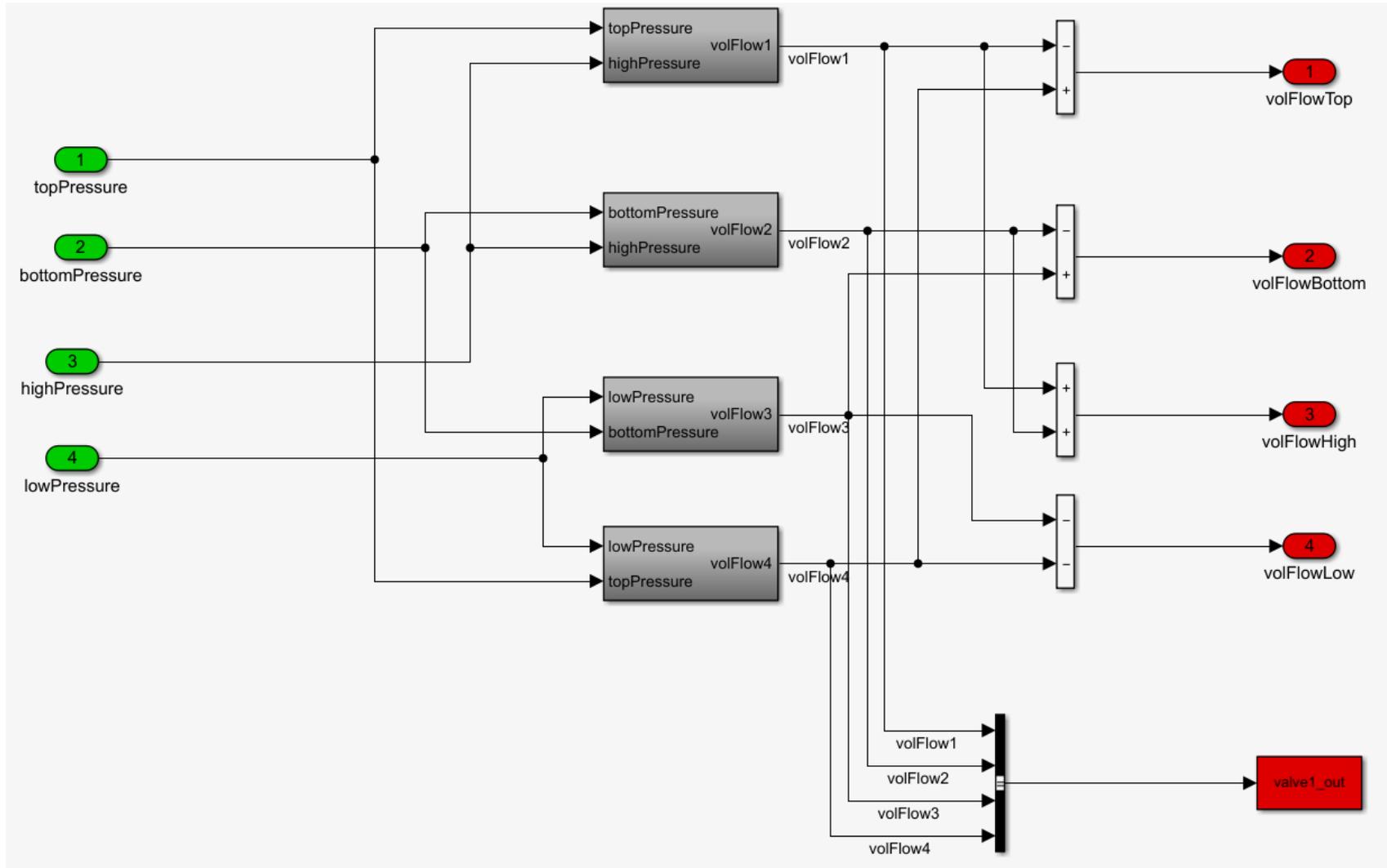
Modelo de Simulink del bloque *Pressure Top*



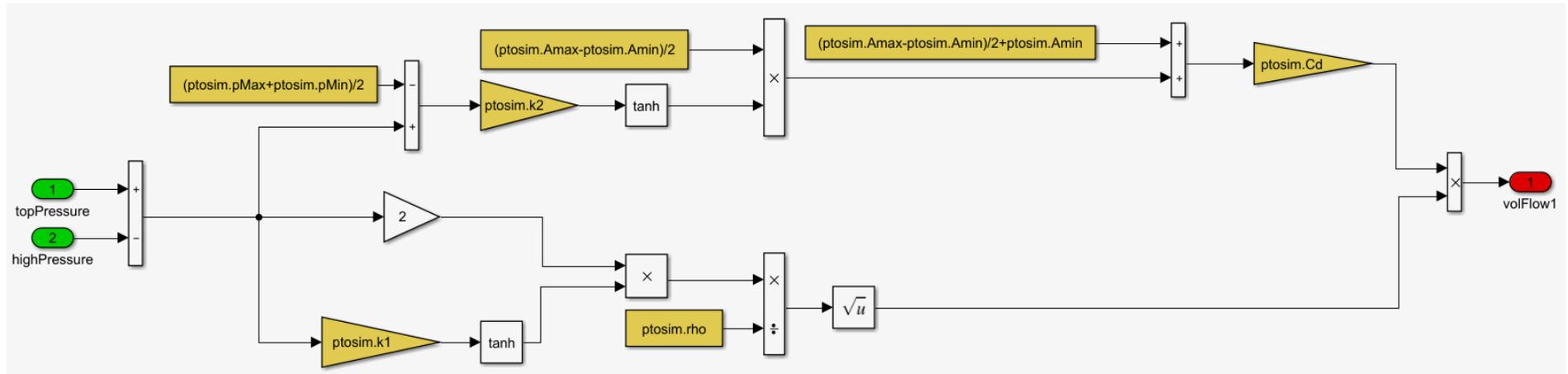
Modelo de Simulink del bloque *Pressure Bottom*



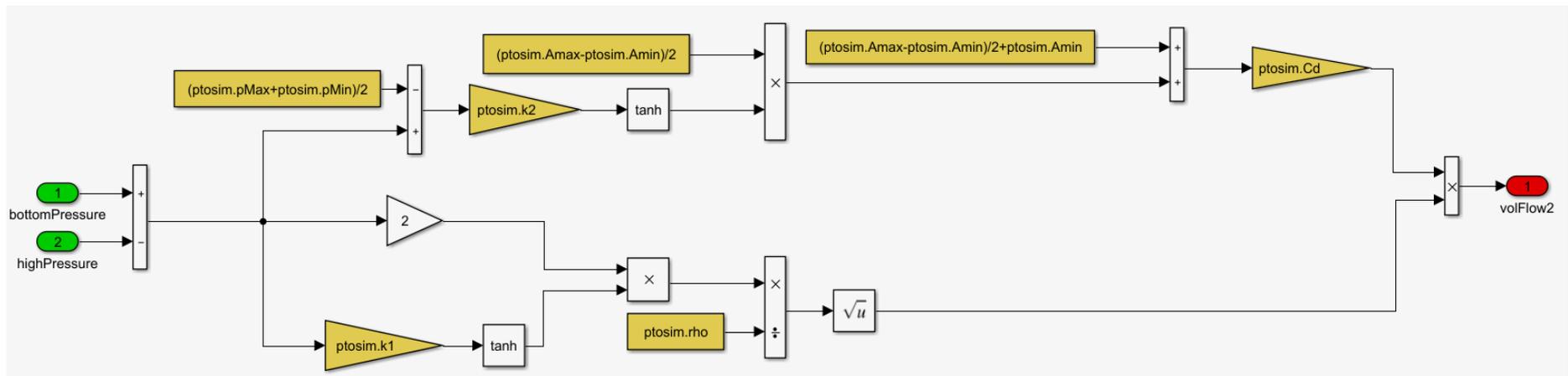
Modelo de Simulink de la válvula rectificadora



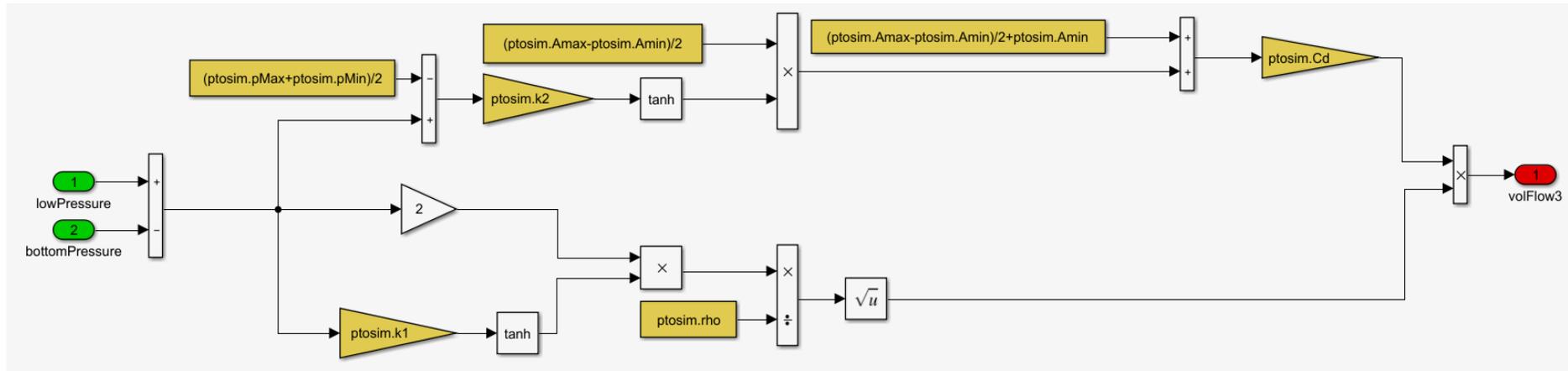
Modelo de Simulink del bloque *volFlow1*



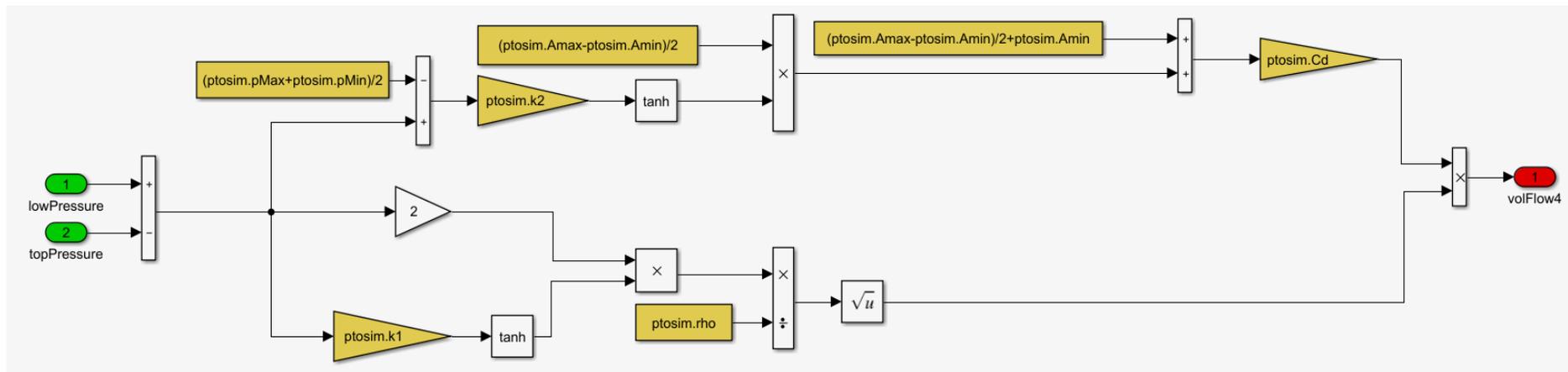
Modelo de Simulink del bloque *volFlow2*



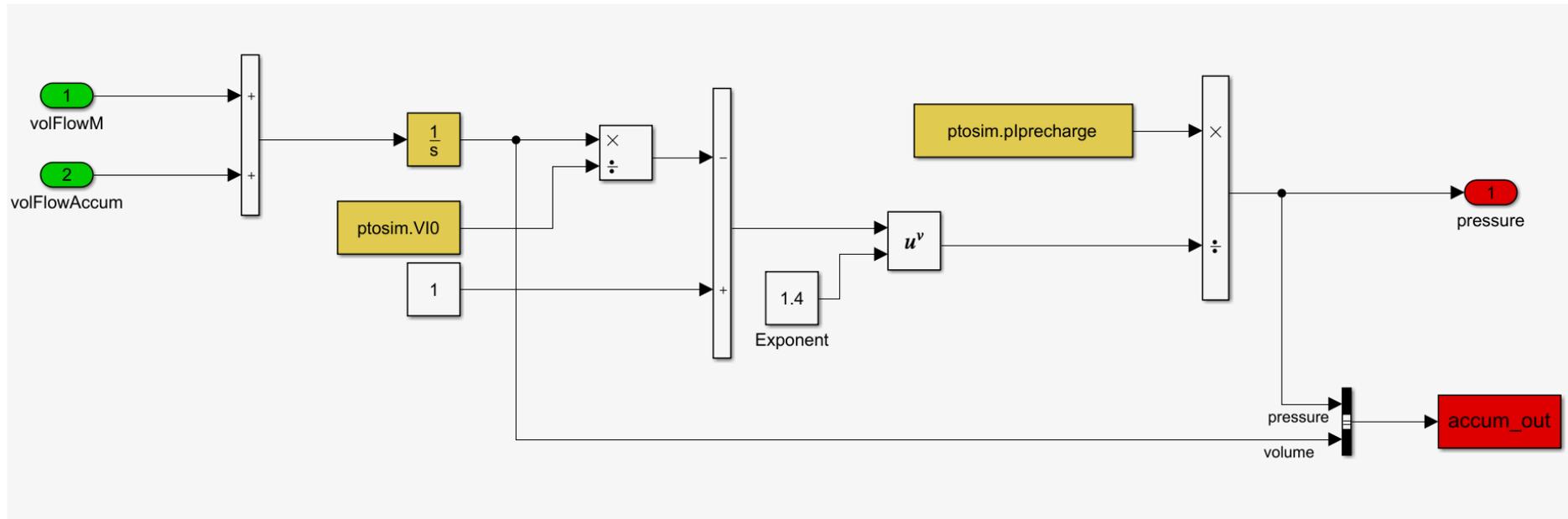
Modelo de Simulink del bloque *volFlow3*



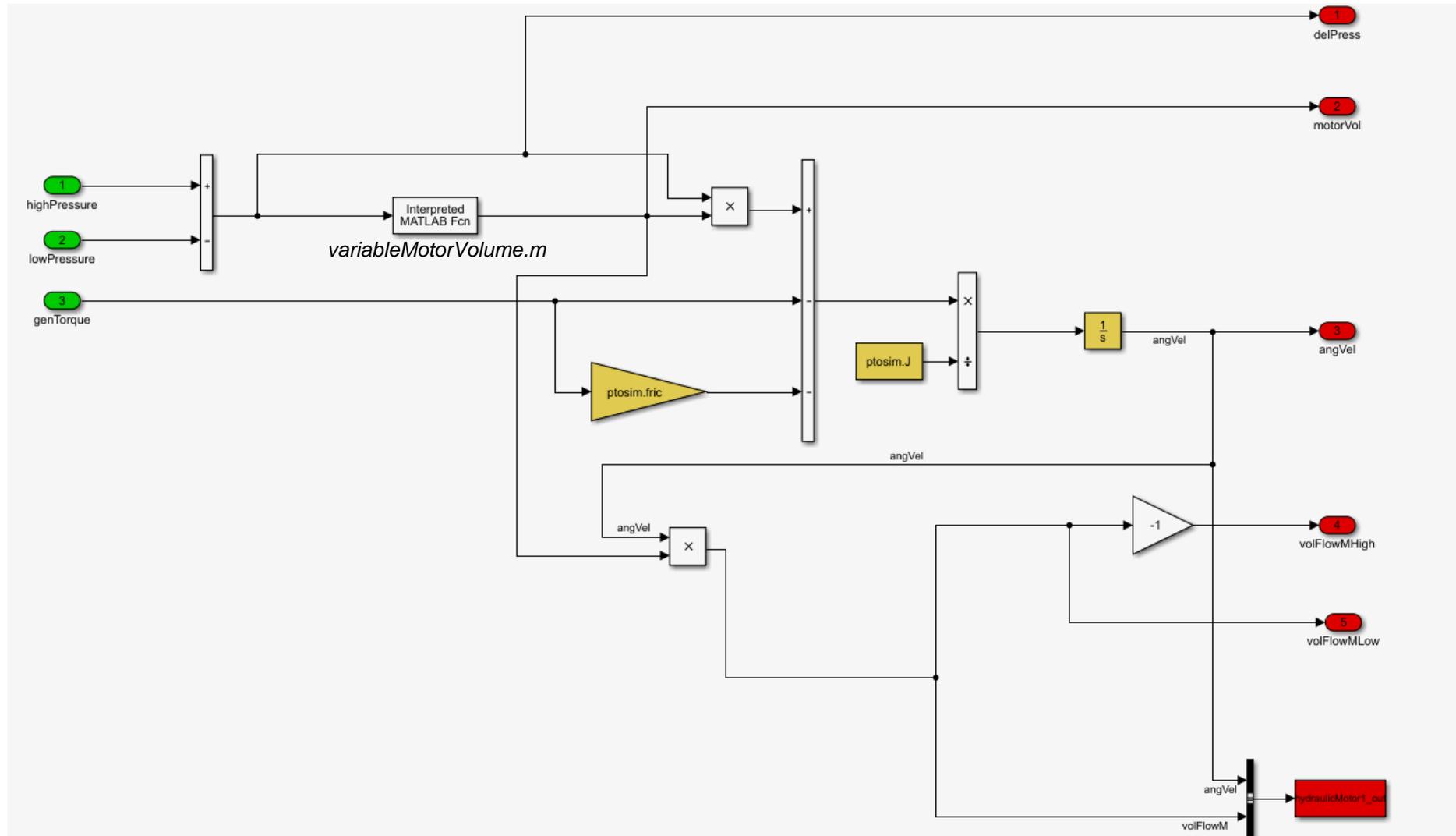
Modelo de Simulink del bloque *volFlow4*



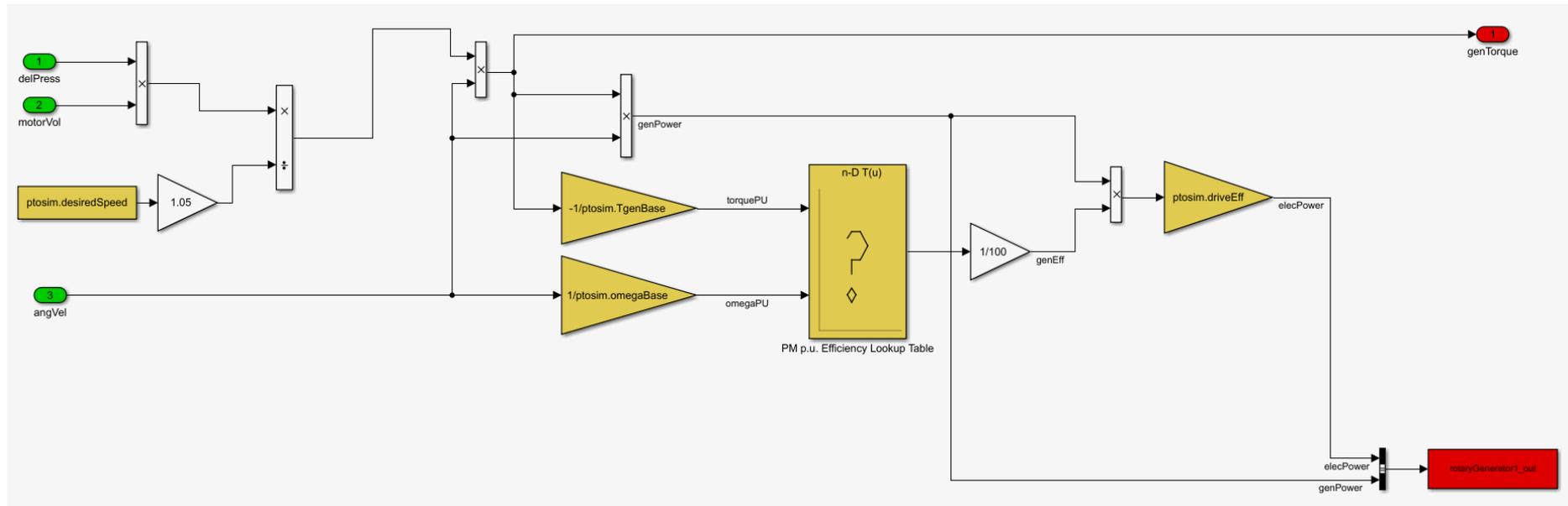
Modelo de Simulink del acumulador de presión



Modelo de Simulink del motor hidráulico



Modelo de Simulink del generador rotativo



Código ptoSimInputFile.m

```

1      %% Compressible Fluid Hydraulic PTO-Sim
2
3      ptoSim = ptoSimClass('Compressible Fluid Hydraulic');
4
5      %% Valve
6
7      ptoSim.checkValve.Cd = 0.61;
8      % Discharge coefficient
9      ptoSim.checkValve.Amax = 0.002;
10     % Maximum valve area [m^2]
11     ptoSim.checkValve.Amin = 1e-8;
12     % Minimum valve area [m^2]
13     ptoSim.checkValve.pMax = 1.5e6;
14     % Maximum pressure difference across the valve [Pa]
15     ptoSim.checkValve.pMin = 0;
16     % Minimum pressure difference across the valve [Pa]
17     ptoSim.checkValve.rho = 850;
18     % Hydraulic fluid density [kg/m^3]
19     ptoSim.checkValve.k1 = 200;
20     % Characteristic constant of the valve
21     ptoSim.checkValve.k2 = ...
22         atanh((ptoSim.checkValve.Amin-(ptoSim.checkValve.Amax-ptoSim.checkValve.Amin)/2)*...
23             2/(ptoSim.checkValve.Amax - ptoSim.checkValve.Amin))*...
24             1/(ptoSim.checkValve.pMin-(ptoSim.checkValve.pMax + ptoSim.checkValve.pMin)/2);
25     % Characteristic constant of the valve
26
27     %% Low Pressure Accumulator
28
29     ptoSim.accumulator(2).VI0 = 6;
30     % Initial volume [m^3]
31     ptoSim.accumulator(2).pIrated = 16e6;
32     % Rated working pressure
33     ptoSim.accumulator(2).pIupper_limit = (4/3)*ptoSim.accumulator(2).pIrated;
34     % Upper working pressure
35     ptoSim.accumulator(2).pIlower_limit = (0.5)*ptoSim.accumulator(2).pIupper_limit;
36     % Lower working pressure
37     ptoSim.accumulator(2).pIprecharge = 0.9*ptoSim.accumulator(2).pIlower_limit;
38     % Precharge pressure
39     ptoSim.accumulator(2).VImax = ptoSim.accumulator(2).VI0*...
40         (1-(ptoSim.accumulator(2).pIprecharge/ptoSim.accumulator(2).pIupper_limit)^(1/1.4));
41     ptoSim.accumulator(2).Vimin = ptoSim.accumulator(2).VI0*...
42         (1-(ptoSim.accumulator(2).pIprecharge/ptoSim.accumulator(2).pIlower_limit)^(1/1.4));
43     ptoSim.accumulator(2).VIEq = ptoSim.accumulator(2).VImax;
44     ptoSim.accumulator(2).pIEq = ptoSim.accumulator(2).pIprecharge/...
45         (1-ptoSim.accumulator(2).VIEq/ptoSim.accumulator(2).VI0)^(1.4);
46
47
48     %% High Pressure Accumulator
49
50     ptoSim.accumulator(1).VI0 = 8.5;
51     % Initial volume
52     ptoSim.accumulator(1).del_p_r = 15e6;
53     ptoSim.accumulator(1).pIrated = ptoSim.accumulator(1).del_p_r +...
54         ptoSim.accumulator(2).pIrated;
55     % Rated working pressure
56     ptoSim.accumulator(1).pIEq = ptoSim.accumulator(2).pIEq;
57     ptoSim.accumulator(1).pIlower_limit = ptoSim.accumulator(1).pIEq;
58     ptoSim.accumulator(1).pIupper_limit = 1.5*ptoSim.accumulator(1).pIlower_limit;
59     ptoSim.accumulator(1).pIprecharge = 0.9*ptoSim.accumulator(1).pIlower_limit;
60     ptoSim.accumulator(1).VIEq = ptoSim.accumulator(1).VI0*...
61         (1-(ptoSim.accumulator(1).pIprecharge/ptoSim.accumulator(1).pIEq)^(1/1.4));
62     ptoSim.accumulator(1).VImax = ptoSim.accumulator(1).VI0*...
63         (1-(ptoSim.accumulator(1).pIprecharge/ptoSim.accumulator(1).pIupper_limit)^(1/1.4));
64     ptoSim.accumulator(1).Vimin = ptoSim.accumulator(1).VI0*...
65         (1-(ptoSim.accumulator(1).pIprecharge/ptoSim.accumulator(1).pIlower_limit)^(1/1.4));
66

```

<pre> 69 %% Piston 70 71 ptosim.pistonCF.Ap = 0.0378; 72 % Piston area [m^2] 73 ptosim.pistonCF.Vo = 15*ptosim.pistonCF.Ap; 74 % Piston volume [m^3] 75 ptosim.pistonCF.Beta_e = 1.4e9; 76 % Effective bulk modulus [Pa] (ISO HM46) 77 ptosim.pistonCF.pAi = ptosim.accumulator(2).pUpper_limit; 78 ptosim.pistonCF.pBi = ptosim.pistonCF.pAi; 79 80 81 %% Hydraulic Motor 82 83 ptosim.hydraulicMotor.angVelInit = 0; 84 % Initial speed 85 ptosim.hydraulicMotor.J = 20; 86 % Total moment of inertia (motor & generator) [kg-m^2] 87 ptosim.hydraulicMotor.fric = 0.05; 88 % Friction [kg-m^2/s] 89 90 91 %% Lookup Table Generator 92 93 load motorEff; 94 ptosim.rotaryGenerator.table = table; 95 ptosim.rotaryGenerator.TgenBase = 2000; 96 ptosim.rotaryGenerator.omegaBase = 300; 97 ptosim.rotaryGenerator.driveEff = 0.98; 98 ptosim.rotaryGenerator.desiredSpeed = 150; 99 % Desired angular velocity [rad/s] 100 </pre>	
--	--

Función del motor hidráulico *variableMotorVolume.m*

<pre> 1 function y = variableMotorVolume(u) 2 3 if u<=15e6 && u>=4e6 4 alphaD = 2.67e-11*u-8.52e-5; 5 else 6 alphaD = 2e-5; 7 end 8 y = alphaD; 9 end 10 </pre>	
---	--

ANEXO II: GRÁFICAS RELEVANTES OBTENIDAS EN LAS EJECUCIONES DEL SIMULADOR

$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 2.5 \text{ s}$

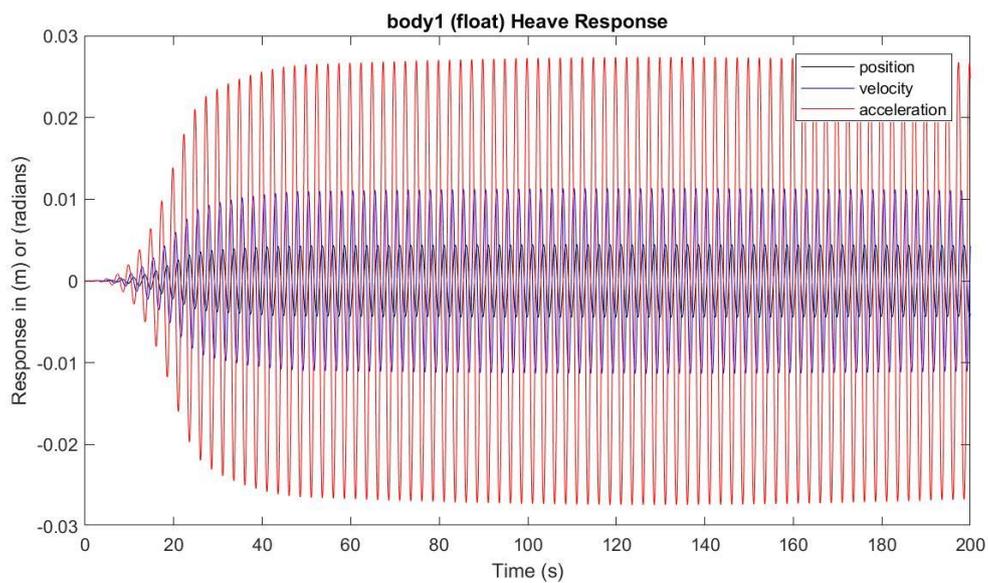
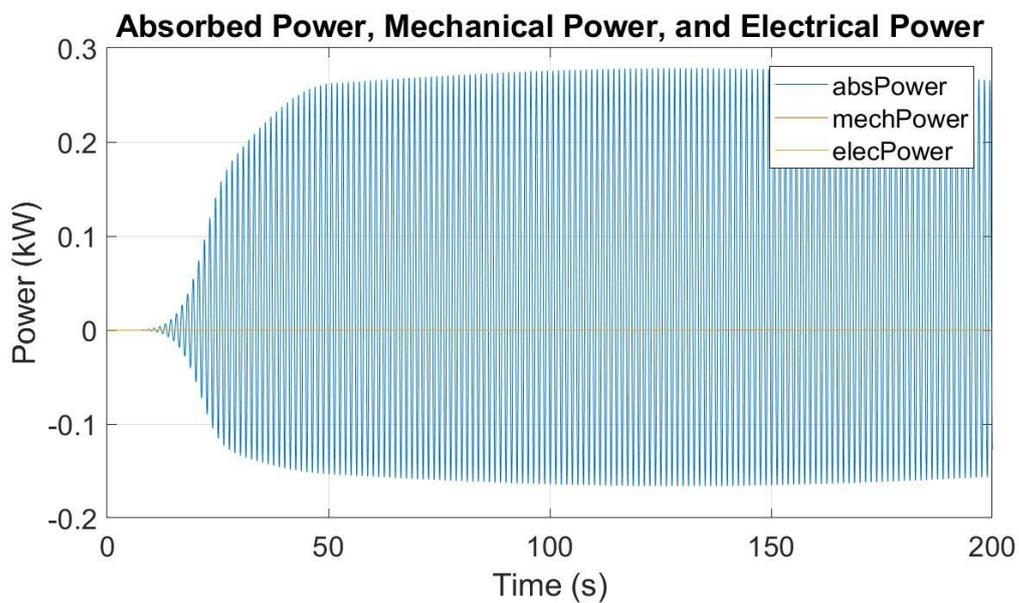
Potencia eléctrica media: 0.001 kW

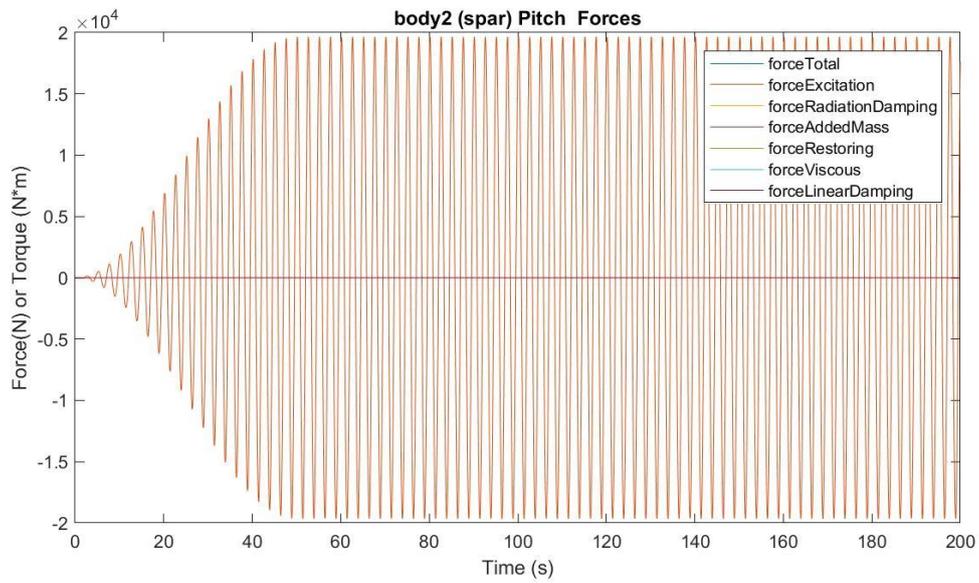
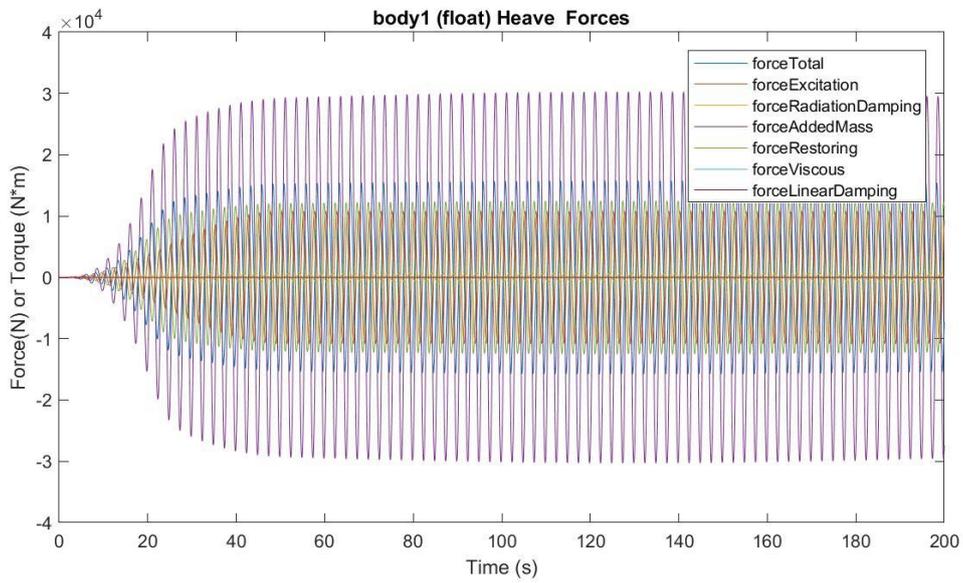
Presión media del acumulador de alta presión: 21.3425 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 21.3121 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0045 m, 0.0113 m/s y 0.0274 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0006 m, 0.0014 m/s y 0.0035 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$
 $T_e = 3.5 \text{ s}$

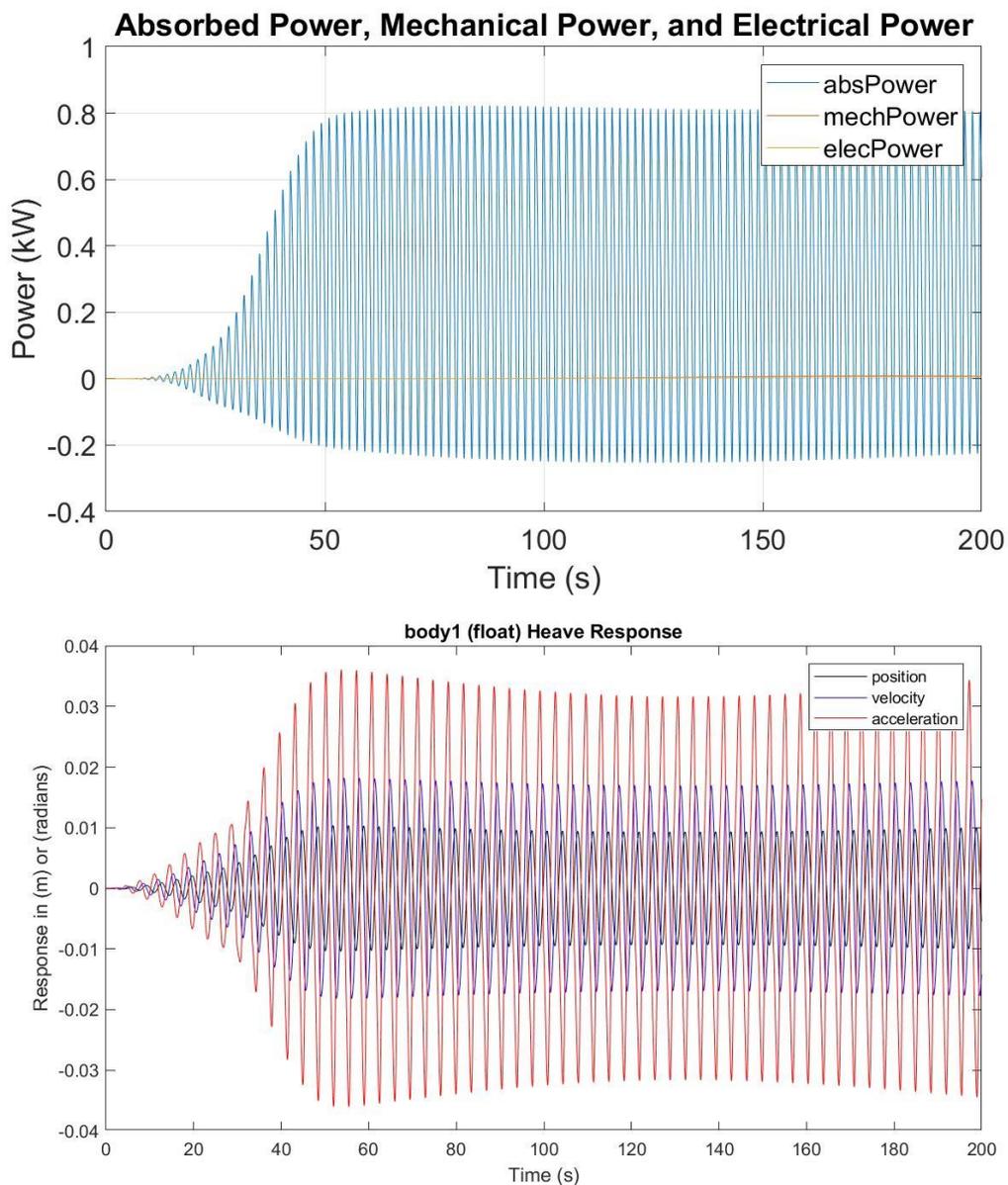
Potencia eléctrica media: 0.0058 kW

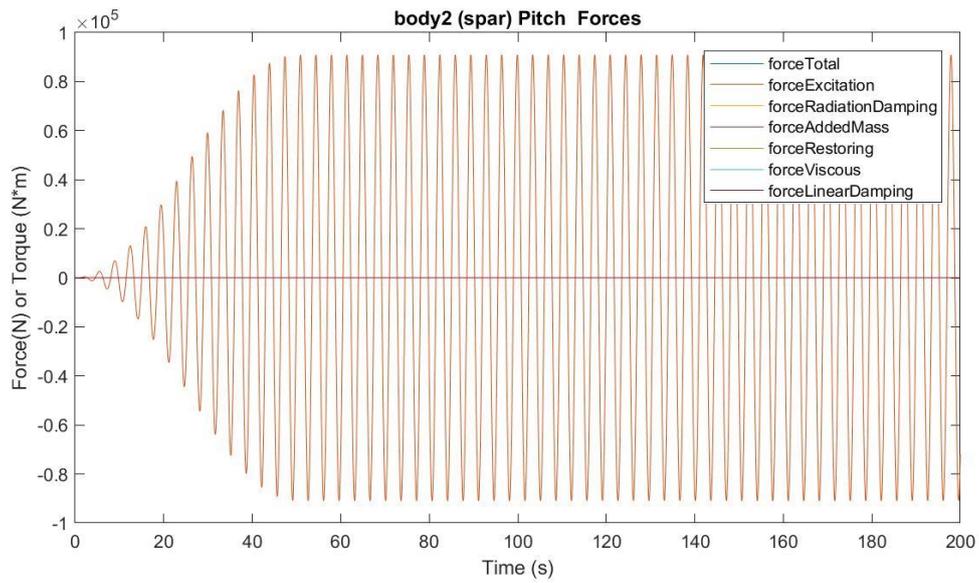
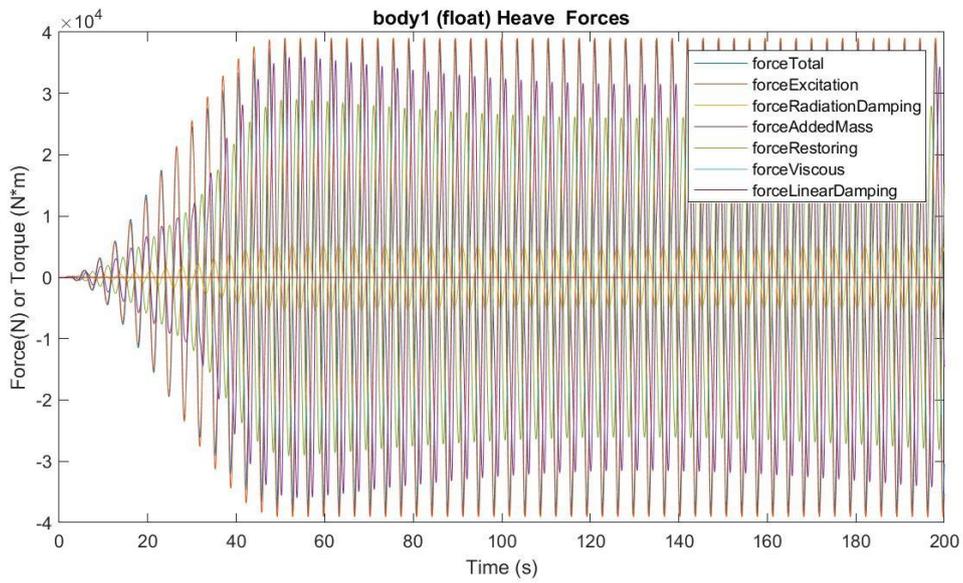
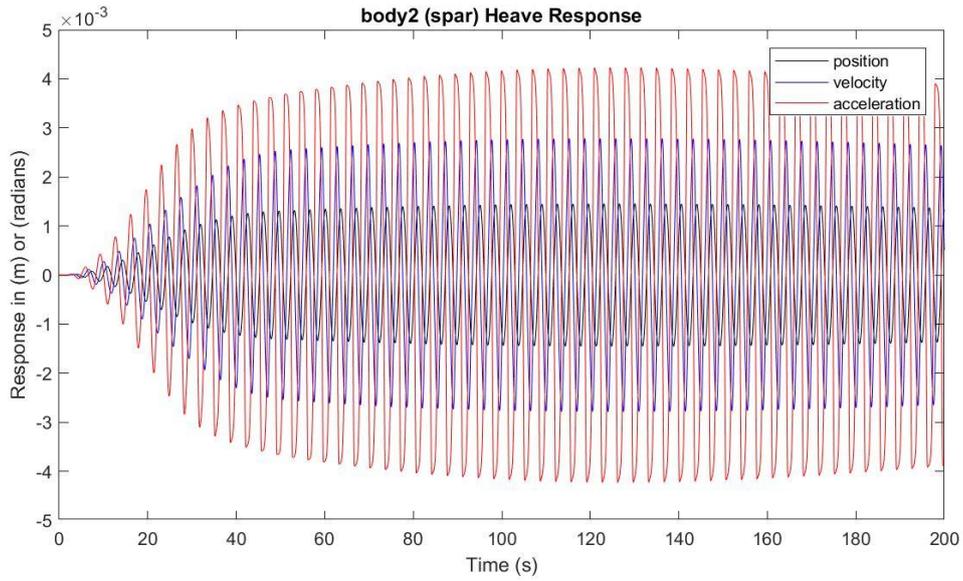
Presión media del acumulador de alta presión: 21.3781 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 21.2298 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0104 m, 0.0182 m/s y 0.0361 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0015 m, 0.0028 m/s y 0.0042 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 4.5 \text{ s}$

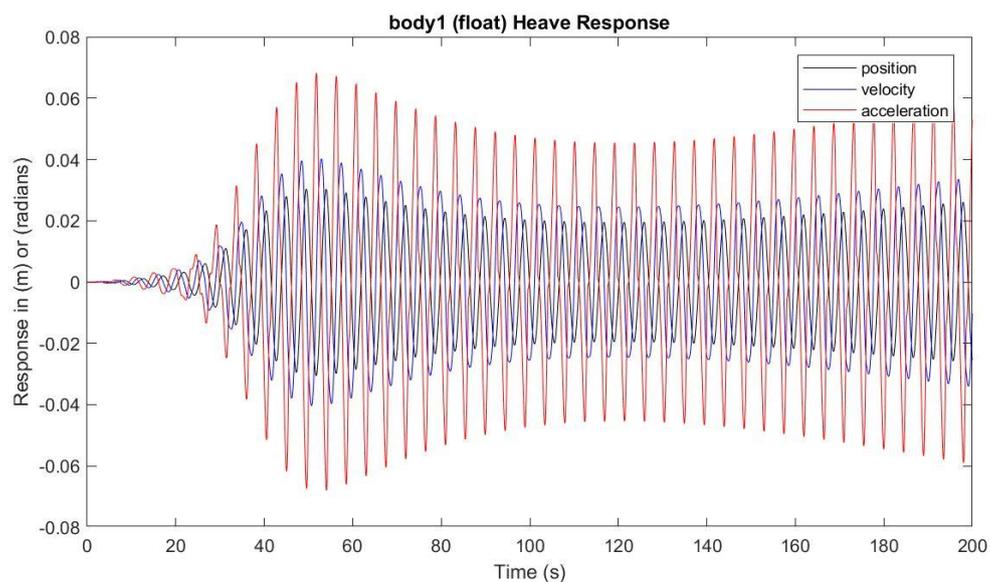
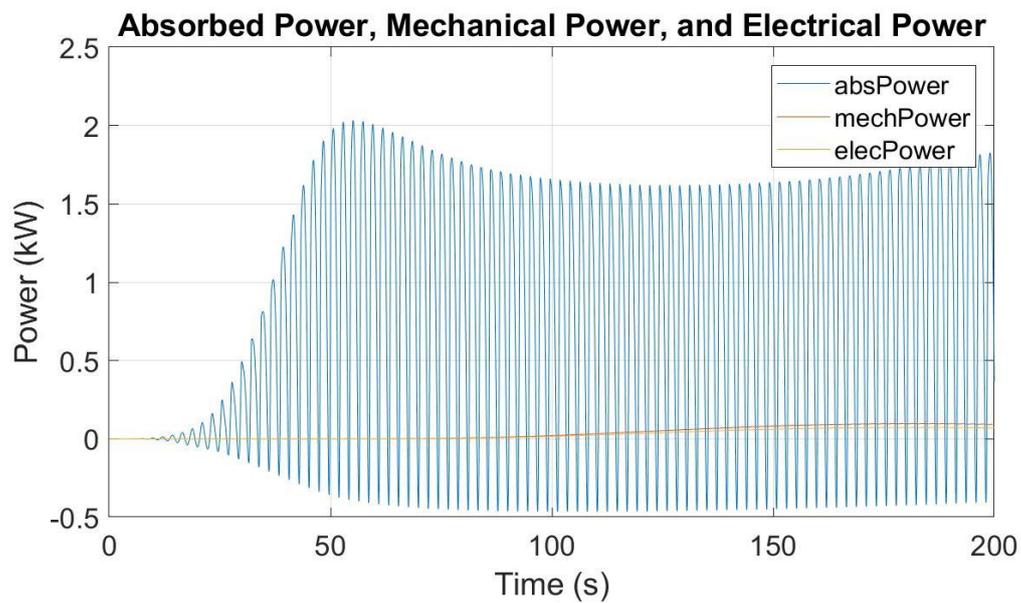
Potencia eléctrica media: 0.0708 kW

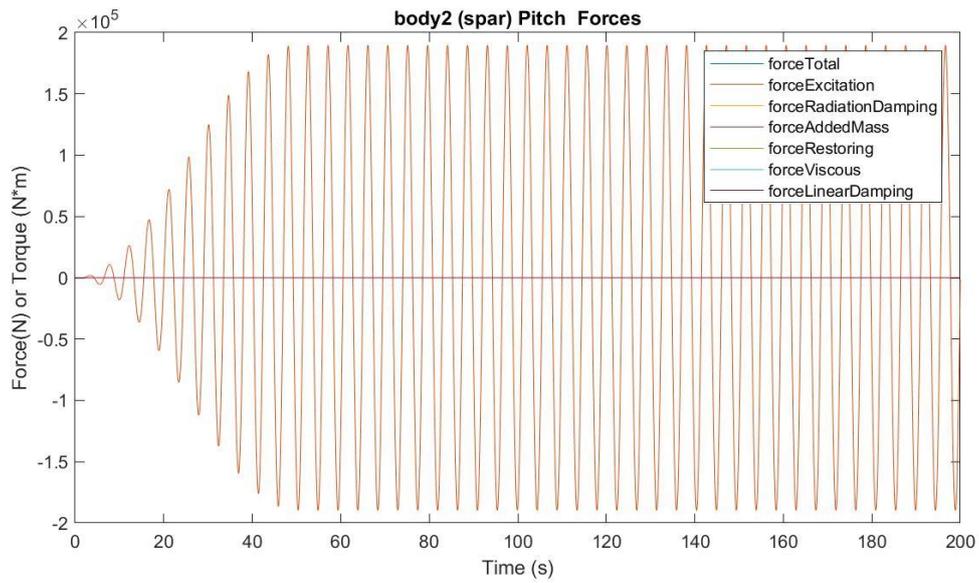
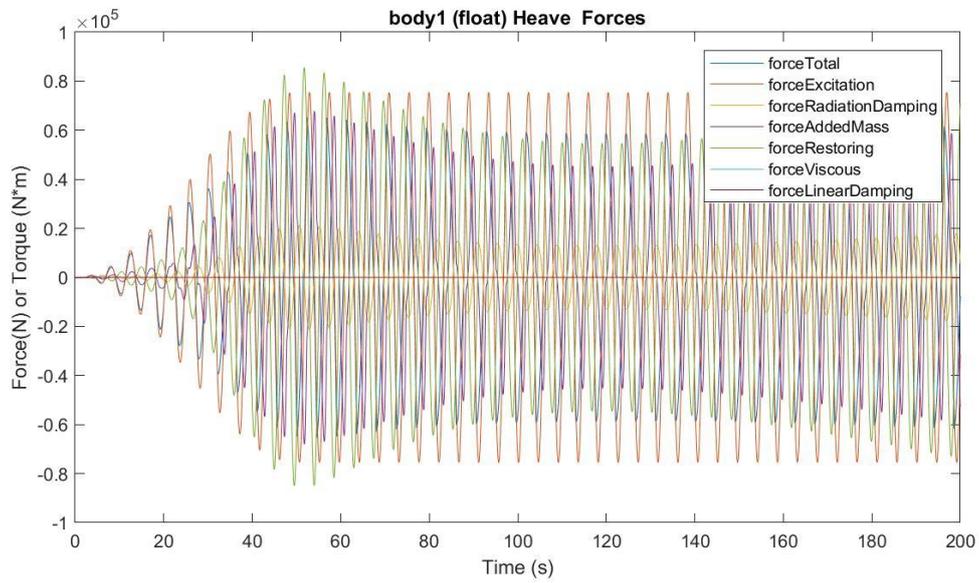
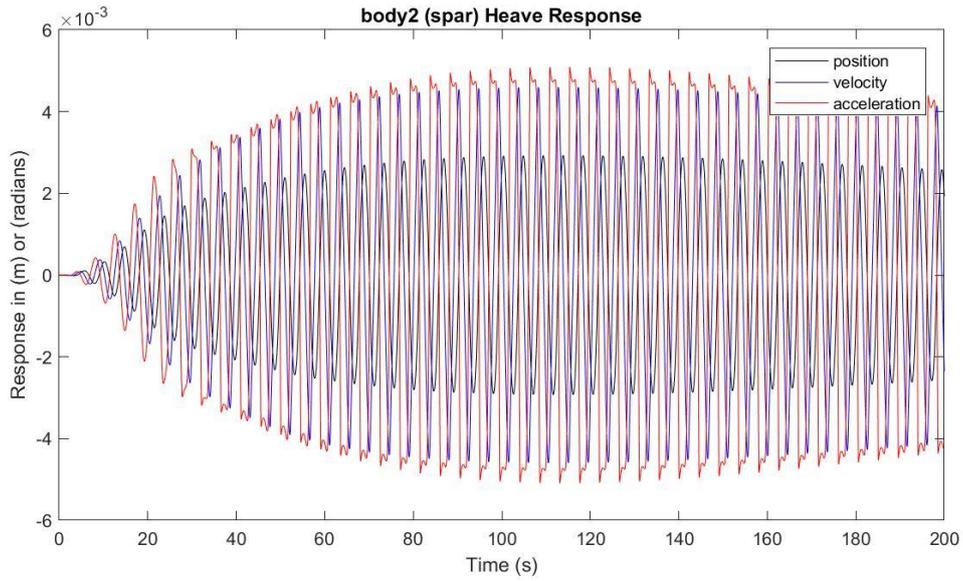
Presión media del acumulador de alta presión: 21.4396 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 21.0895 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0304 m, 0.0403 m/s y 0.0682 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0029 m, 0.0046 m/s y 0.0051 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 5.5 \text{ s}$

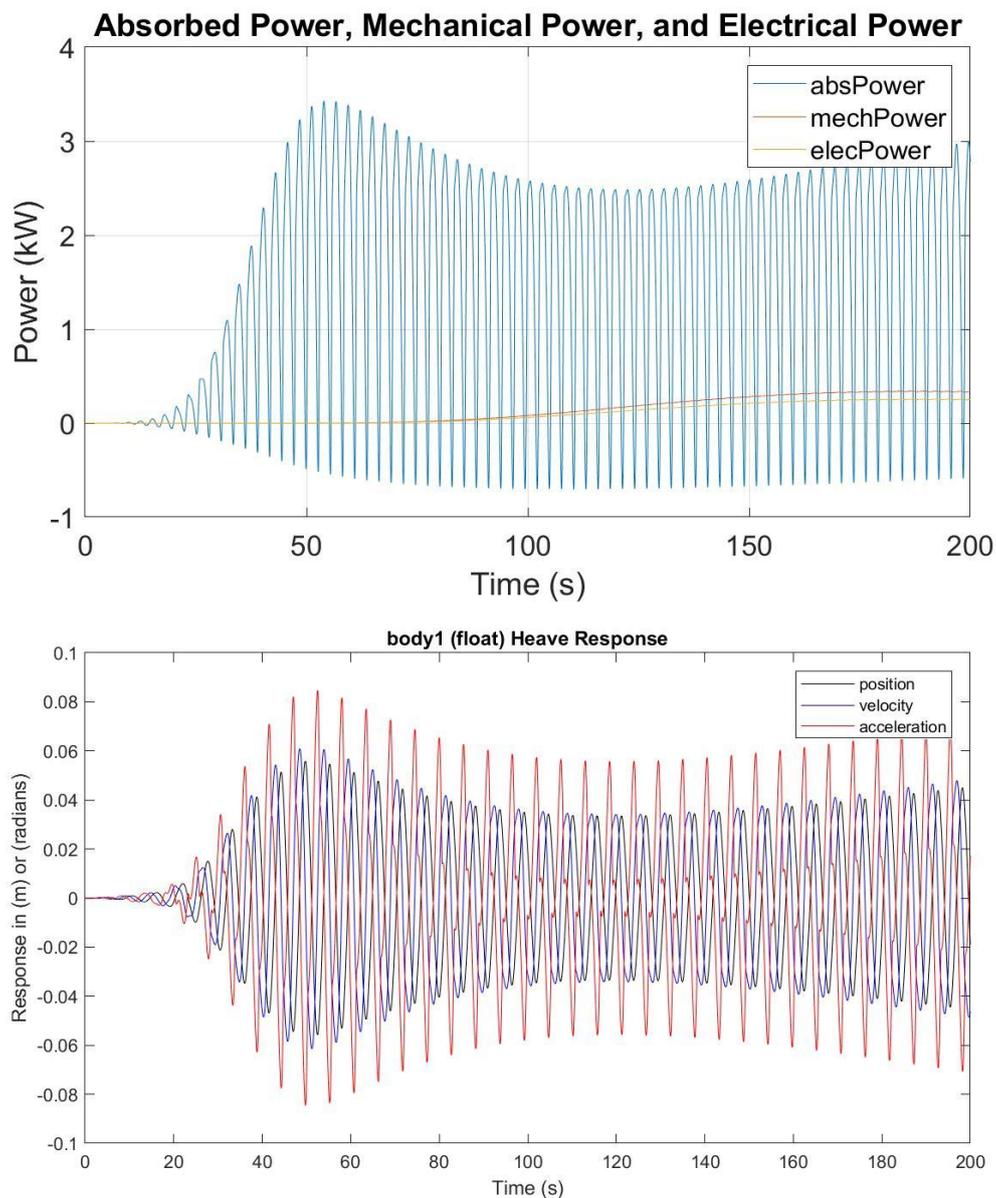
Potencia eléctrica media: 0.2472 kW

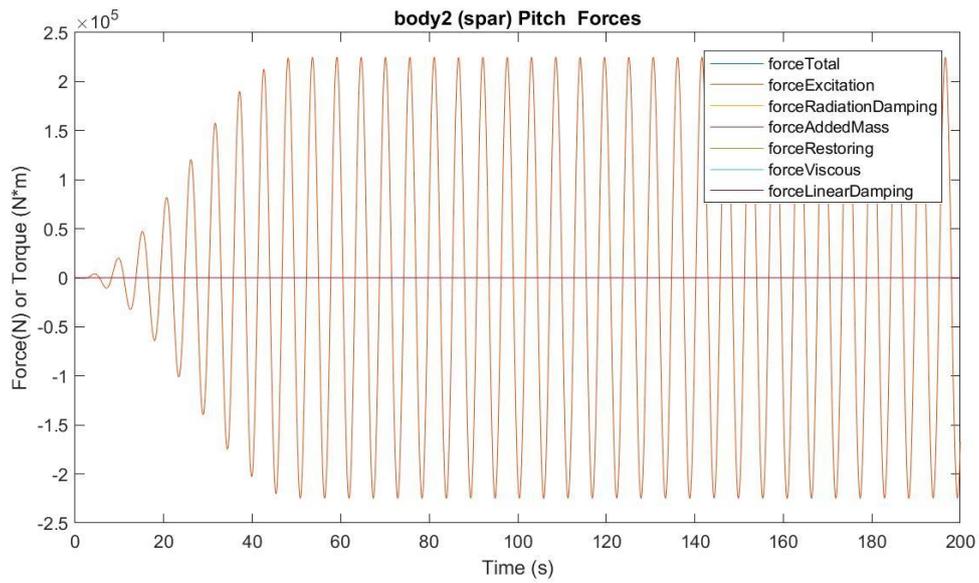
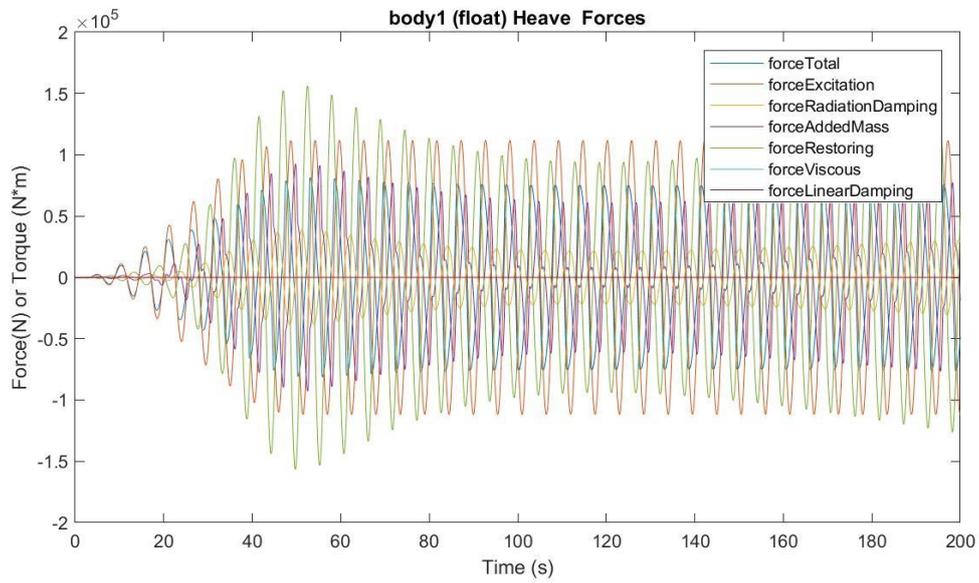
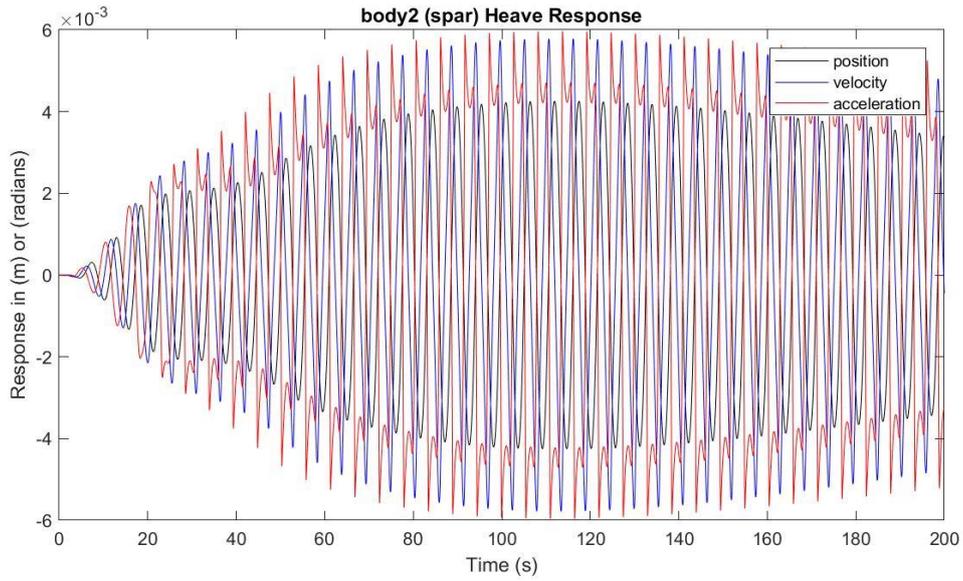
Presión media del acumulador de alta presión: 21.5110 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.9295 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0559 m, 0.0609 m/s y 0.0848 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.043 m, 0.0058 m/s y 0.0060 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$
 $T_e = 6.5 \text{ s}$

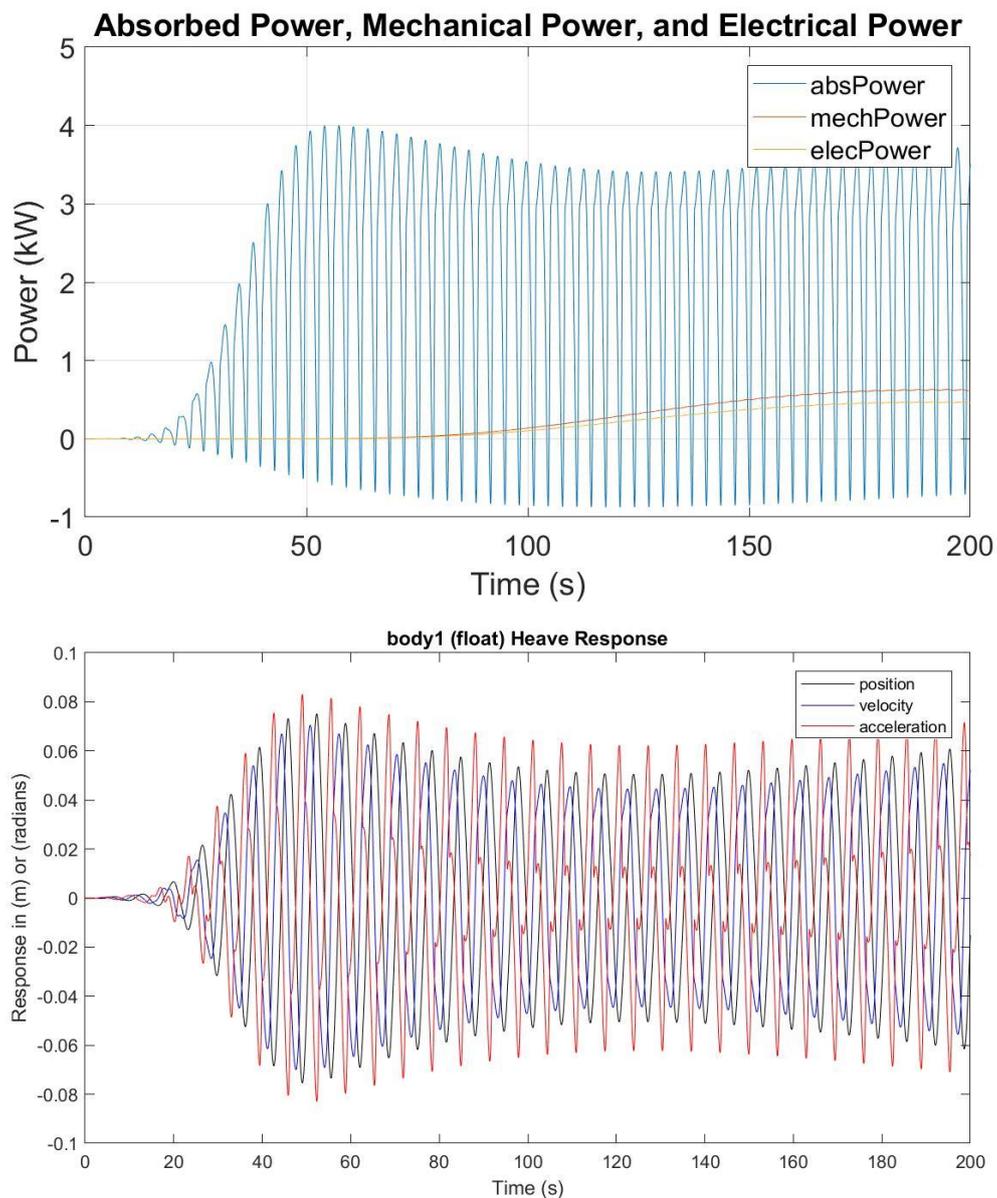
Potencia eléctrica media: 0.4532 kW

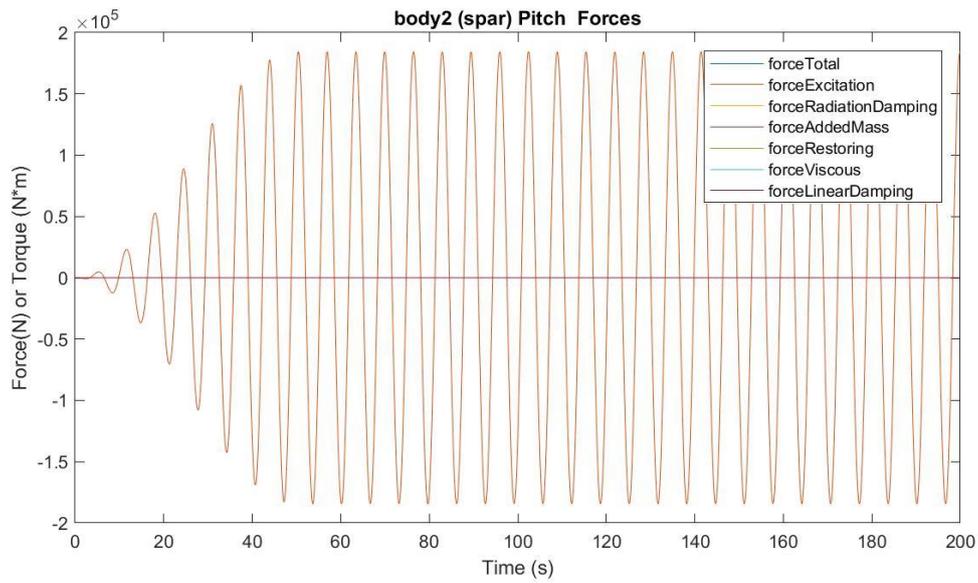
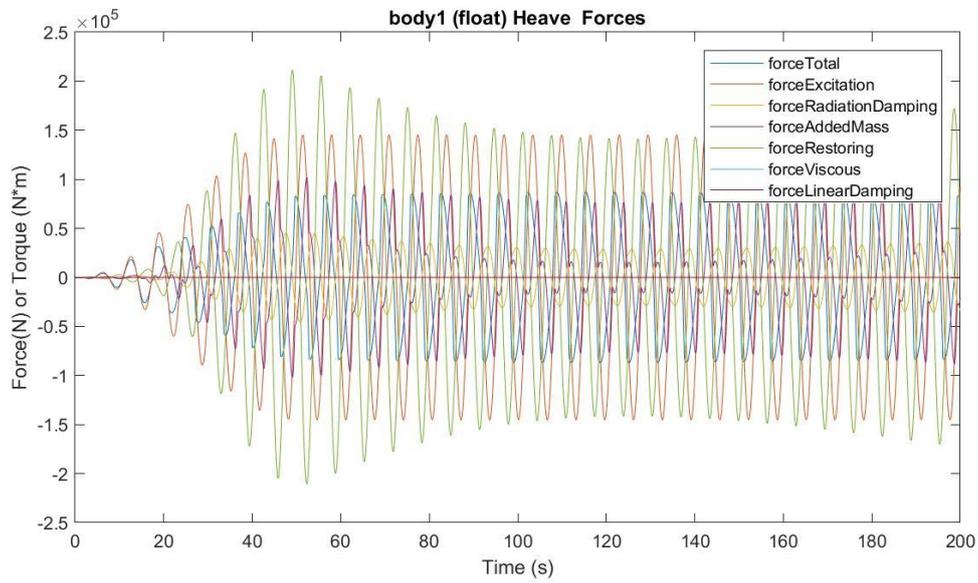
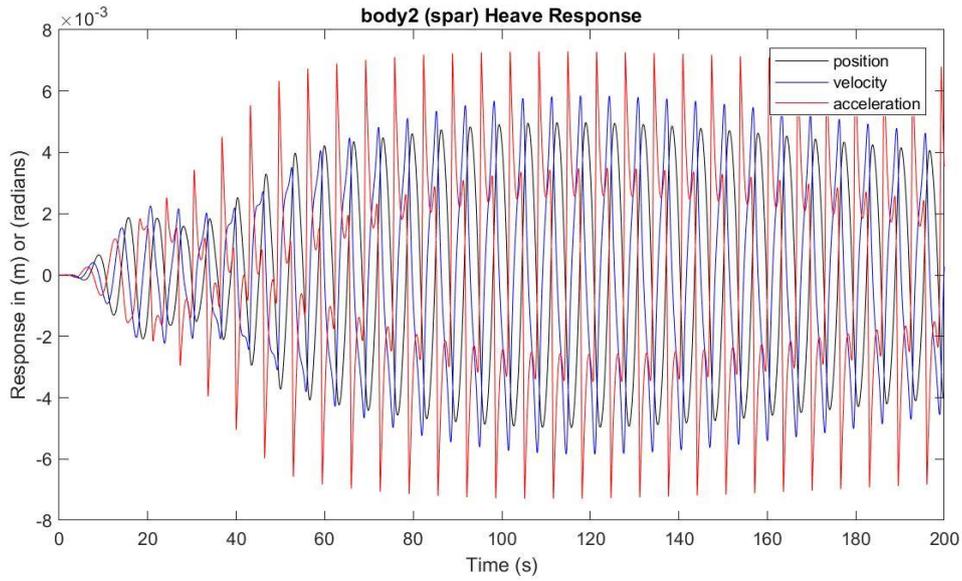
Presión media del acumulador de alta presión: 21.5719 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.7953 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0751 m, 0.0706 m/s y 0.0830 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0050 m, 0.0058 m/s y 0.0073 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

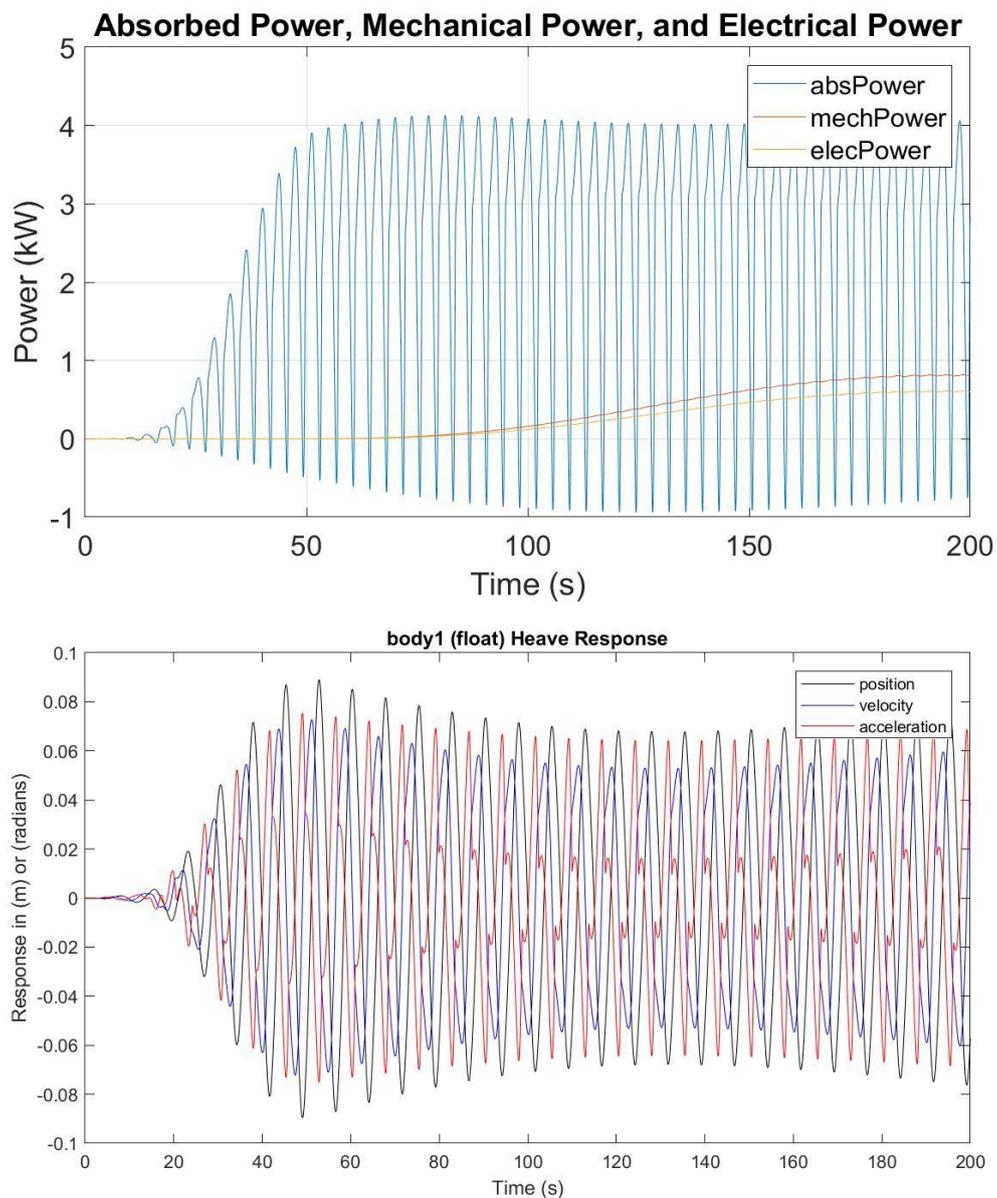
Potencia eléctrica media: 0.5816 kW

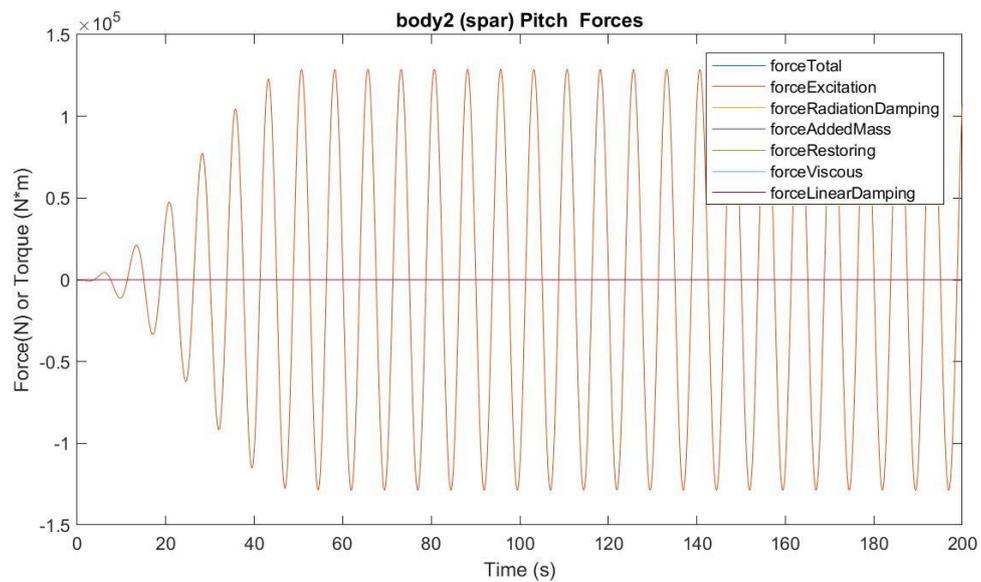
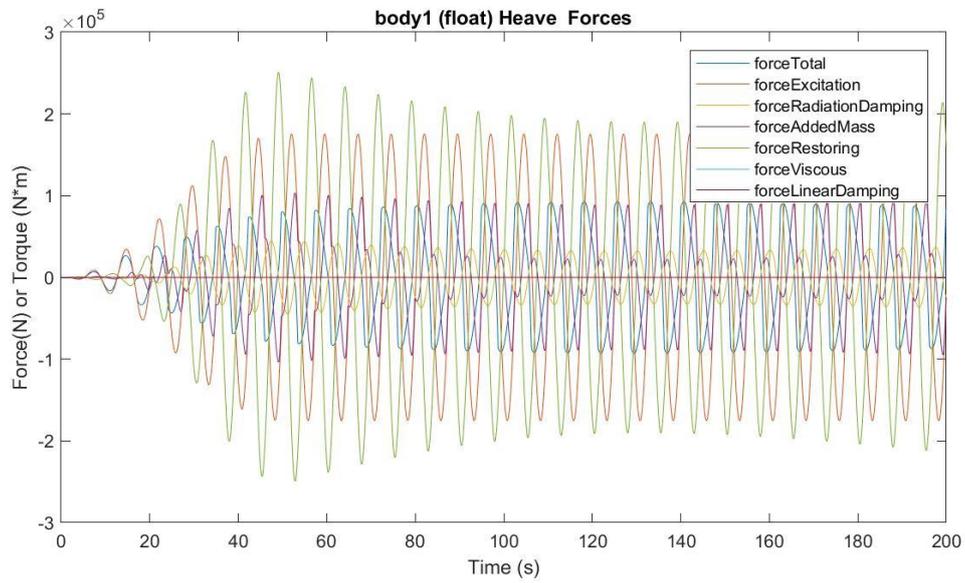
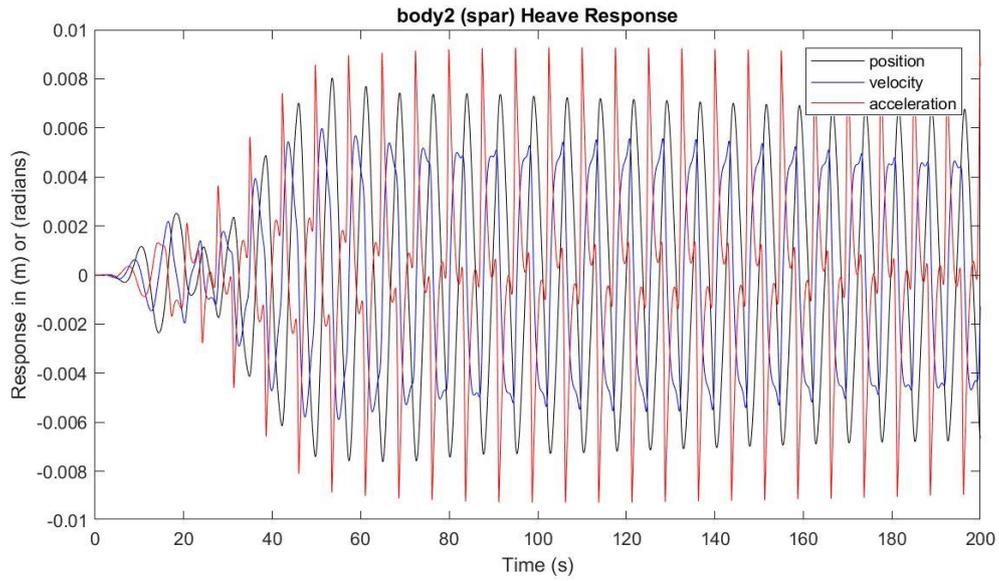
Presión media del acumulador de alta presión: 21.6082 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.7162 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0890 m, 0.0727 m/s y 0.754 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0080 m, 0.0060 m/s y 0.0093 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 8.5 \text{ s}$

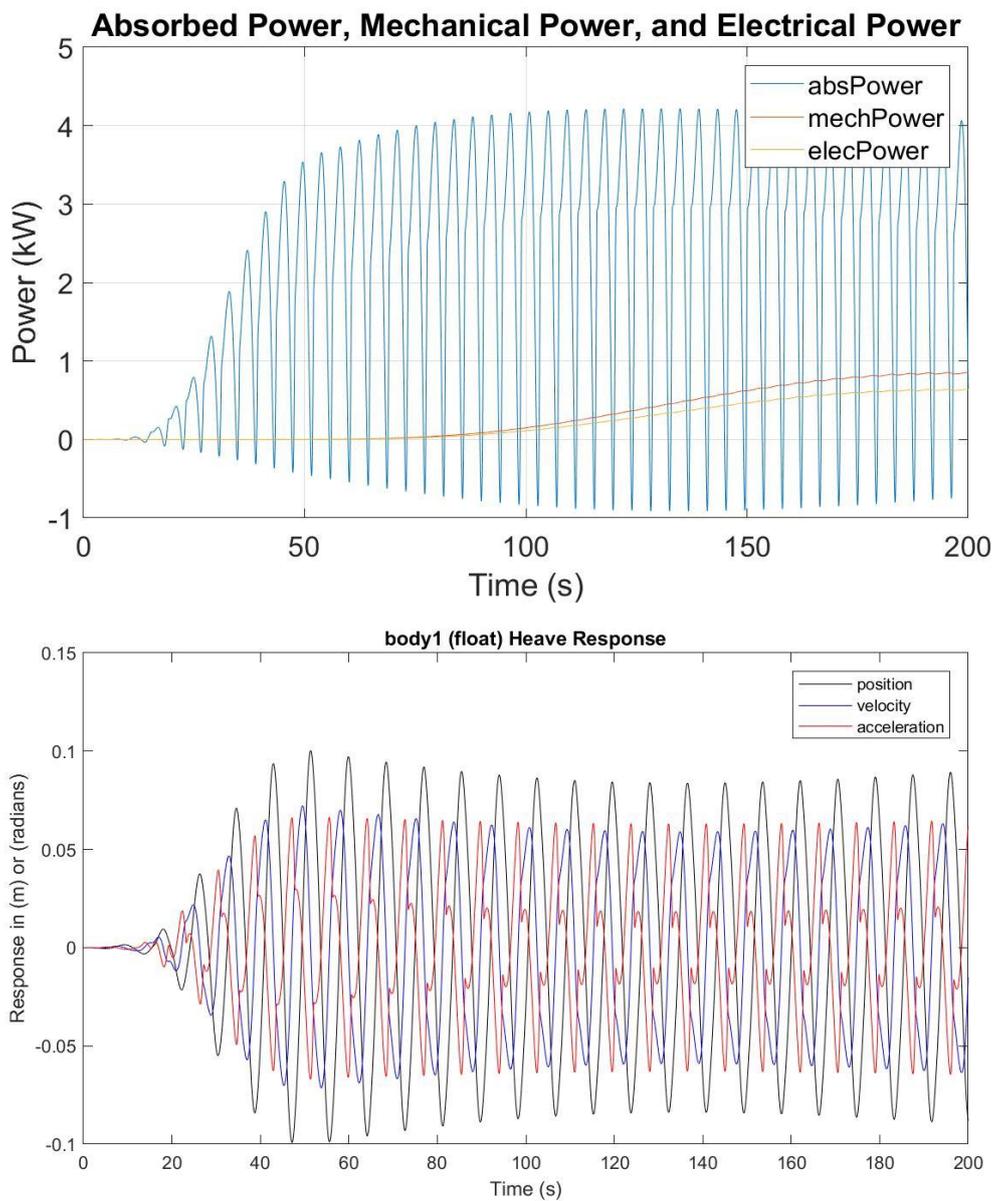
Potencia eléctrica media: 0.6025 kW

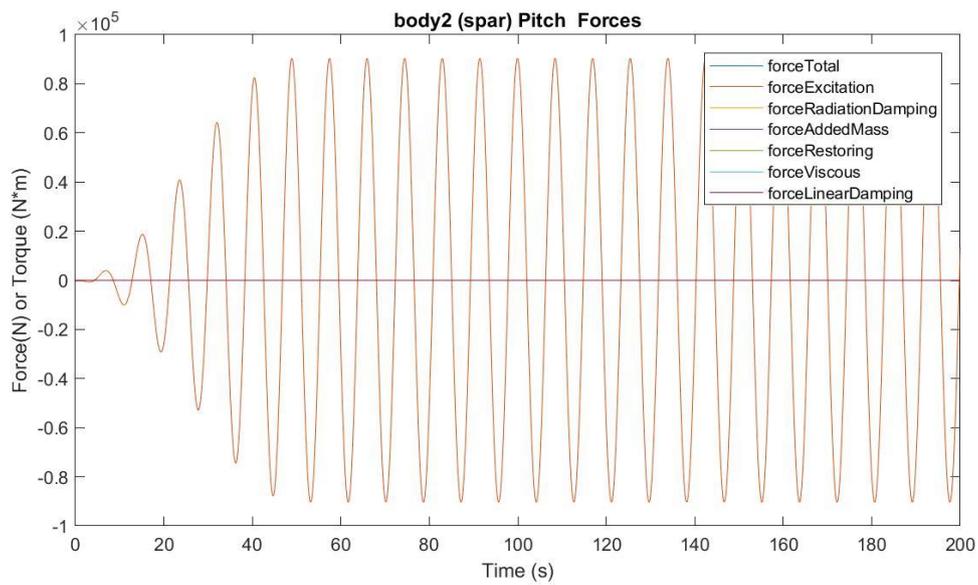
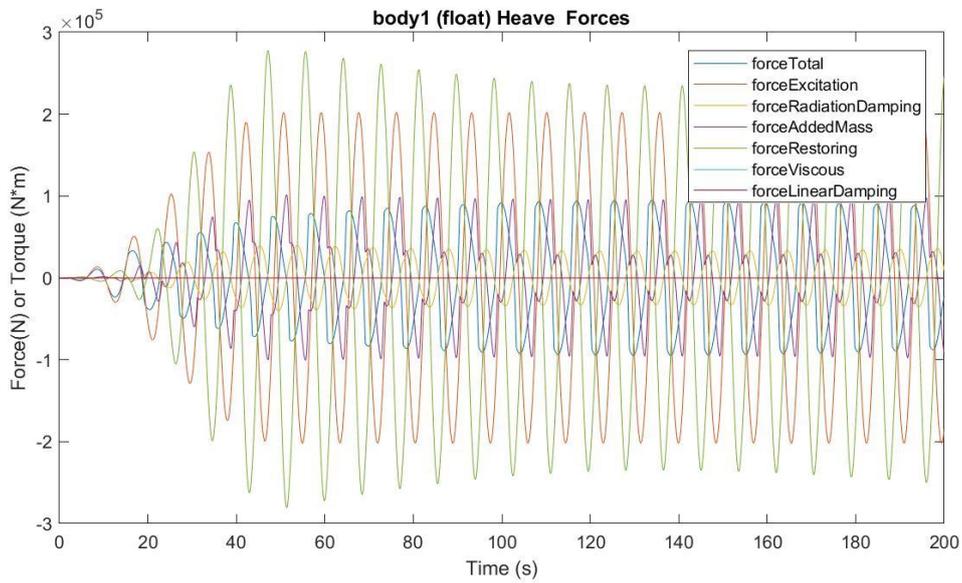
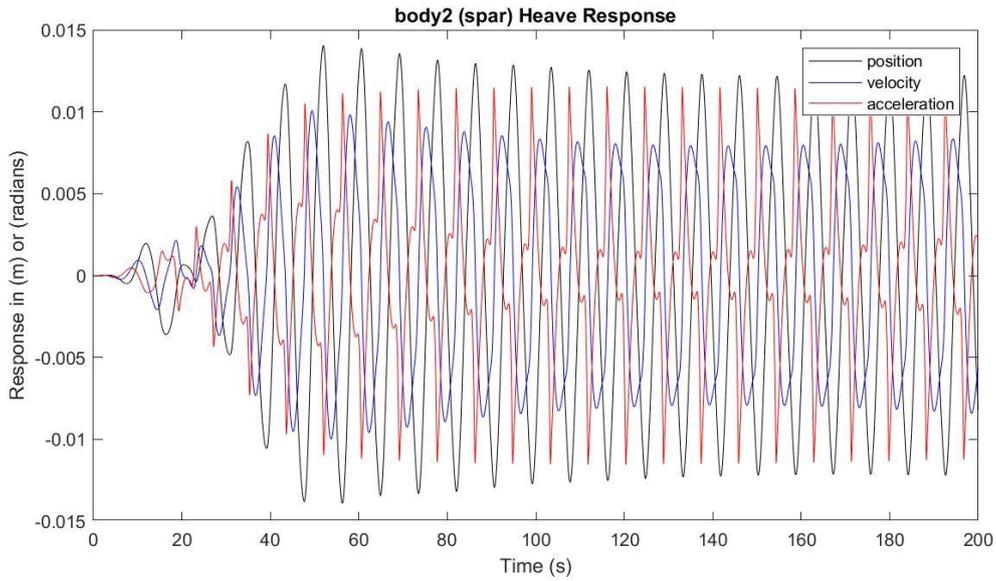
Presión media del acumulador de alta presión: 21.6177 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.6958 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.1002 m, 0.0722 m/s y 0.0663 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0140 m, 0.0101 m/s y 0.0115 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

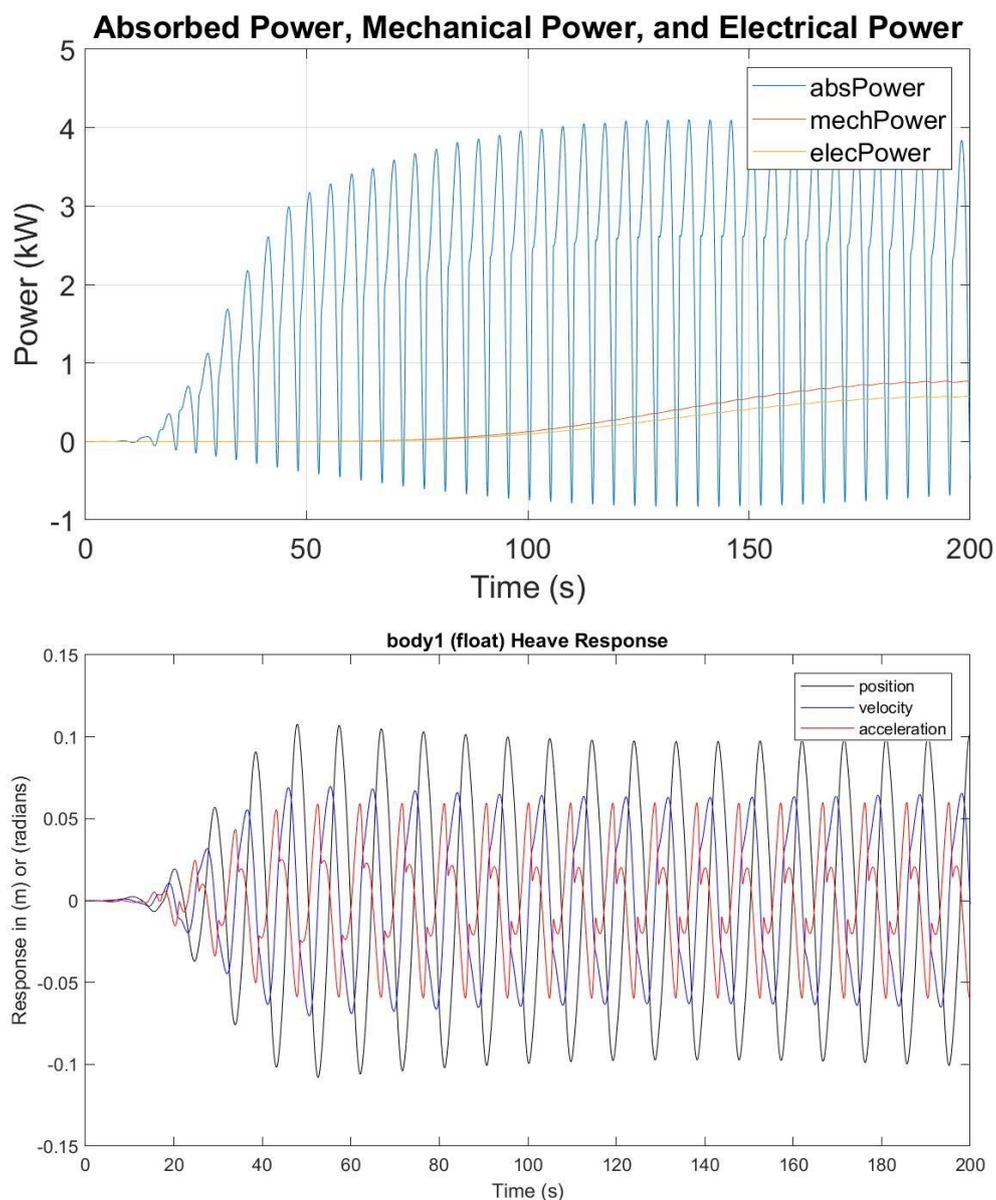
Potencia eléctrica media: 0.5402 kW

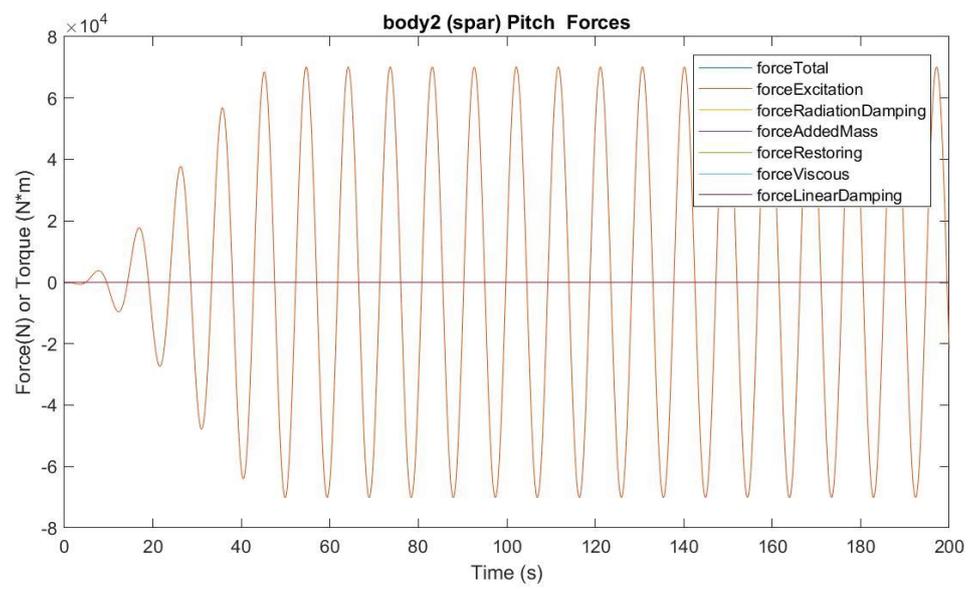
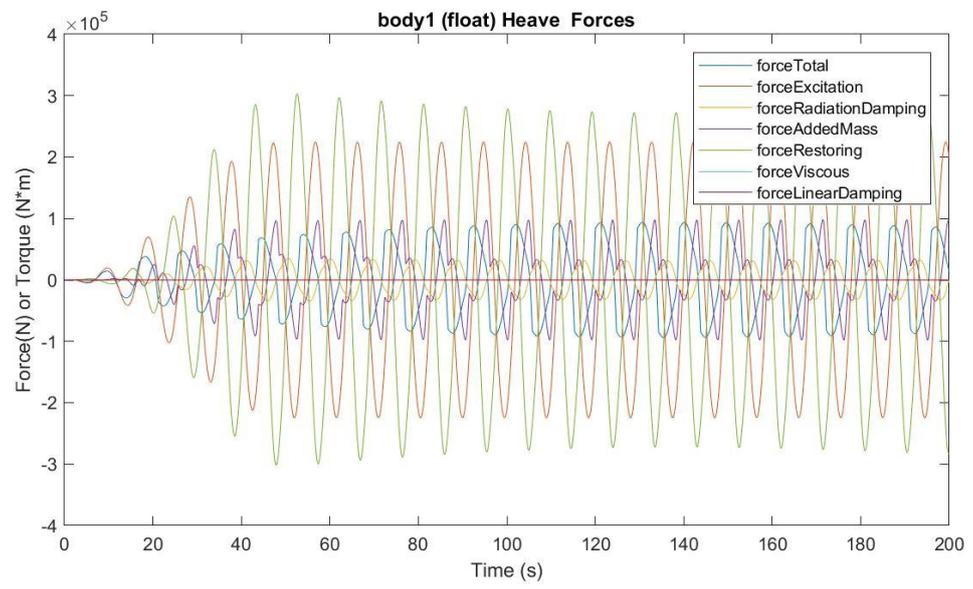
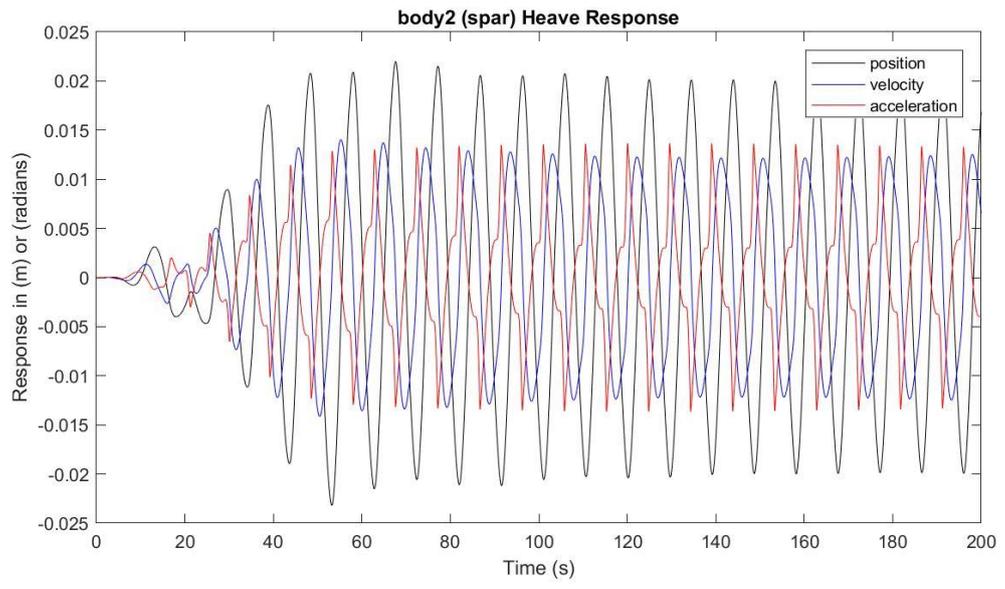
Presión media del acumulador de alta presión: 21.6070 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.7189 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.1077 m, 0.0697 m/s y 0.0598 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0220 m, 0.0140 m/s y 0.0137 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

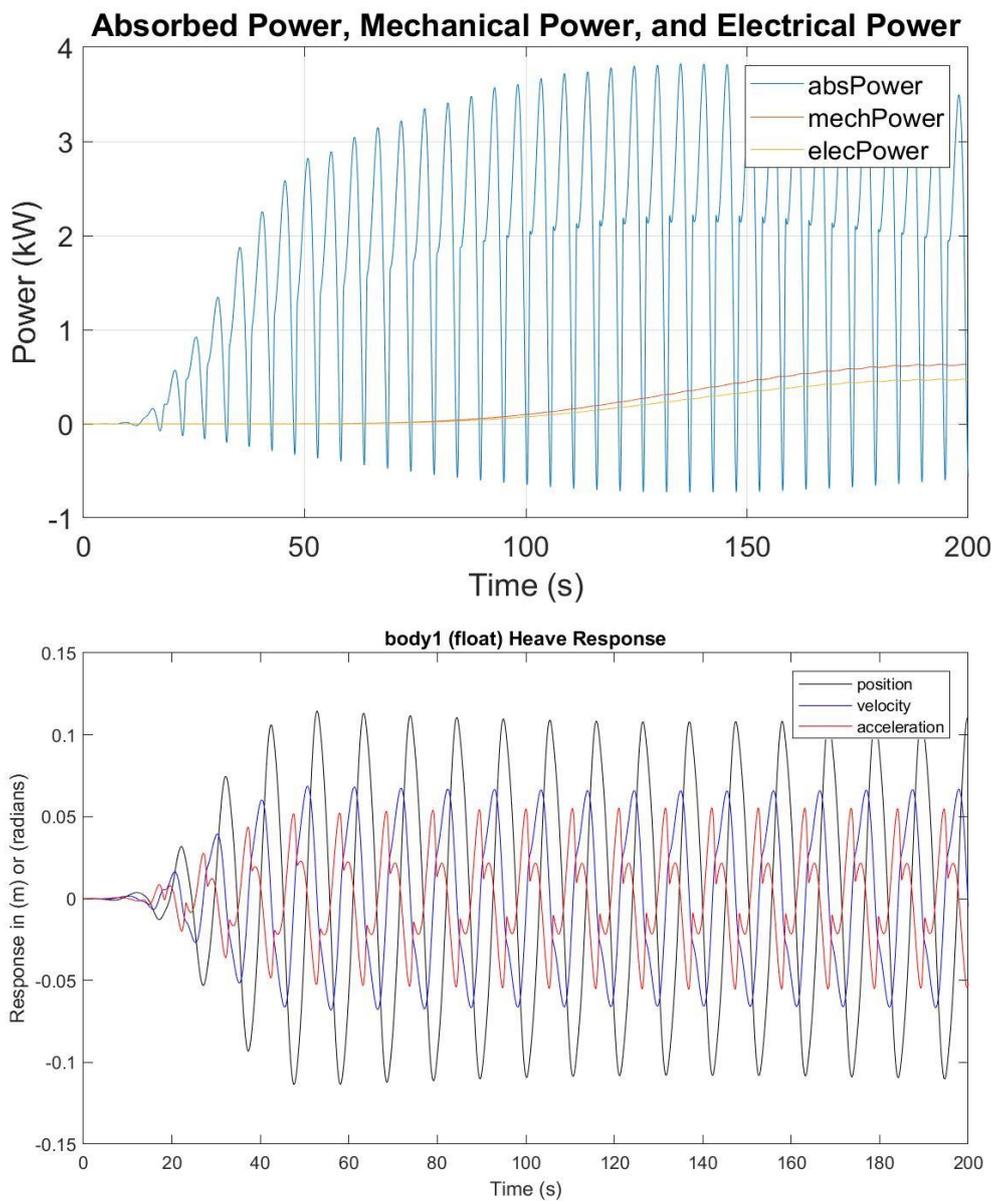
Potencia eléctrica media: 0.4437 kW

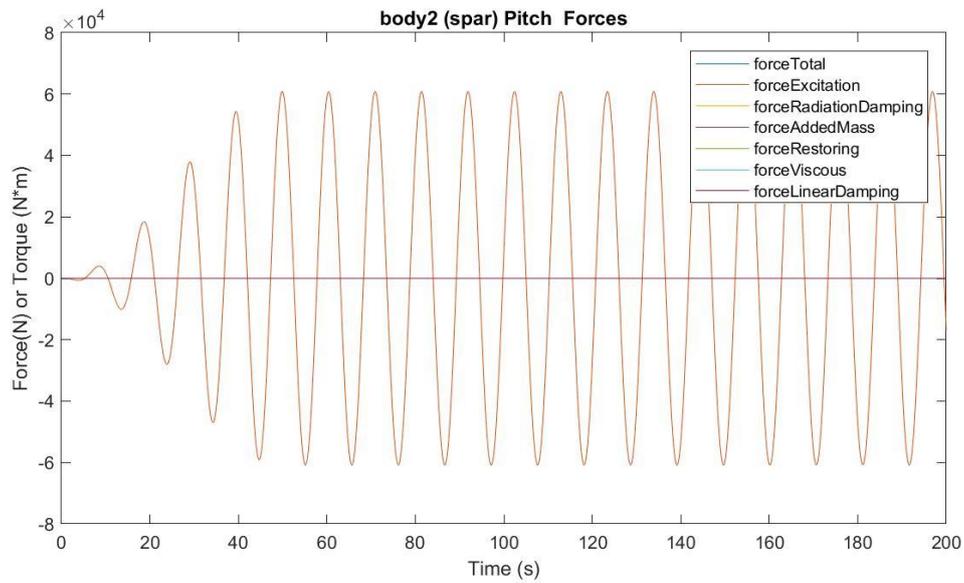
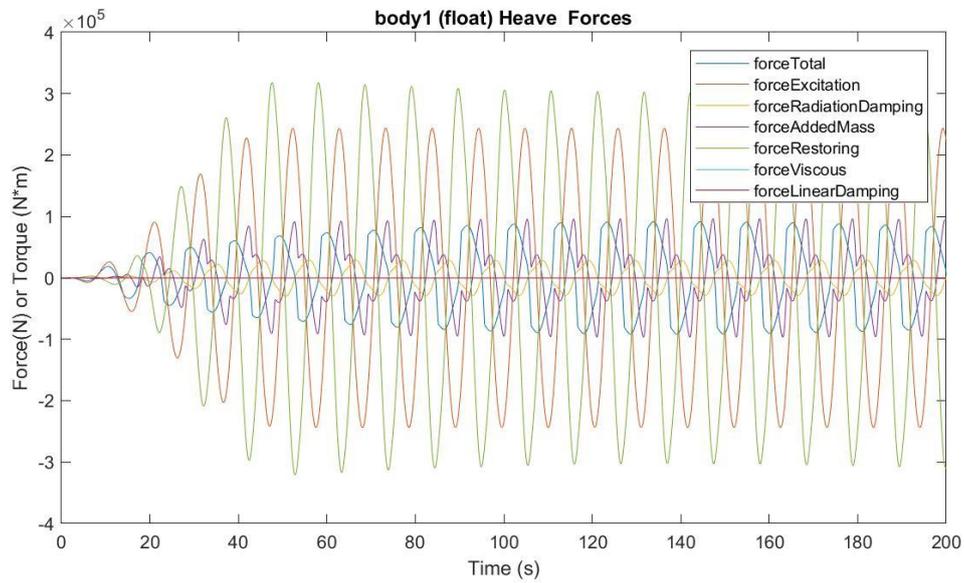
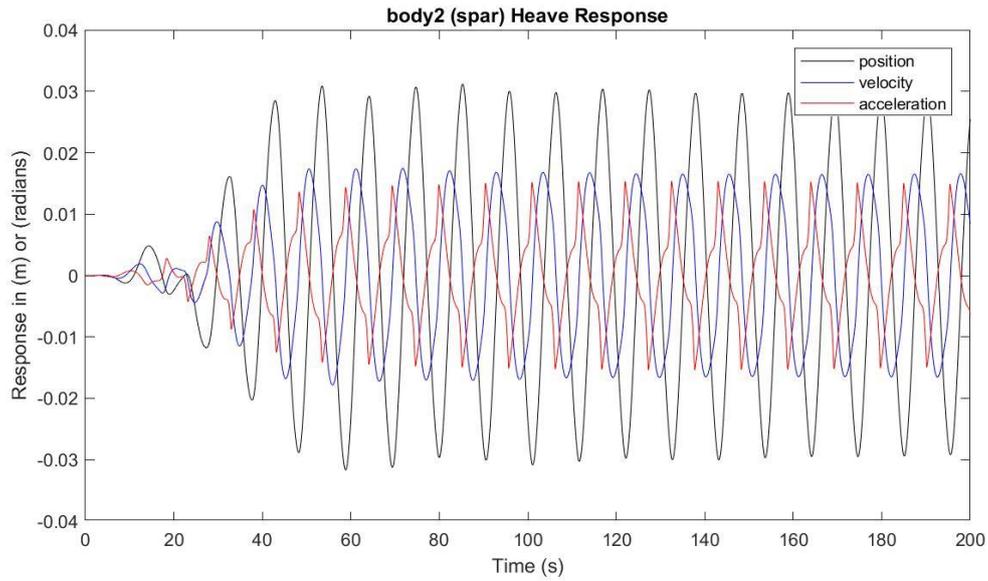
Presión media del acumulador de alta presión: 21.5847 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.7674 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.1145 m, 0.0687 m/s y 0.0554 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0312 m, 0.0174 m/s y 0.0154 m/s²





$H_s = 0.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

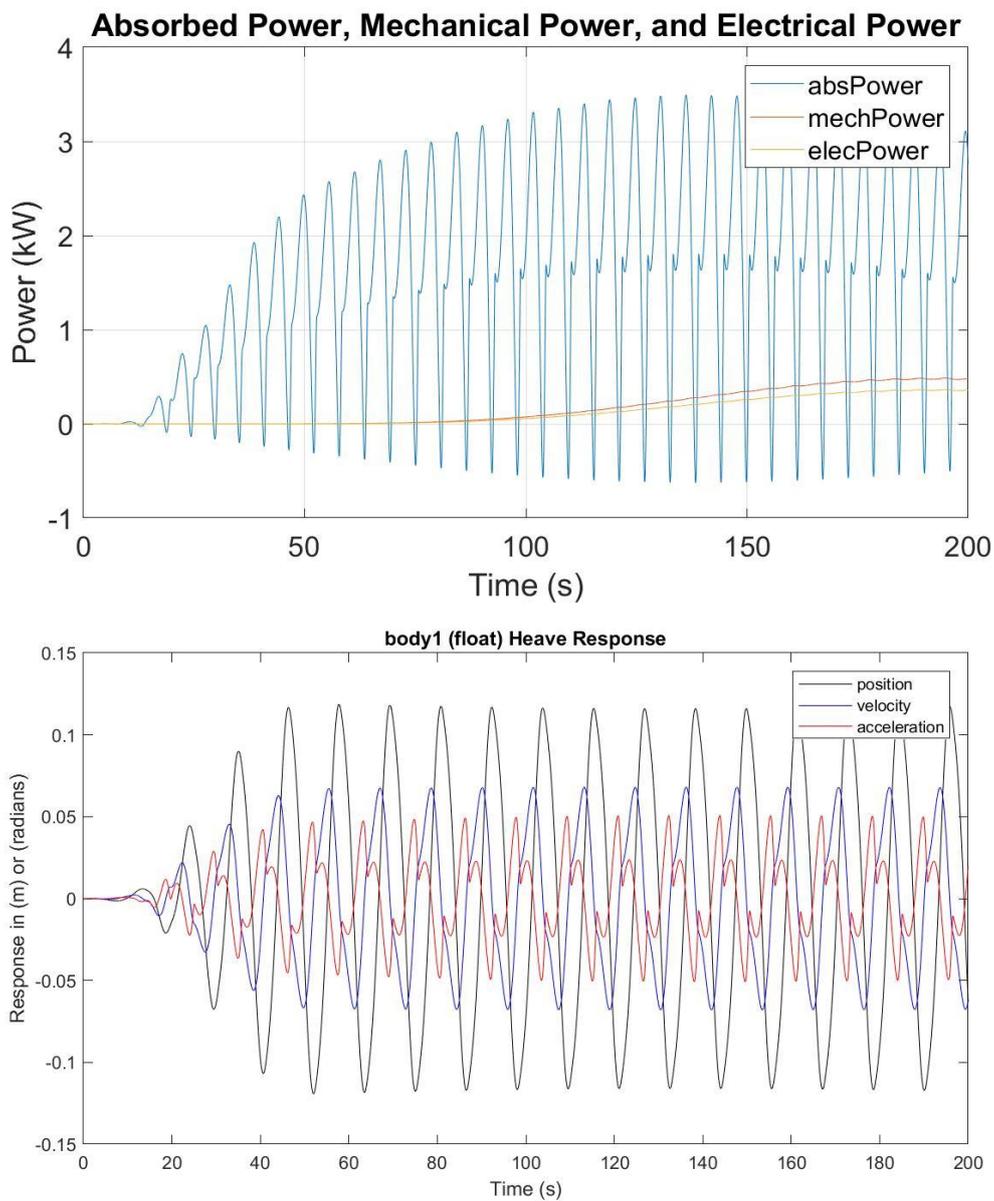
Potencia eléctrica media: 0.3408 kW

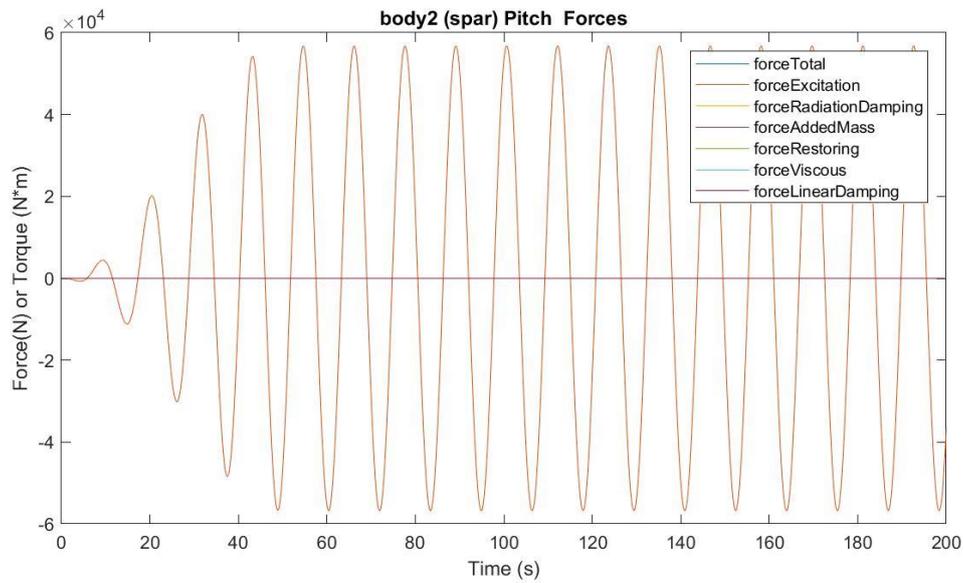
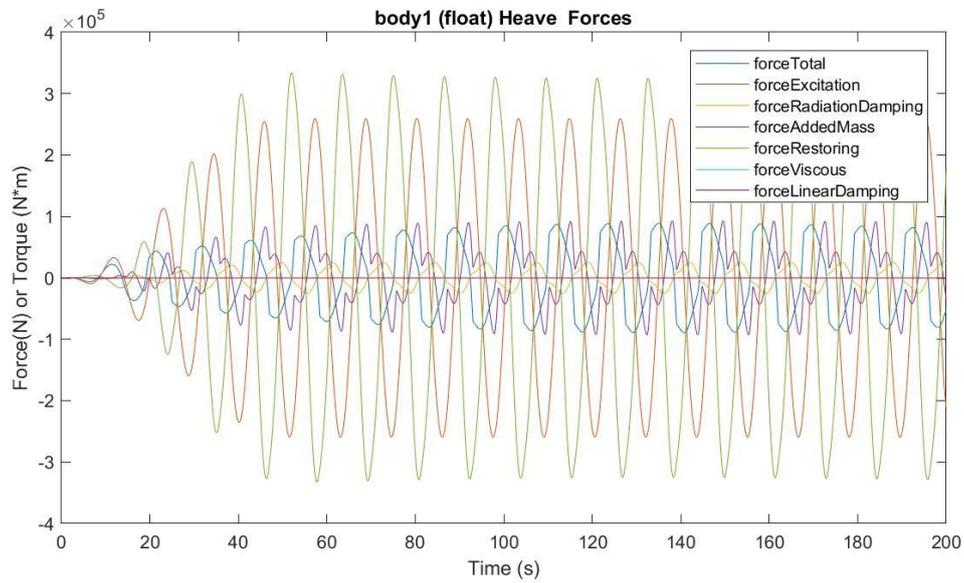
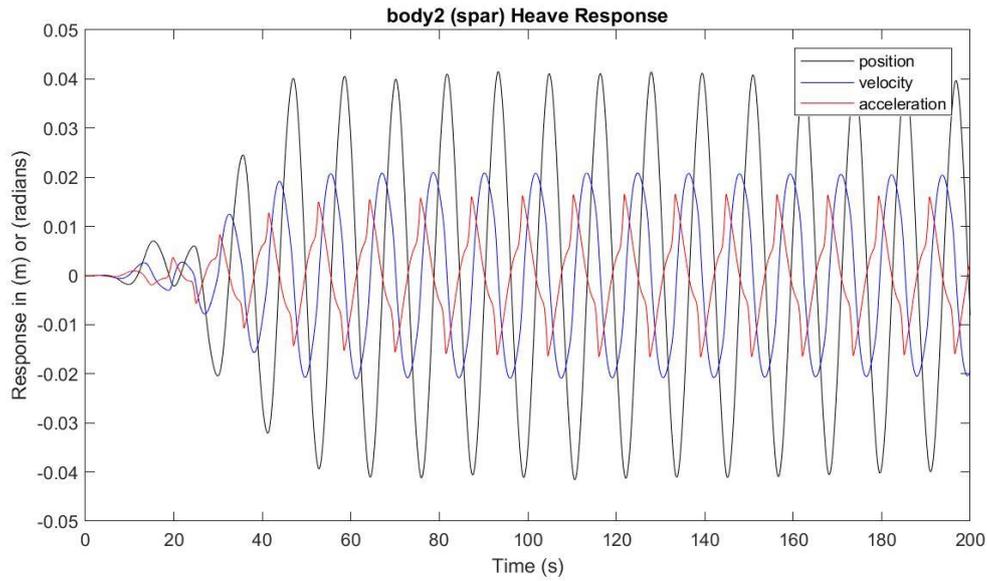
Presión media del acumulador de alta presión: 21.5567 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.8286 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.1186 m, 0.0680 m/s y 0.0507 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0415 m, 0.0210 m/s y 0.0166 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$ $T_e = 2.5 \text{ s}$

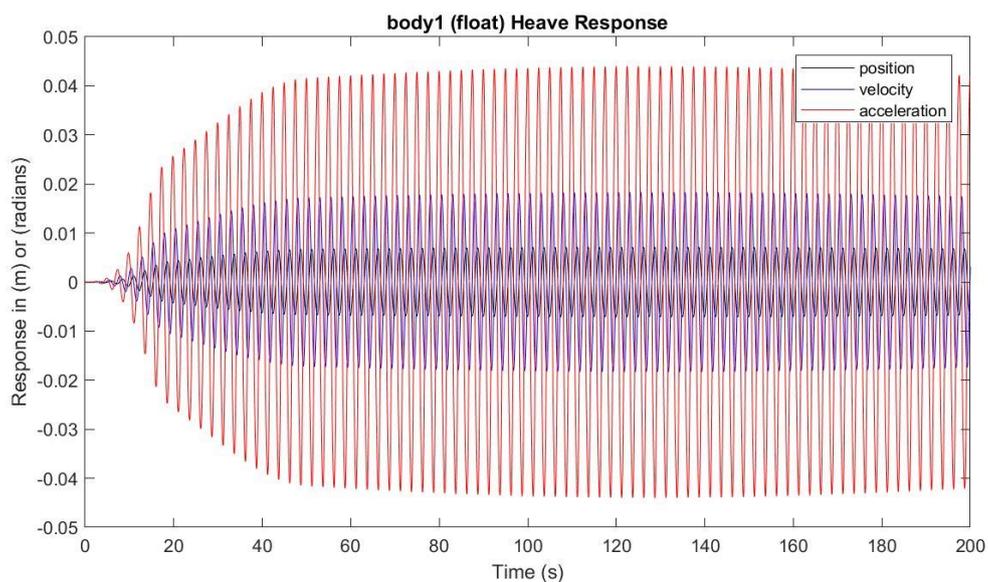
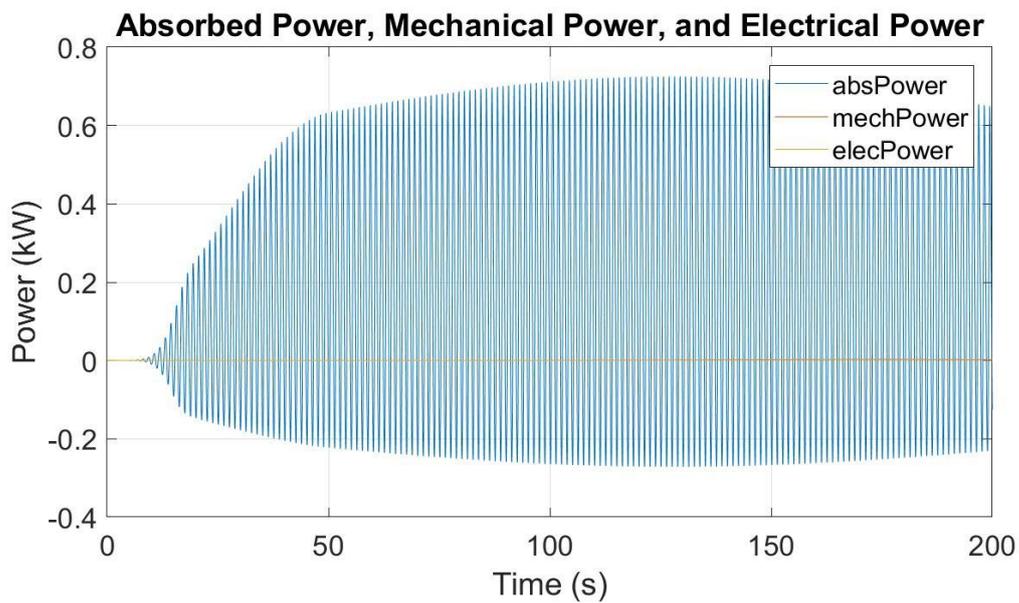
Potencia eléctrica media: 0.0022 kW

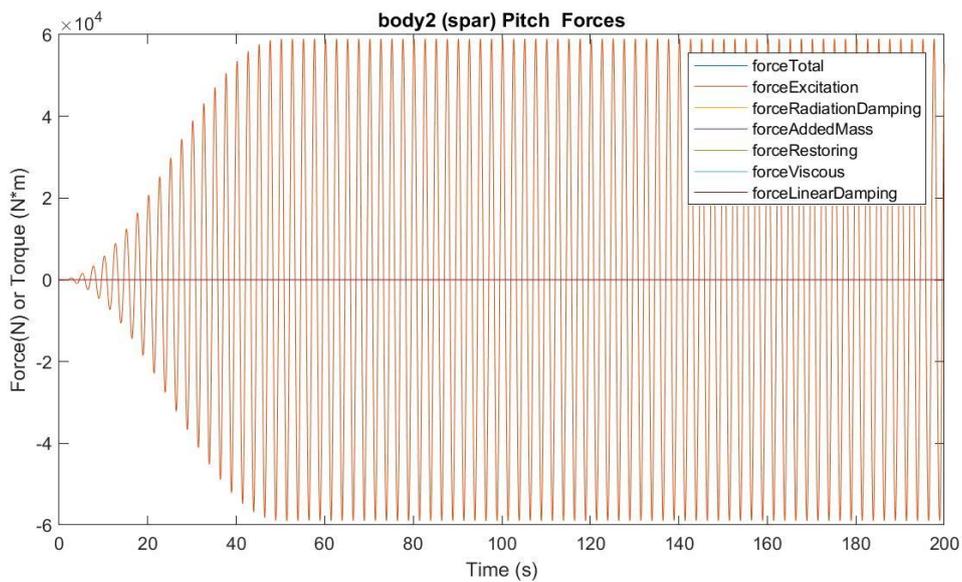
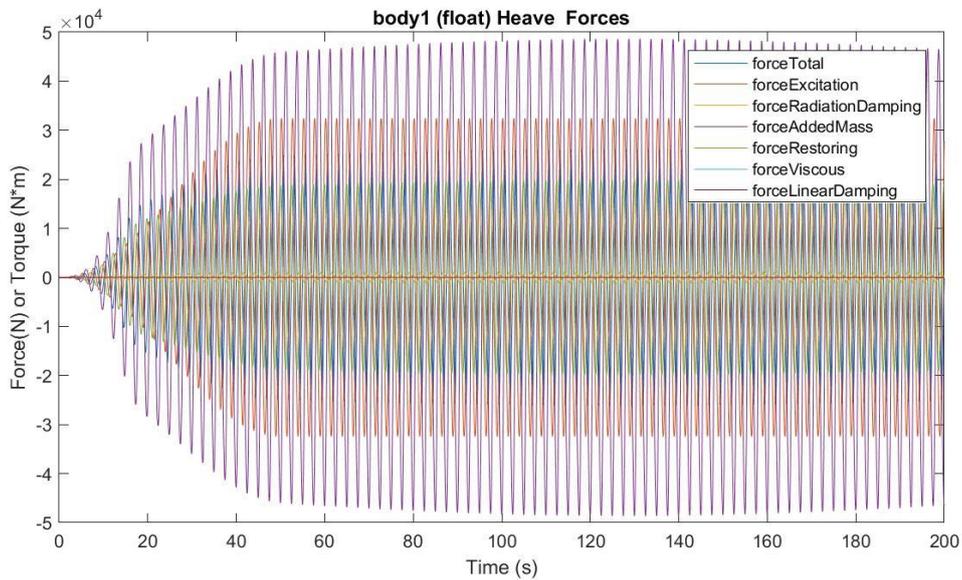
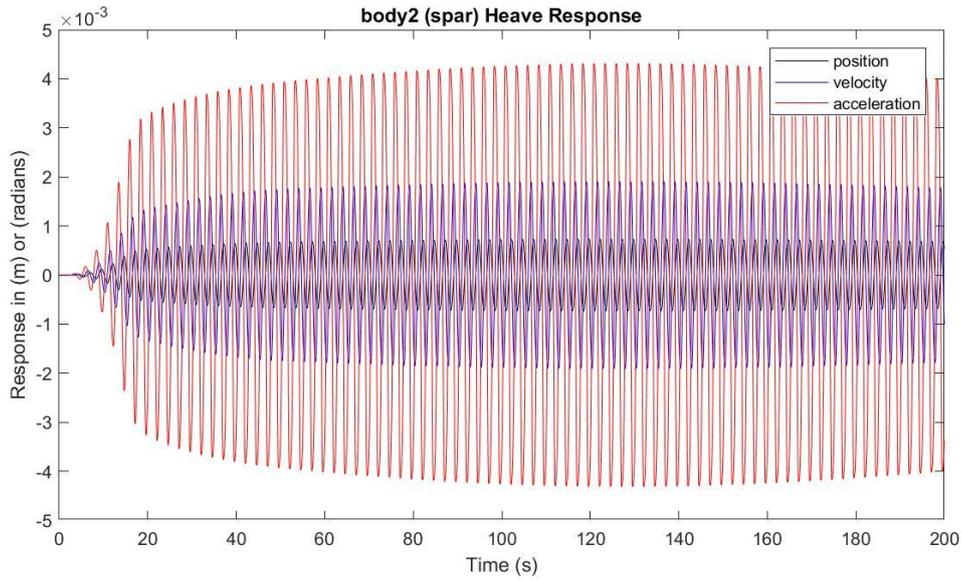
Presión media del acumulador de alta presión: 21.3633 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 21.2639 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0071 m, 0.0183 m/s y 0.0440 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.007 m, 0.0019 m/s y 0.0043 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$
 $T_e = 3.5 \text{ s}$

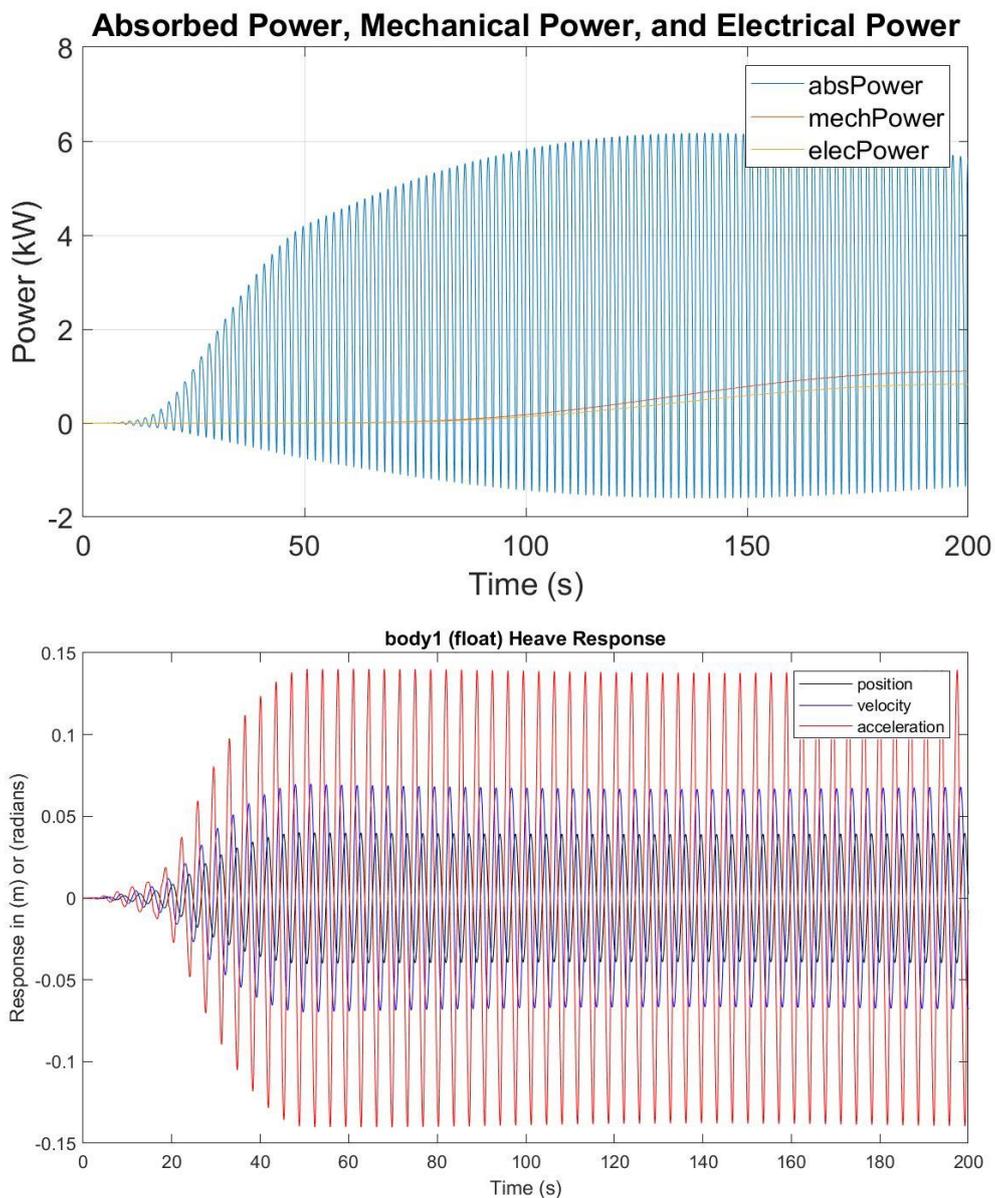
Potencia eléctrica media: 0.7761 kW

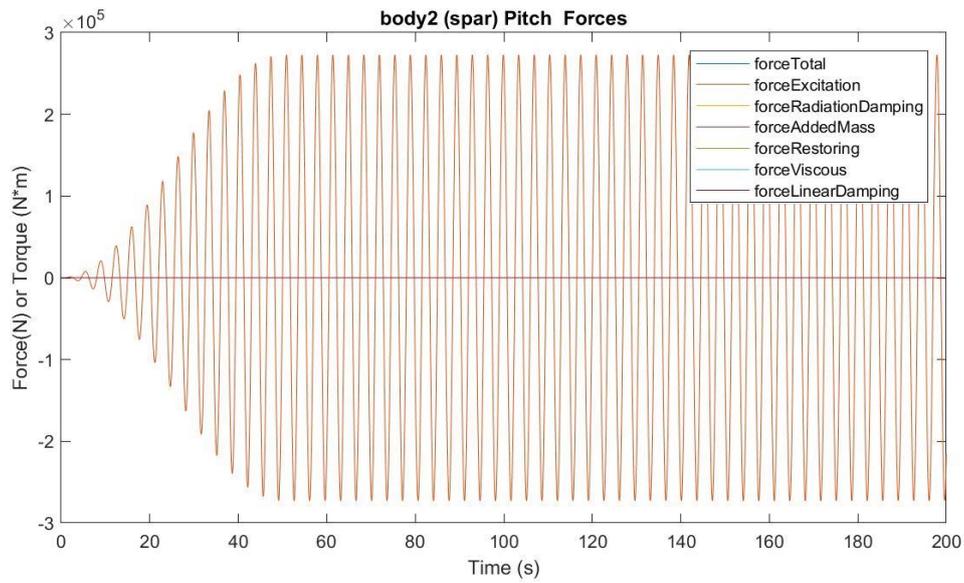
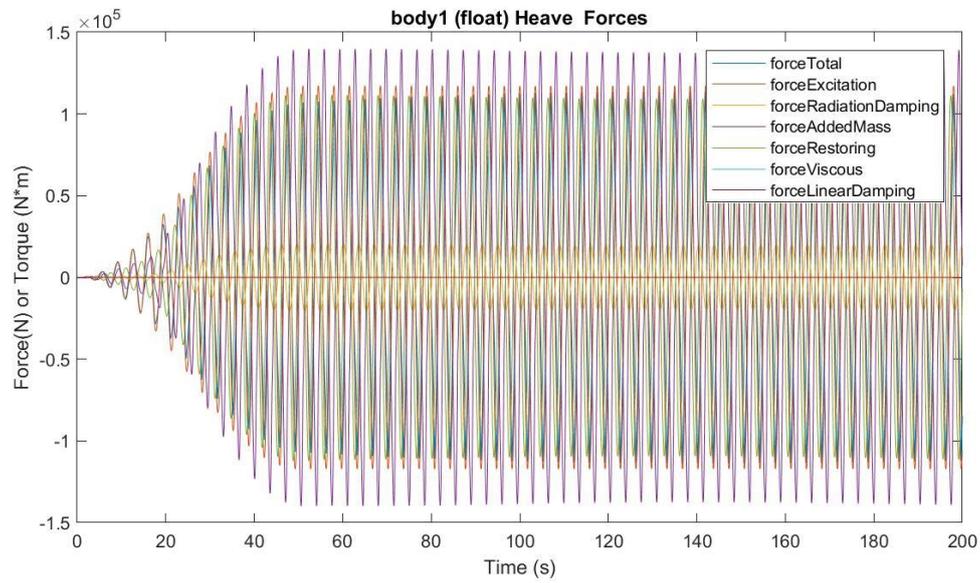
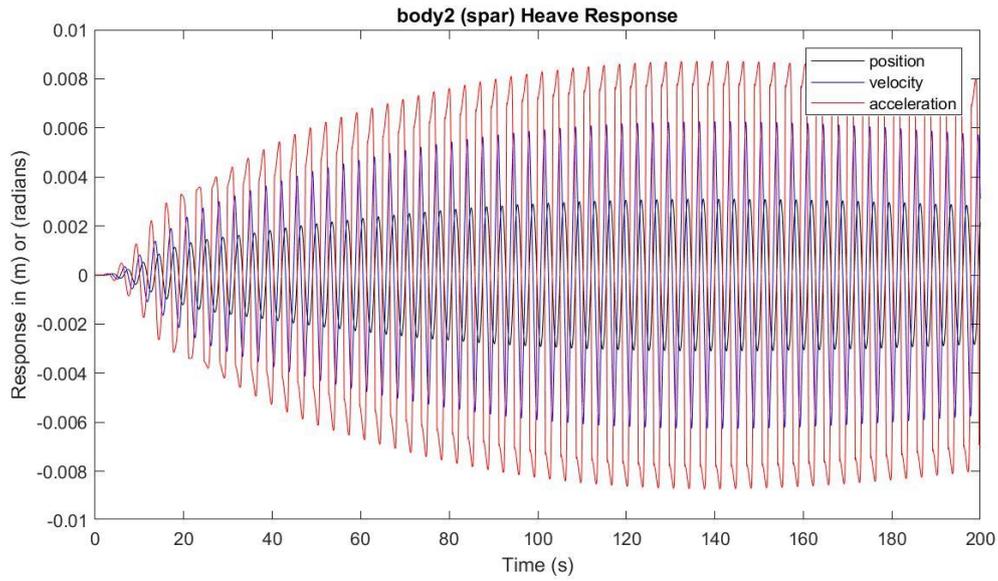
Presión media del acumulador de alta presión: 21.6604 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.6039 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0401 m, 0.0699 m/s y 0.1402 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0031 m, 0.0063 m/s y 0.0087 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 4.5 \text{ s}$

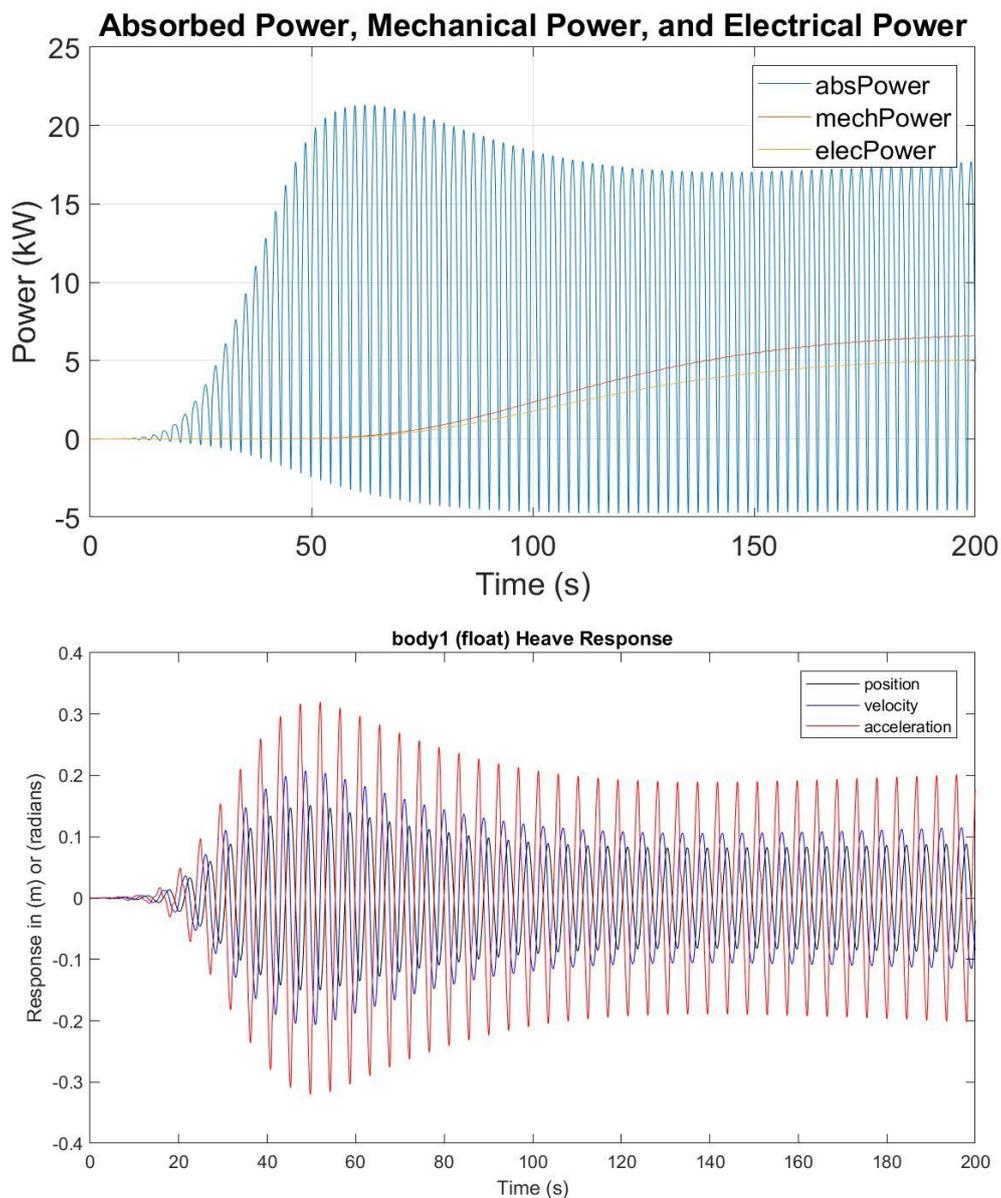
Potencia eléctrica media: 4.8145 kW

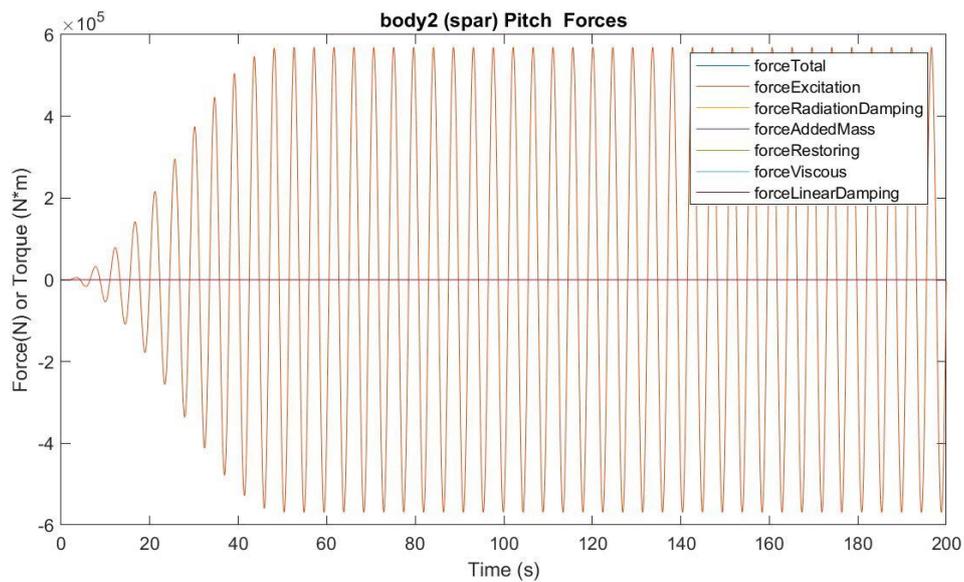
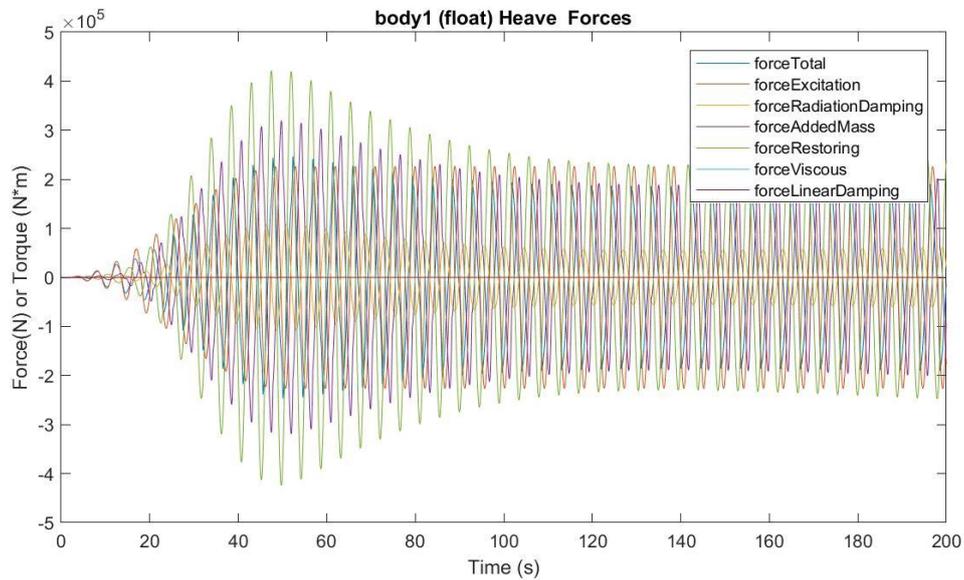
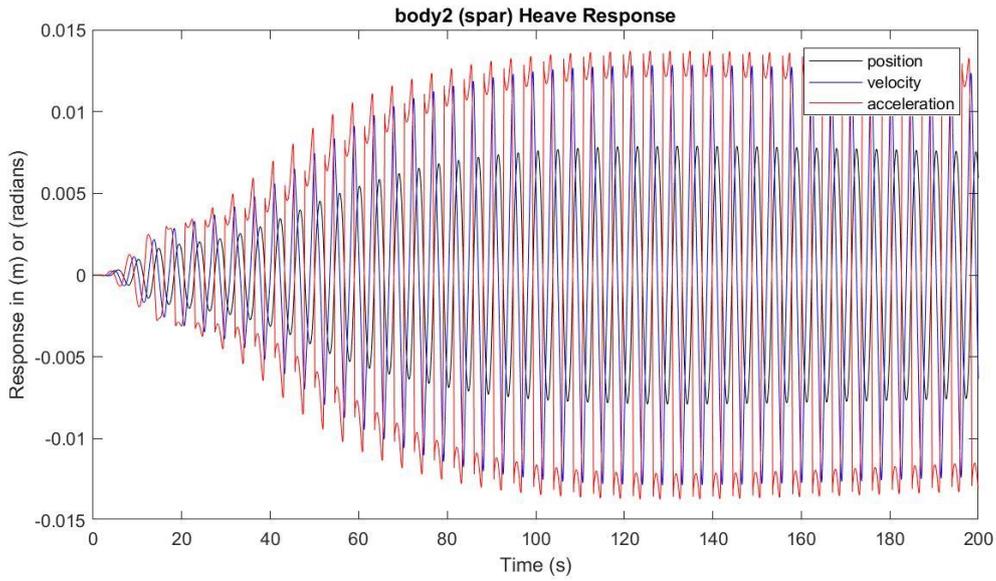
Presión media del acumulador de alta presión: 22.2203 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 19.4855 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.1512 m, 0.2073 m/s y 0.3199 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0079 m, 0.0128 m/s y 0.0137 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 5.5 \text{ s}$

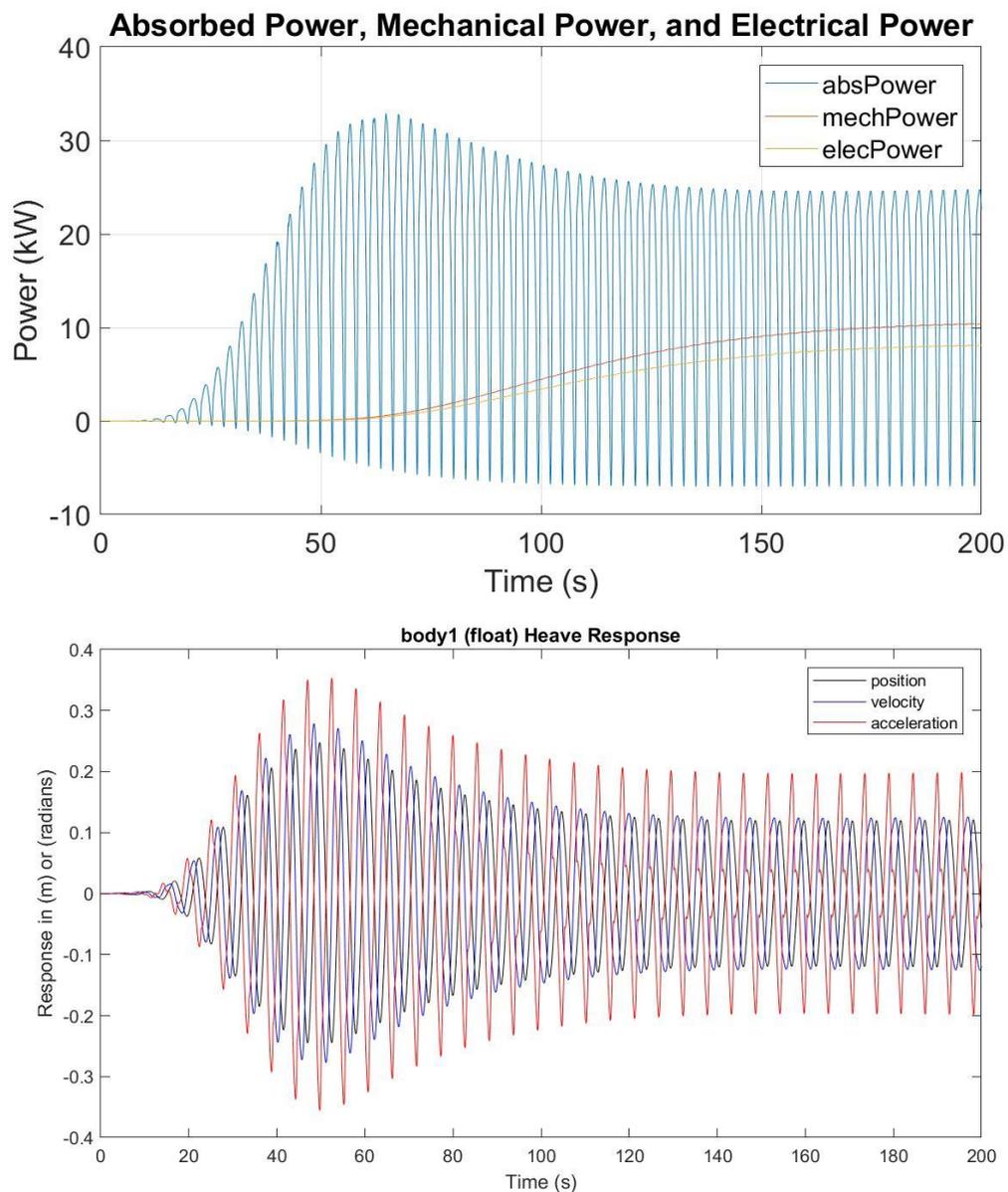
Potencia eléctrica media: 7.8235 kW

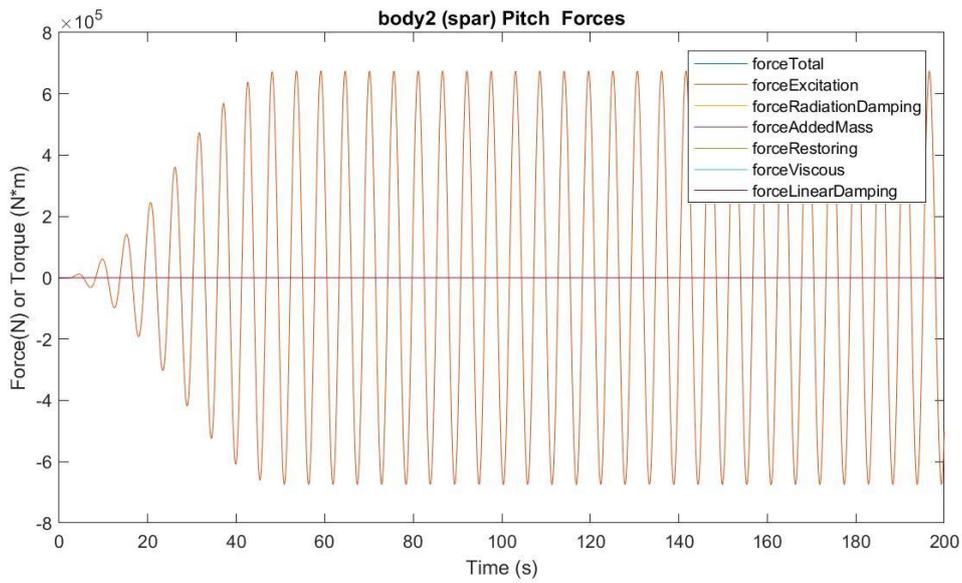
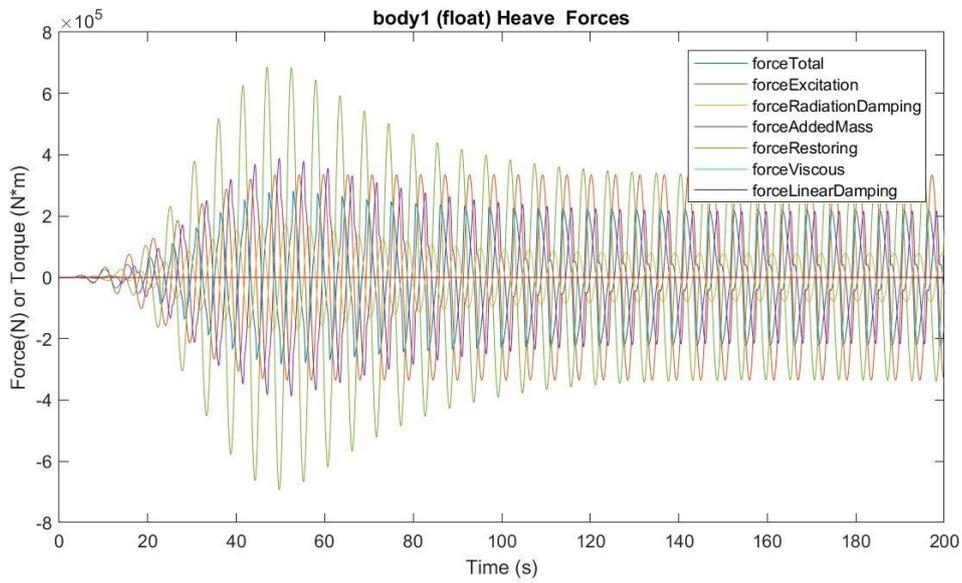
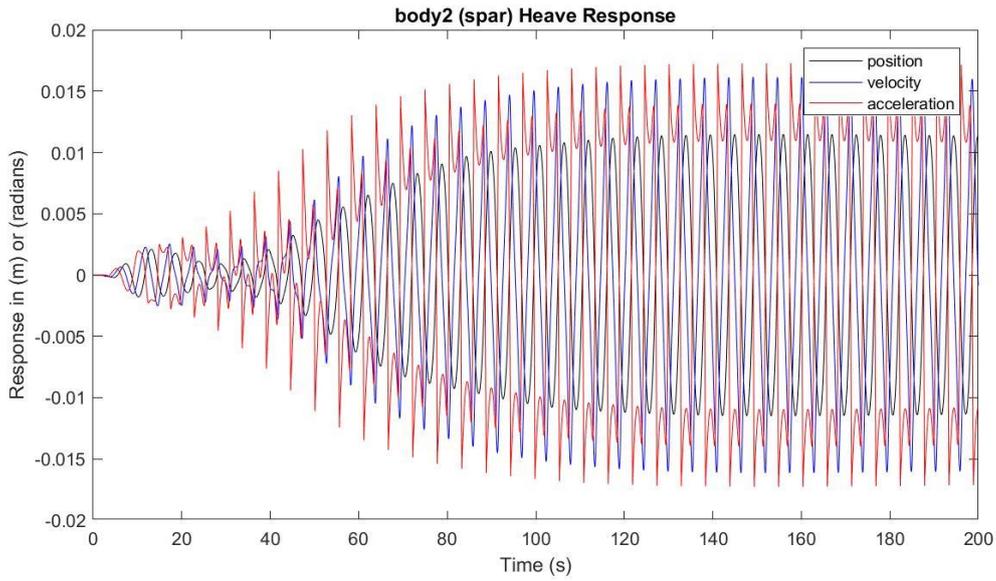
Presión media del acumulador de alta presión: 22.6266 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.7634 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.2475 m, 0.2782 m/s y 0.3534 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0115 m, 0.0161 m/s y 0.0173 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 6.5 \text{ s}$

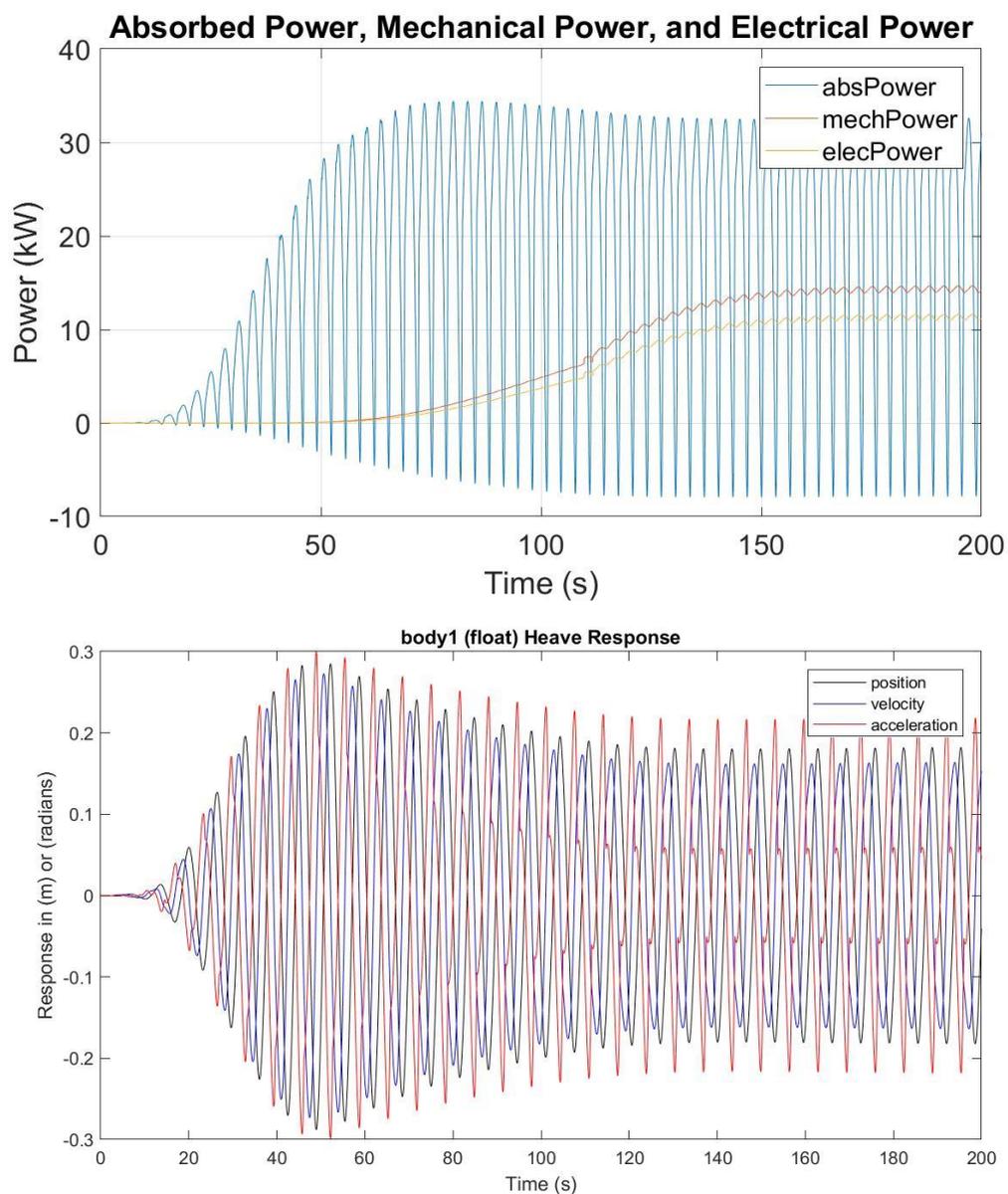
Potencia eléctrica media: 11.2743 kW

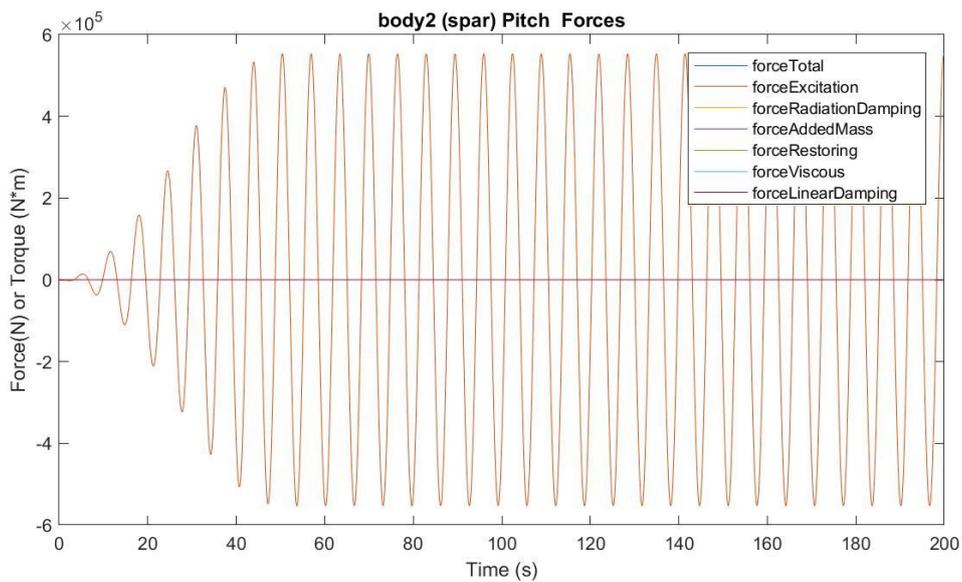
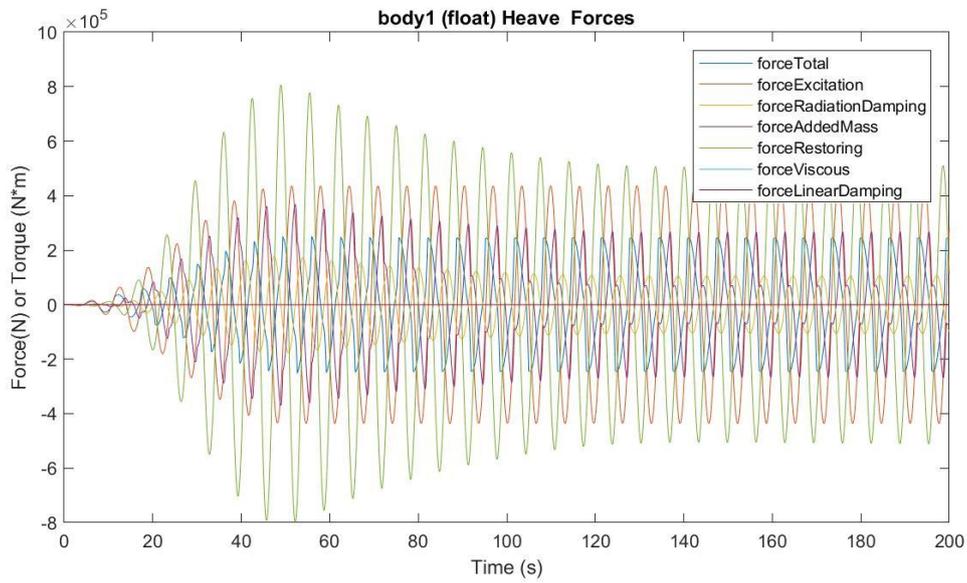
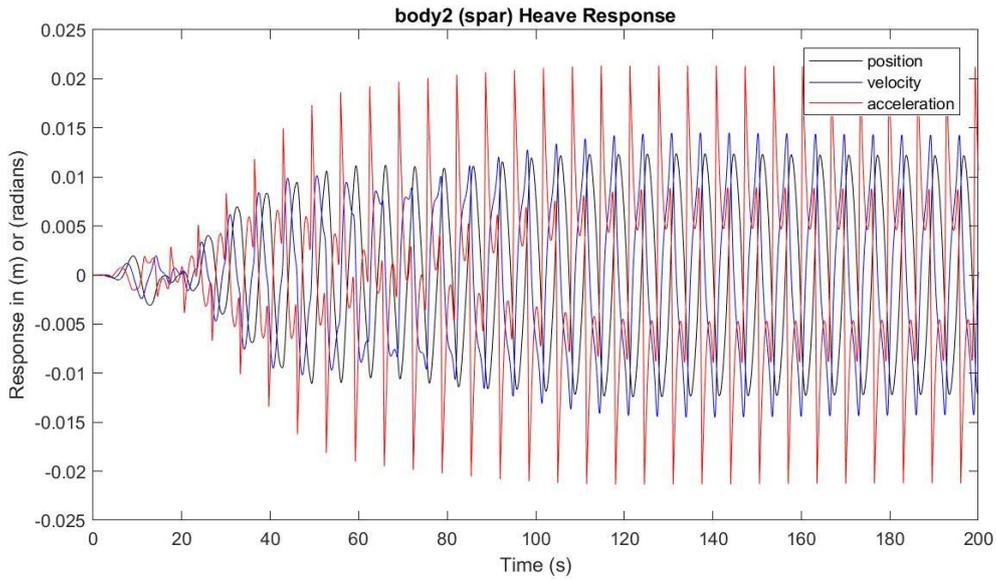
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7289 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.5904 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.2851 m, 0.2729 m/s y 0.2998 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0124 m, 0.0145 m/s y 0.0214 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

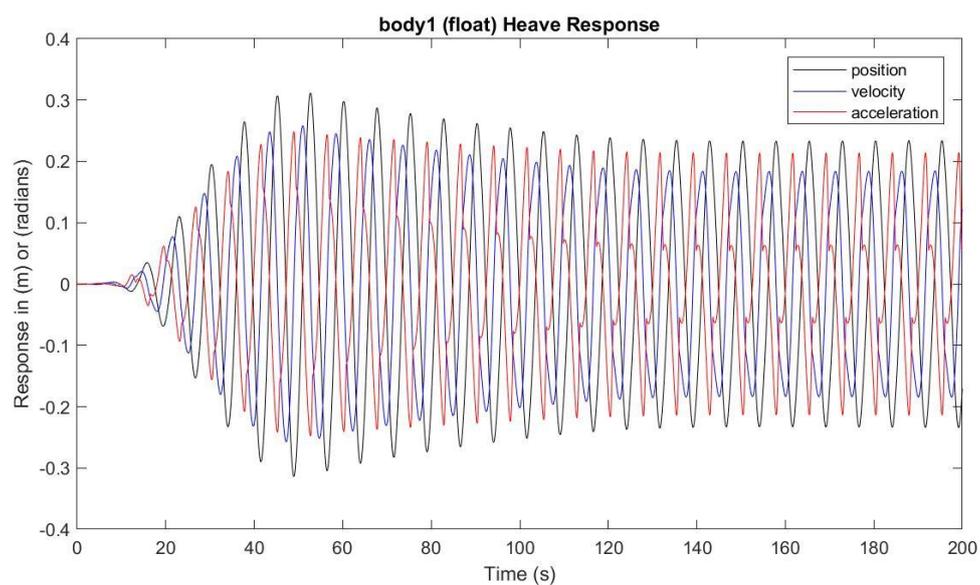
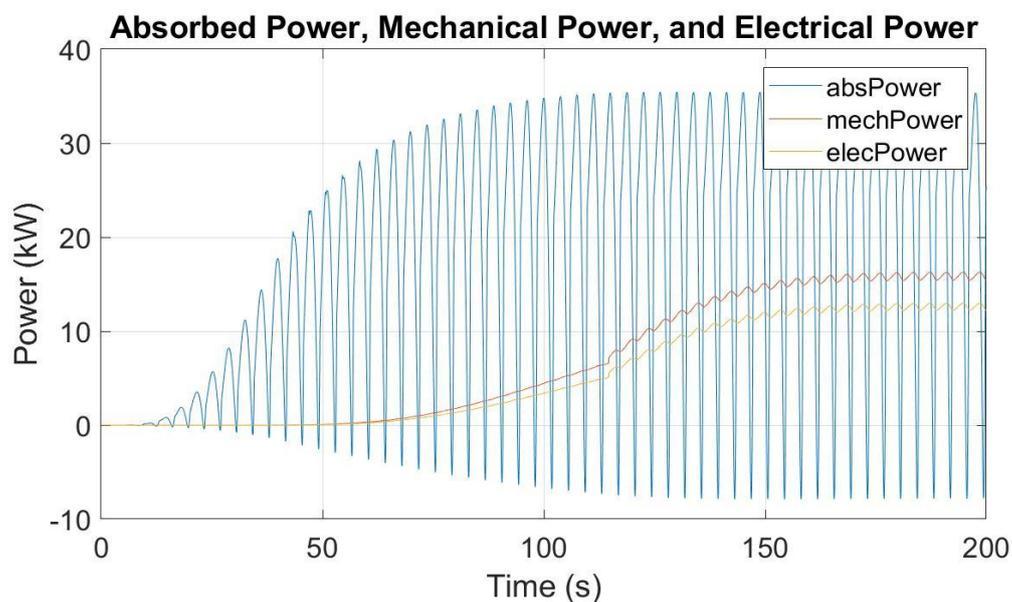
Potencia eléctrica media: 12.5368 kW

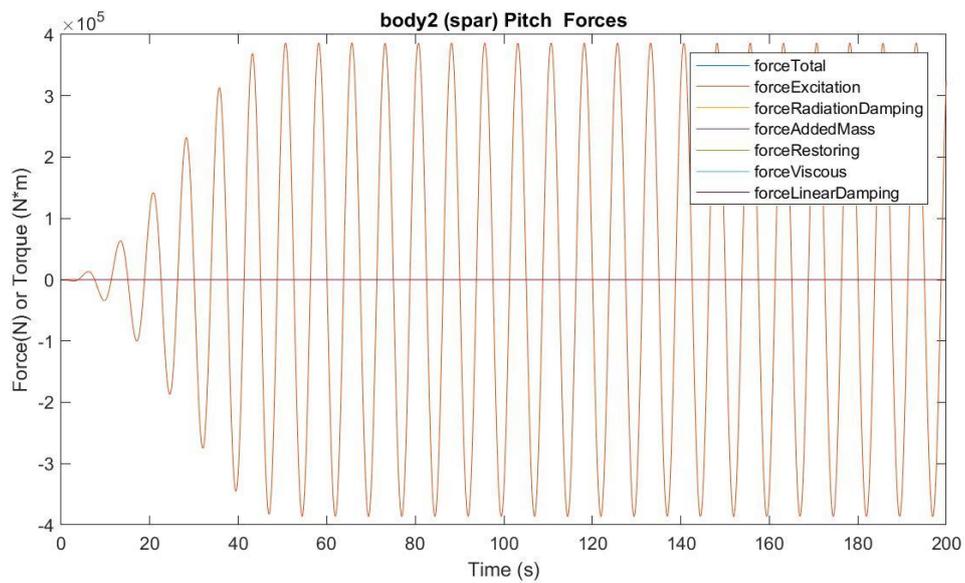
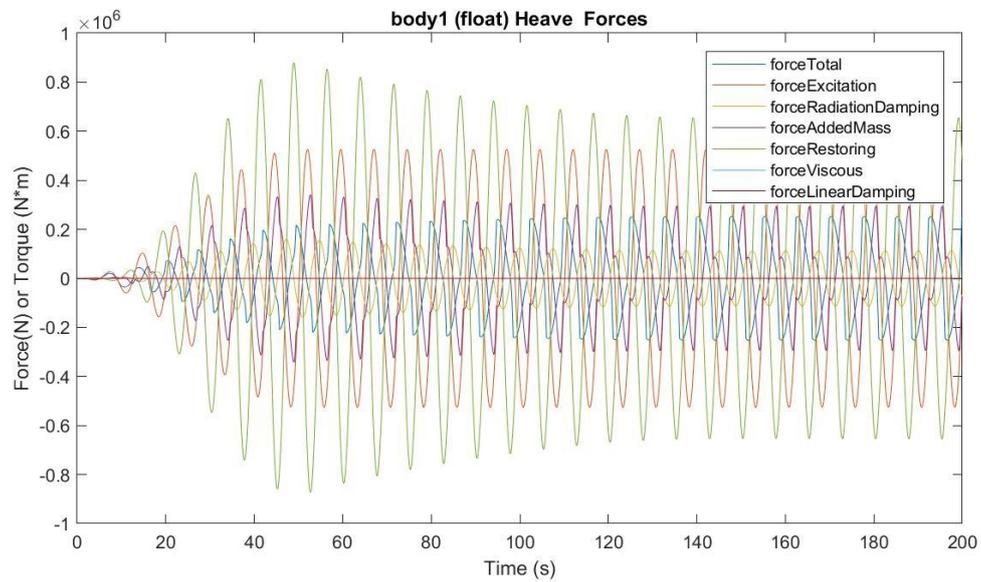
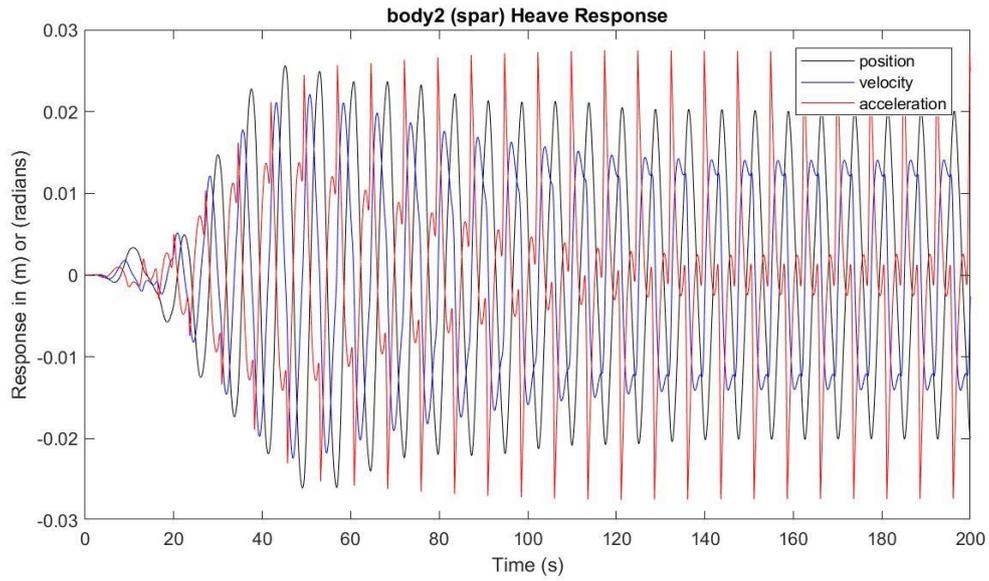
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7585 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.5416 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3116 m, 0.2581 m/s y 0.2487 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0256 m, 0.0221 m/s y 0.0275 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 8.5 \text{ s}$

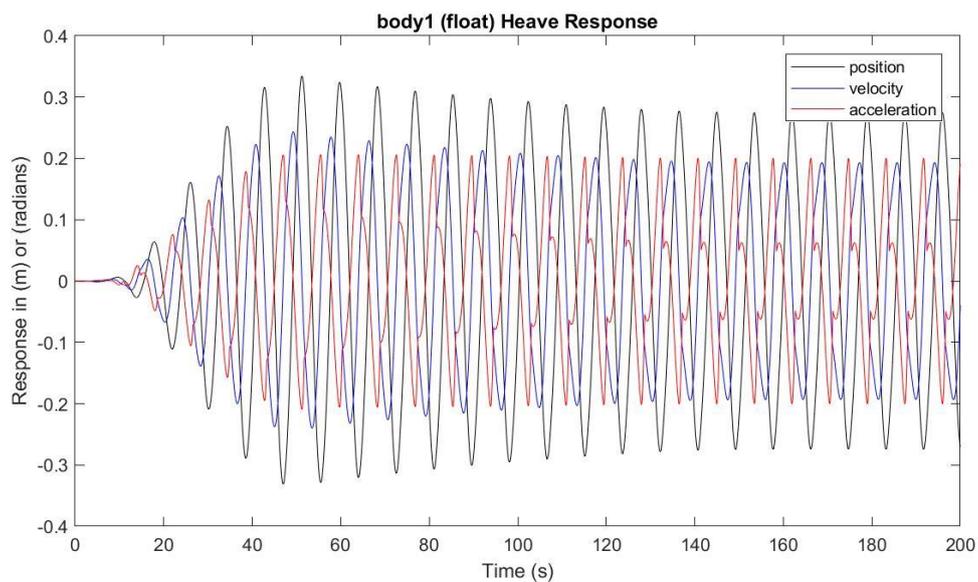
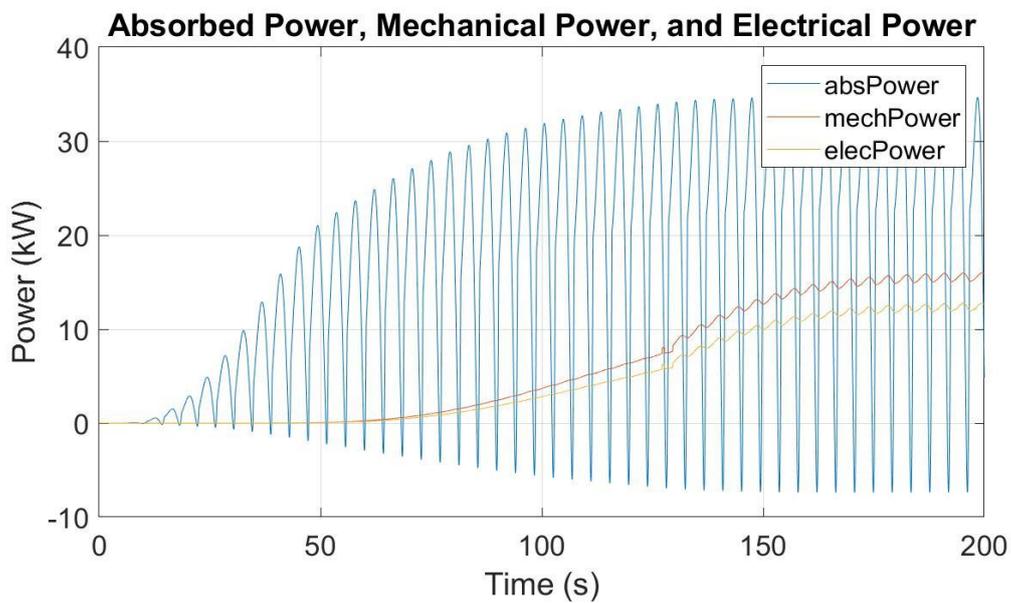
Potencia eléctrica media: 12.0427 kW

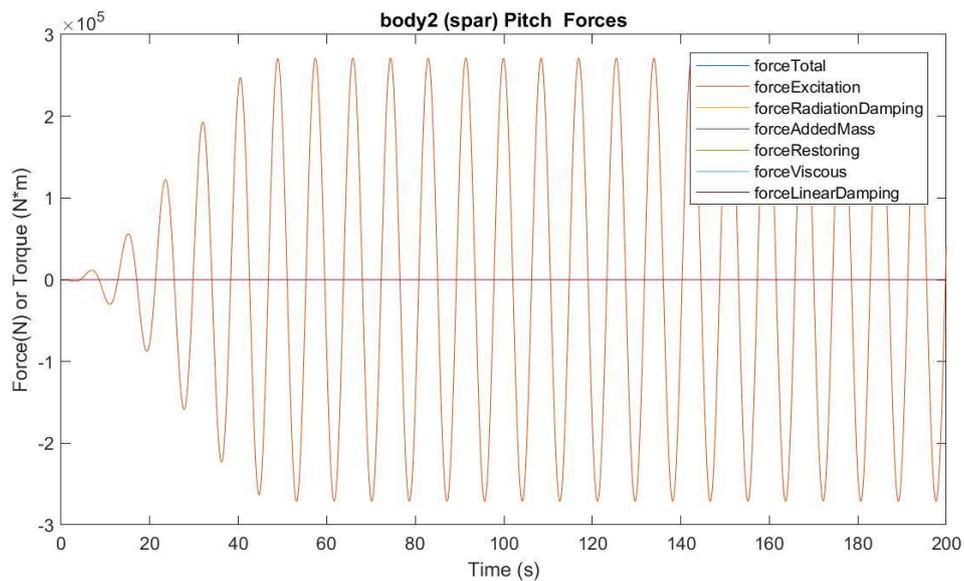
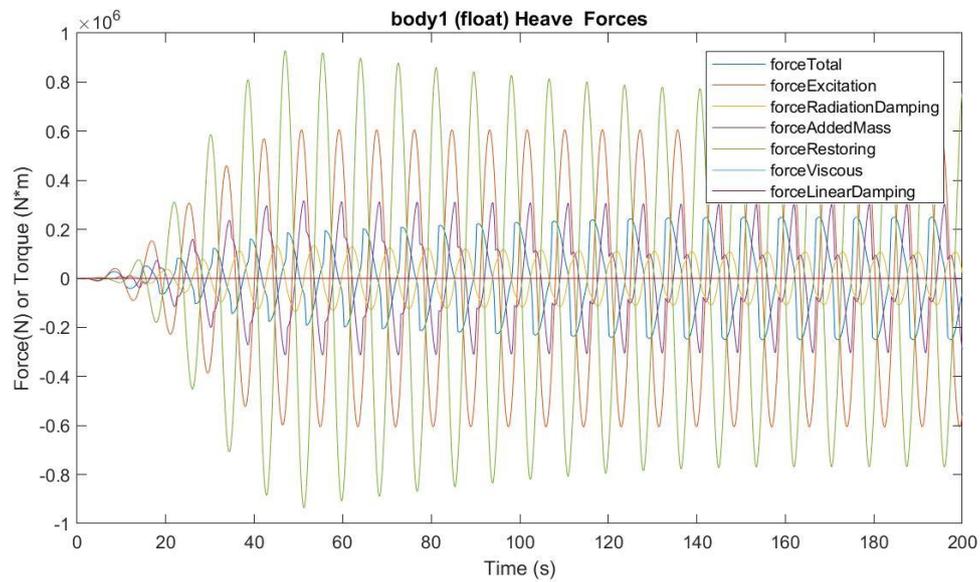
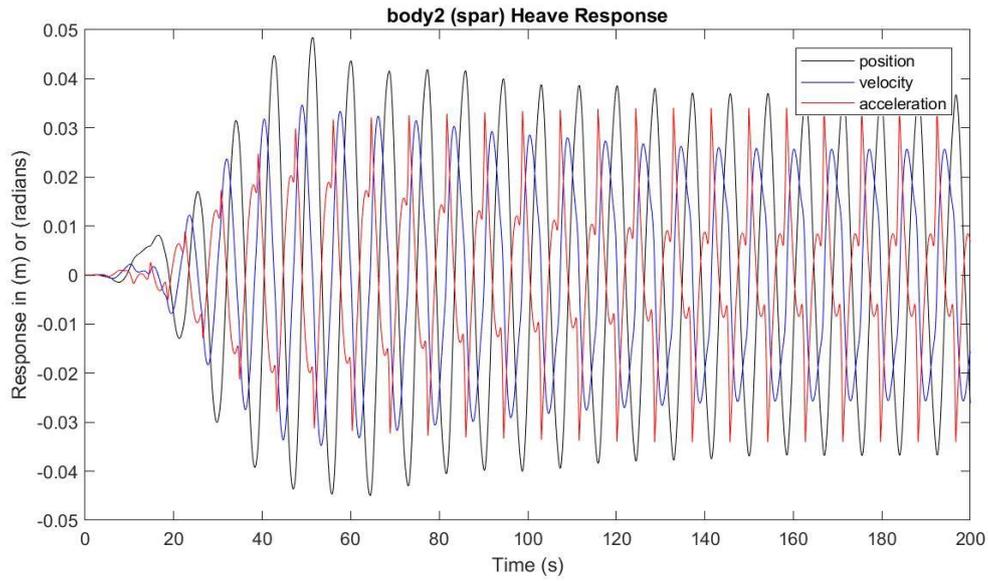
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7532 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.5512 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3341 m, 0.2434 m/s y 0.2062 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0484 m, 0.0347 m/s y 0.0341 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

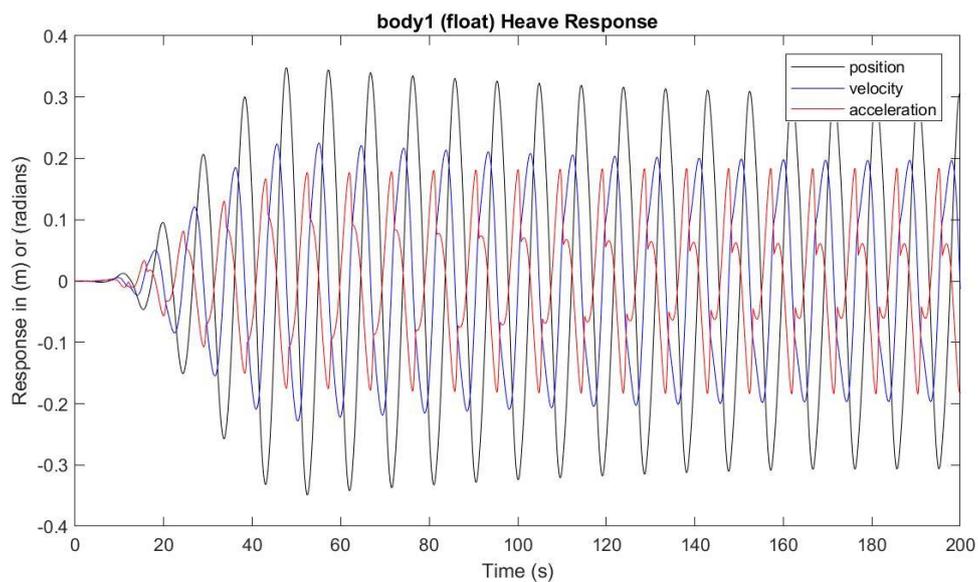
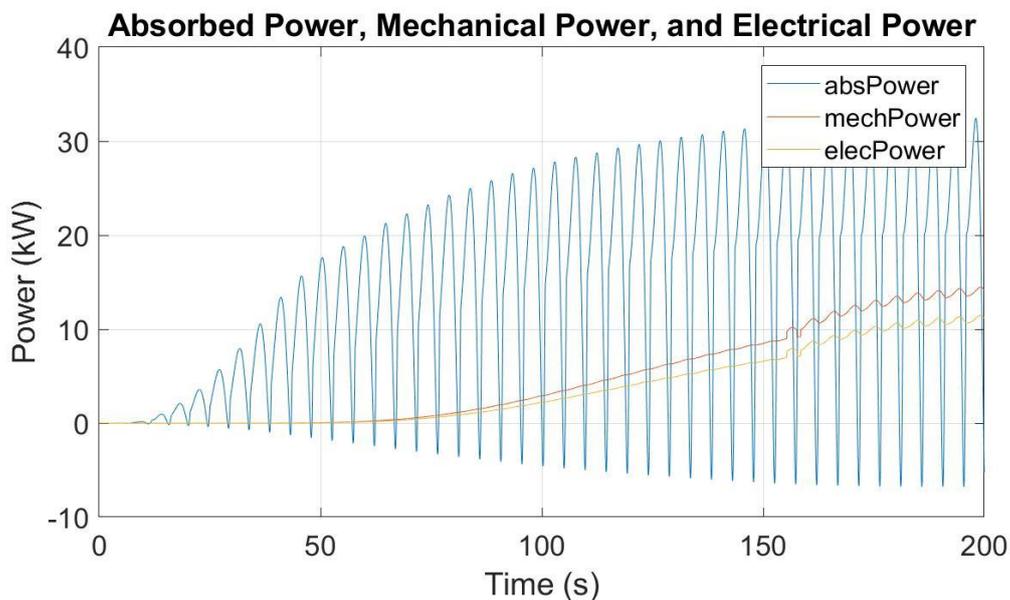
Potencia eléctrica media: 10.0893 kW

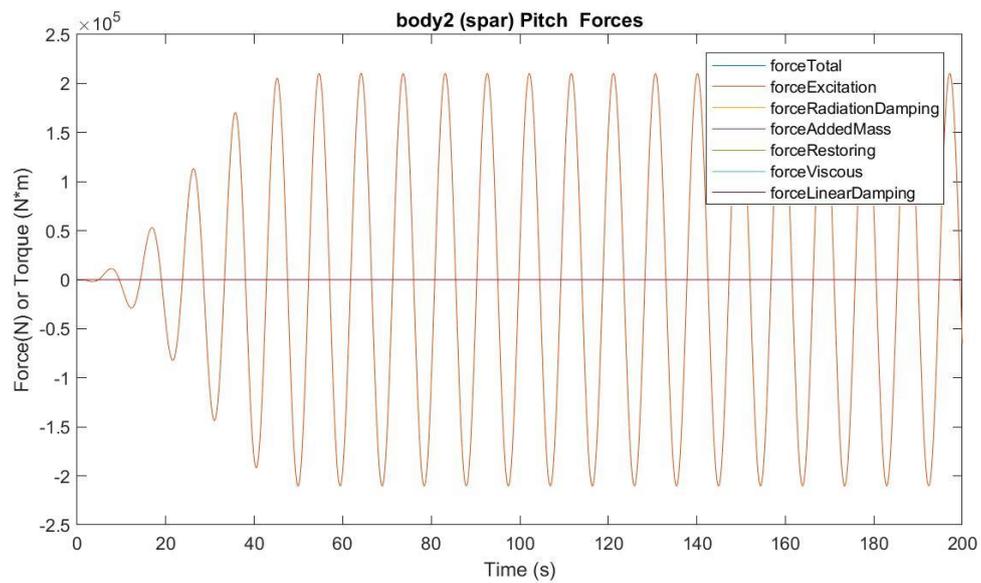
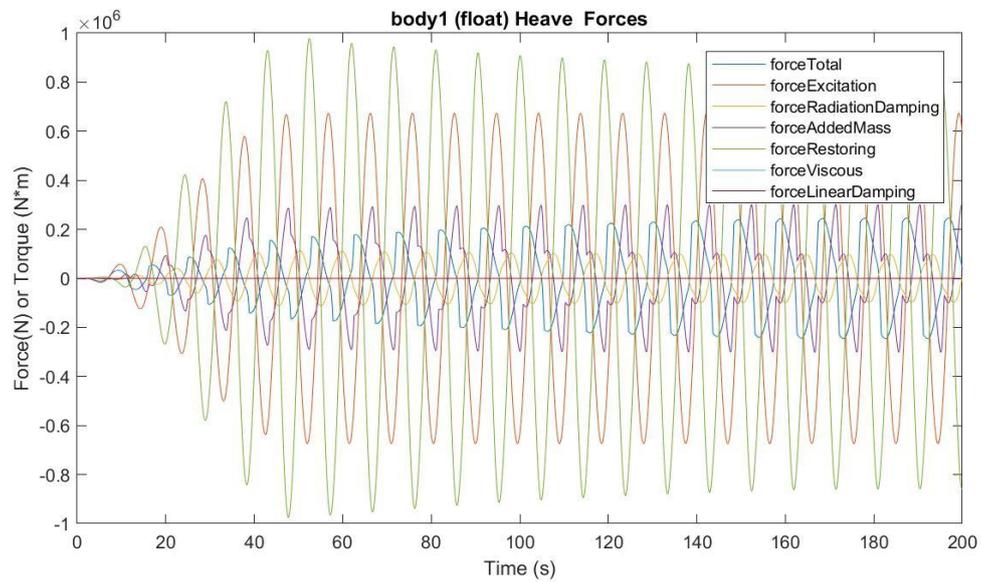
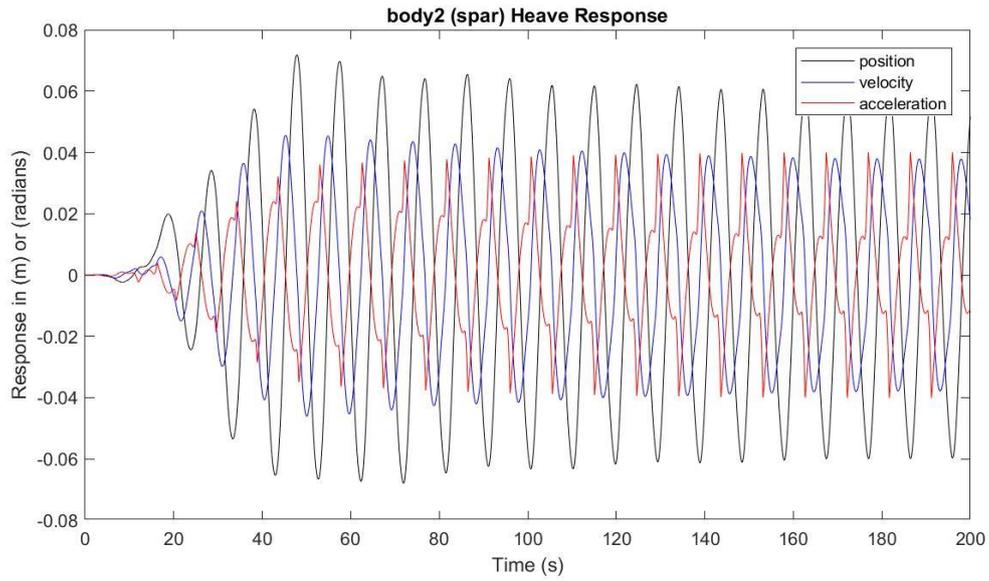
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7172 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.6121 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3480 m, 0.2250 m/s y 0.1842 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0718 m, 0.0456 m/s y 0.0401 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

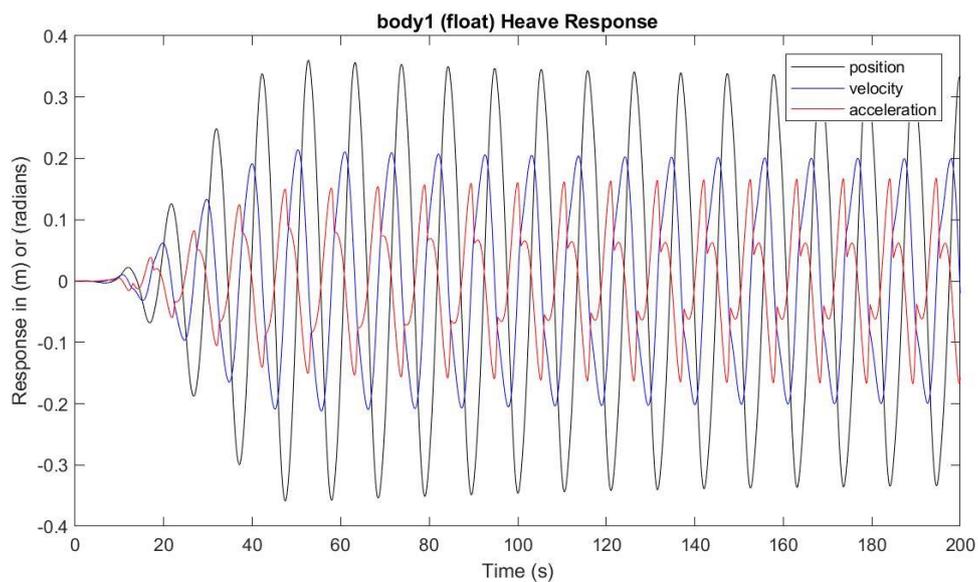
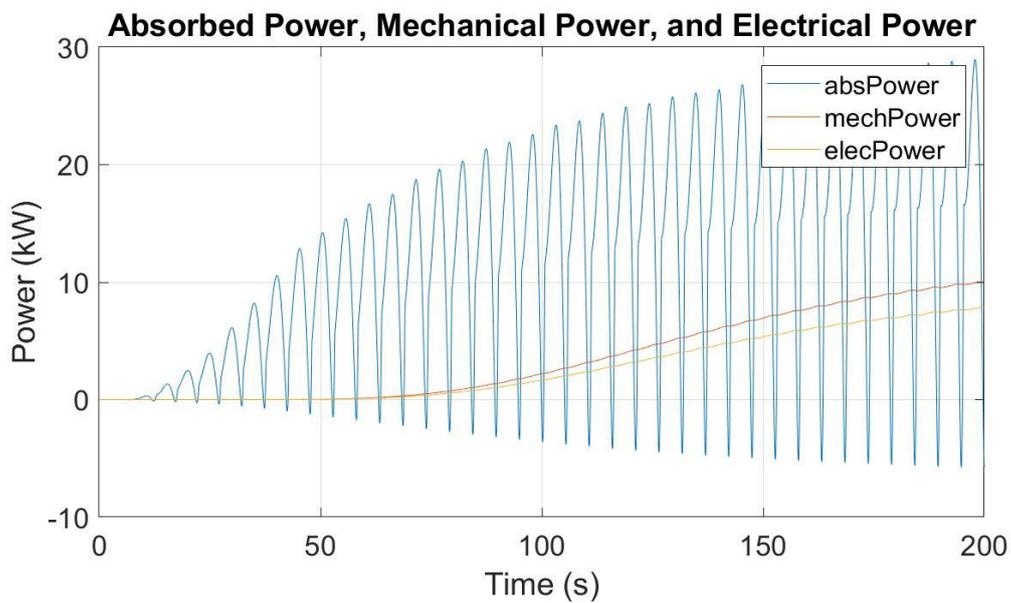
Potencia eléctrica media: 6.9884 kW

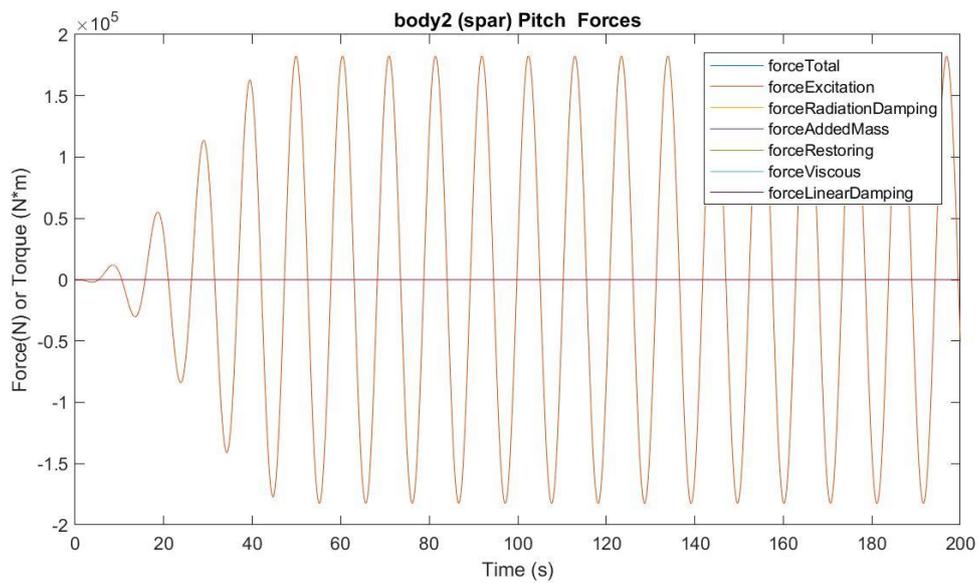
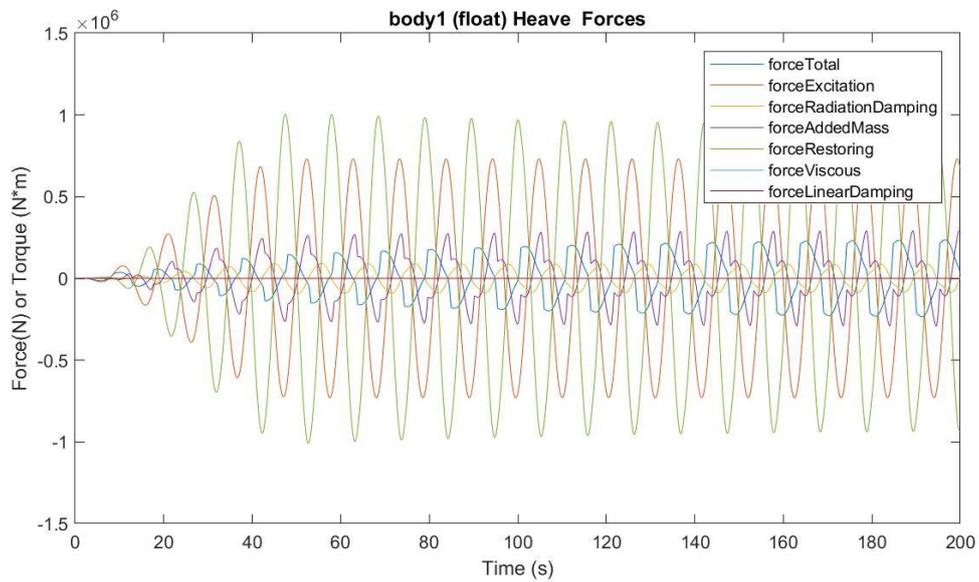
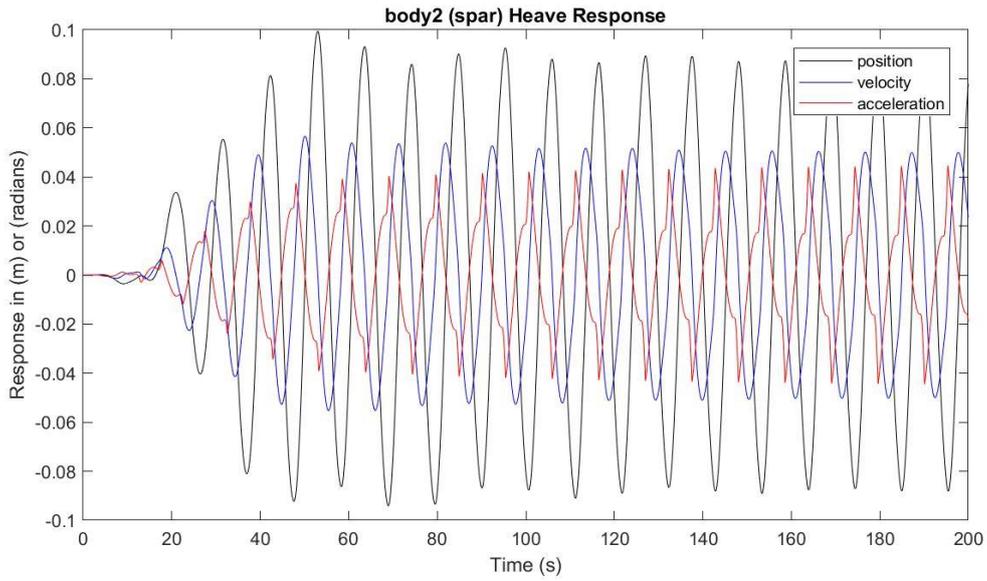
Presión media del acumulador de alta presión: 22.5801 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.8441 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3601 m, 0.2141 m/s y 0.1676 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0994 m, 0.0566 m/s y 0.0446 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

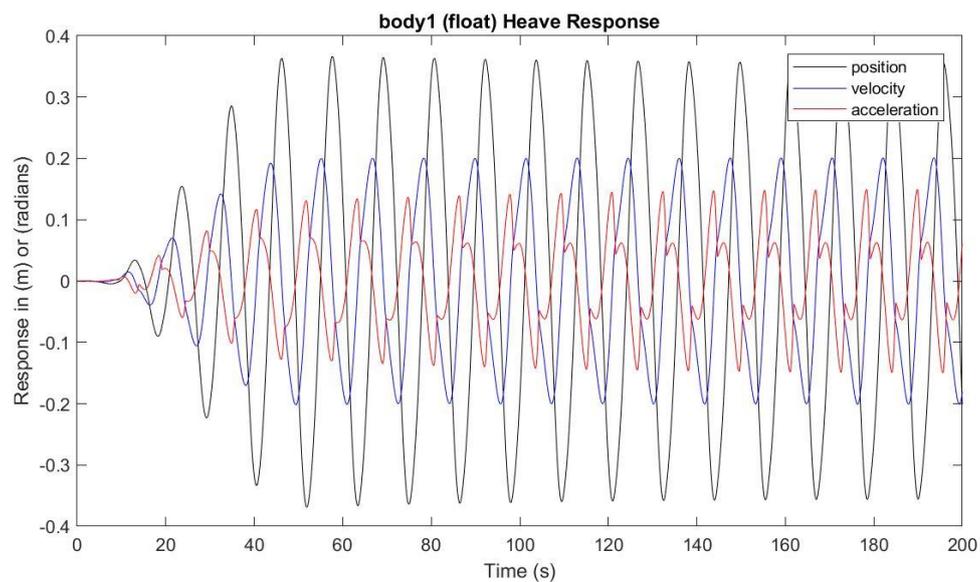
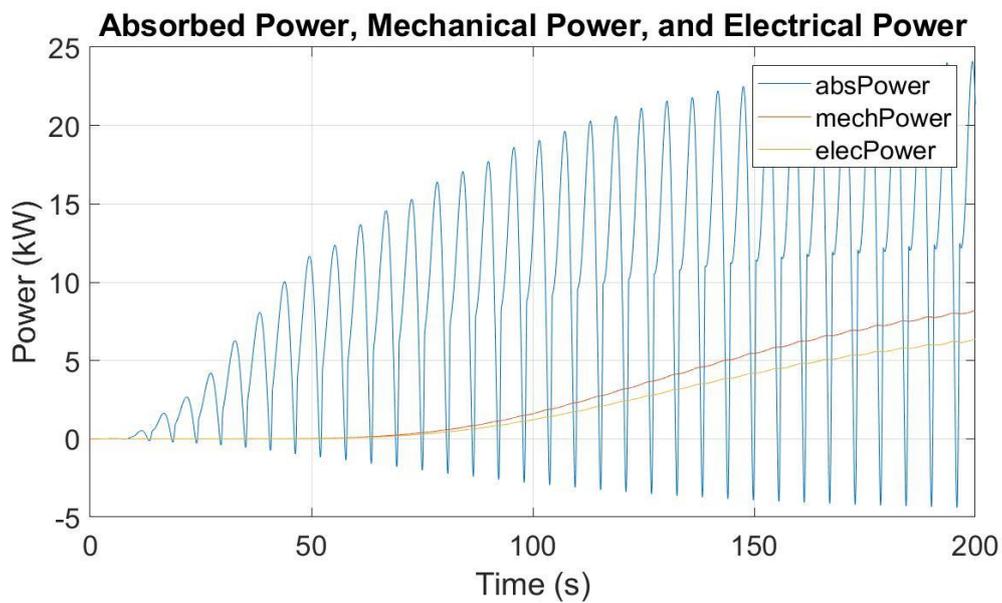
Potencia eléctrica media: 5.5849 kW

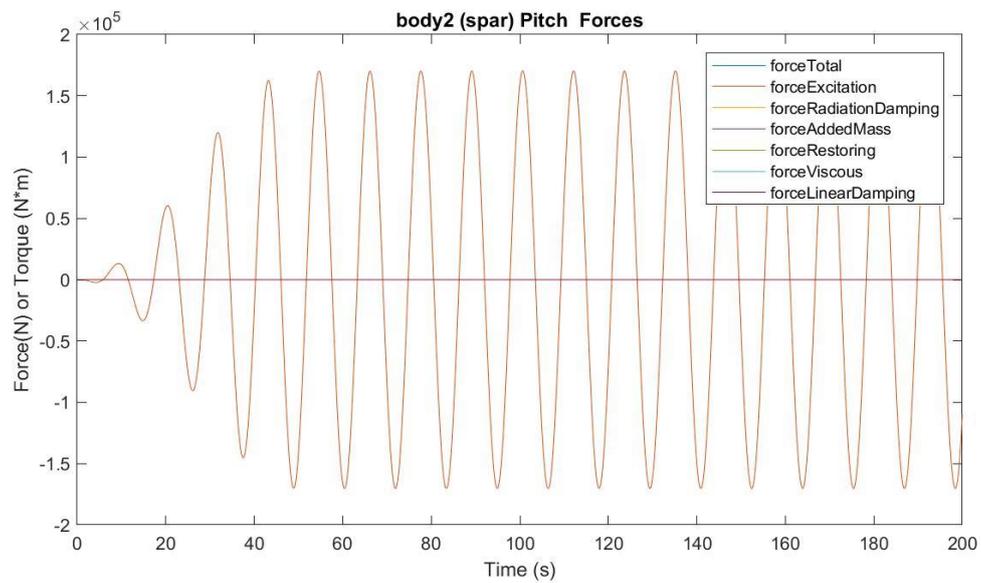
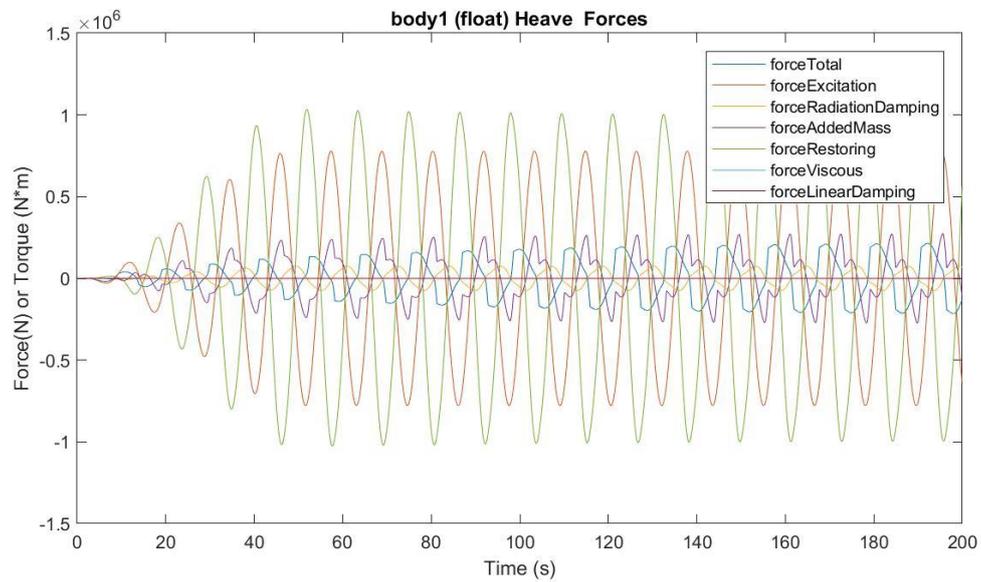
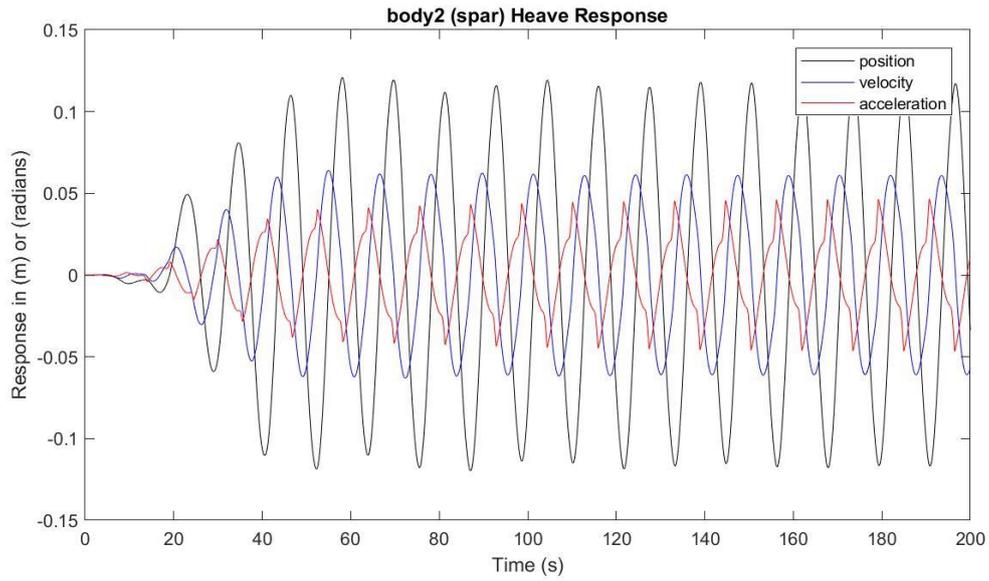
Presión media del acumulador de alta presión: 22.3899 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 19.1770 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3662 m, 0.2009 m/s y 0.1496 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1208 m, 0.0640 m/s y 0.0467 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

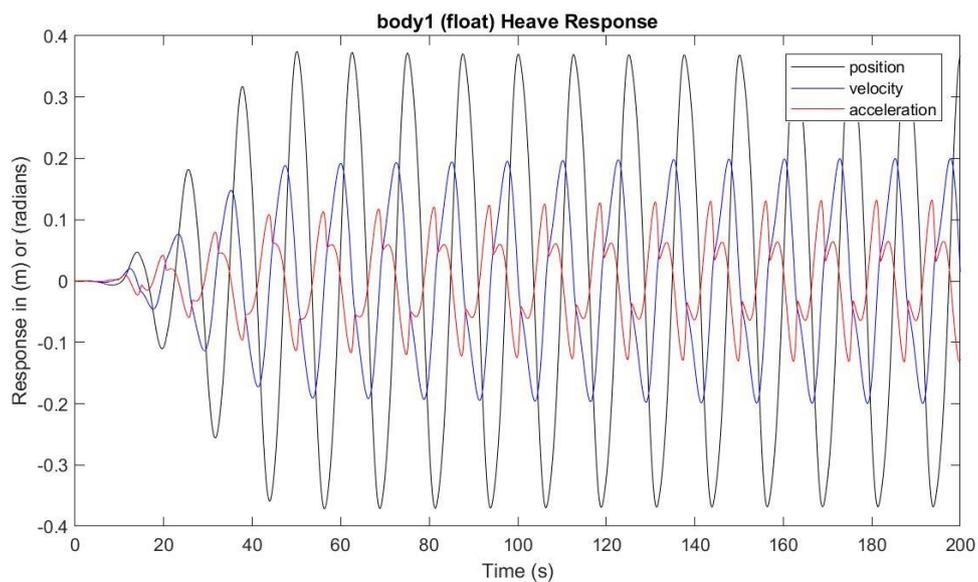
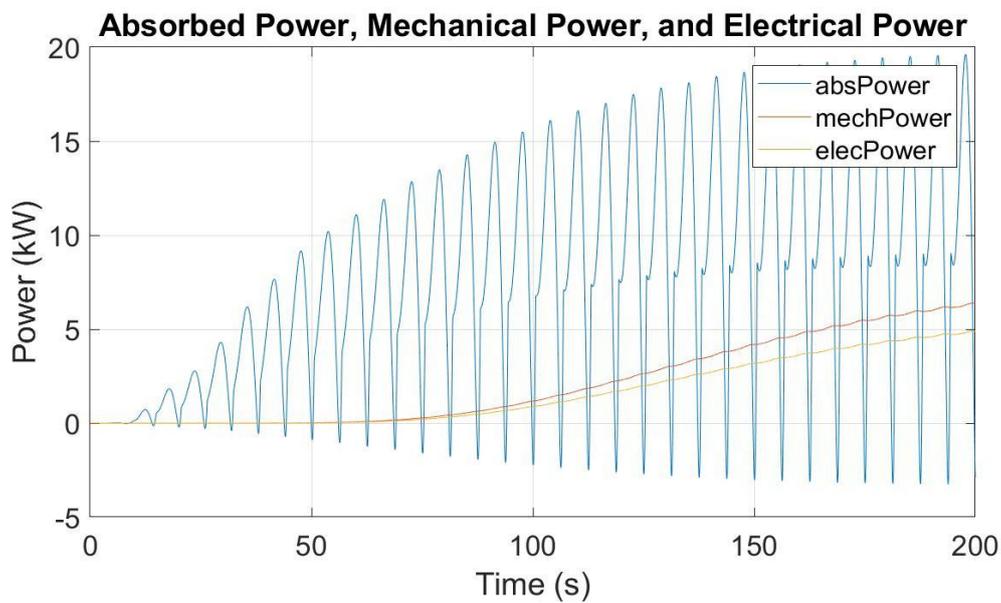
Potencia eléctrica media: 4.3035 kW

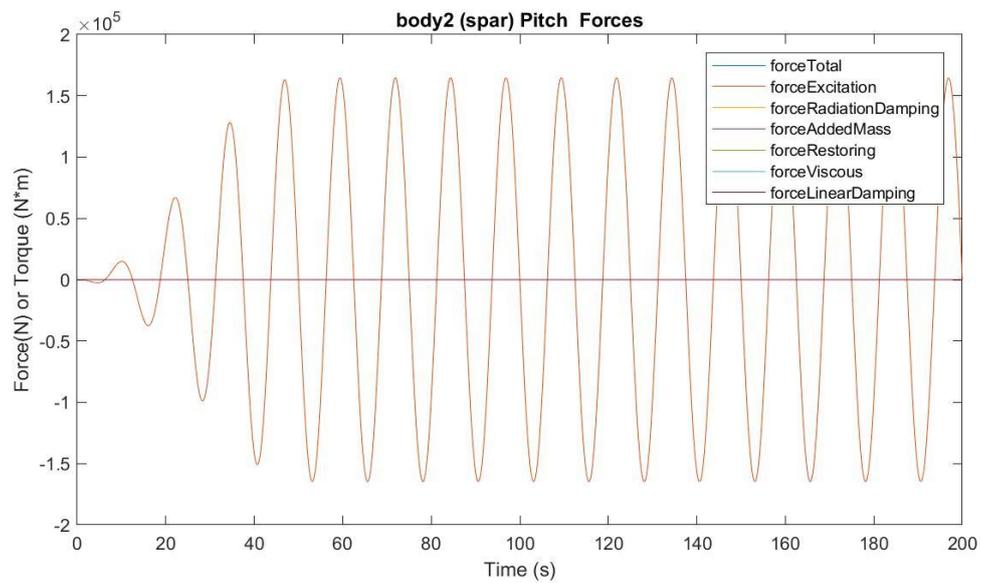
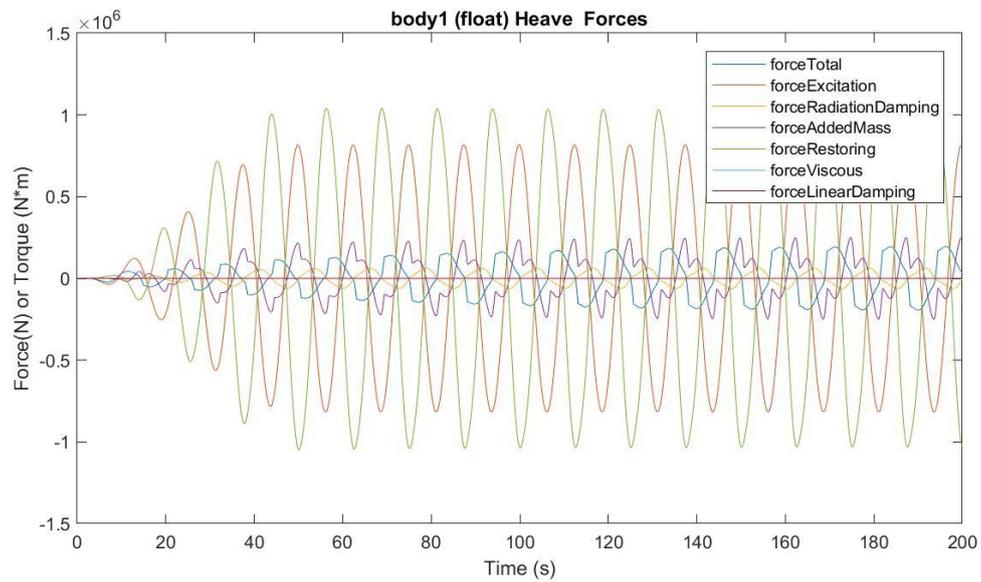
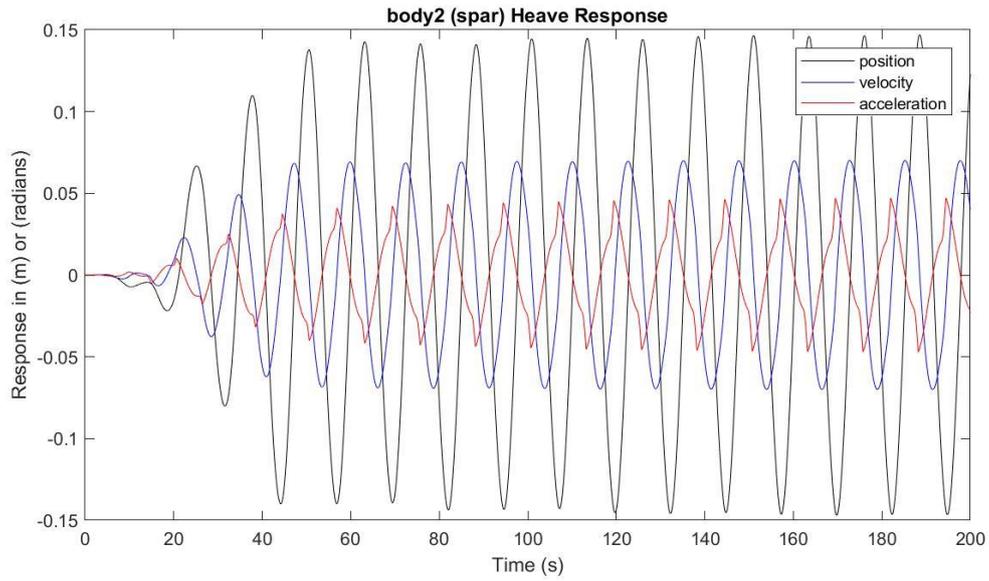
Presión media del acumulador de alta presión: 22.2143 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 19.4978 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3745 m, 0.2000 m/s y 0.1322 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1469 m, 0.0701 m/s y 0.0471 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

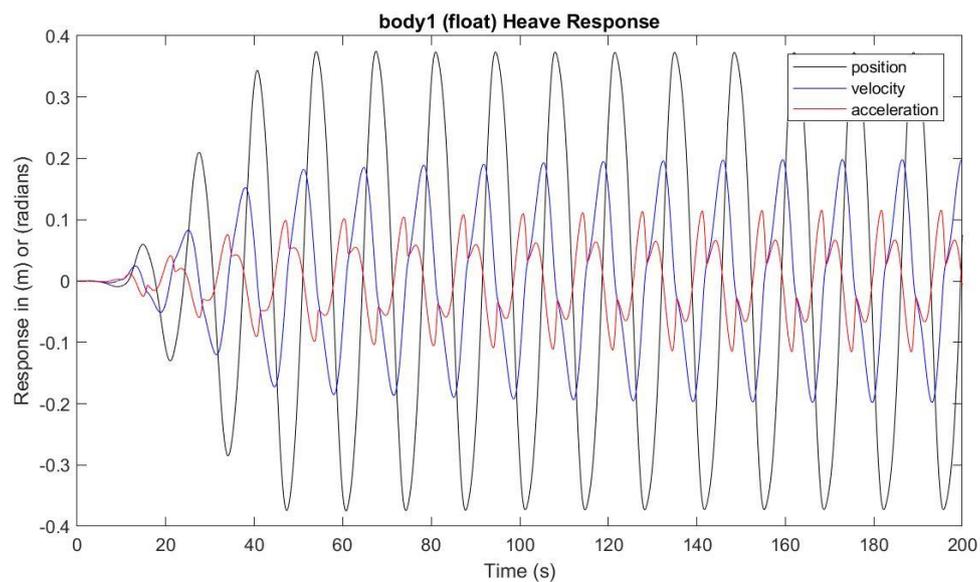
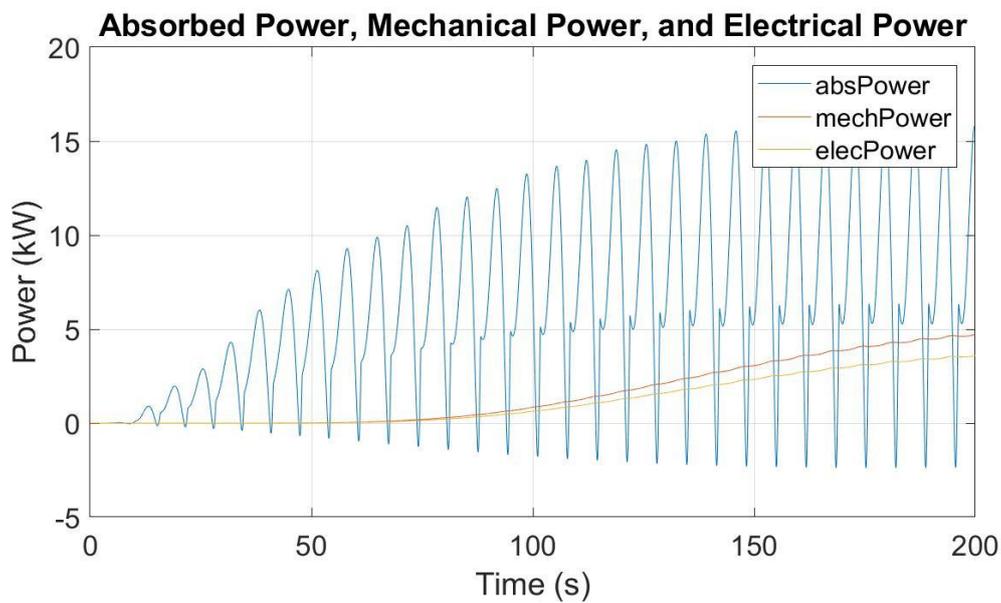
Potencia eléctrica media: 3.1849 kW

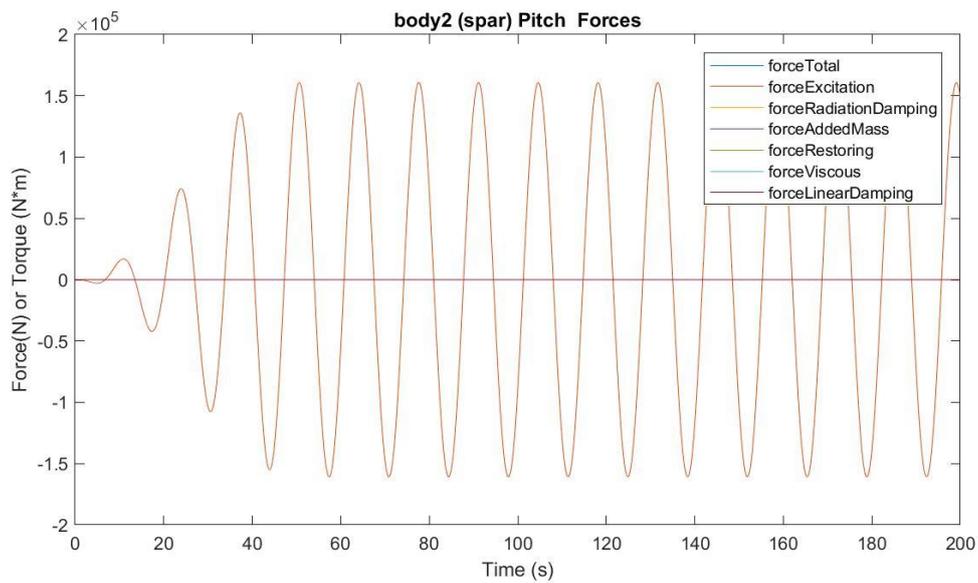
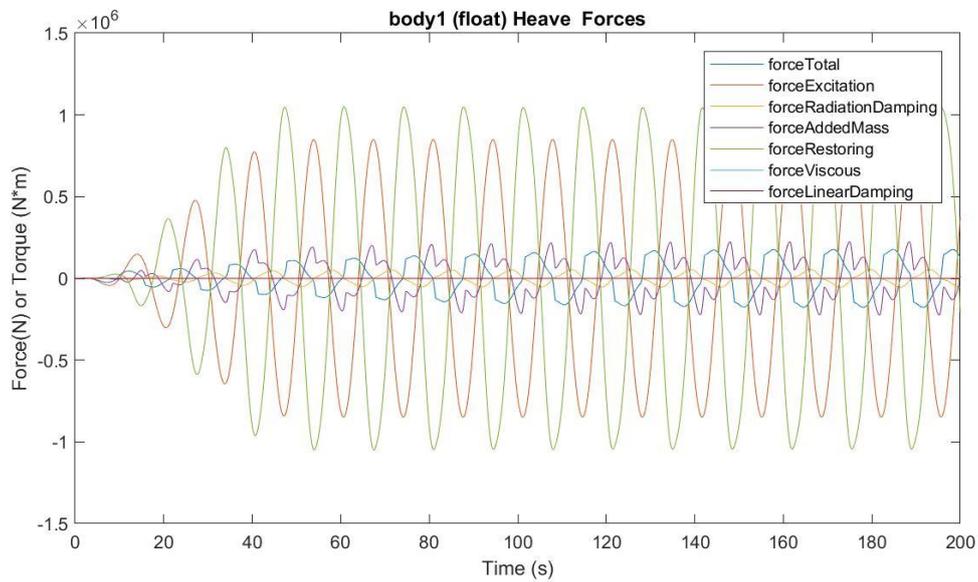
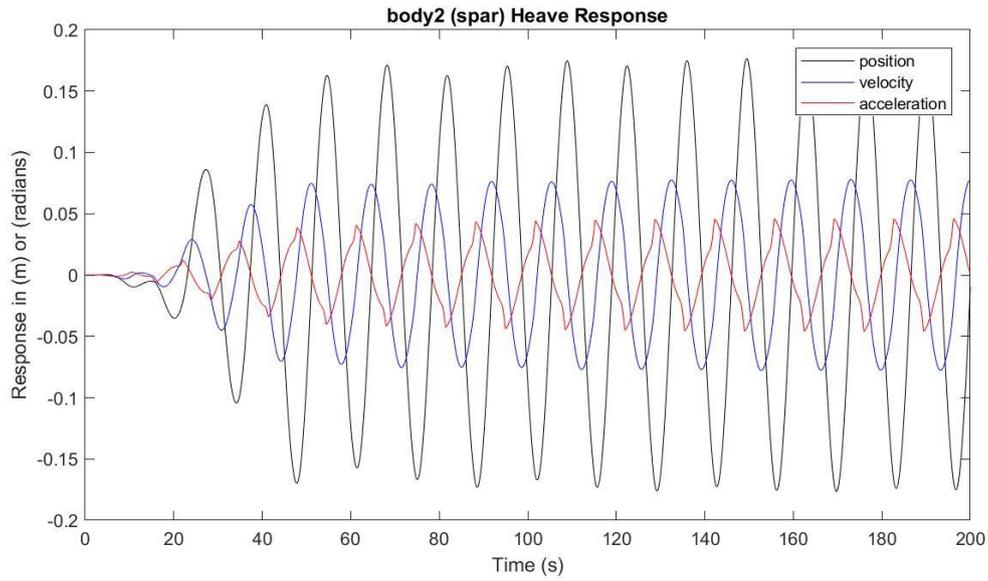
Presión media del acumulador de alta presión: 22.0553 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 19.7999 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3749 m, 0.1981 m/s y 0.1155 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1766 m, 0.0779 m/s y 0.0460 m/s²





$H_s = 0.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

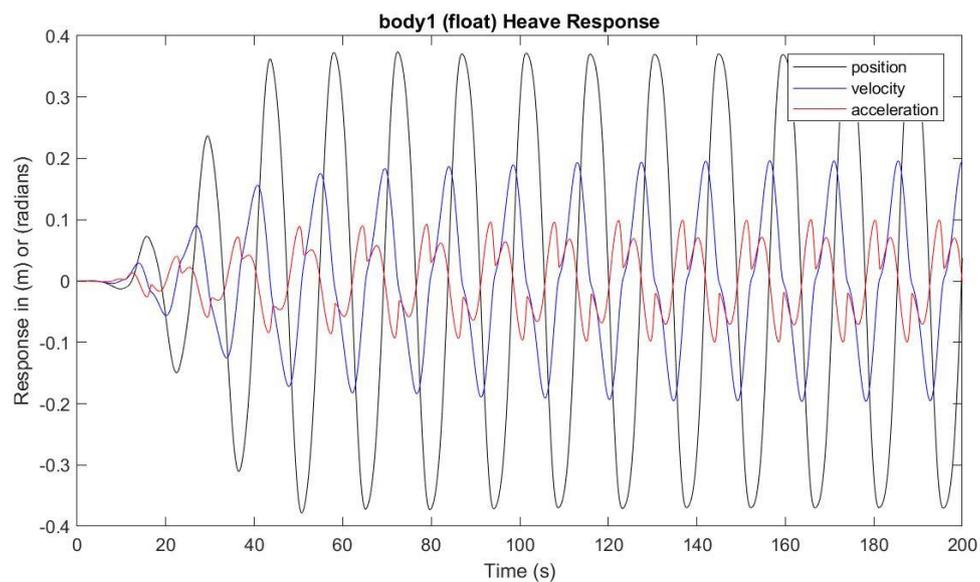
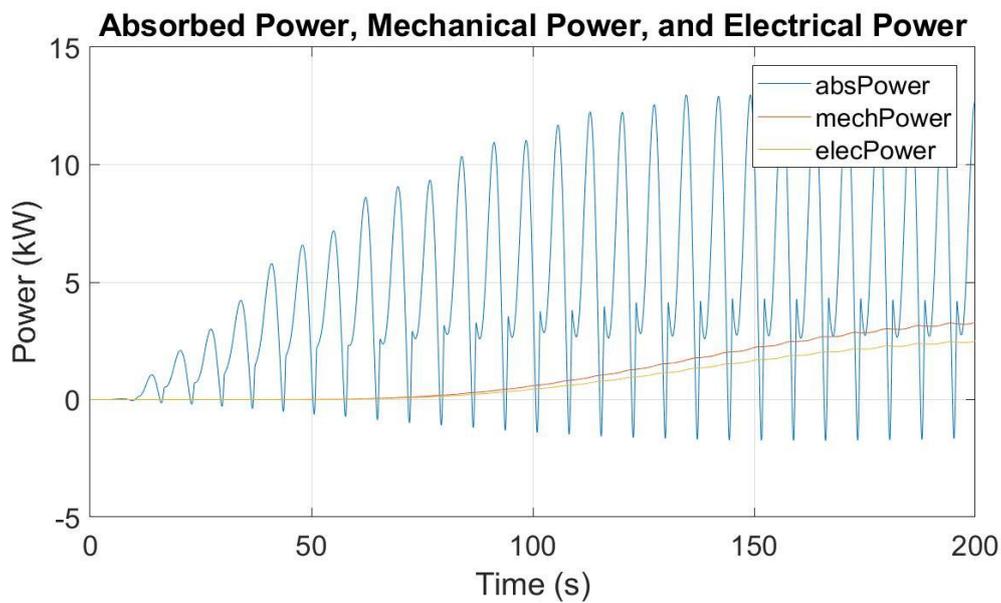
Potencia eléctrica media: 2.2266 kW

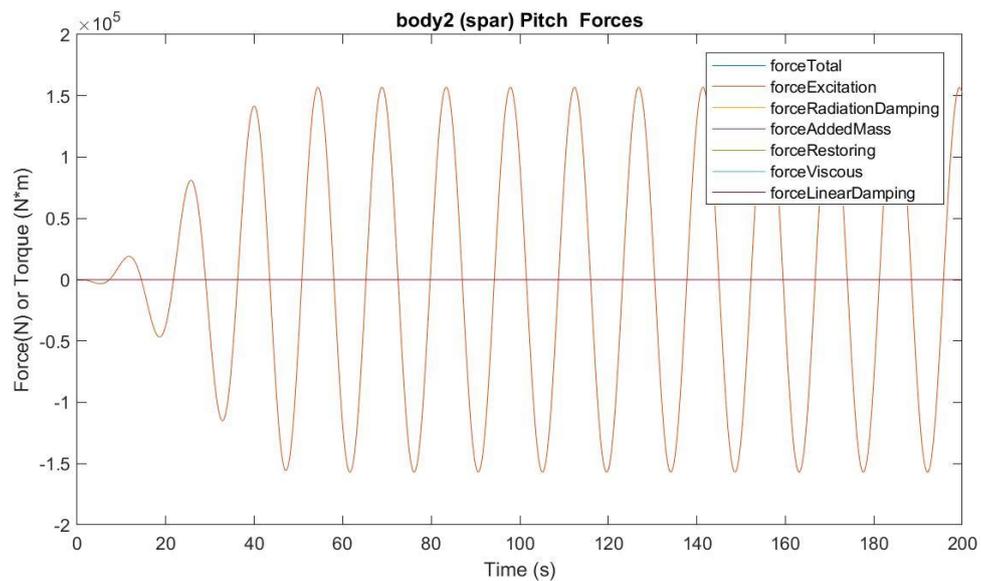
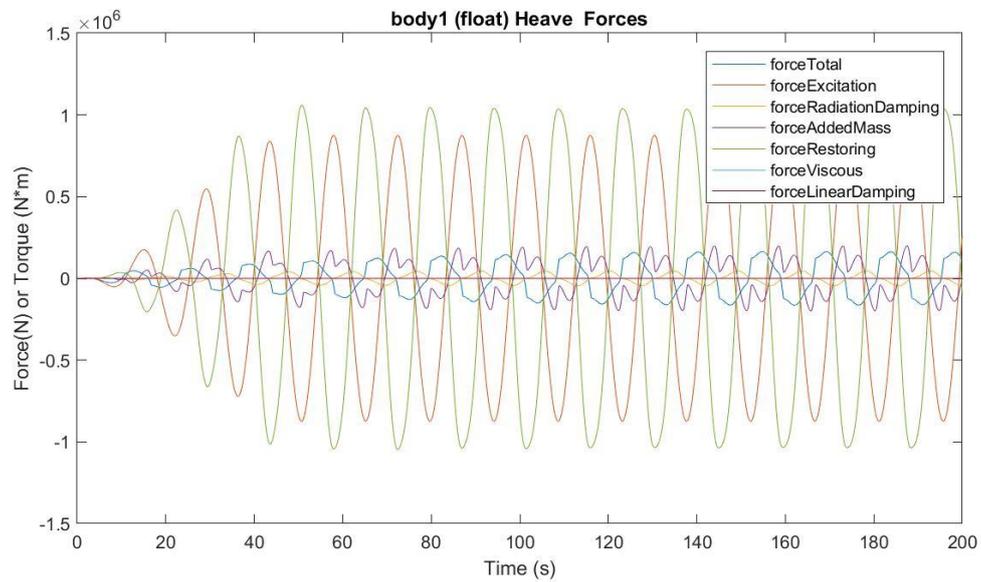
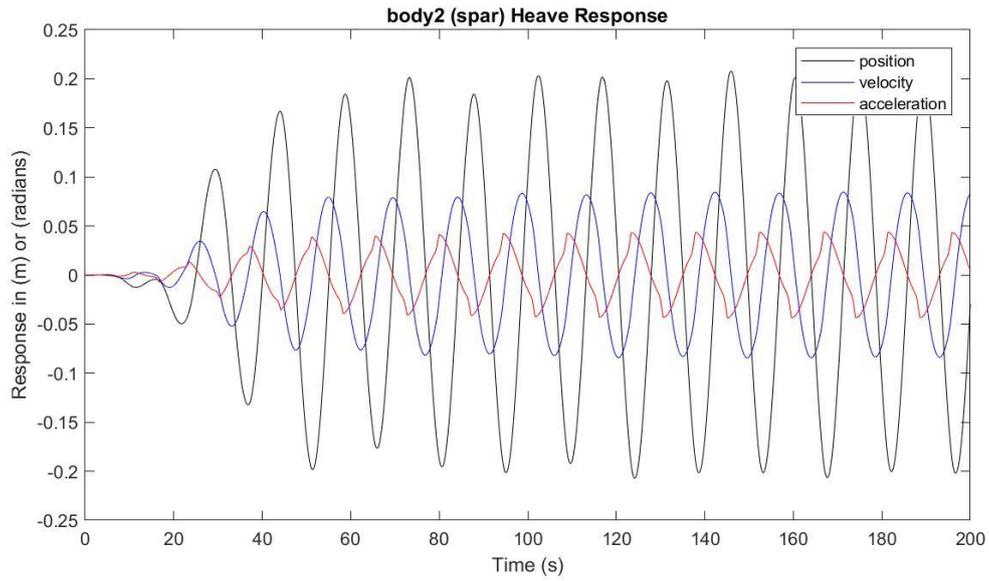
Presión media del acumulador de alta presión: 21.9098 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 20.0871 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.3737 m, 0.1963 m/s y 0.1001 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2078 m, 0.0846 m/s y 0.0439 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$
 $T_e = 3.5 \text{ s}$

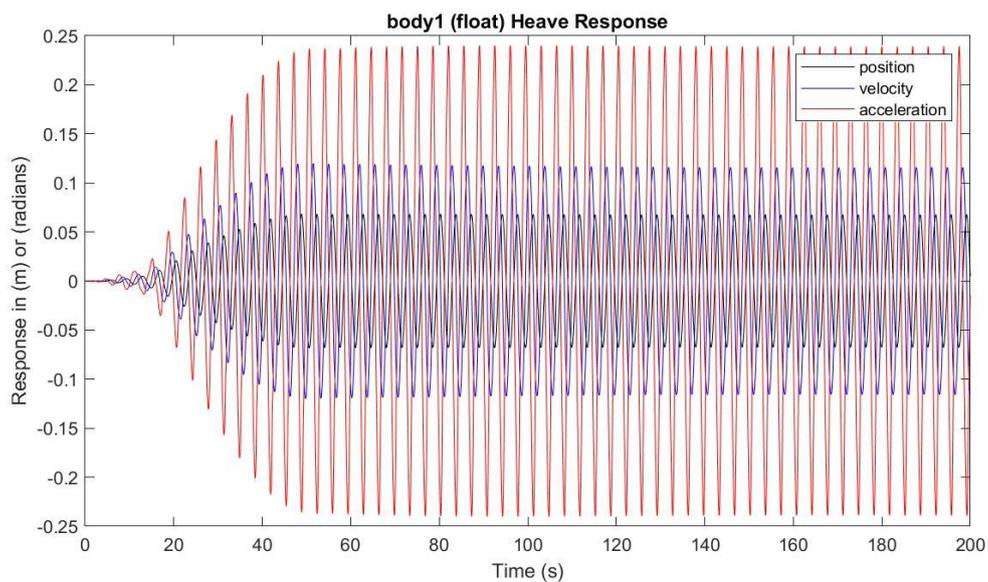
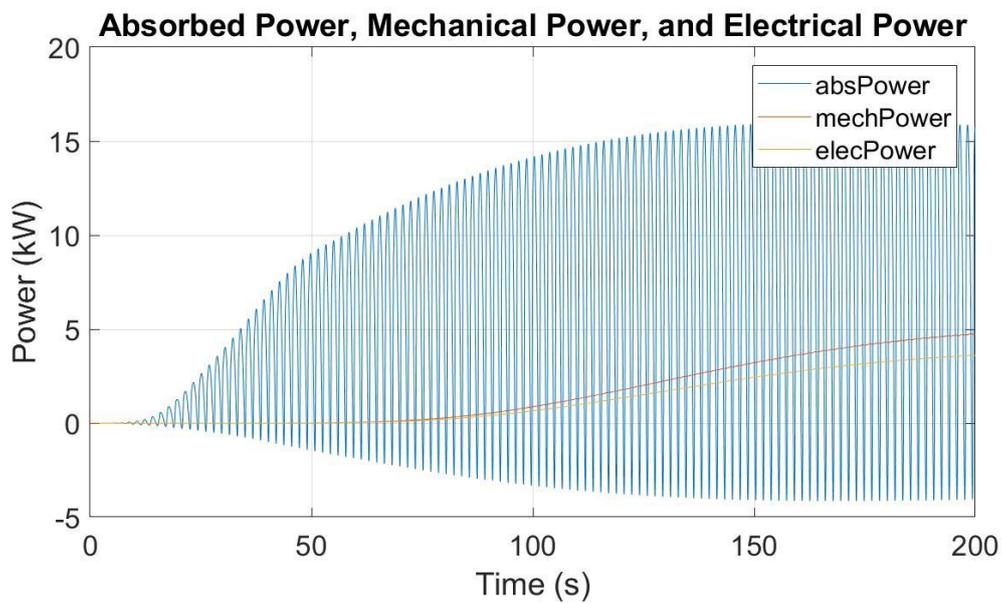
Potencia eléctrica media: 3.2490 kW

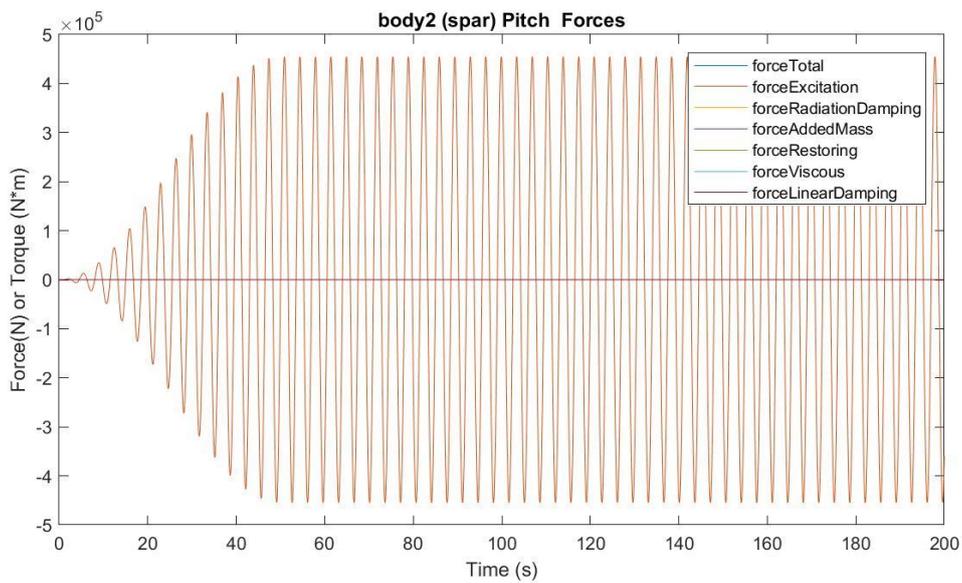
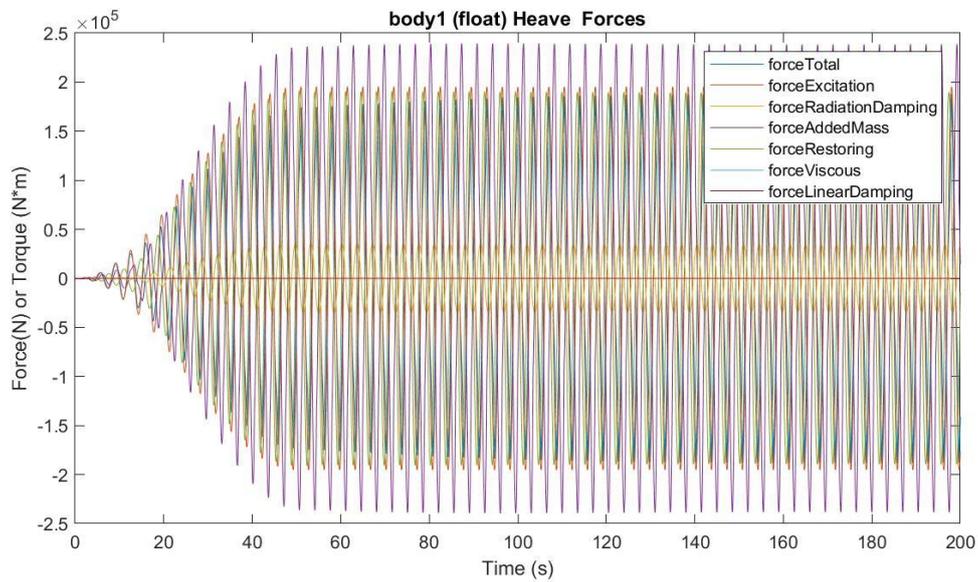
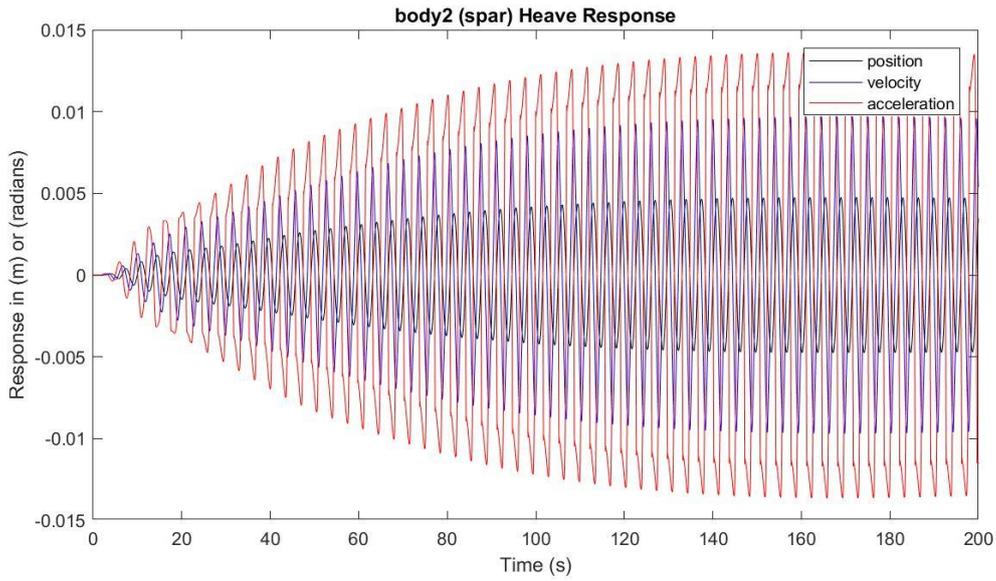
Presión media del acumulador de alta presión: 22.0604 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 19.7900 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.0682 m, 0.1199 m/s y 0.2400 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0048 m, 0.0097 m/s y 0.0136 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 4.5 \text{ s}$

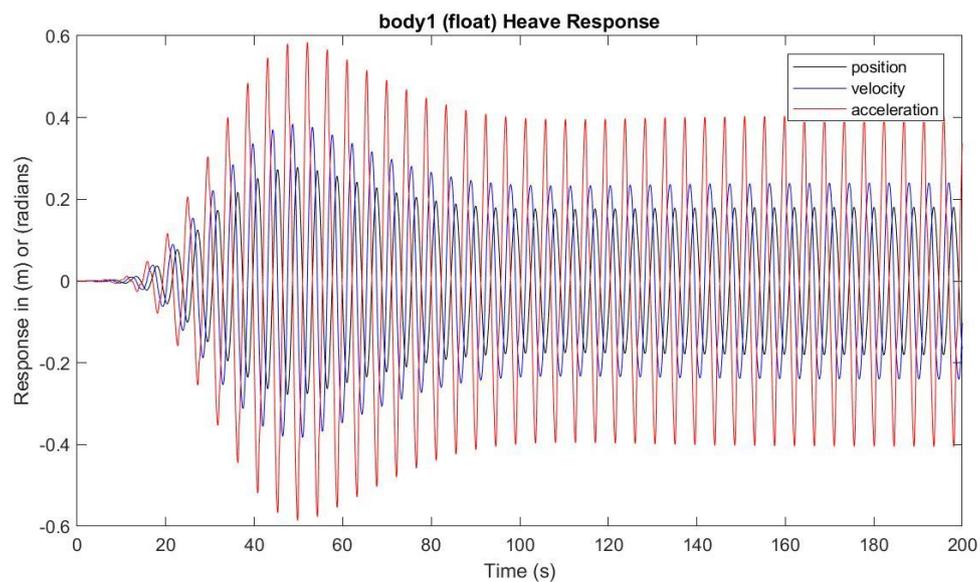
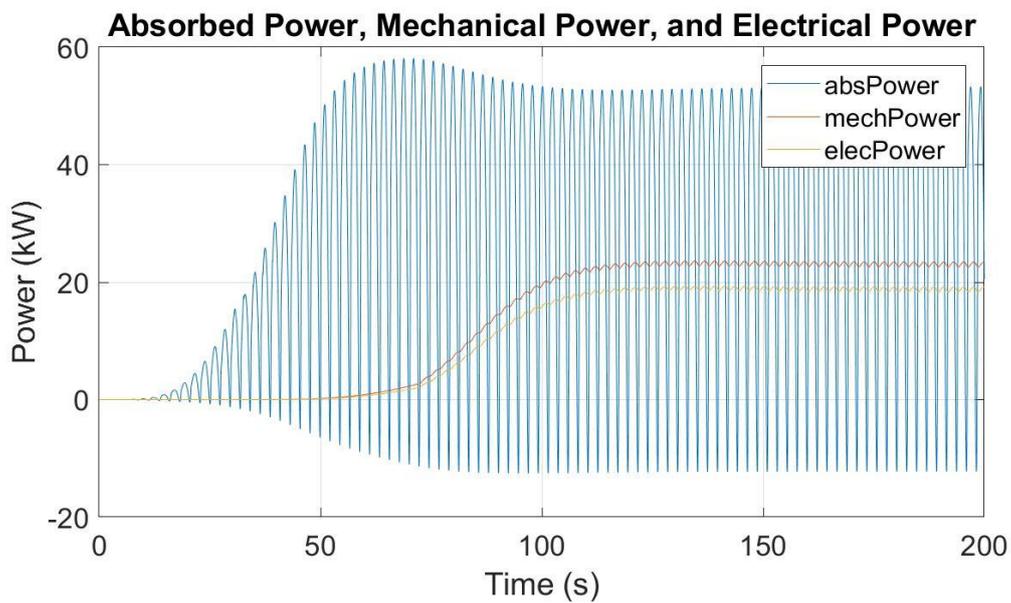
Potencia eléctrica media: 18.8172 kW

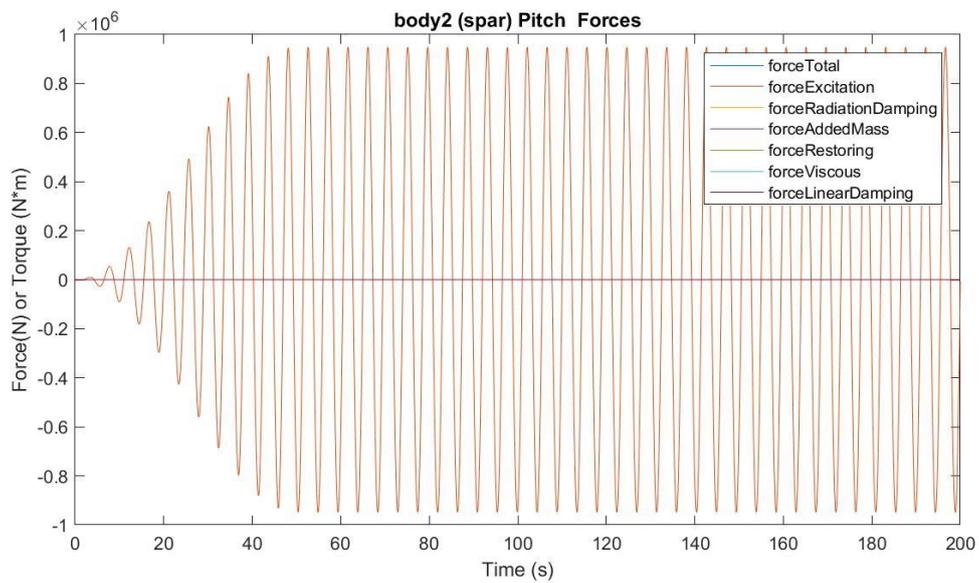
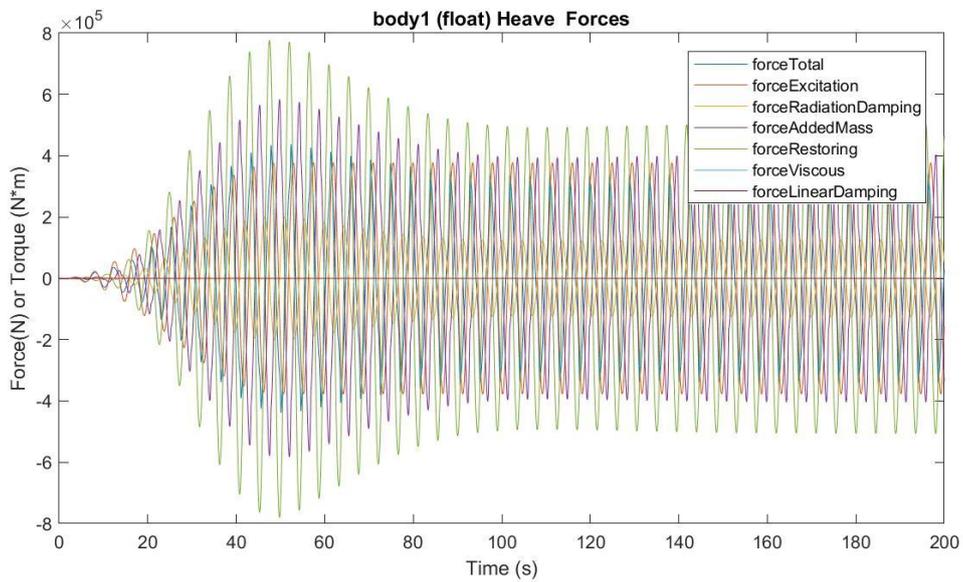
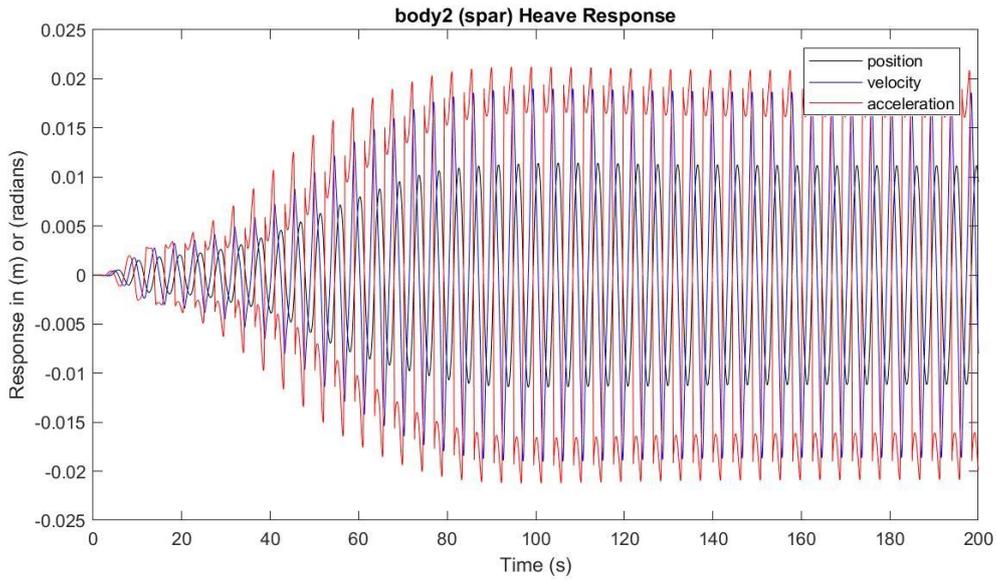
Presión media del acumulador de alta presión: 22.8753 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.3453 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.2786 m, 0.3838 m/s y 0.5837 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0114 m, 0.0190 m/s y 0.0212 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$
 $T_e = 5.5 \text{ s}$

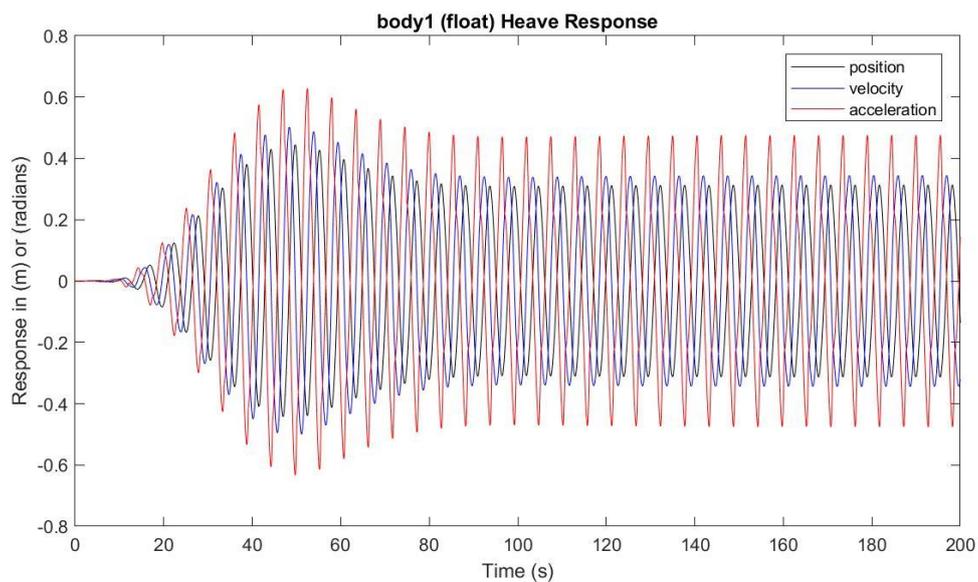
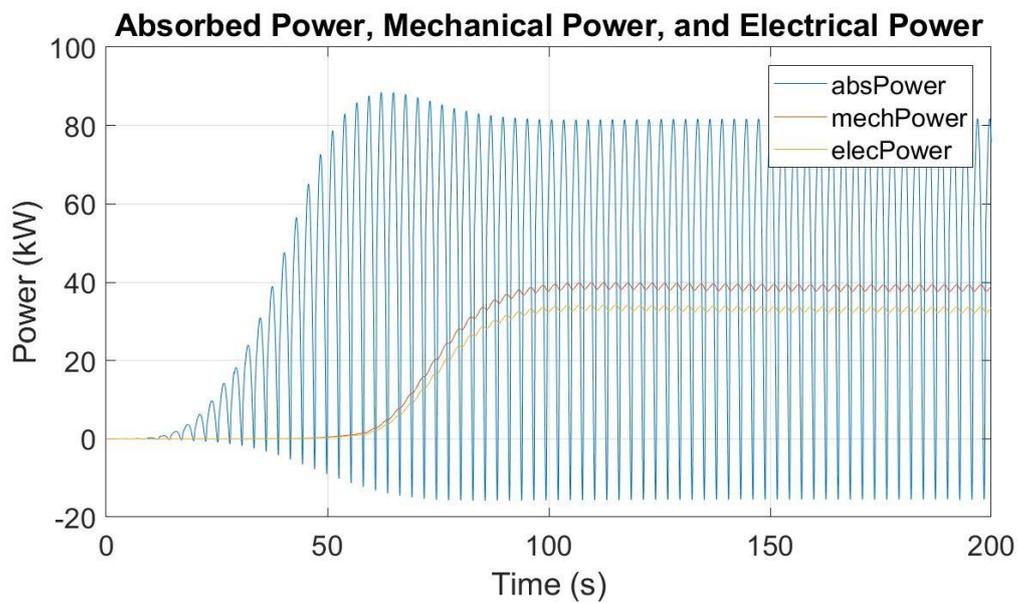
Potencia eléctrica media: 32.9724 kW

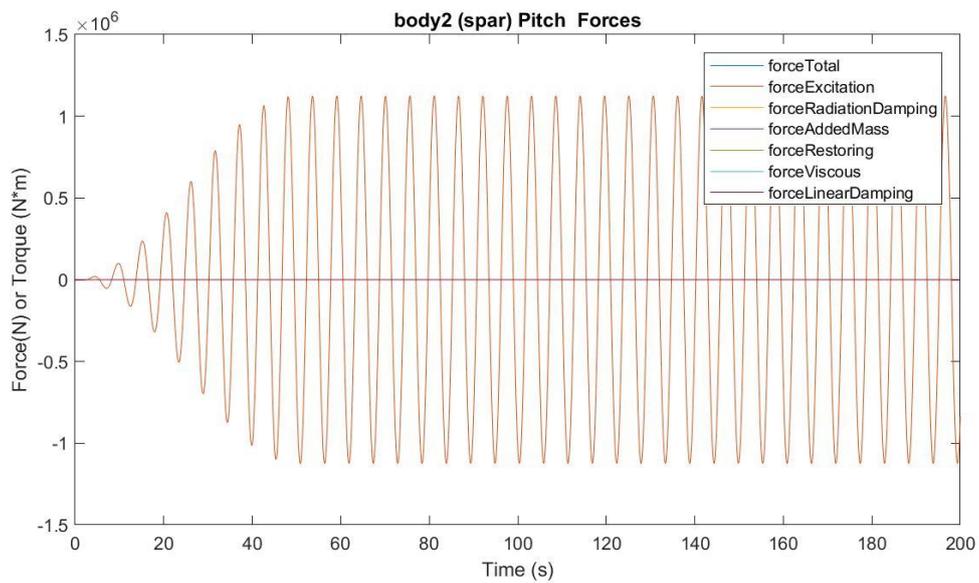
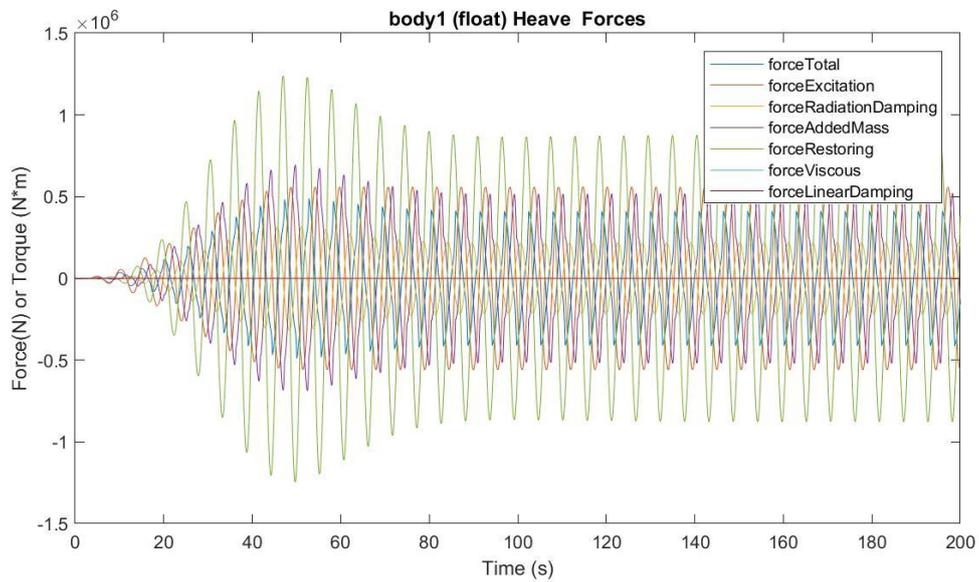
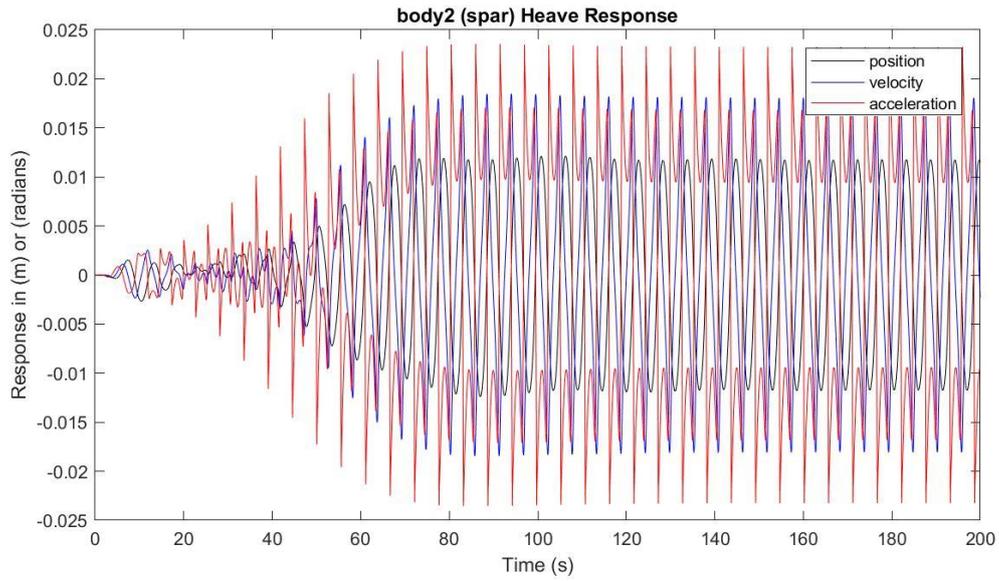
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1138 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.9627 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.4449 m, 0.5022 m/s y 0.6282 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0121 m, 0.0185 m/s y 0.0236 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 6.5 \text{ s}$

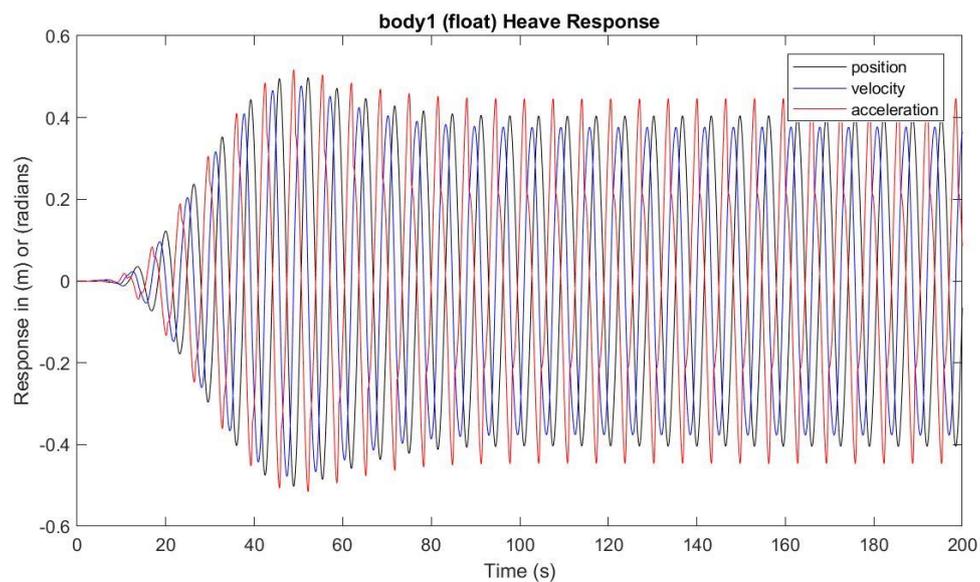
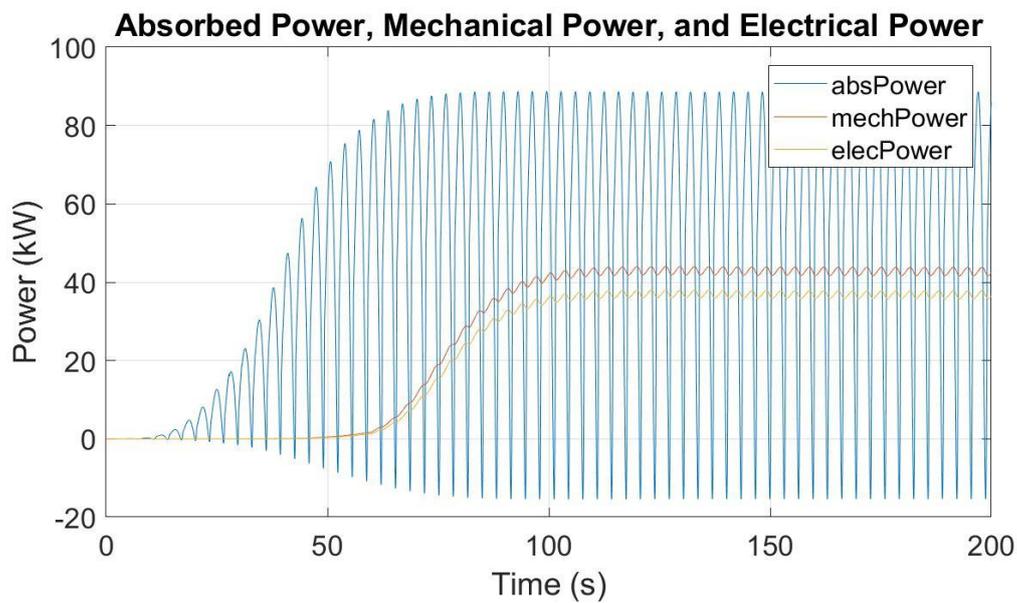
Potencia eléctrica media: 36.7635 kW

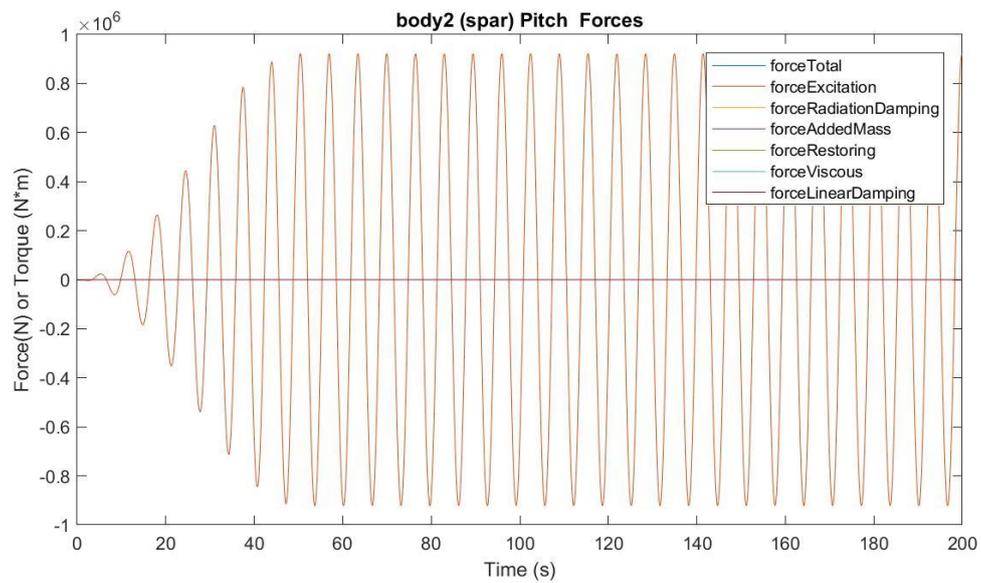
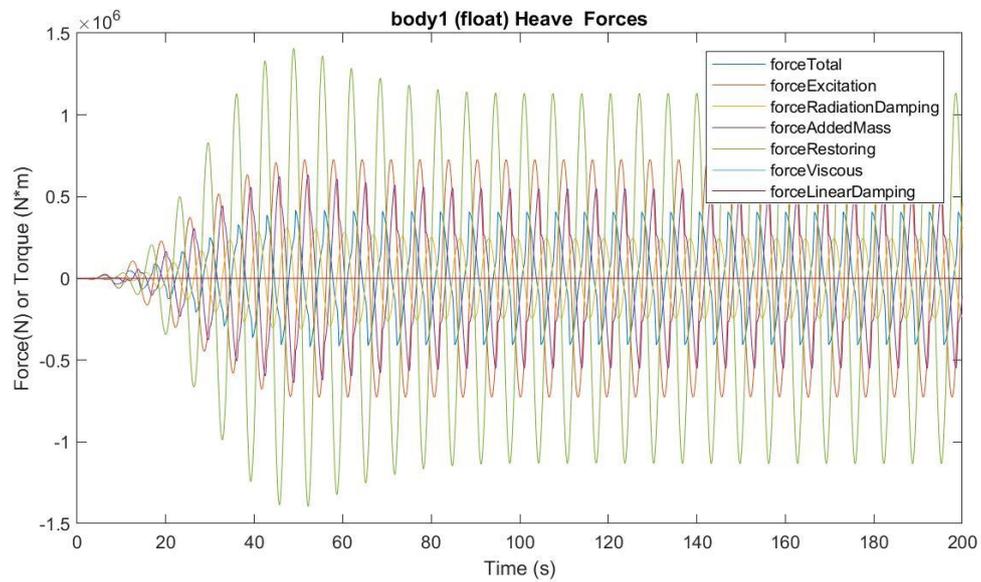
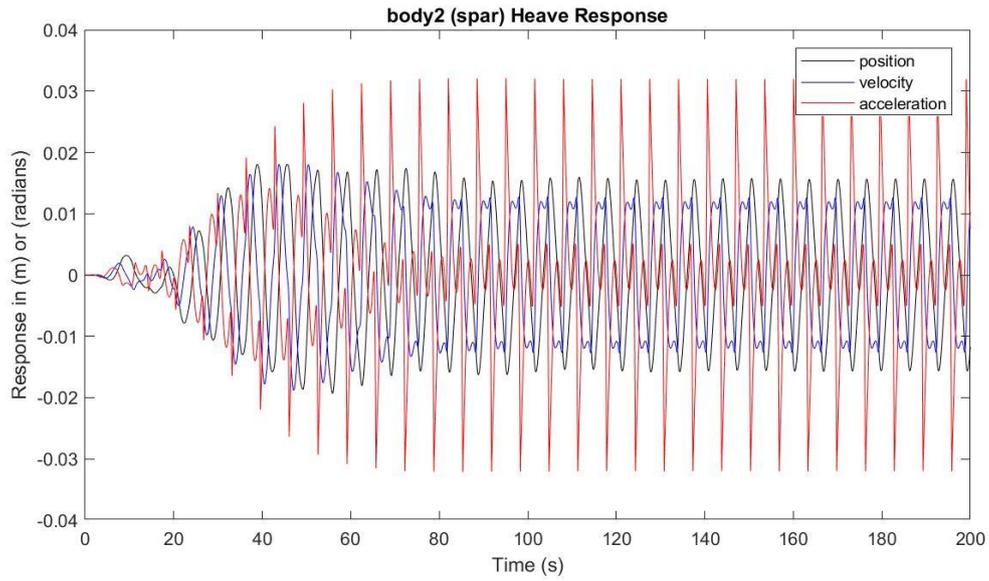
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1738 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.8708 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.4977 m, 0.4776 m/s y 0.5172 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0181 m, 0.0181 m/s y 0.0321 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

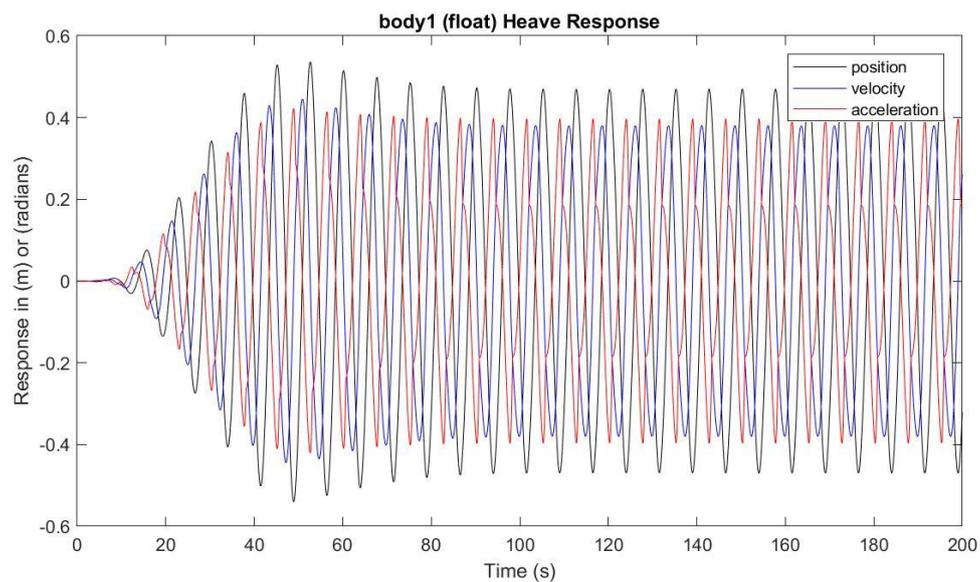
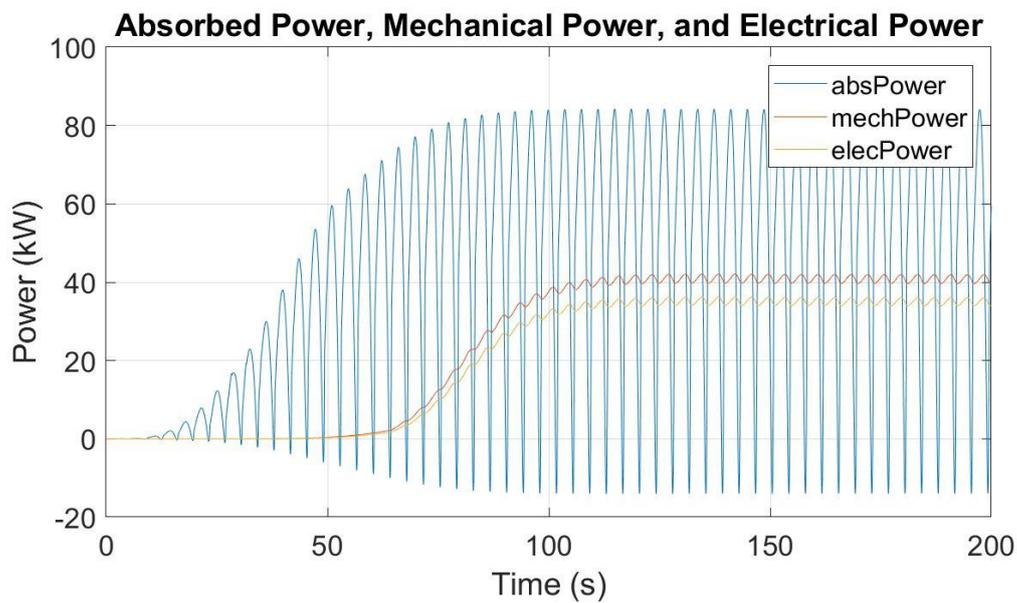
Potencia eléctrica media: 35.0491 kW

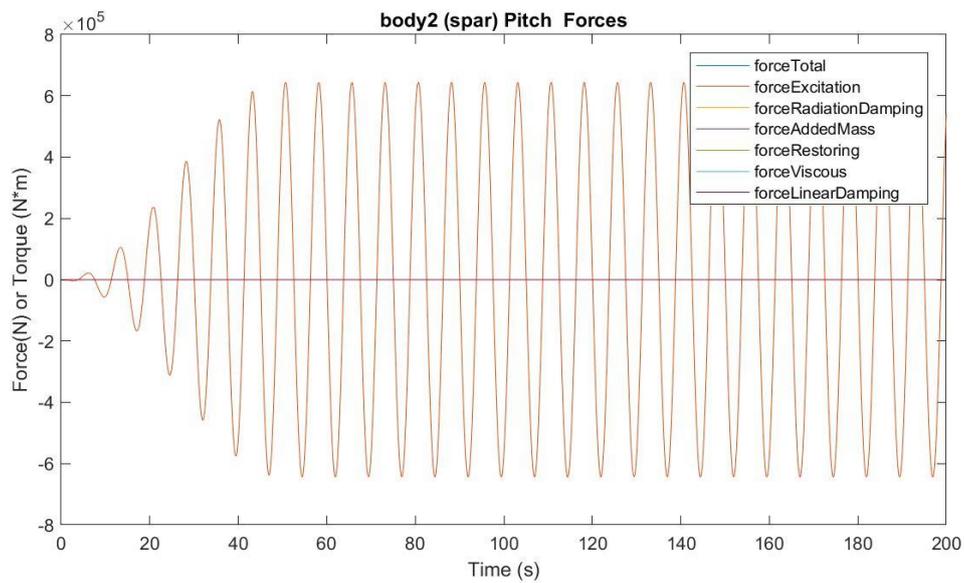
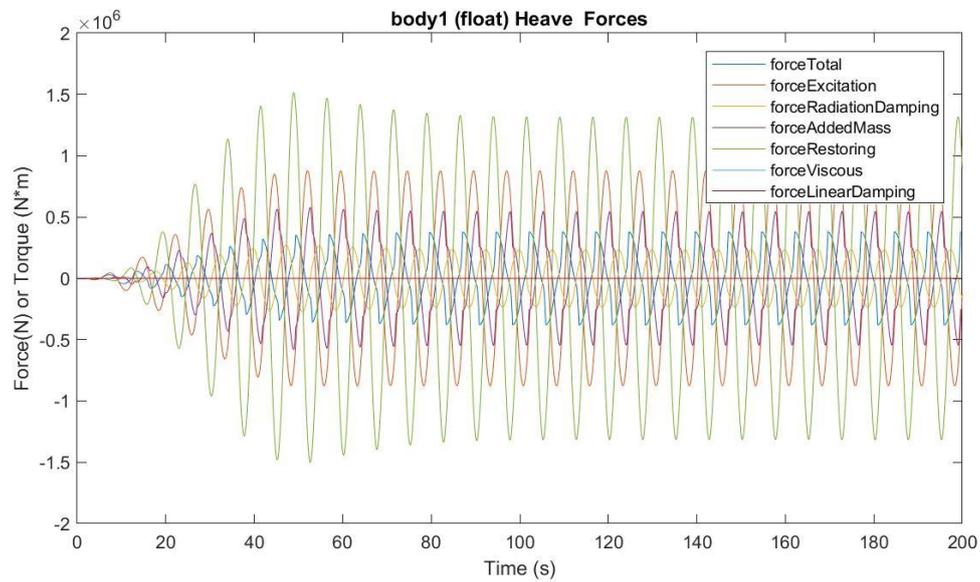
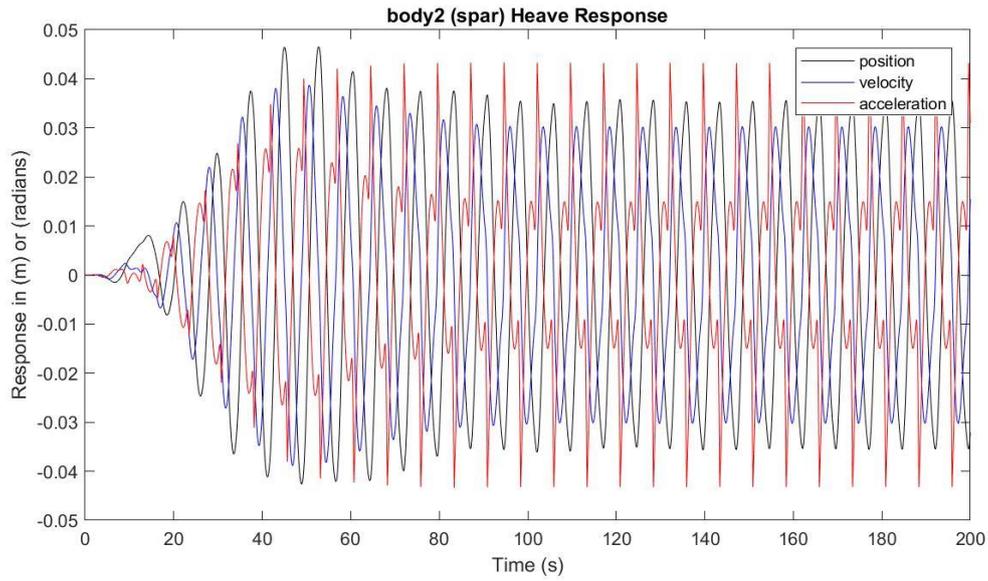
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1477 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.9122 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.5361 m, 0.4454 m/s y 0.4222 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0466 m, 0.0388 m/s y 0.0433 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$ $T_e = 8.5 \text{ s}$

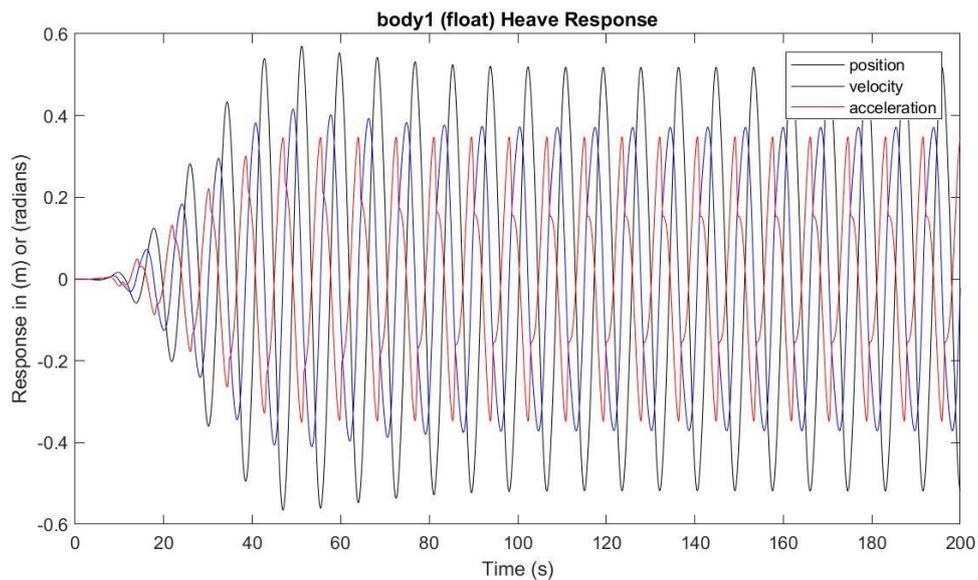
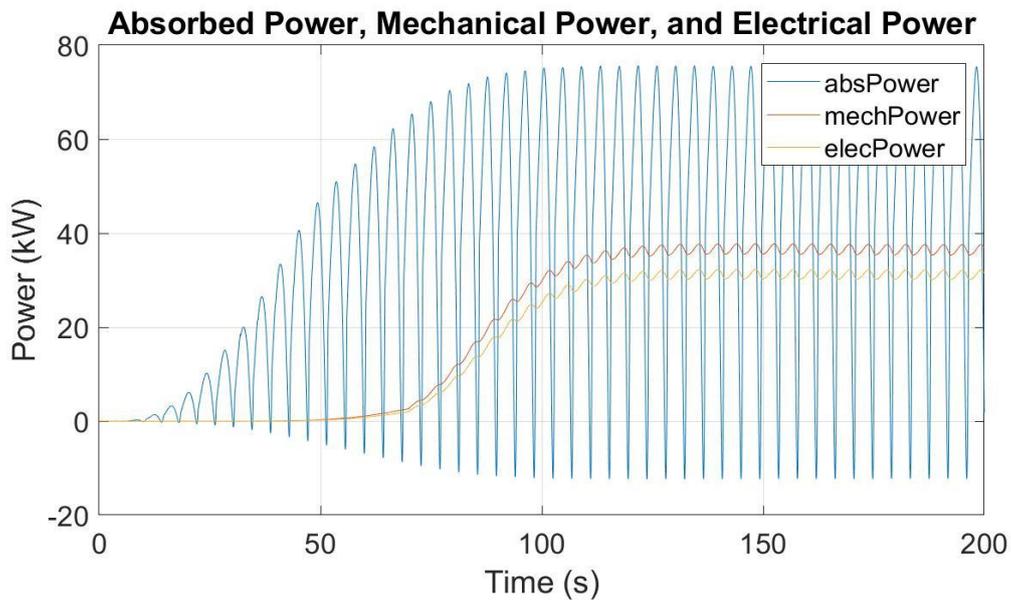
Potencia eléctrica media: 31.1906 kW

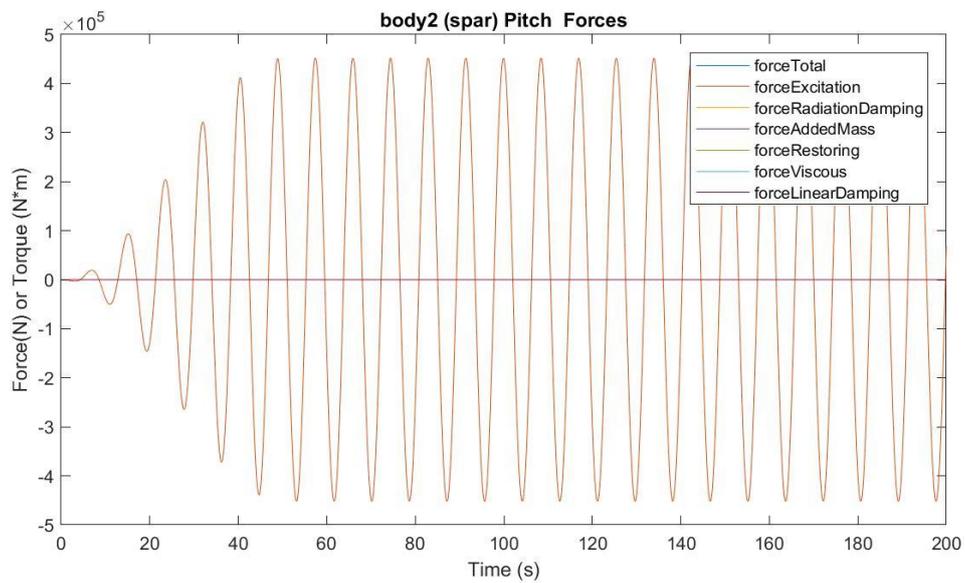
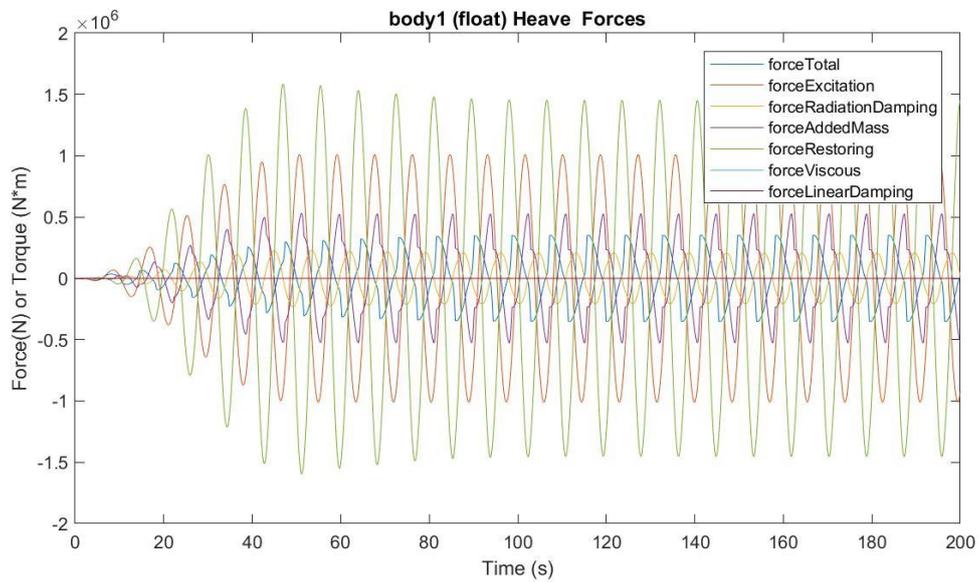
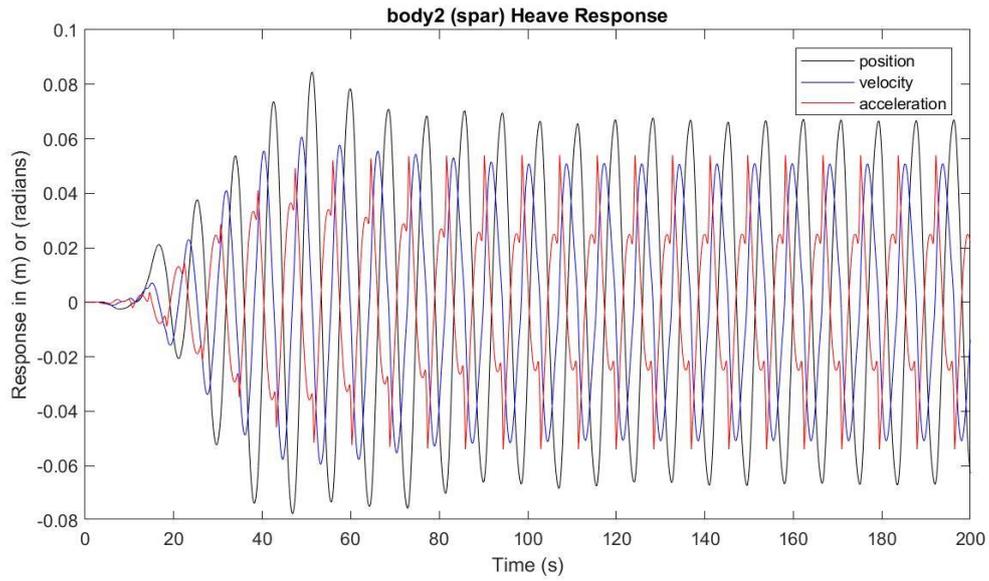
Presión media del acumulador de alta presión: 23.0863 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.0088 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.5697 m, 0.4160 m/s y 0.3482 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0845 m, 0.0607 m/s y 0.0541 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

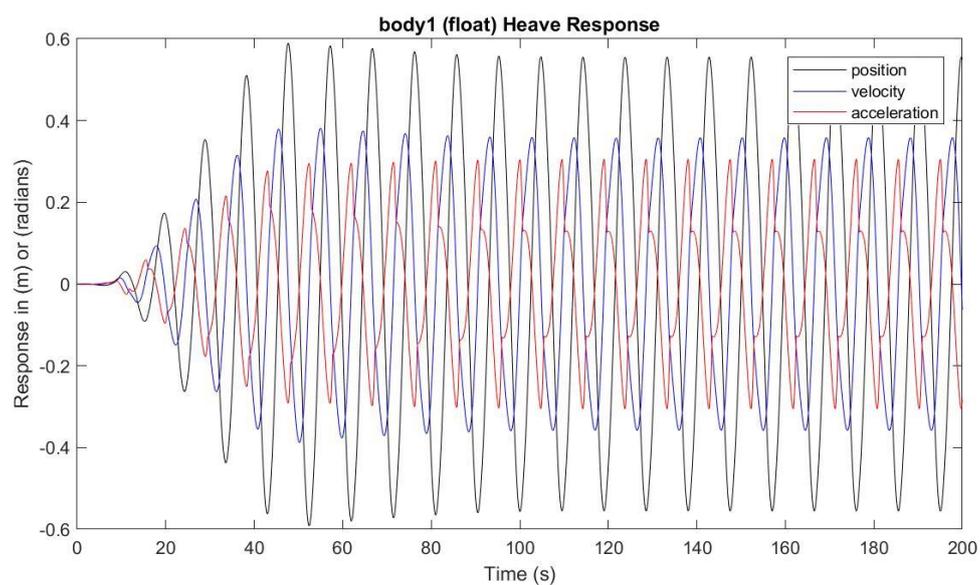
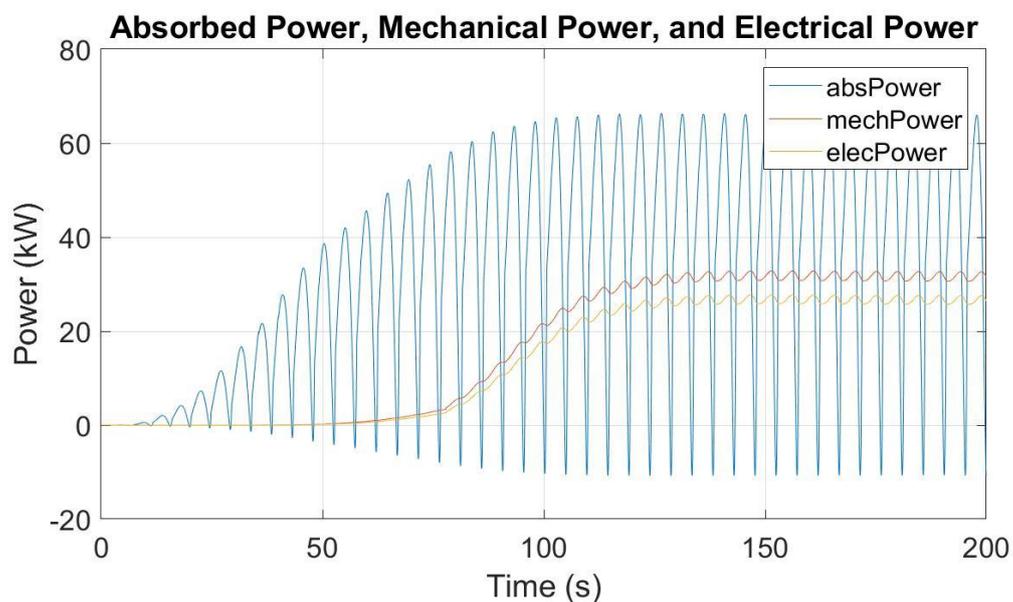
Potencia eléctrica media: 26.6615 kW

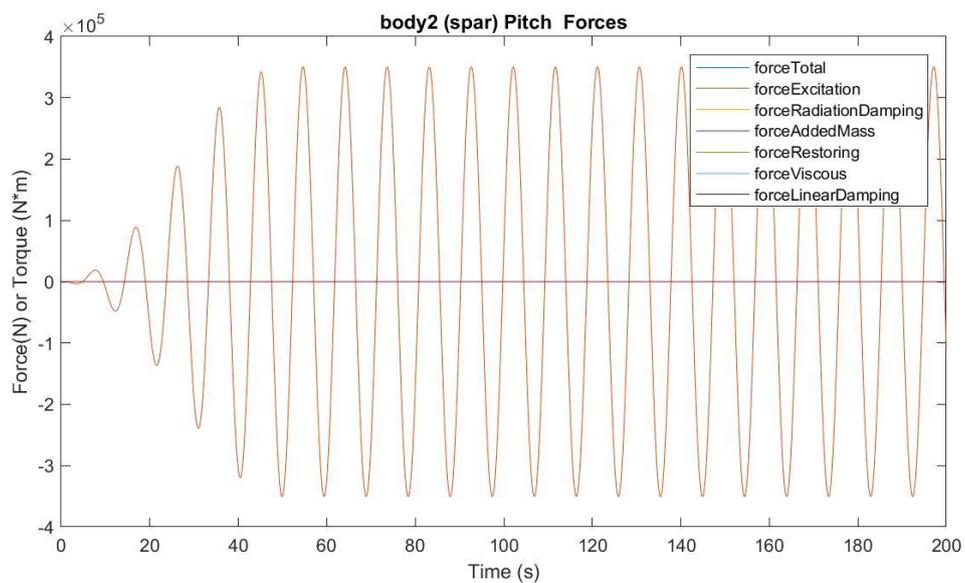
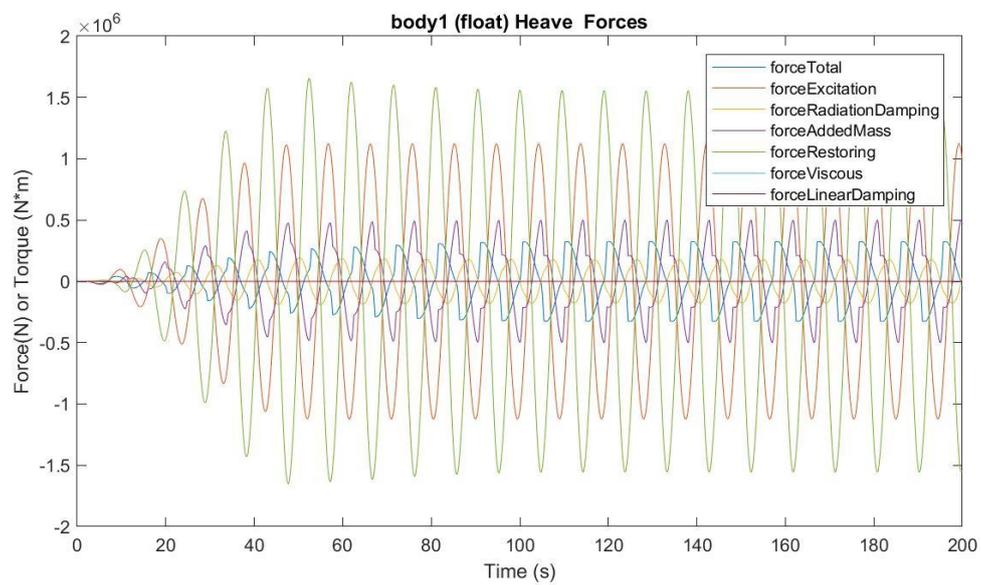
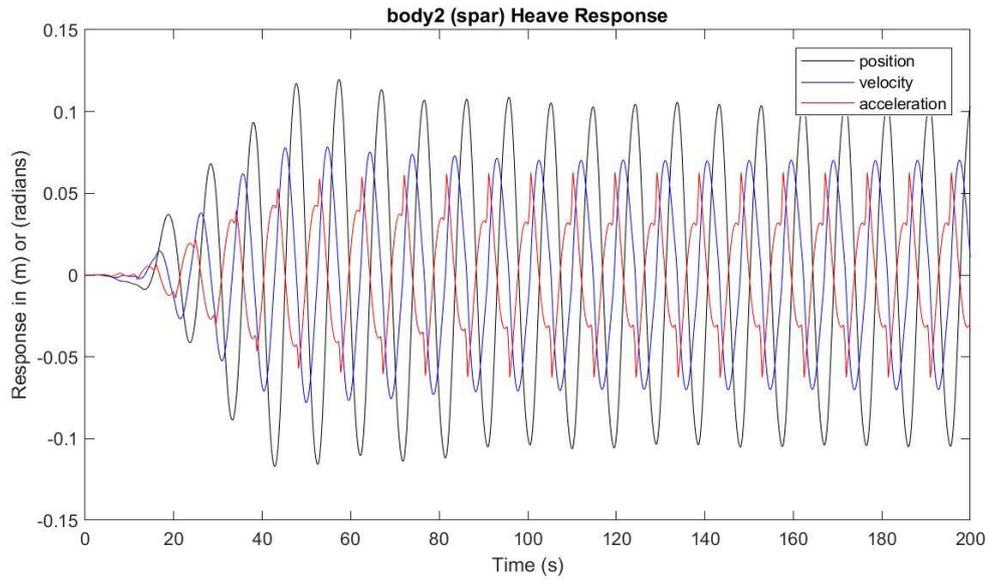
Presión media del acumulador de alta presión: 23.0141 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.1236 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.5894 m, 0.3810 m/s y 0.3056 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1196 m, 0.0783 m/s y 0.0627 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

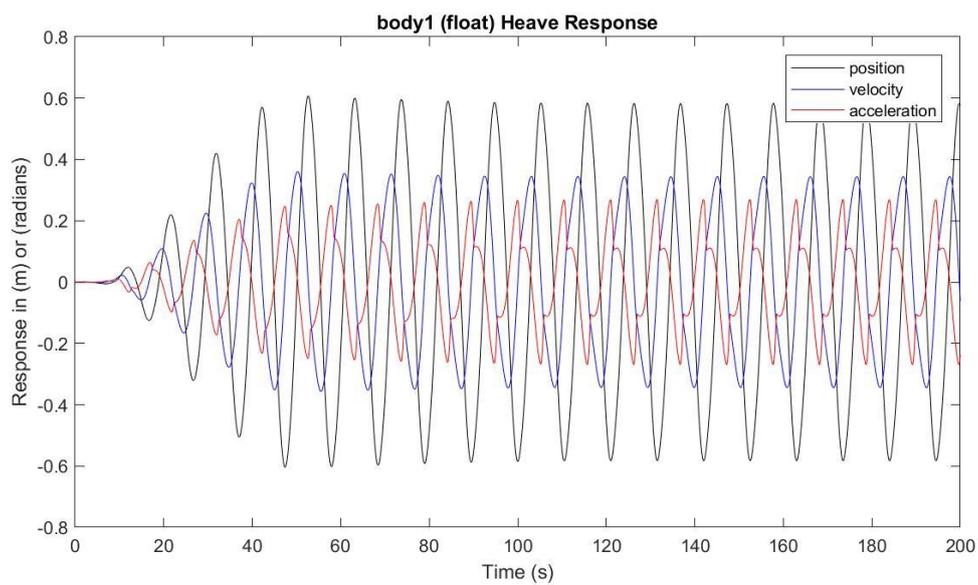
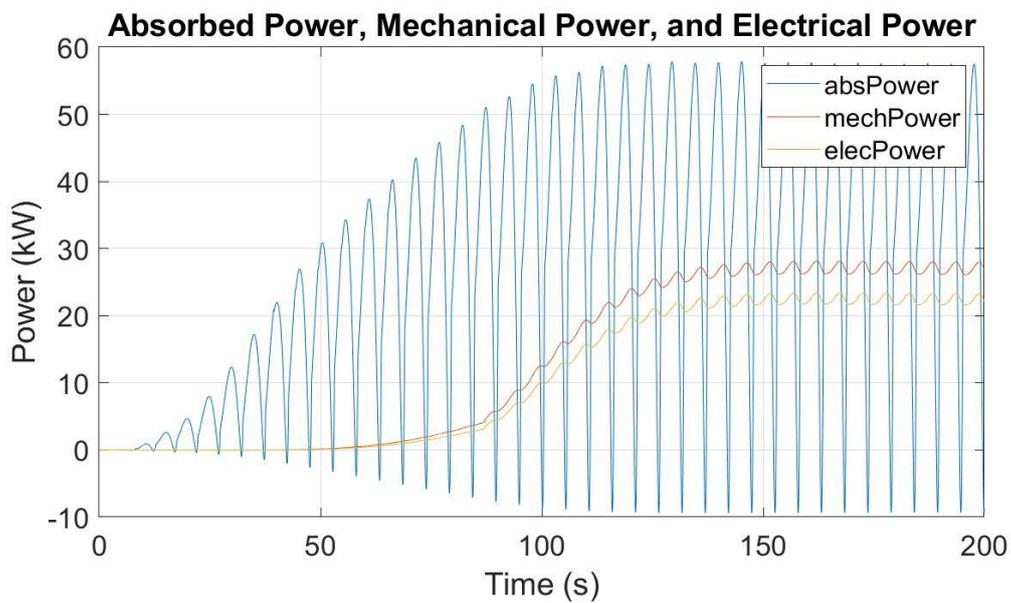
Potencia eléctrica media: 22.4389 kW

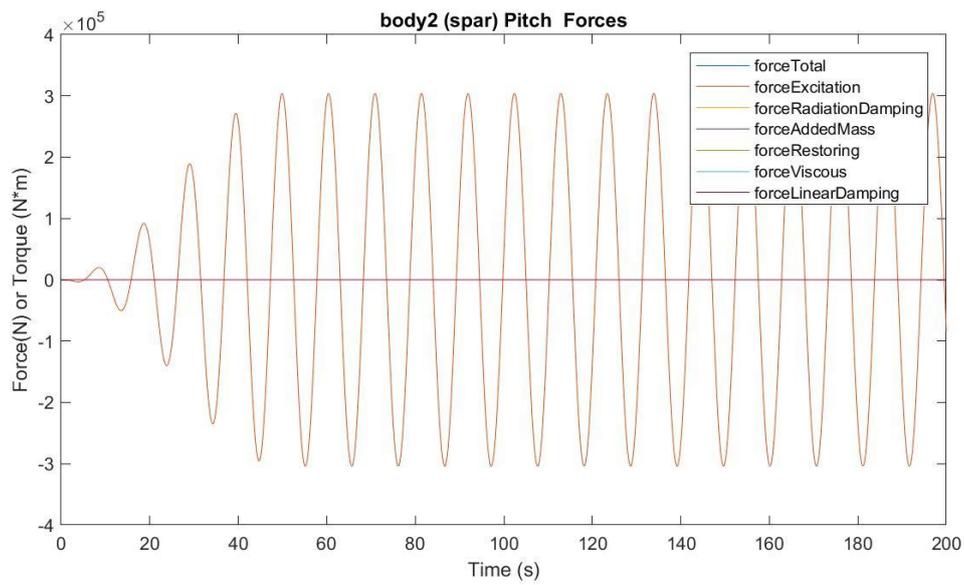
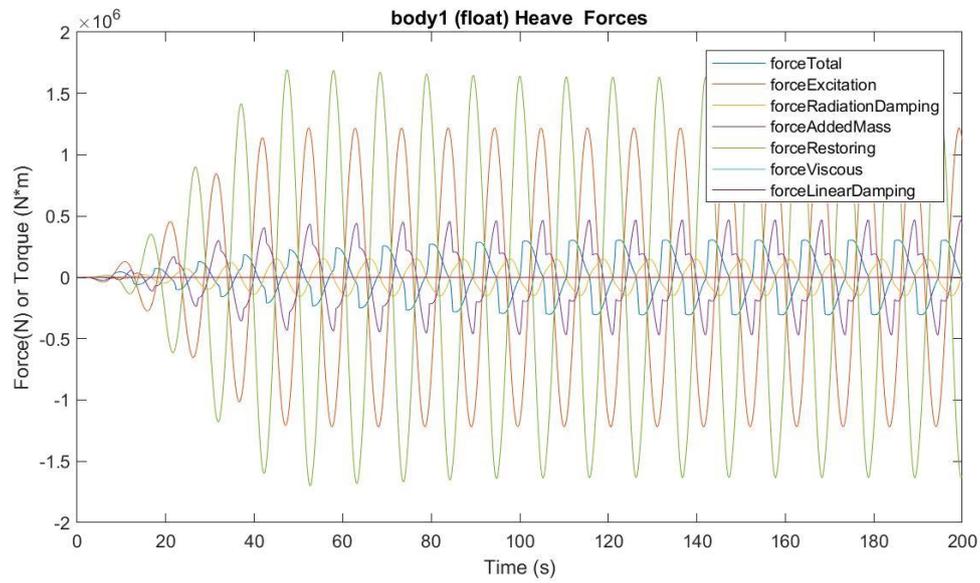
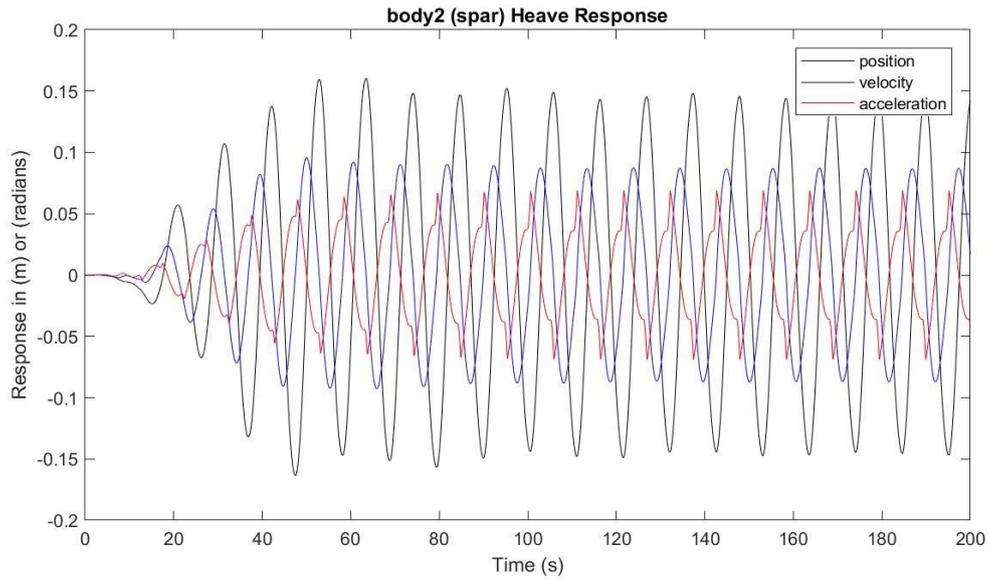
Presión media del acumulador de alta presión: 22.9435 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.2375 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.6070 m, 0.3610 m/s y 0.2698 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1603 m, 0.0958 m/s y 0.0689 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

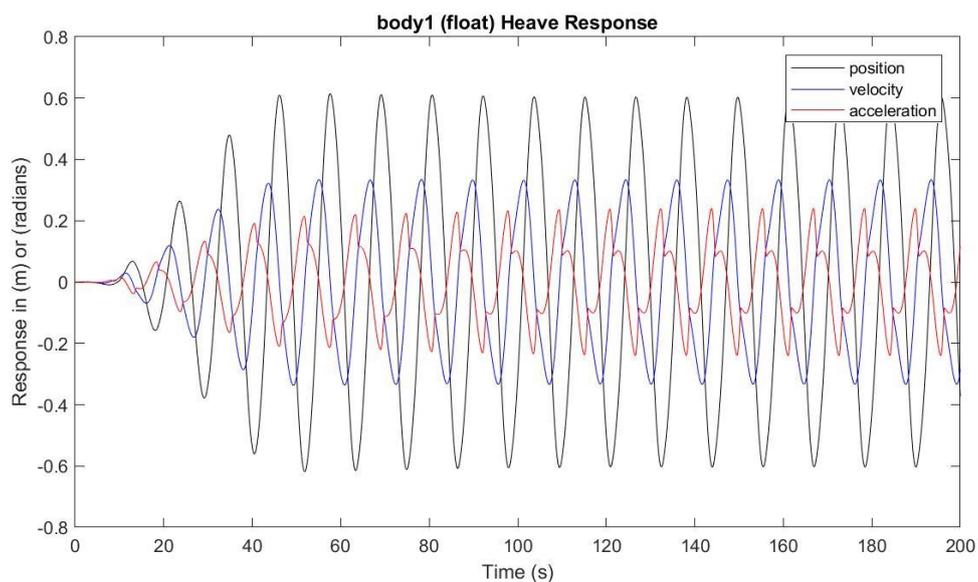
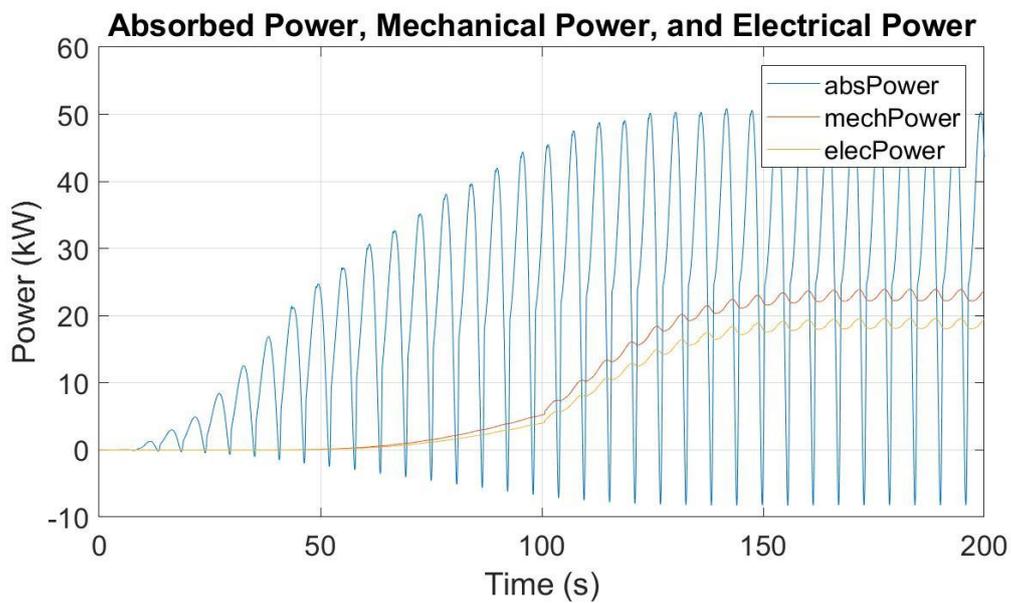
Potencia eléctrica media: 18.7110 kW

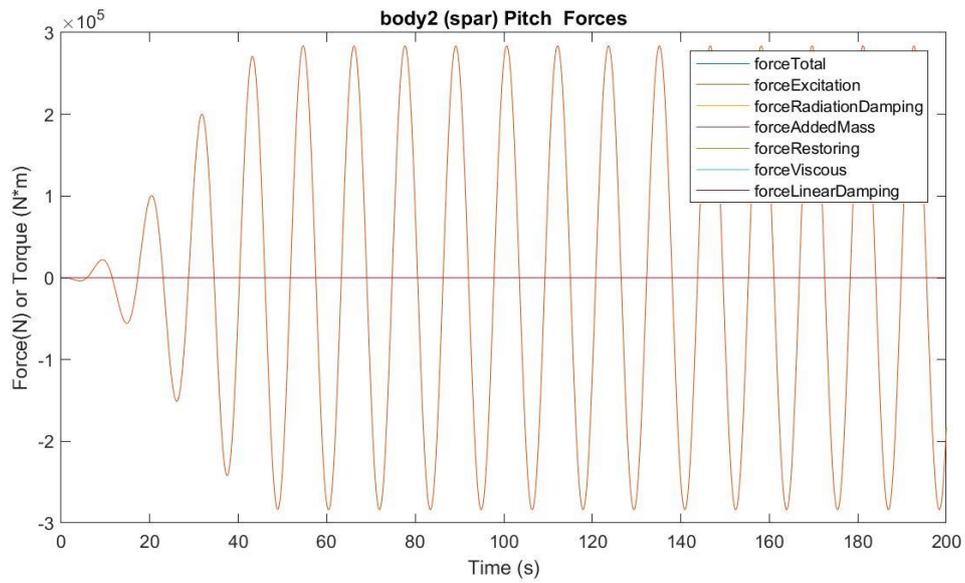
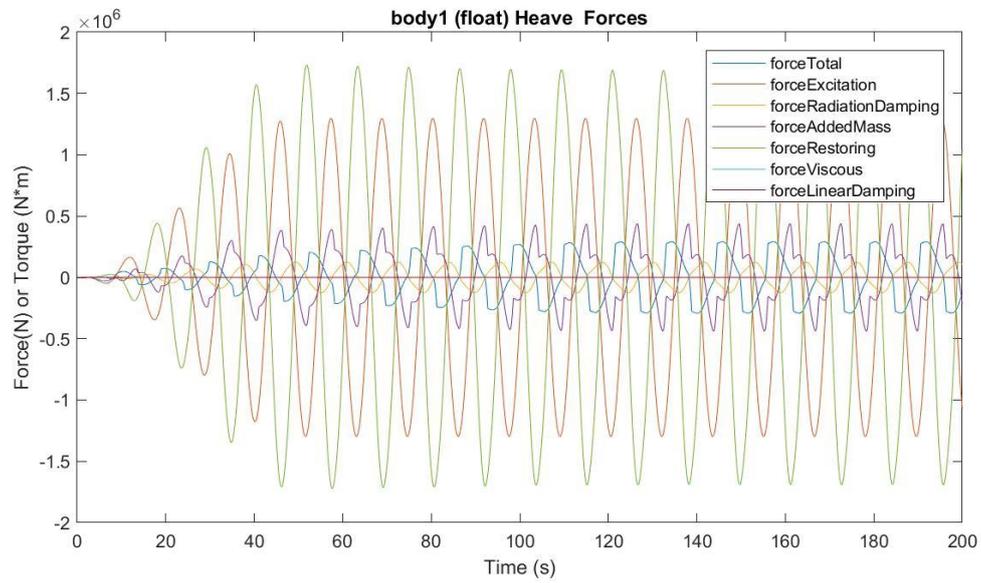
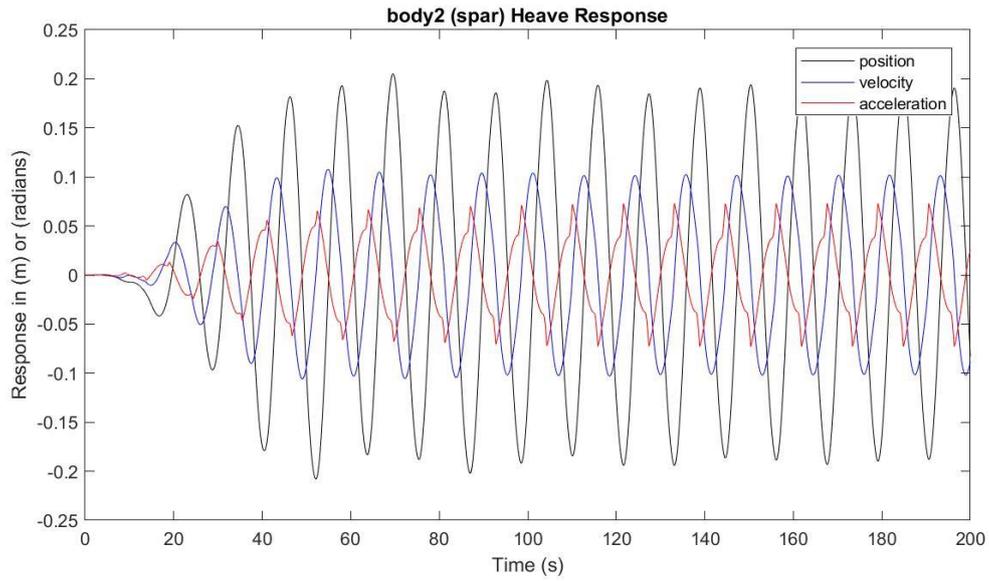
Presión media del acumulador de alta presión: 22.8786 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.3437 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.6144 m, 0.3344 m/s y 0.2400 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2050 m, 0.1077 m/s y 0.0730 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

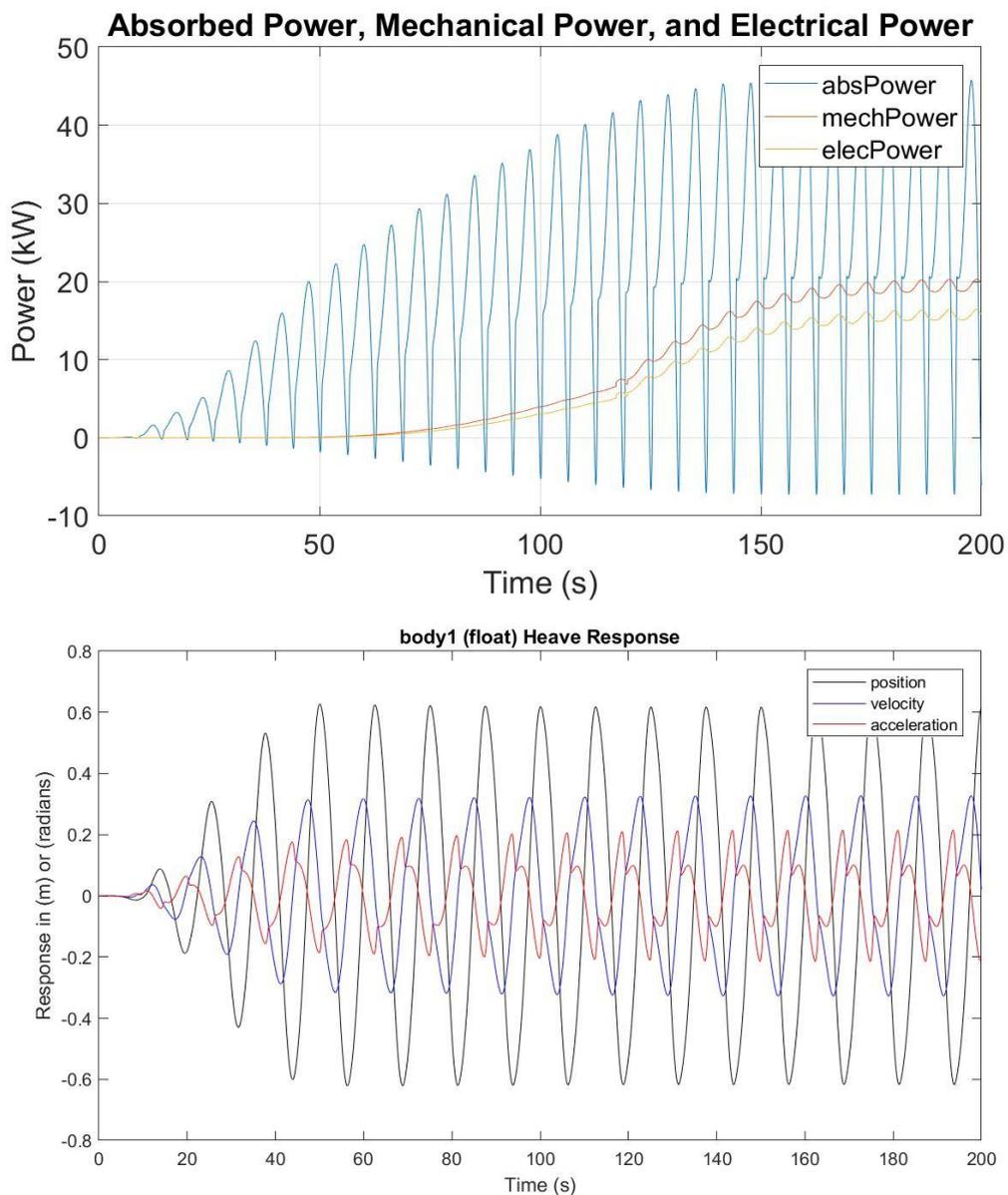
Potencia eléctrica media: 15.3773 kW

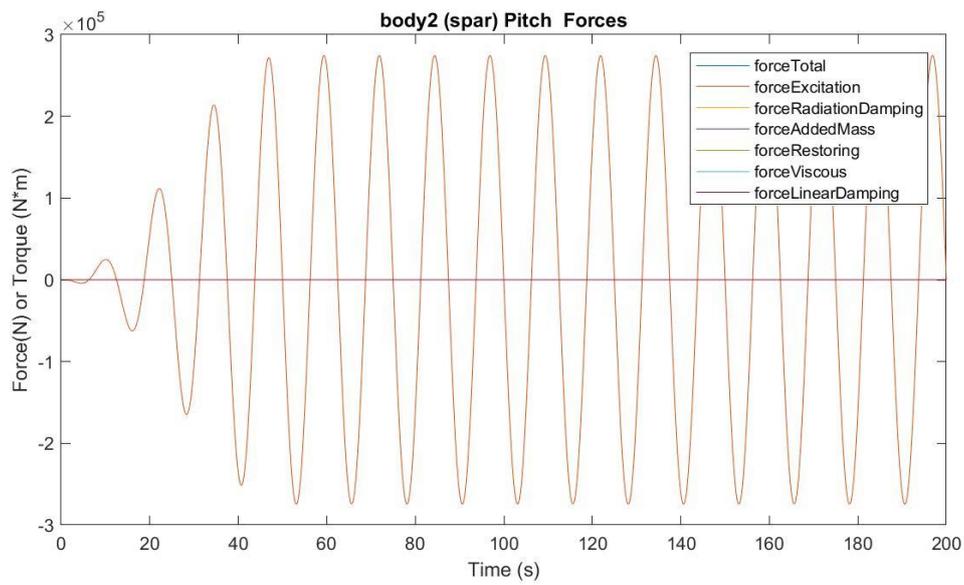
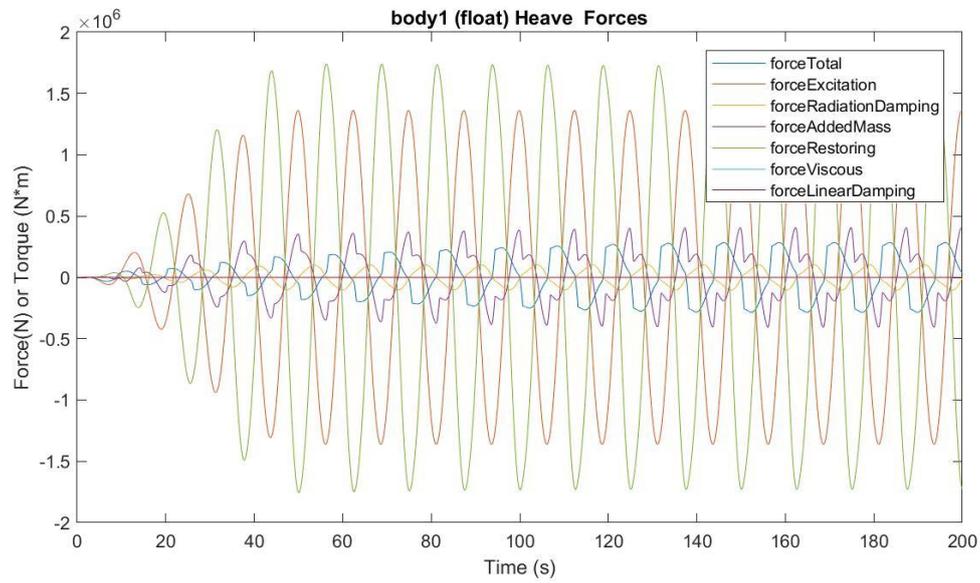
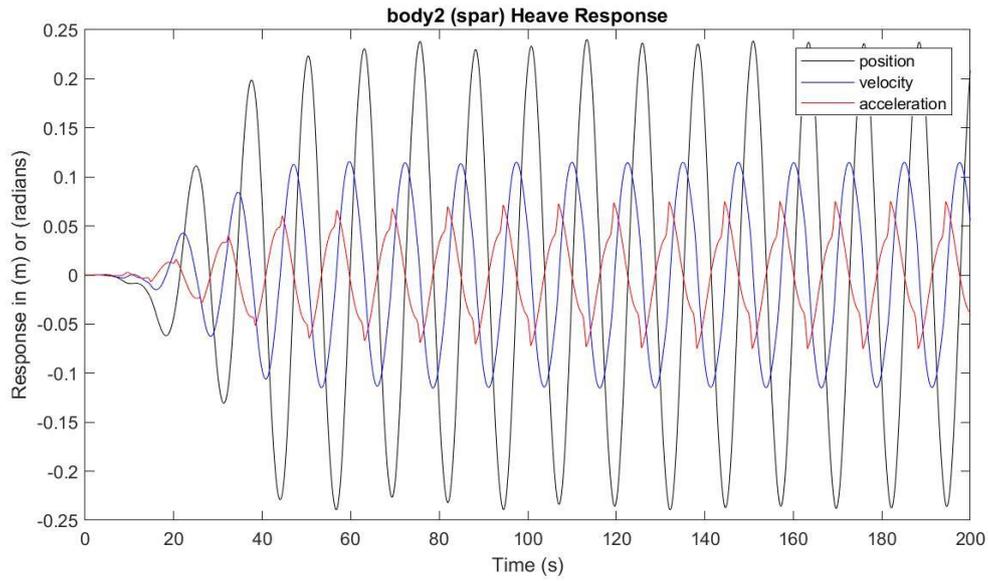
Presión media del acumulador de alta presión: 22.8201 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.4407 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.6270 m, 0.3275 m/s y 0.2146 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2402 m, 0.1157 m/s y 0.0752 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

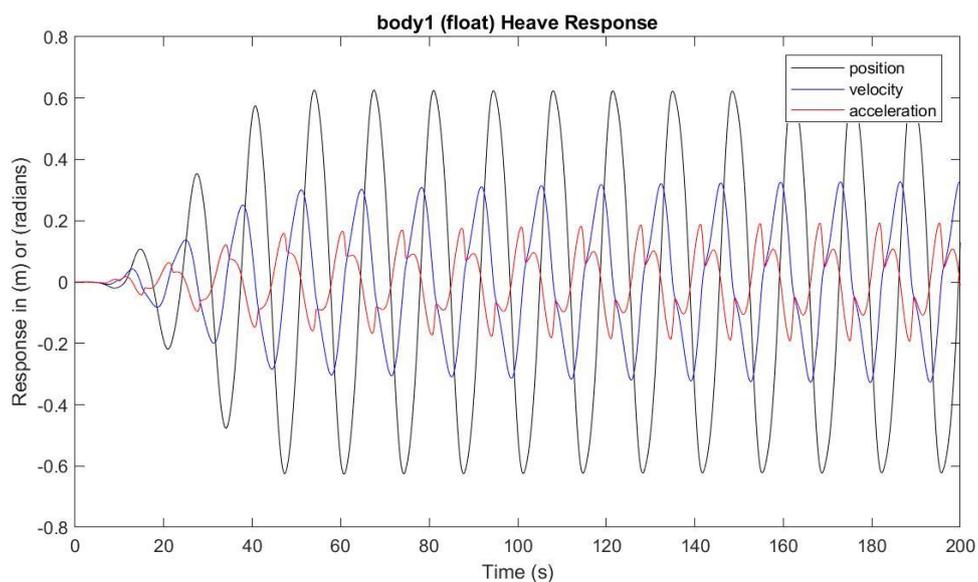
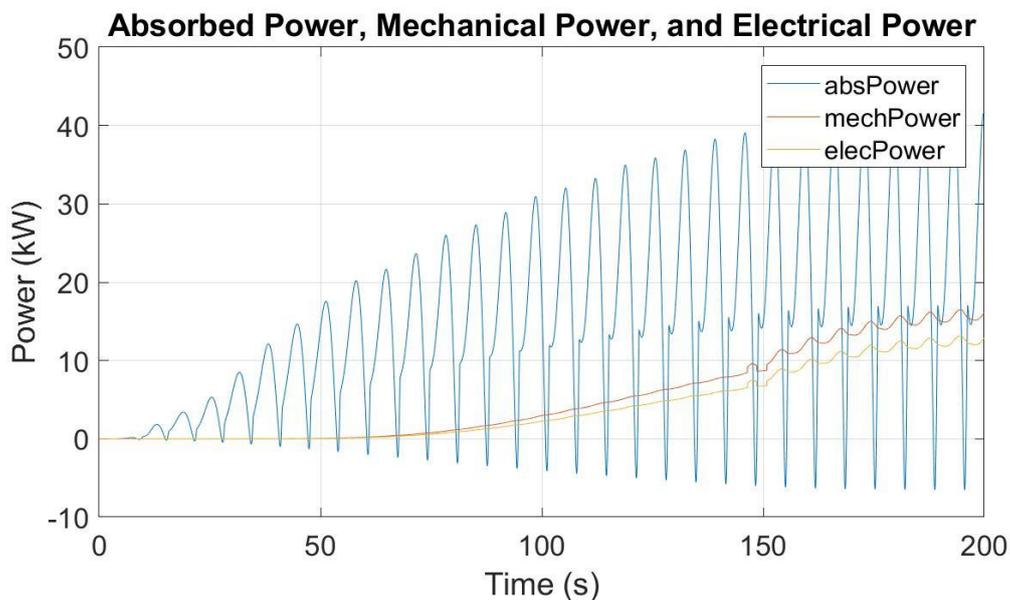
Potencia eléctrica media: 11.4868 kW

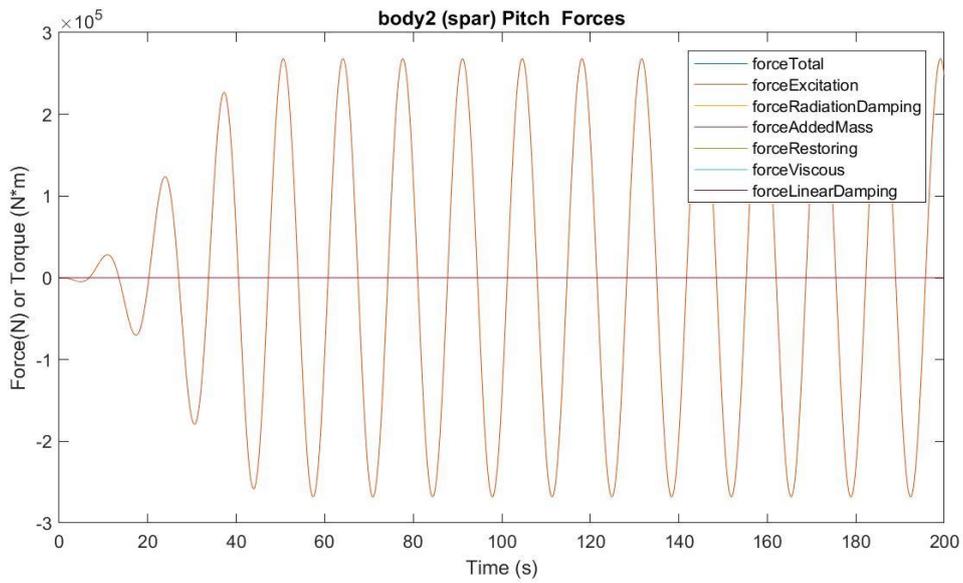
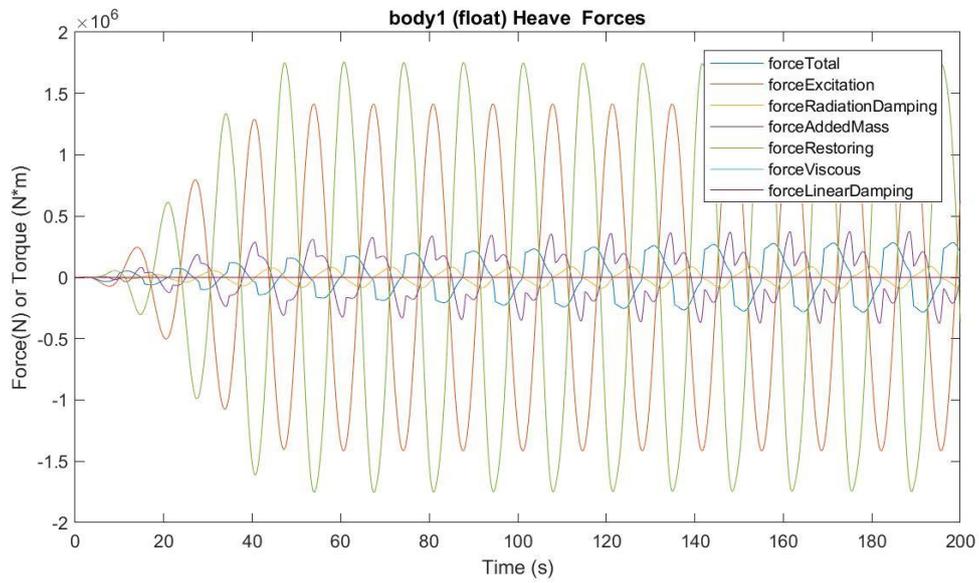
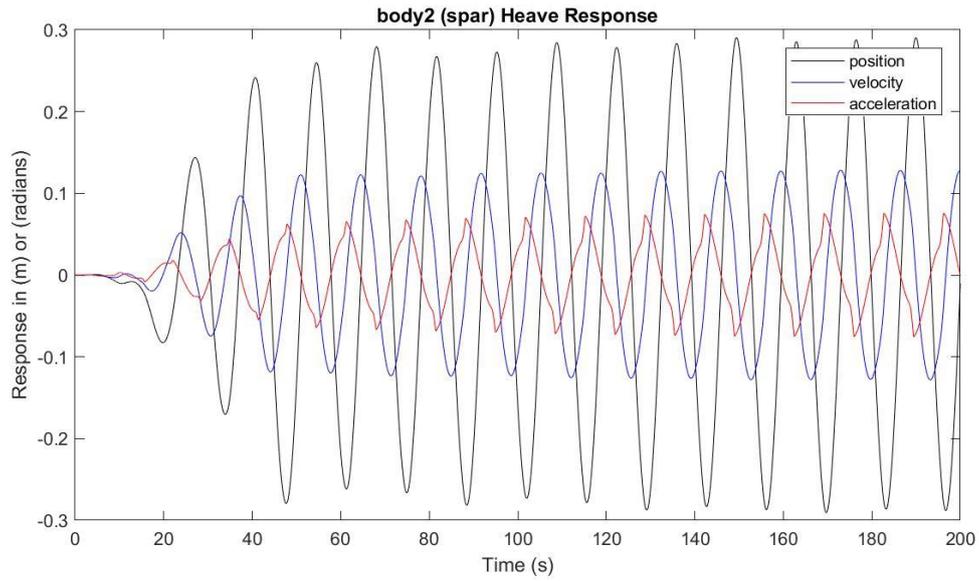
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7493 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.5587 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.6265 m, 0.3273 m/s y 0.1929 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2905 m, 0.1282 m/s y 0.0757 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

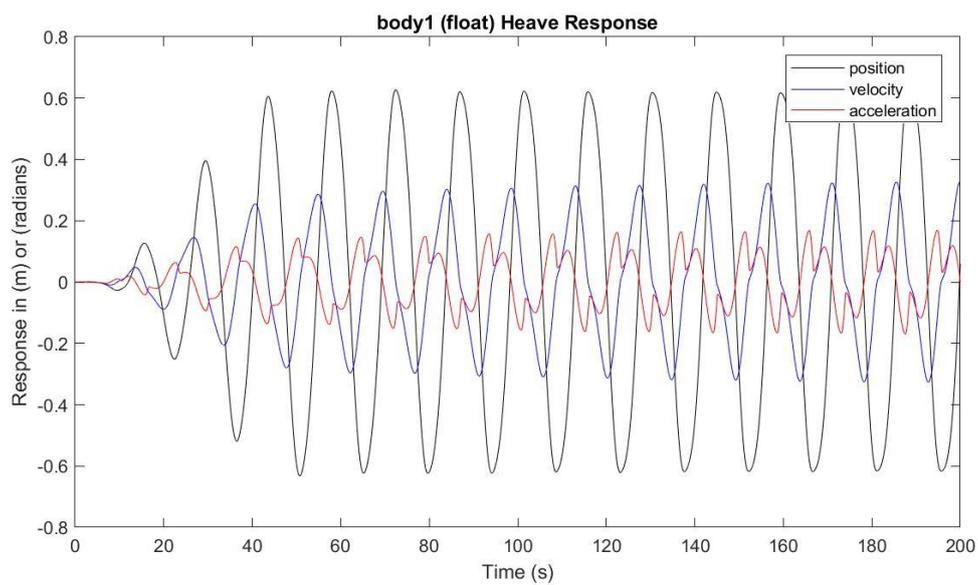
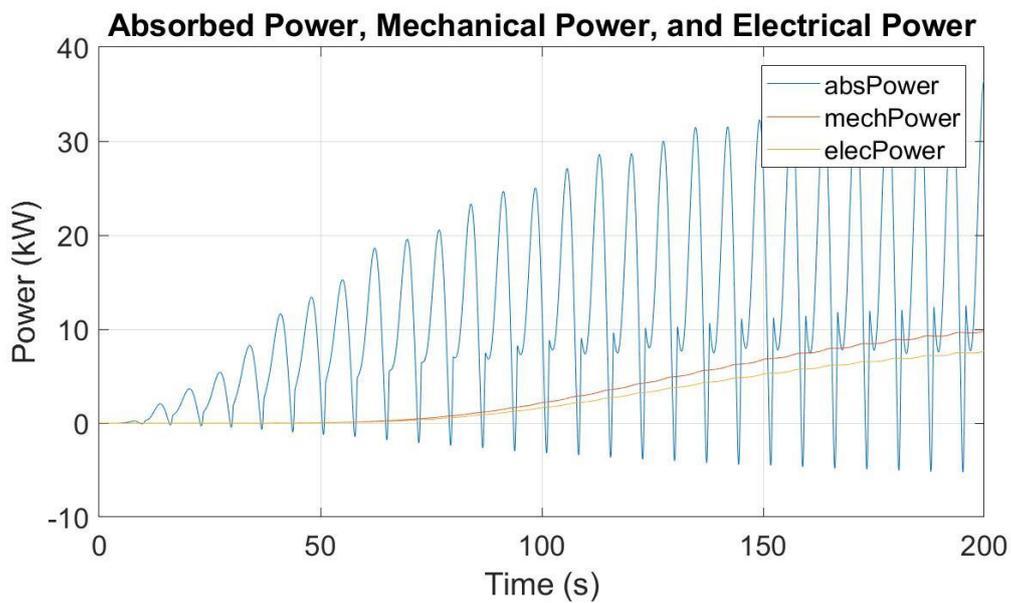
Potencia eléctrica media: 6.7789 kW

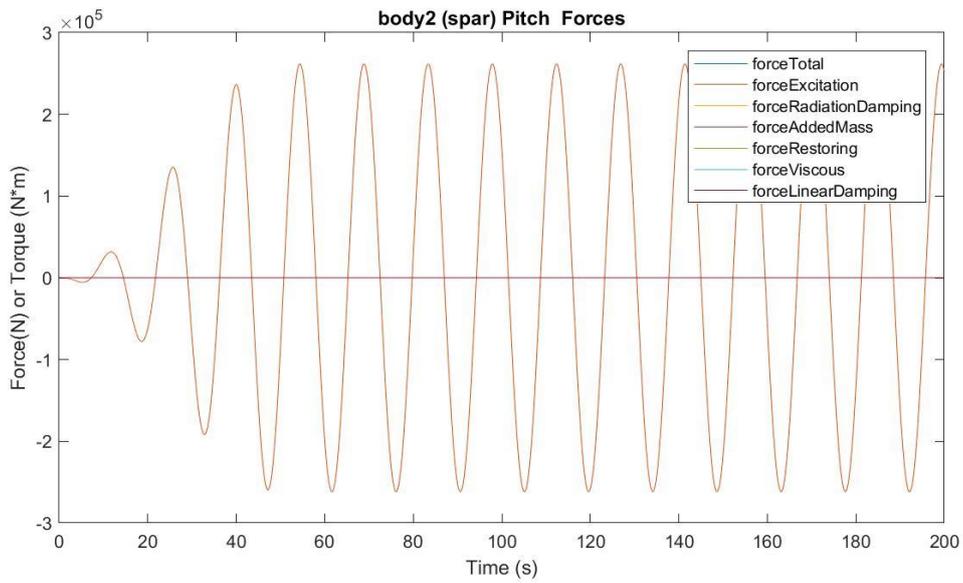
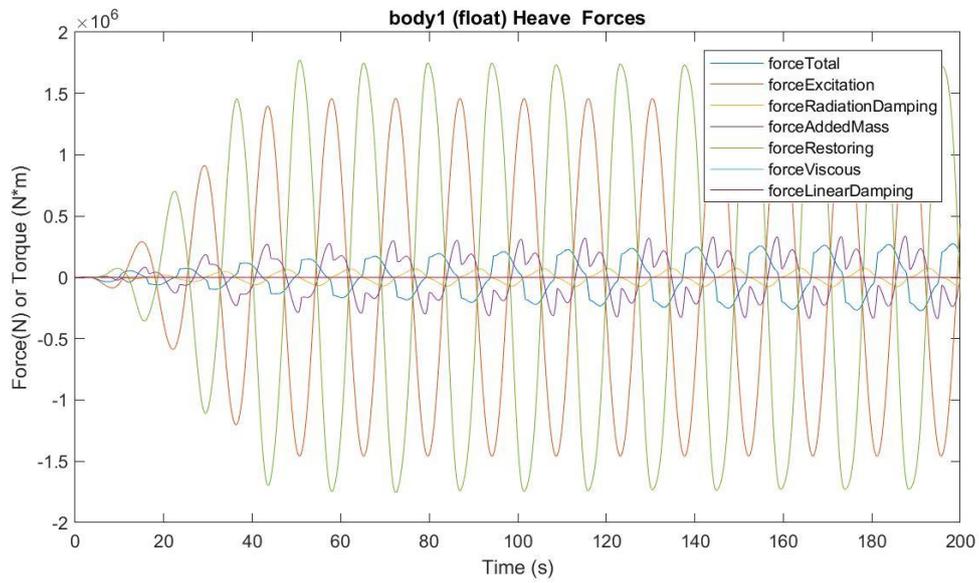
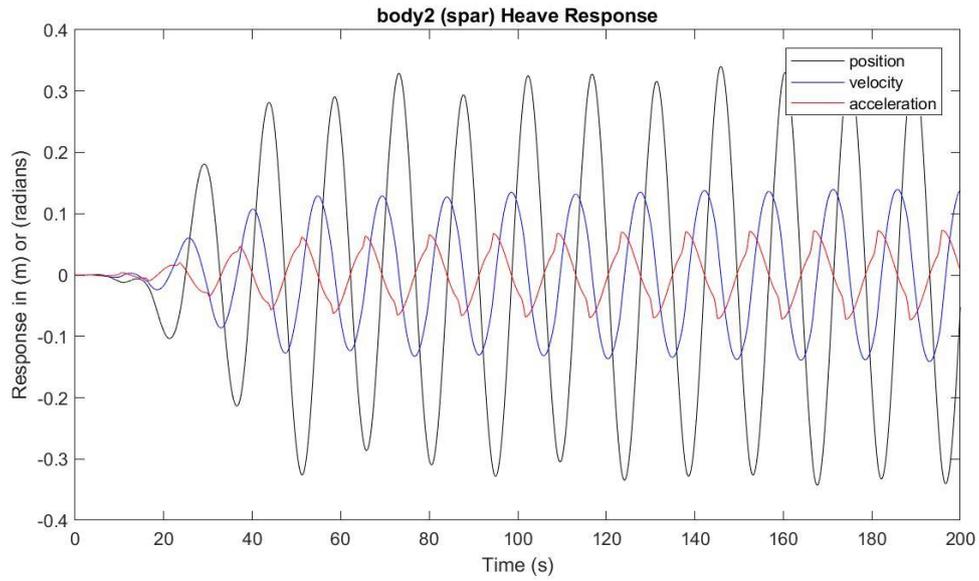
Presión media del acumulador de alta presión: 22.5500 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.8956 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.6269 m, 0.3277 m/s y 0.1690 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3438 m, 0.1397 m/s y 0.0731 m/s²





$H_s = 1.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

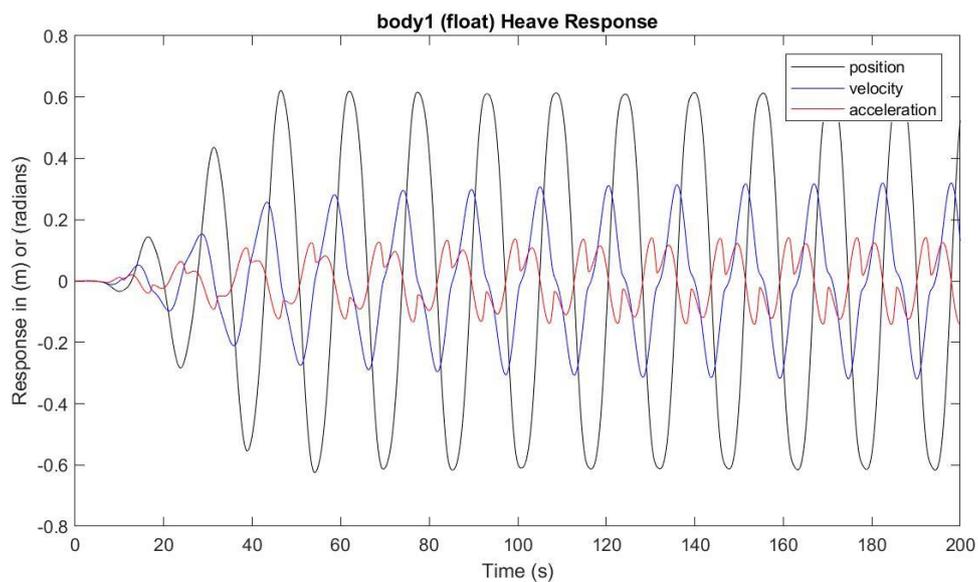
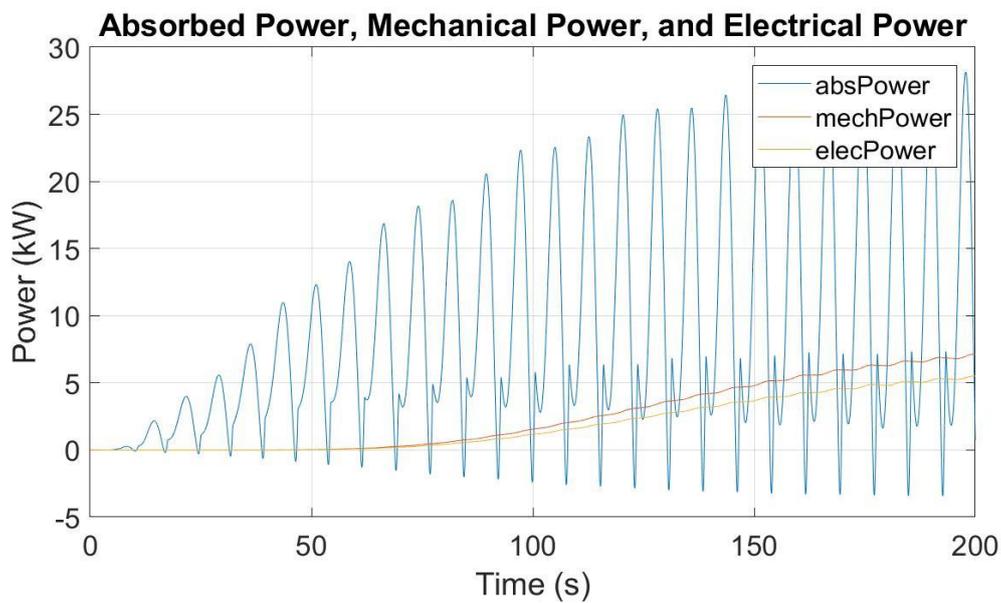
Potencia eléctrica media: 4.8609 kW

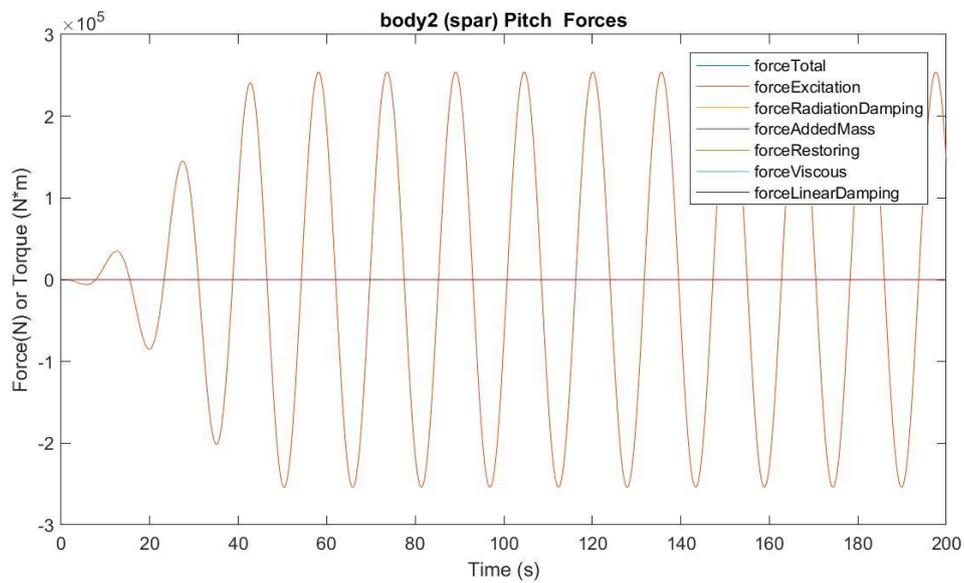
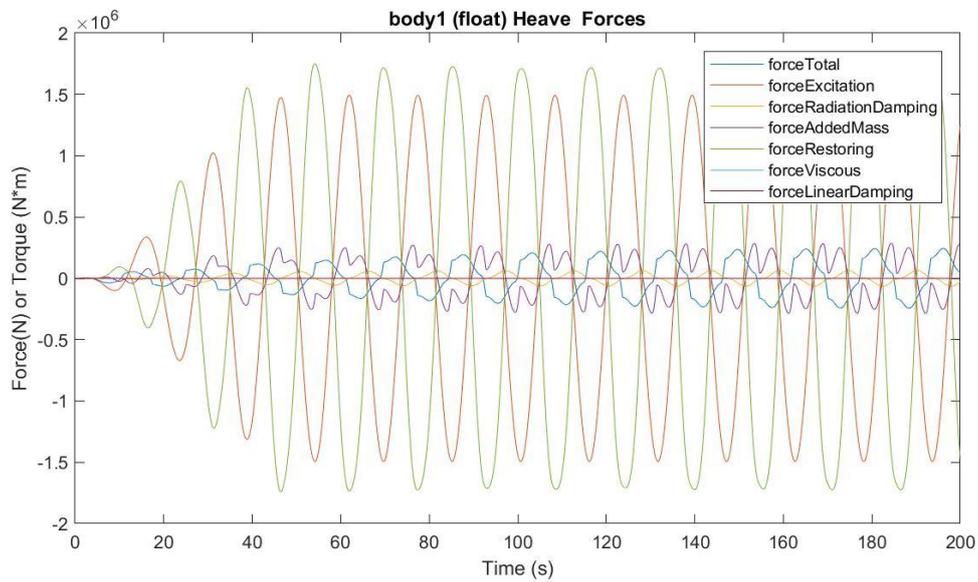
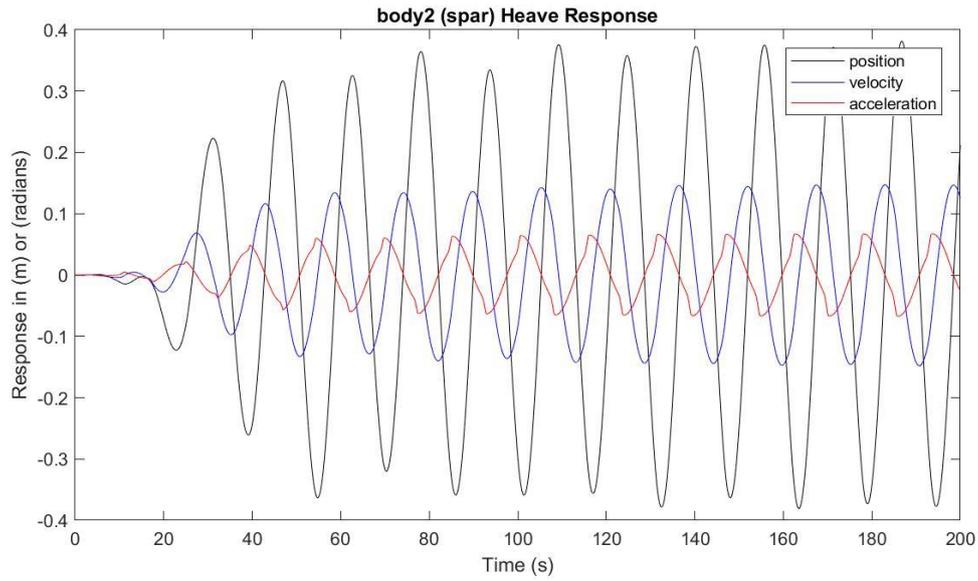
Presión media del acumulador de alta presión: 22.2764 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 19.3825 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.6213 m, 0.3200 m/s y 0.1416 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3812 m, 0.1472 m/s y 0.0671 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 4.5 \text{ s}$

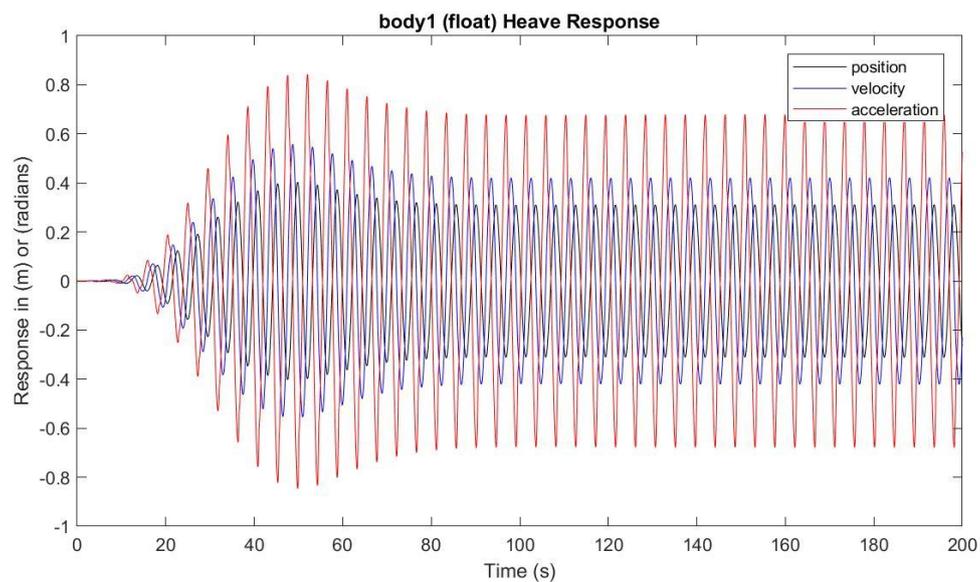
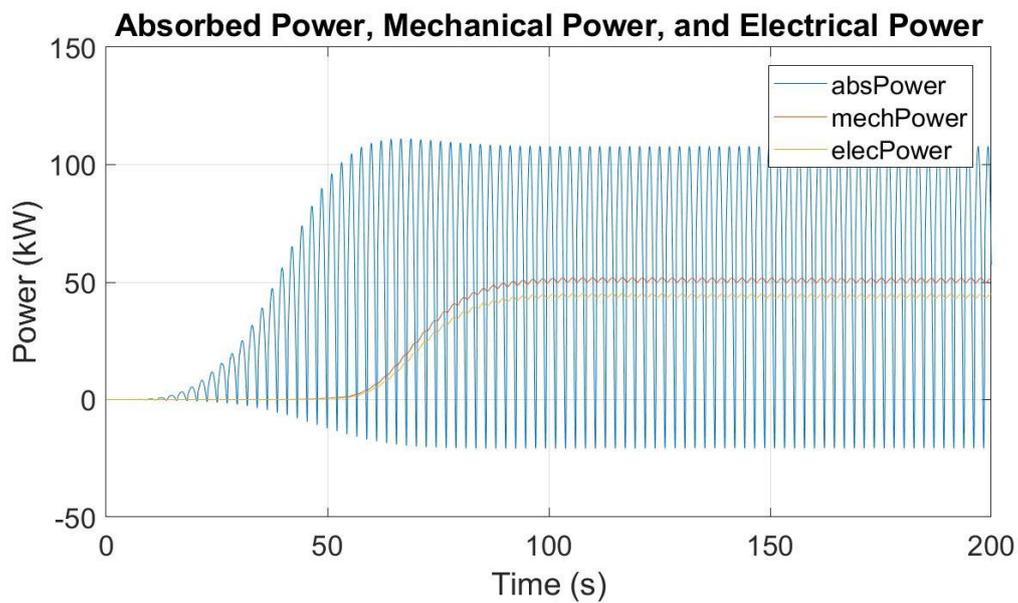
Potencia eléctrica media: 44.1059 kW

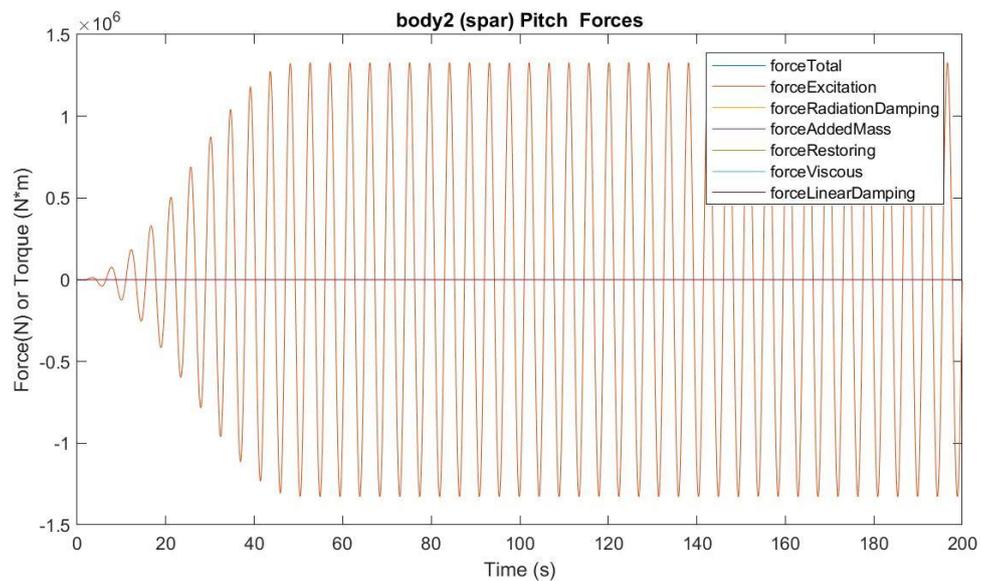
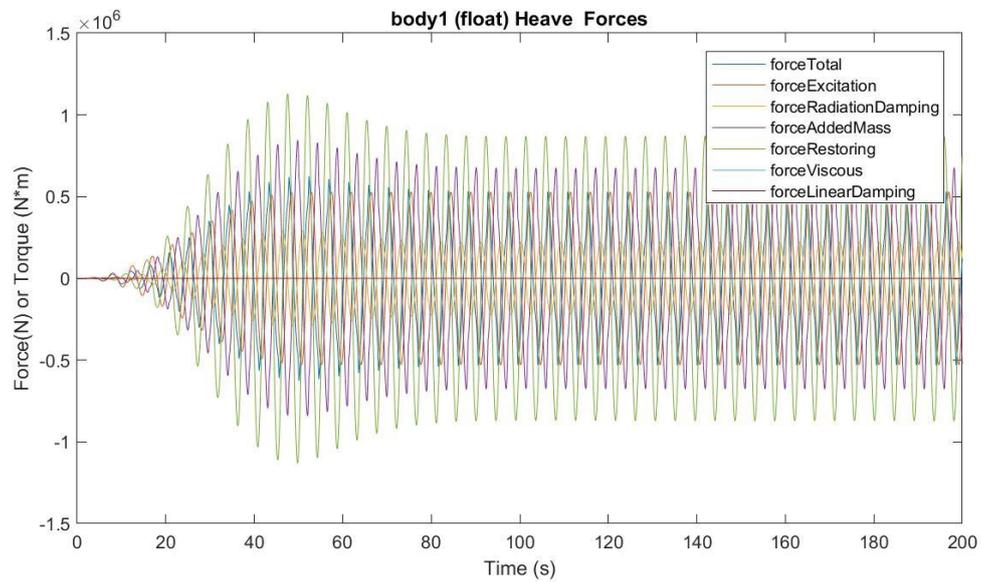
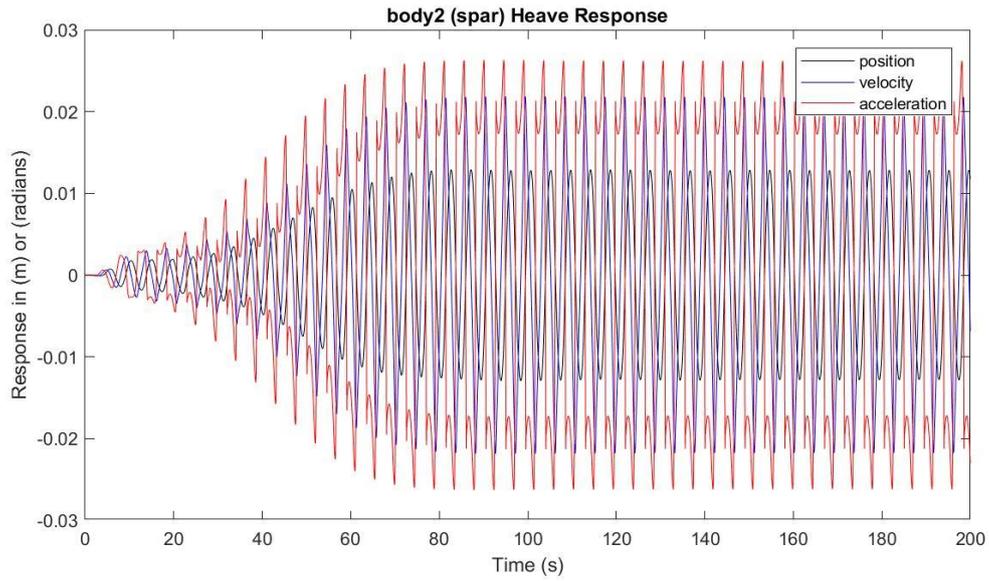
Presión media del acumulador de alta presión: 23.2818 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.7047 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.4038 m, 0.5576 m/s y 0.8432 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0129 m, 0.0218 m/s y 0.0263 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 5.5 \text{ s}$

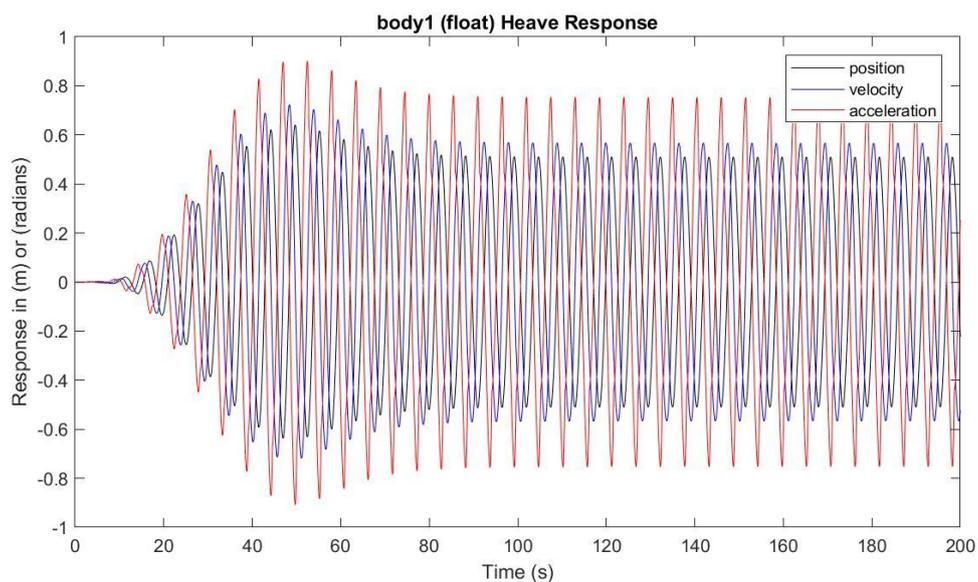
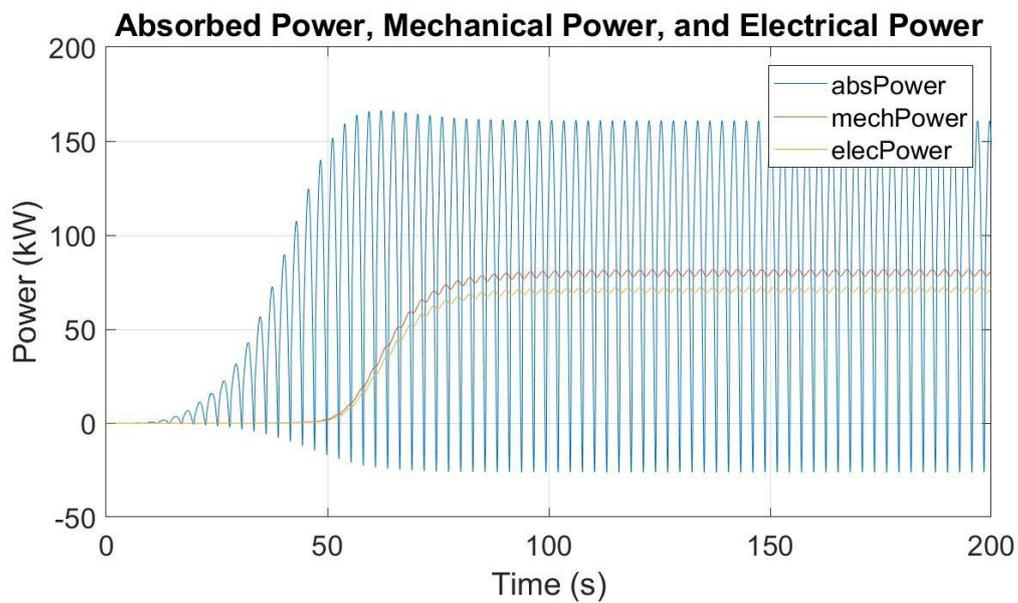
Potencia eléctrica media: 70.8483 kW

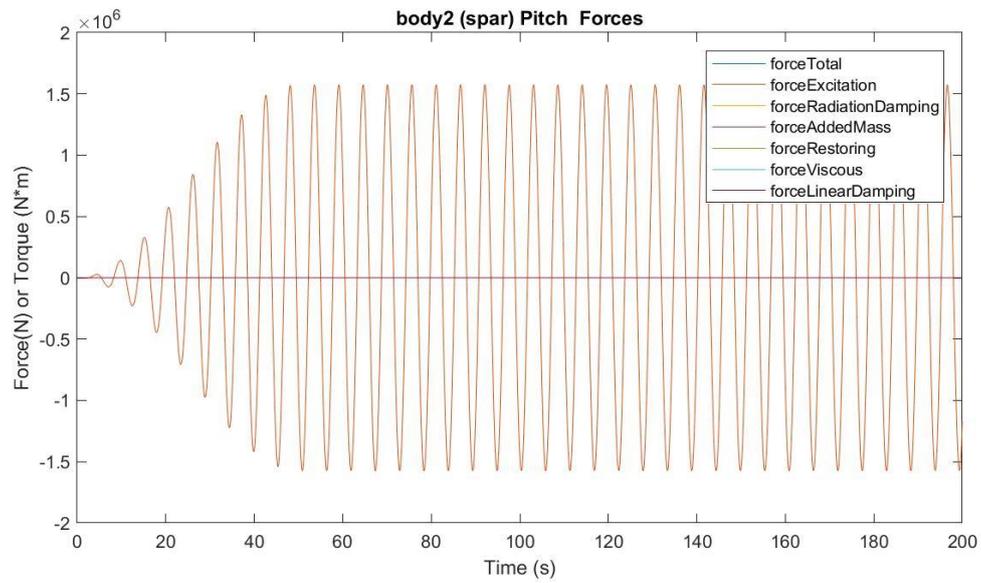
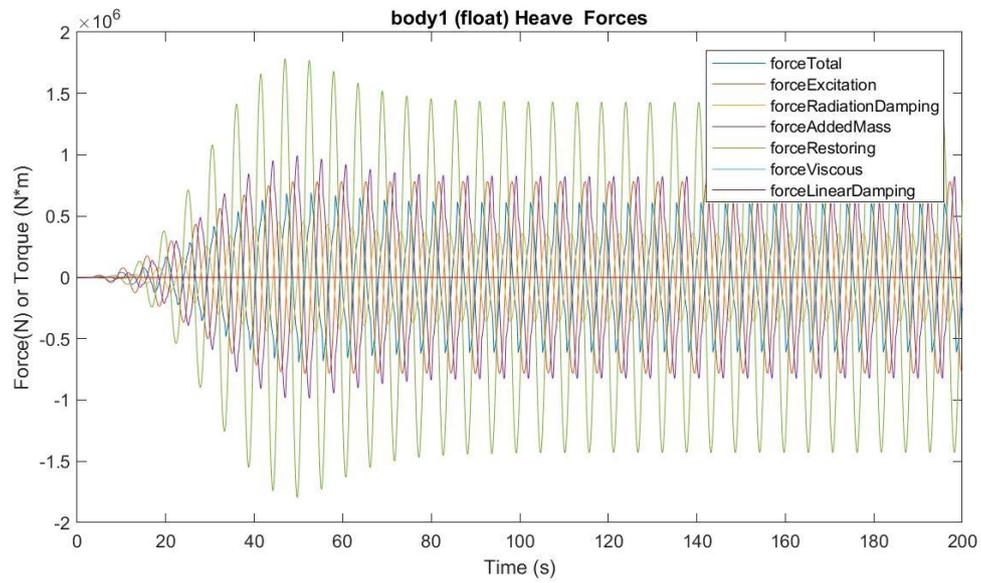
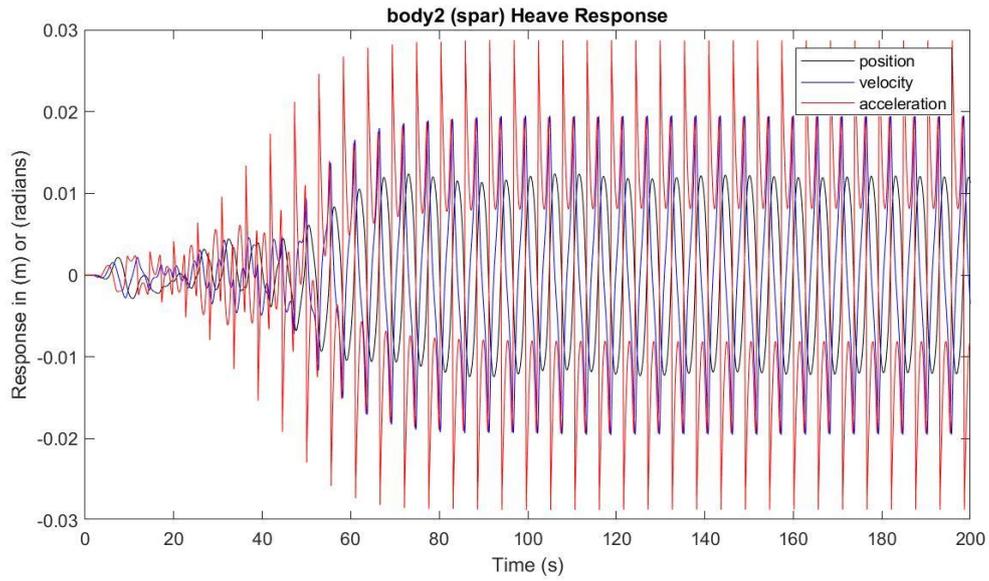
Presión media del acumulador de alta presión: 23.6336 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.1903 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.6405 m, 0.7238 m/s y 0.9011 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0124 m, 0.0195 m/s y 0.0288 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$
 $T_e = 6.5 \text{ s}$

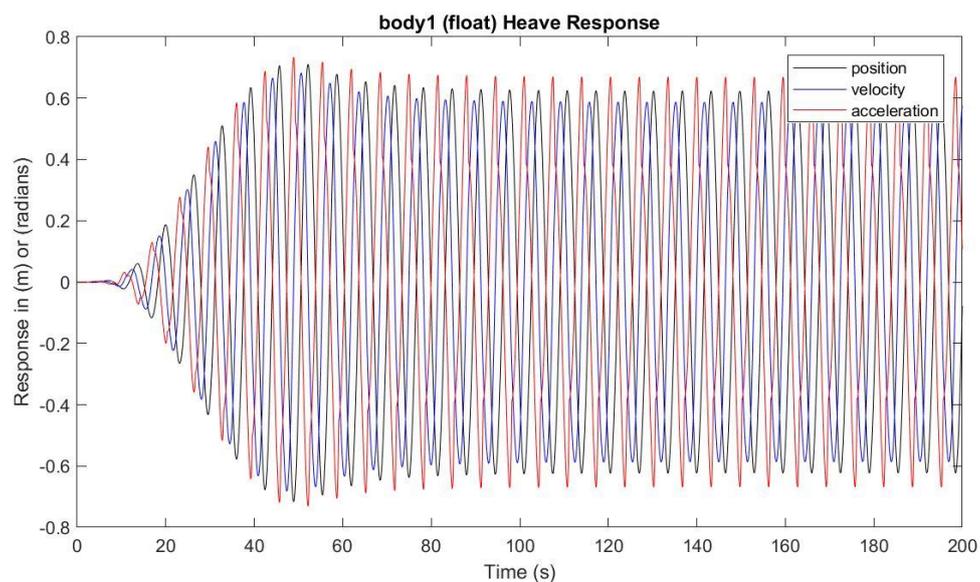
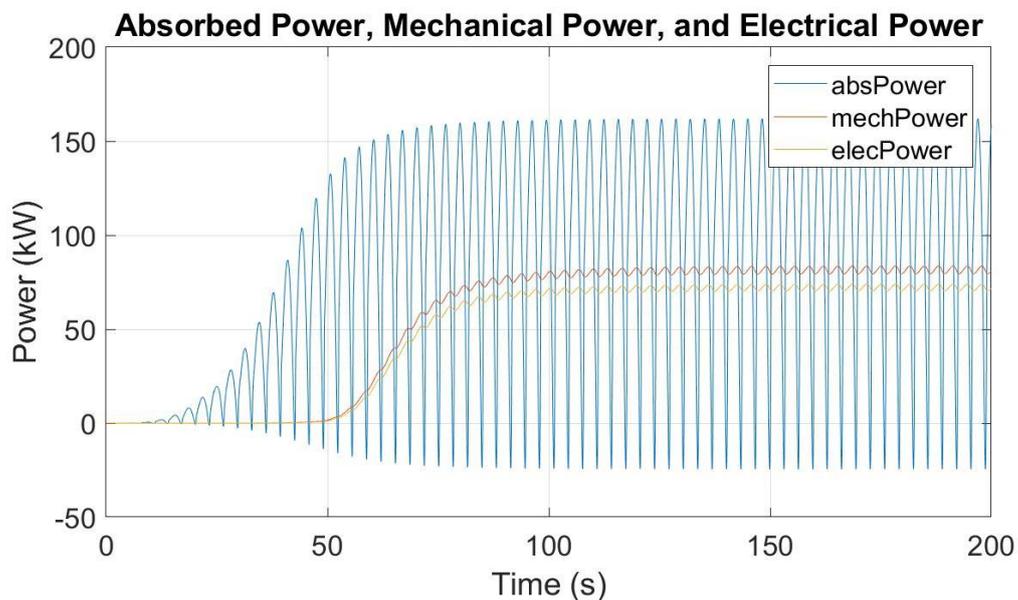
Potencia eléctrica media: 72.1339 kW

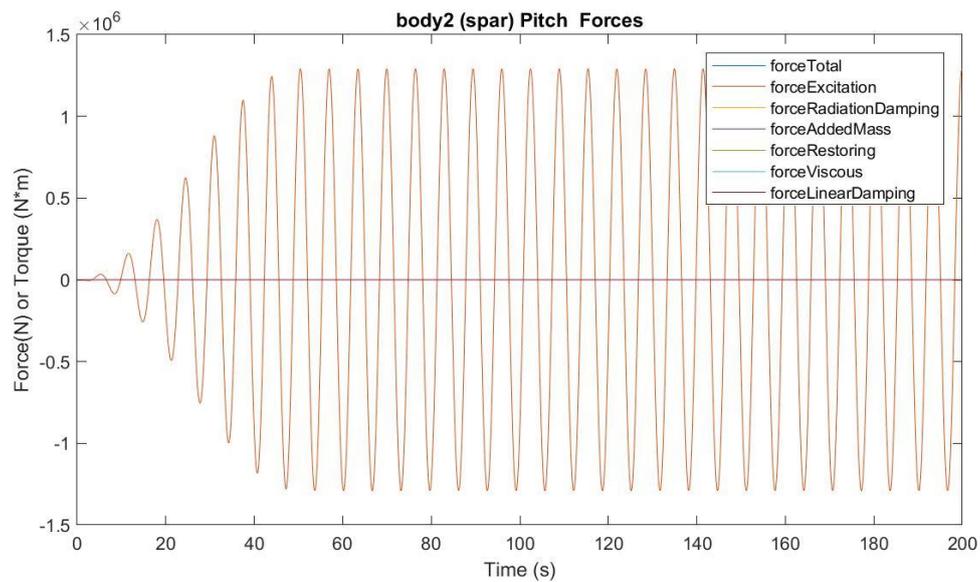
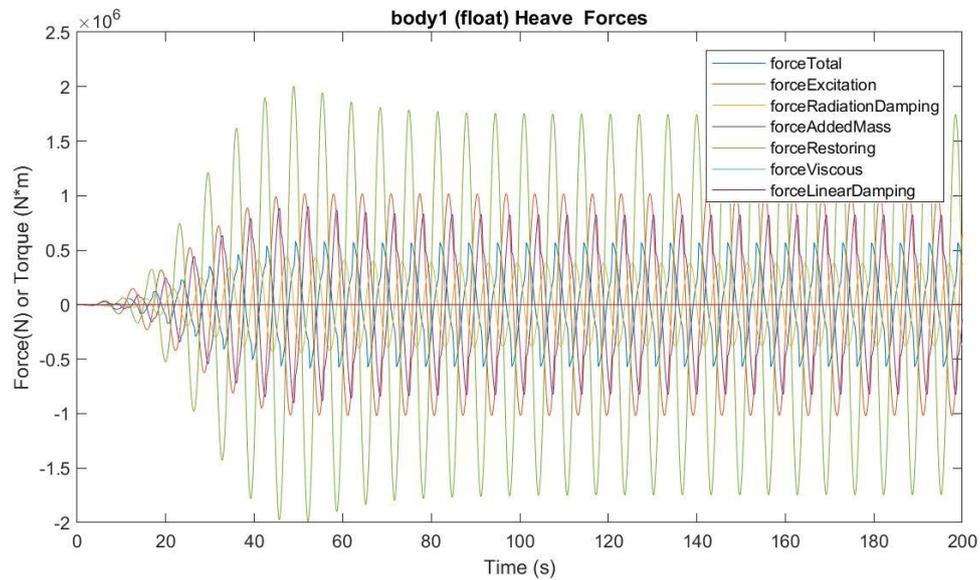
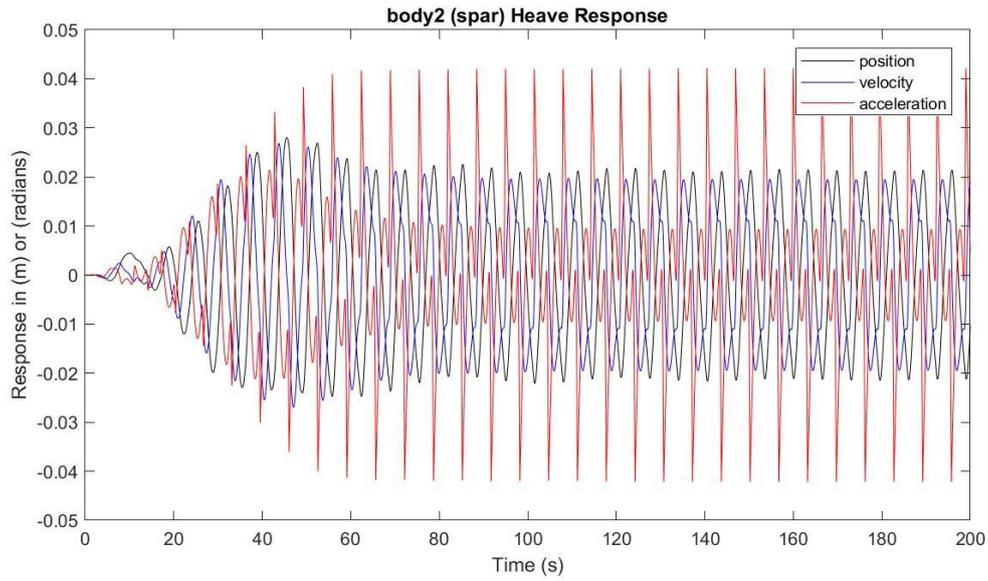
Presión media del acumulador de alta presión: 23.6513 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.1670 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.7103 m, 0.6819 m/s y 0.7337 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0280 m, 0.0268 m/s y 0.0422 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

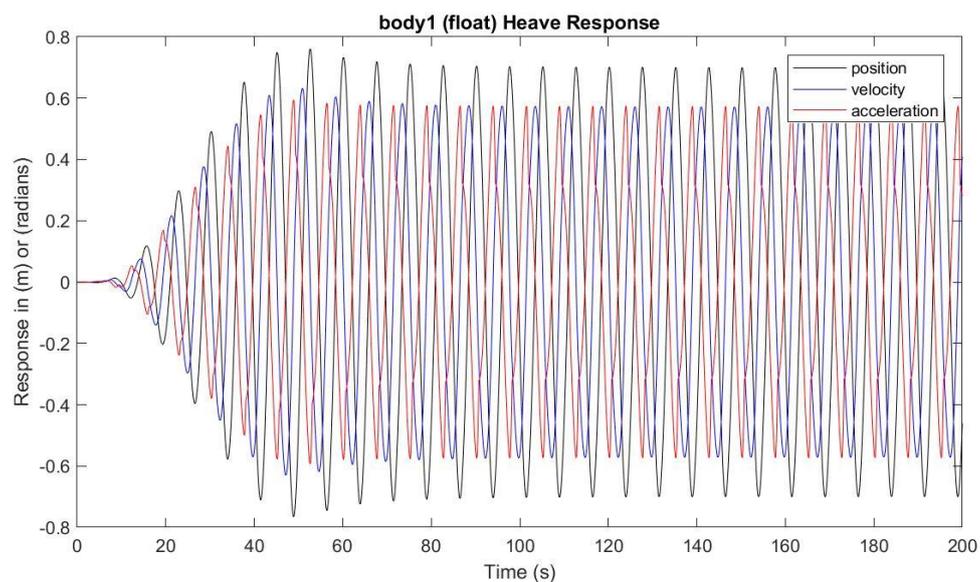
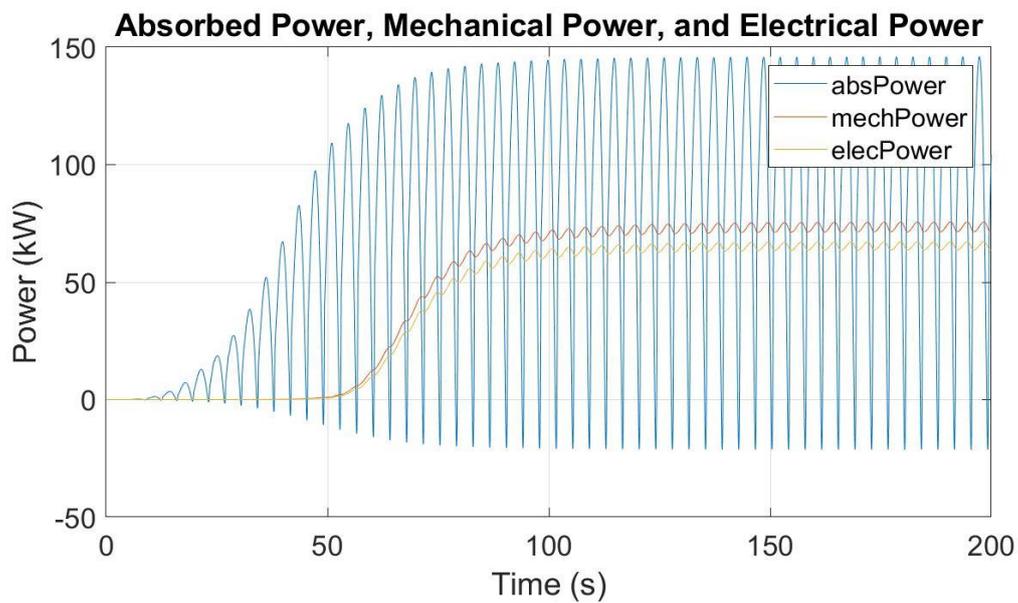
Potencia eléctrica media: 65.4092 kW

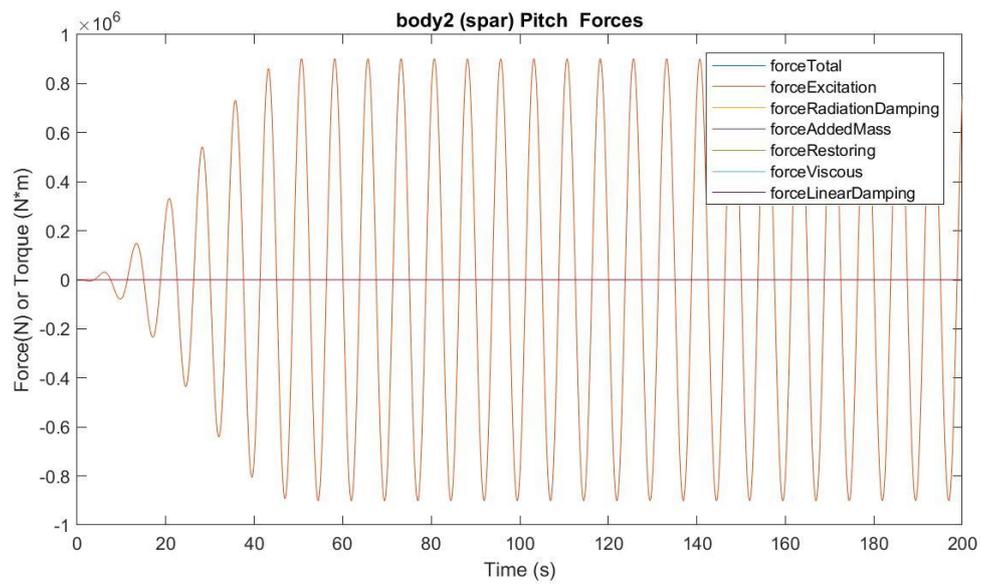
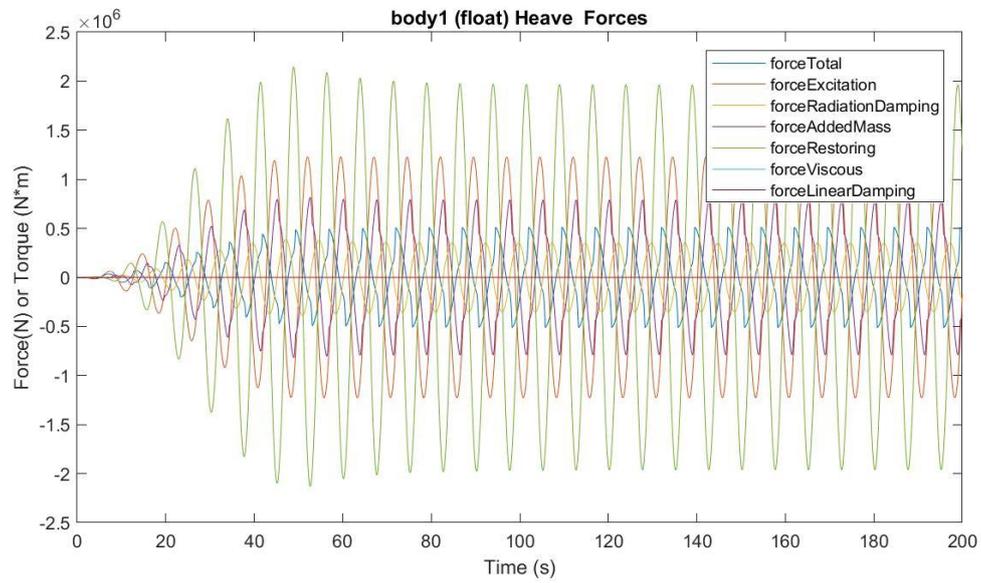
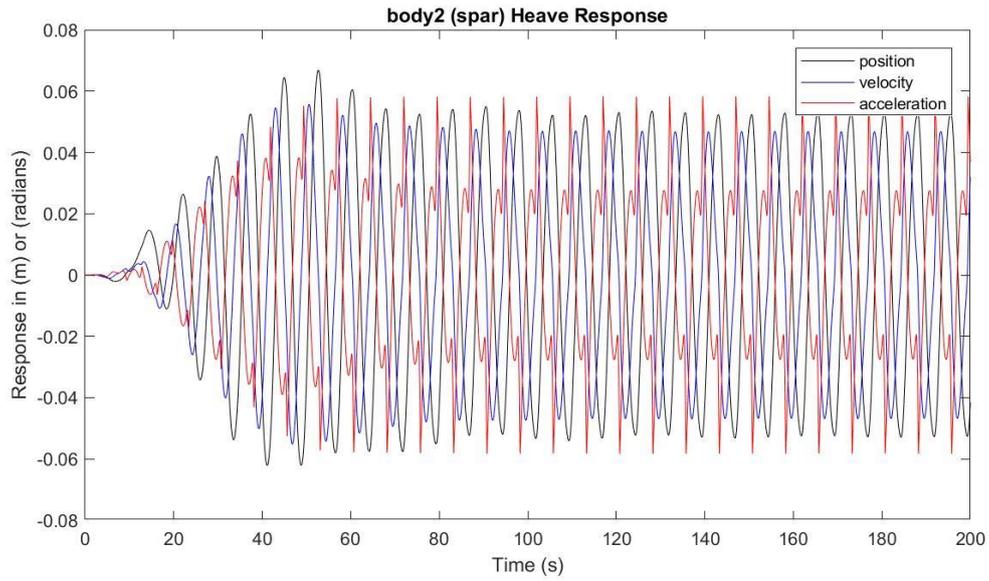
Presión media del acumulador de alta presión: 23.5616 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.2954 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.7604 m, 0.6322 m/s y 0.5947 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0668 m, 0.0557 m/s y 0.0583 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 8.5 \text{ s}$

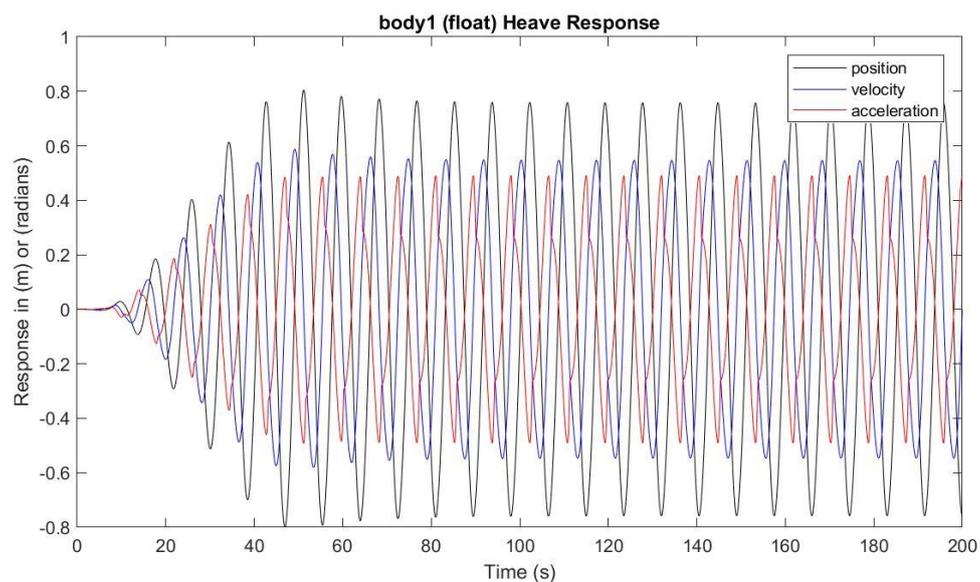
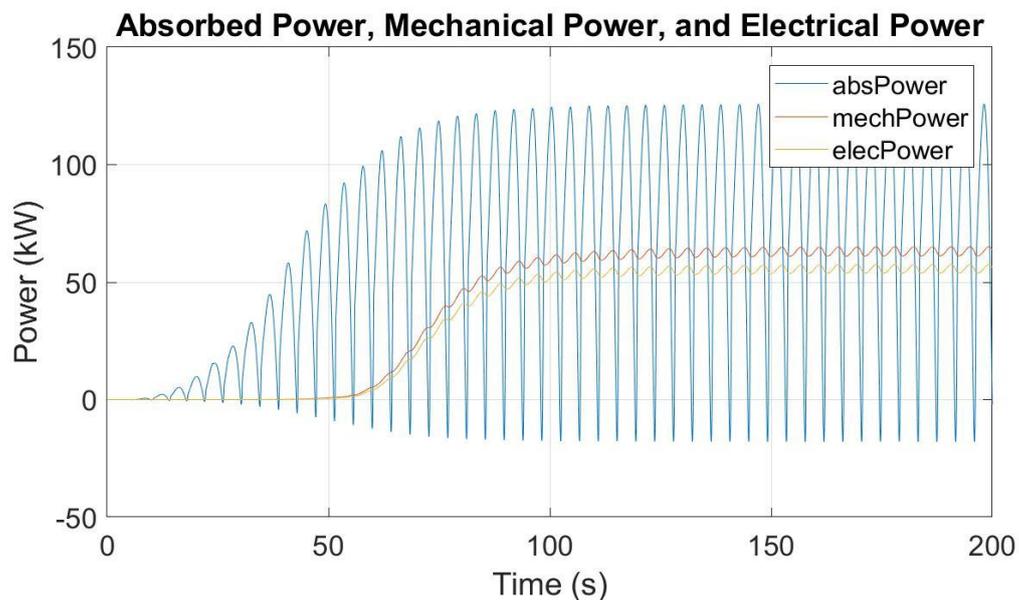
Potencia eléctrica media: 55.6631 kW

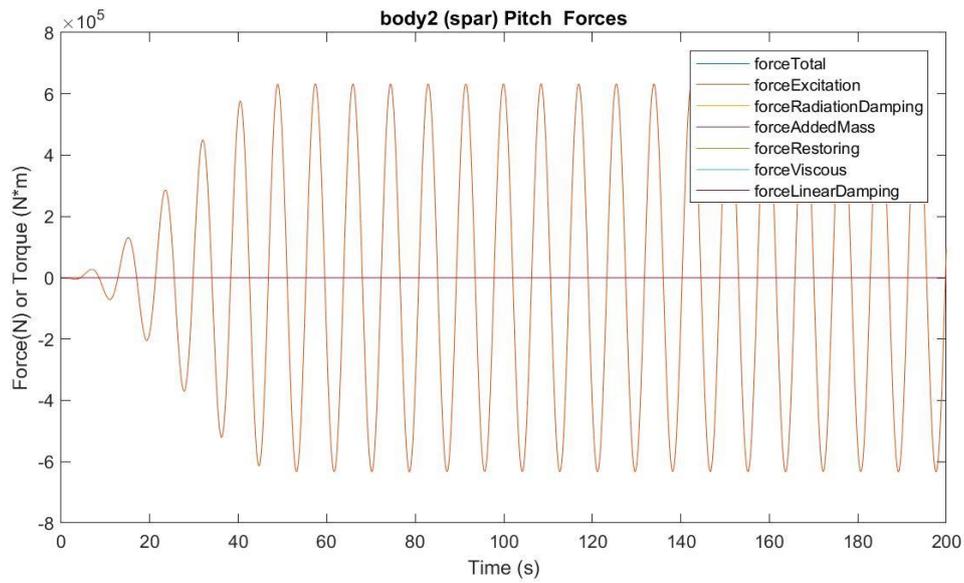
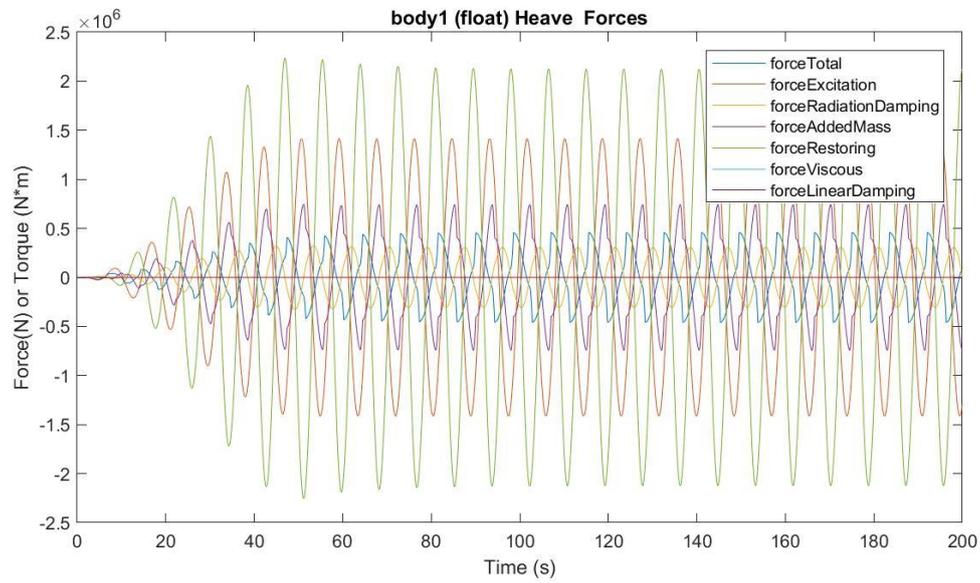
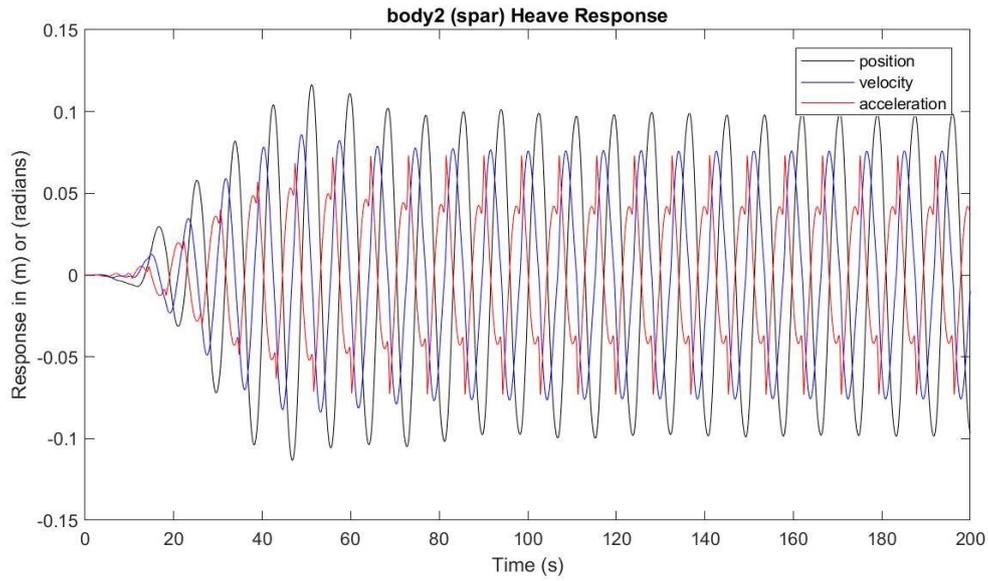
Presión media del acumulador de alta presión: 23.4384 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.4742 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8047 m, 0.5882 m/s y 0.4911 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1165 m, 0.0859 m/s y 0.0732 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$ $T_e = 9.5 \text{ s}$

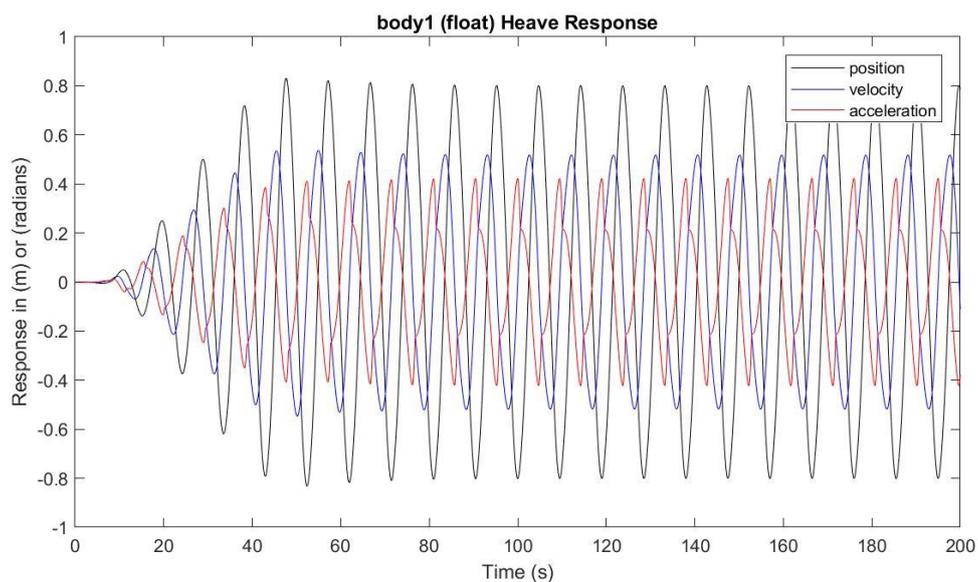
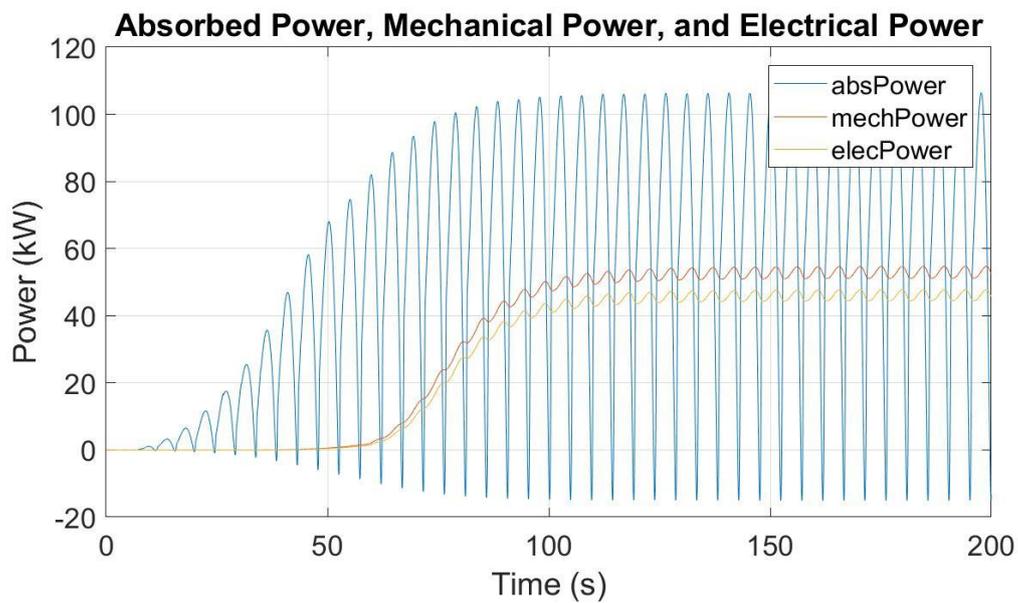
Potencia eléctrica media: 46.0901 kW

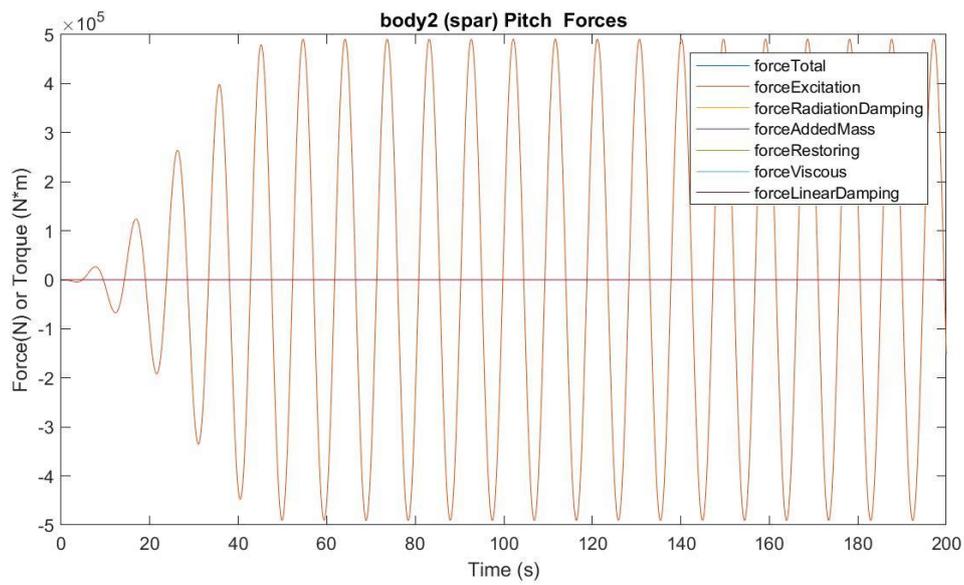
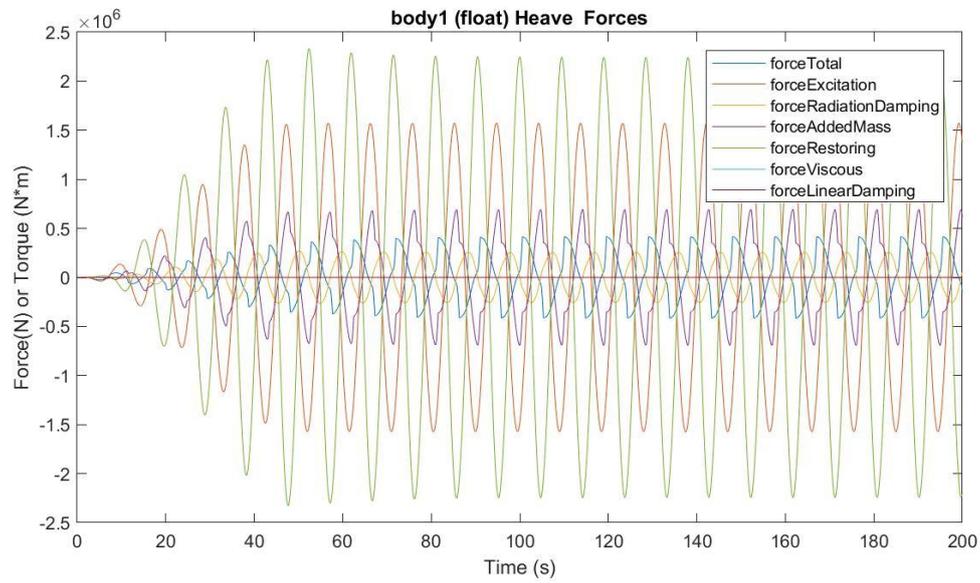
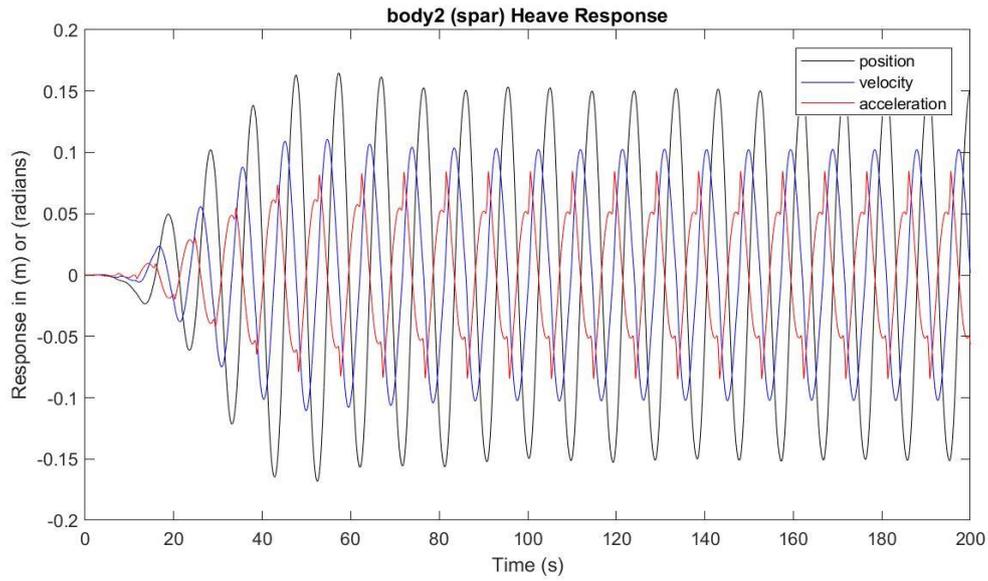
Presión media del acumulador de alta presión: 23.3108 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.6639 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8306 m, 0.5371 m/s y 0.4231 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1648 m, 0.1108 m/s y 0.0847 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

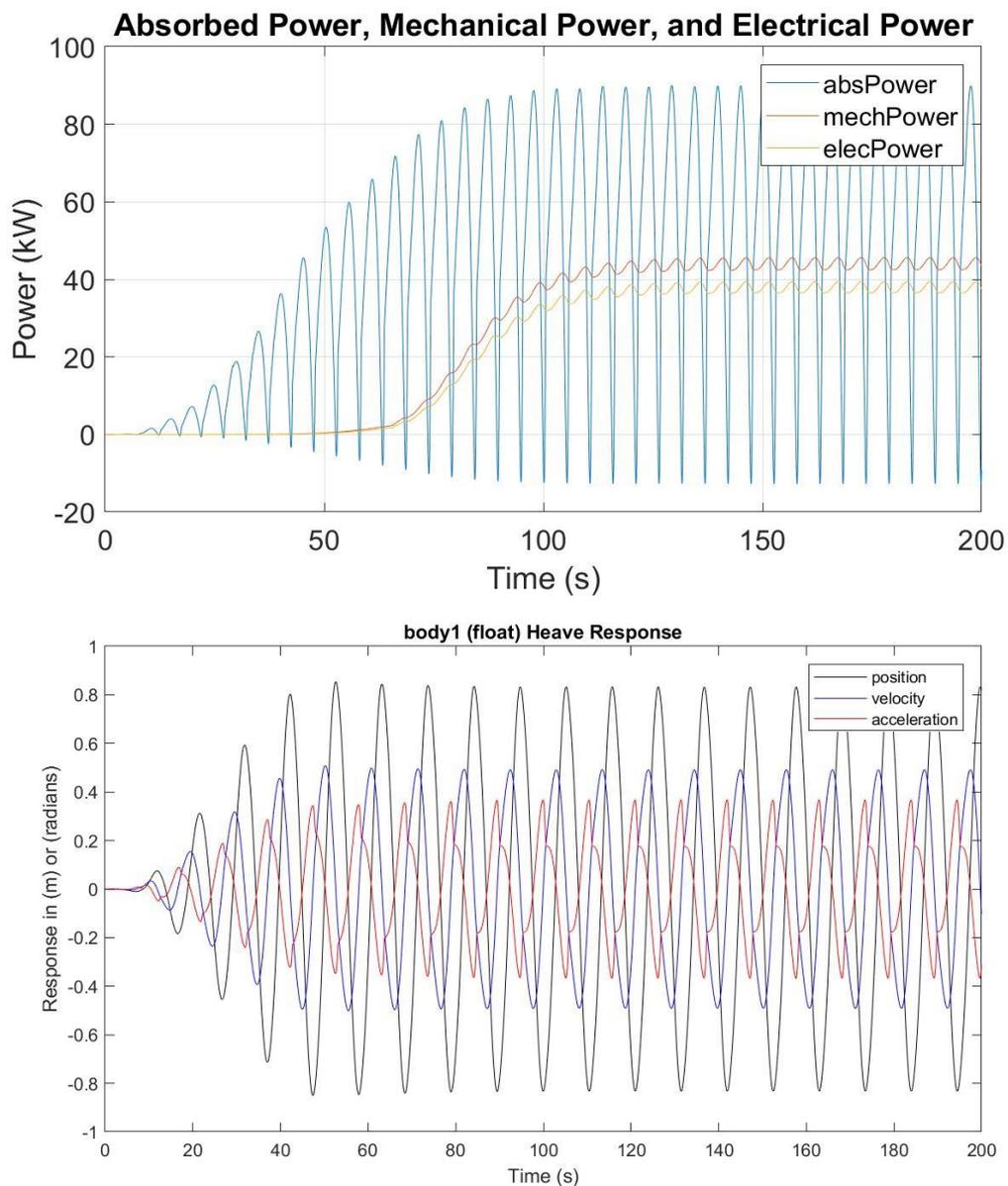
Potencia eléctrica media: 37.9012 kW

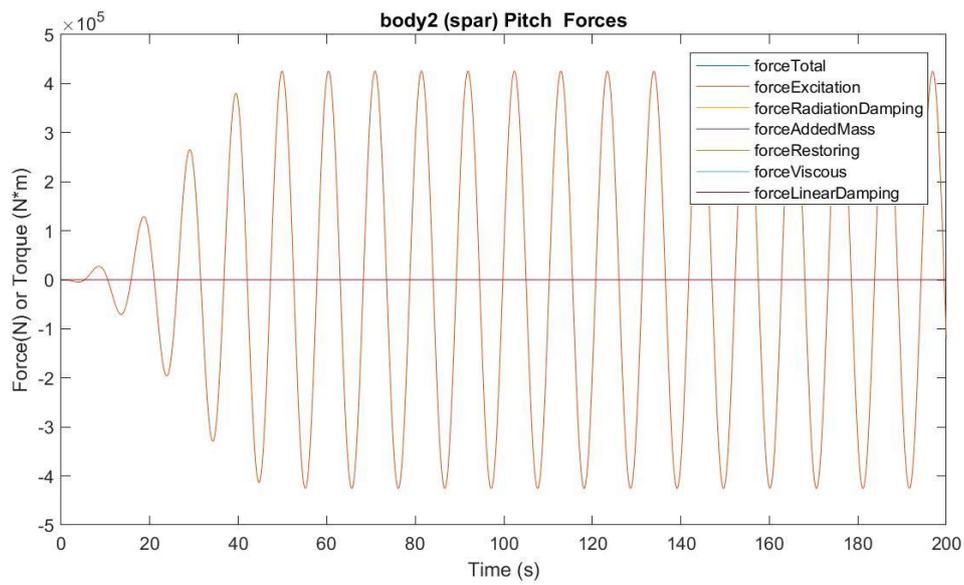
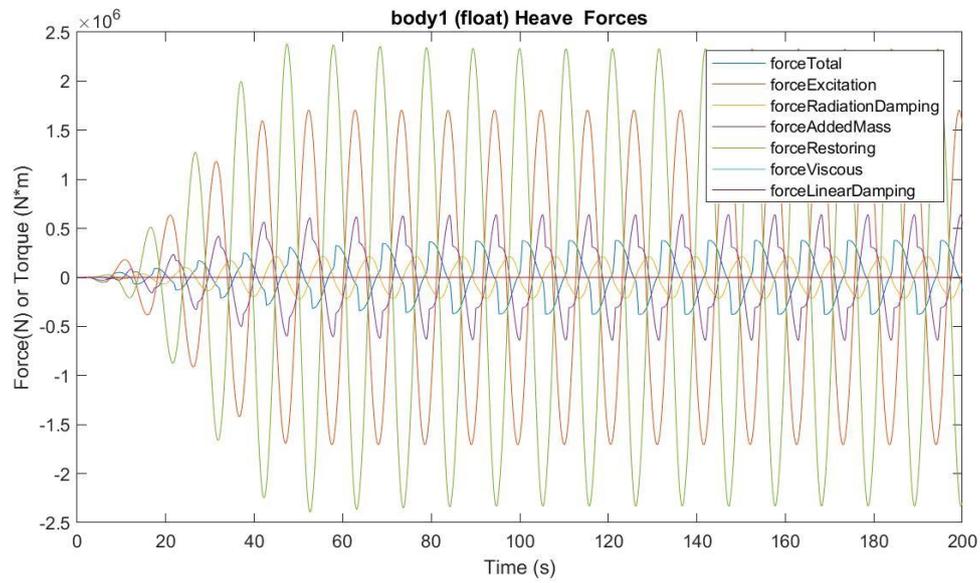
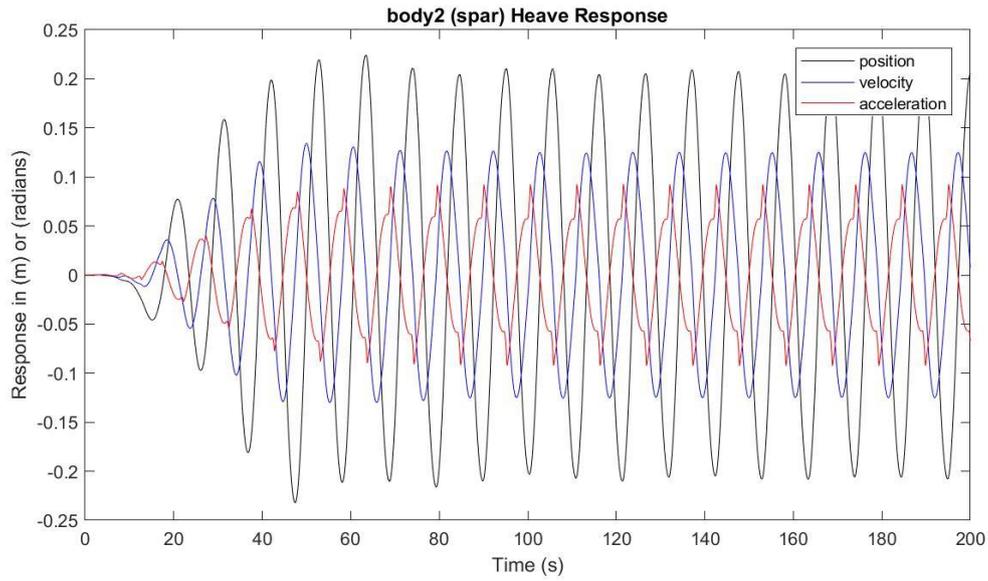
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1920 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.8449 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8539 m, 0.5084 m/s y 0.3680 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2242 m, 0.1342 m/s y 0.0925 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

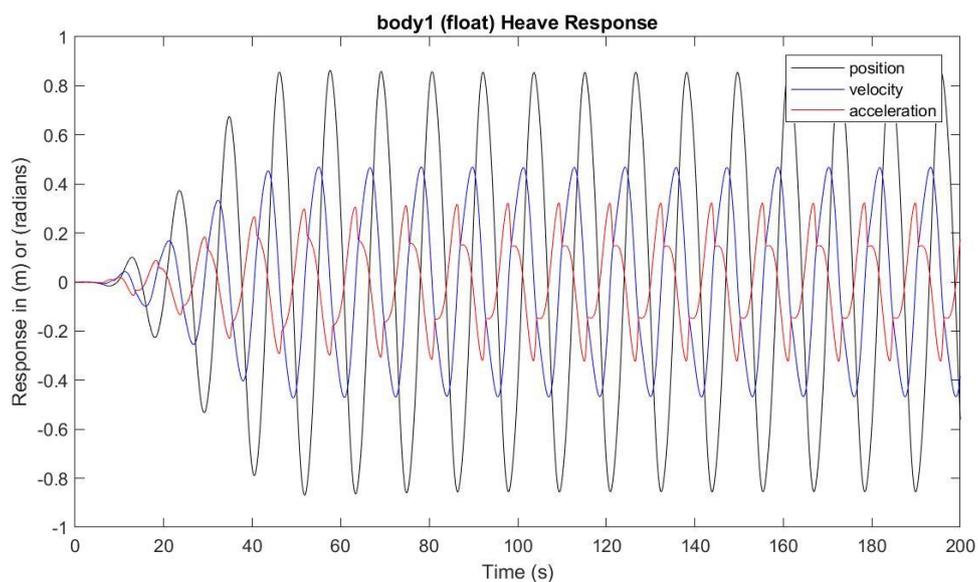
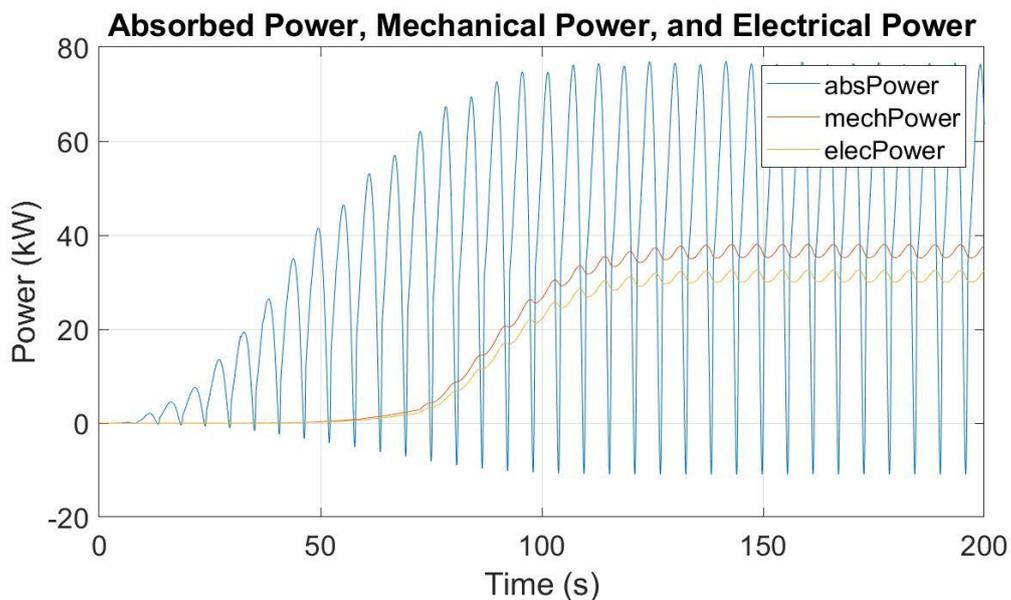
Potencia eléctrica media: 31.1417 kW

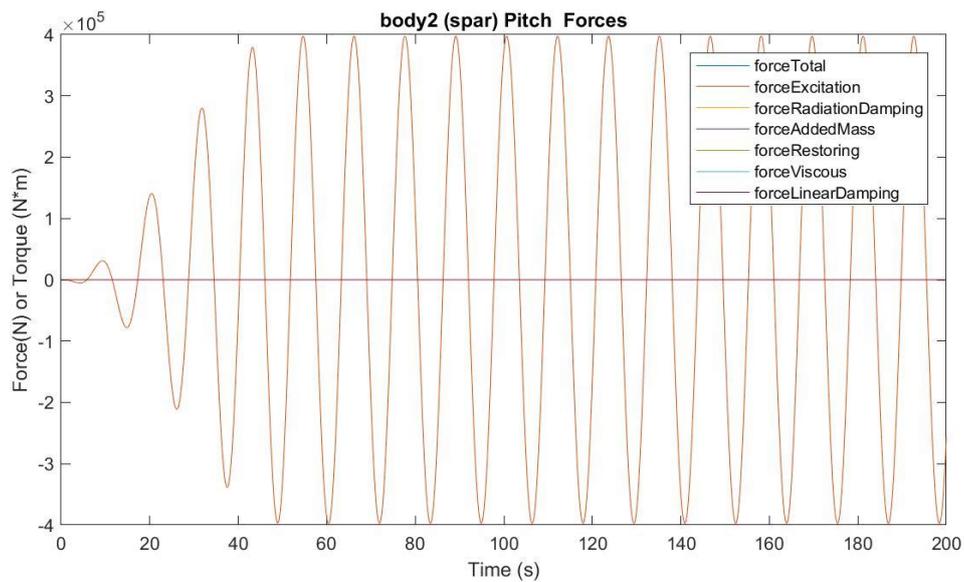
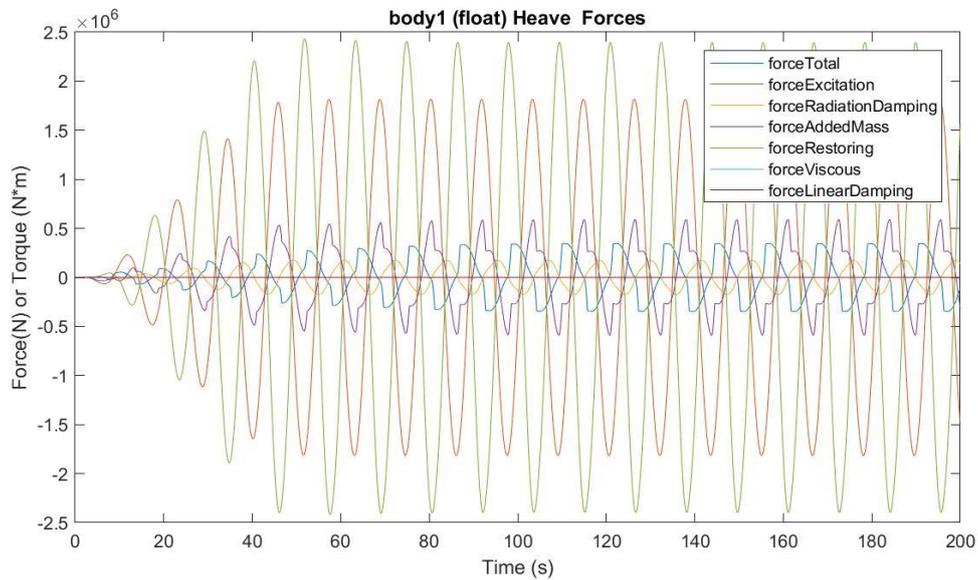
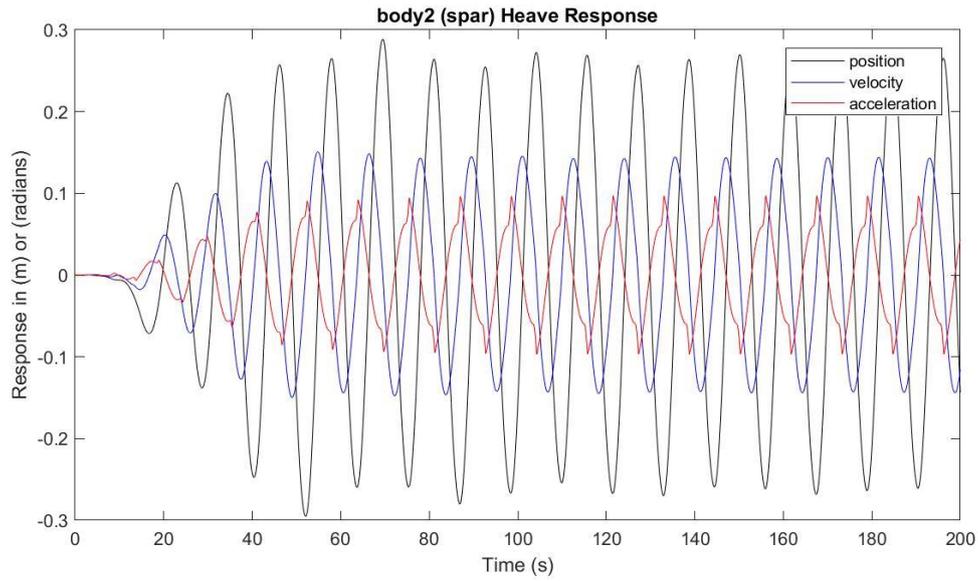
Presión media del acumulador de alta presión: 23.0857 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.0104 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8631 m, 0.4694 m/s y 0.3234 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2885 m, 0.1509 m/s y 0.0971 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

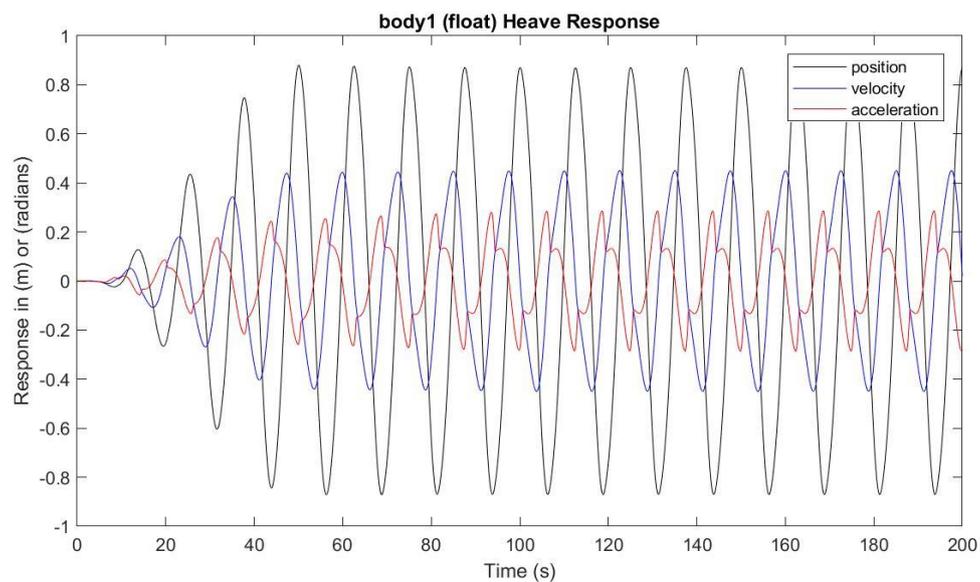
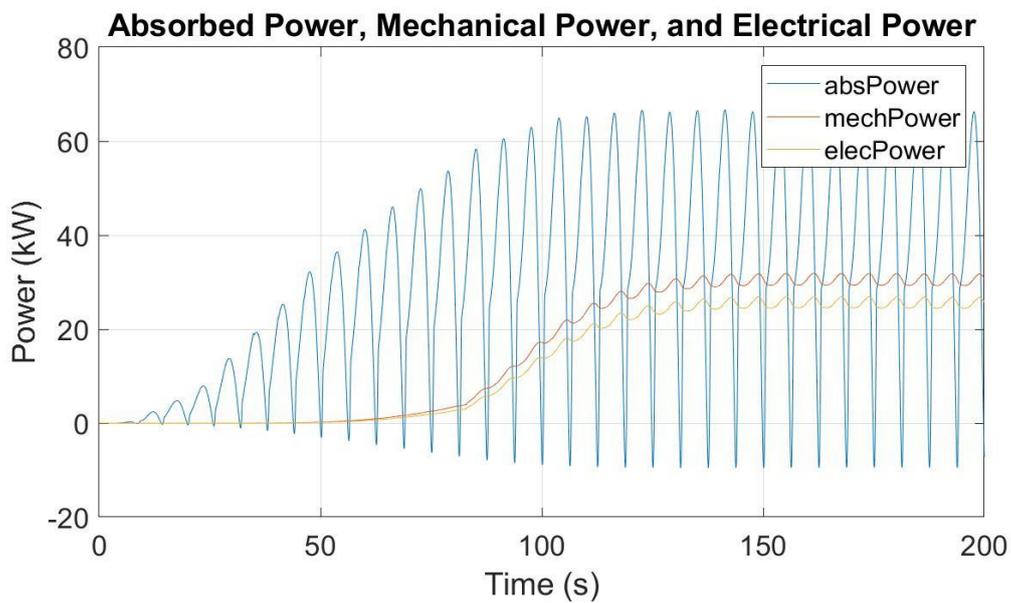
Potencia eléctrica media: 25.5302 kW

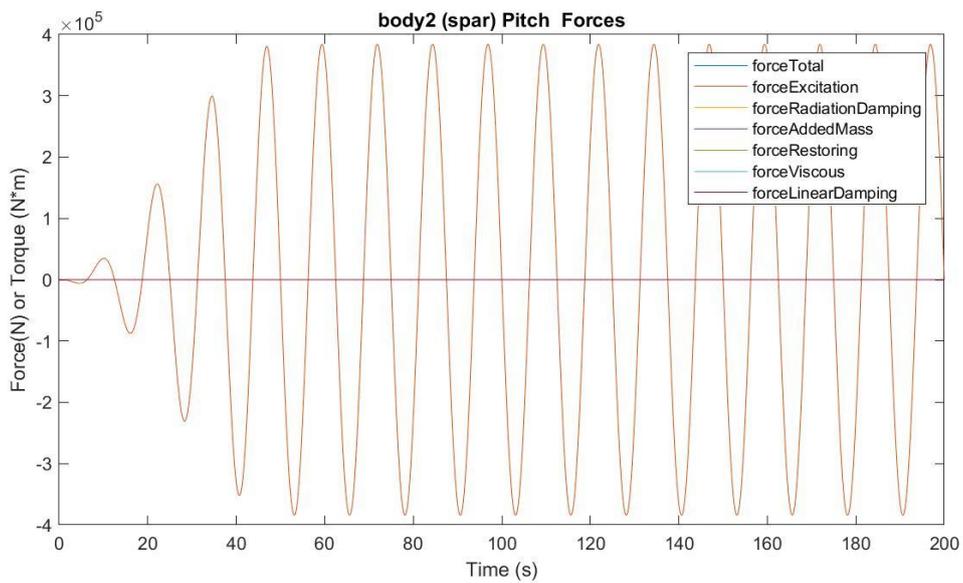
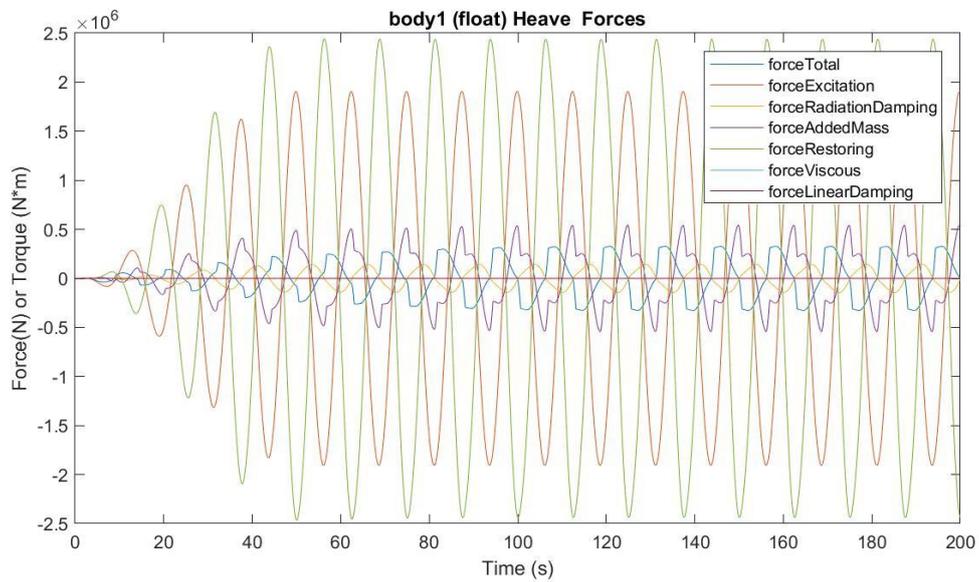
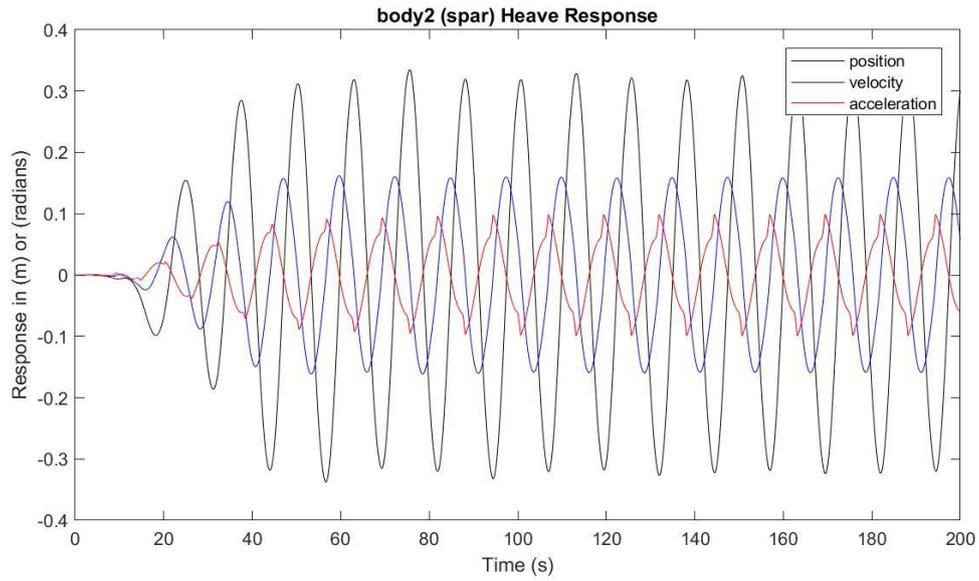
Presión media del acumulador de alta presión: 22.9959 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.1533 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8802 m, 0.4505 m/s y 0.2866 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3349 m, 0.1622 m/s y 0.0991 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

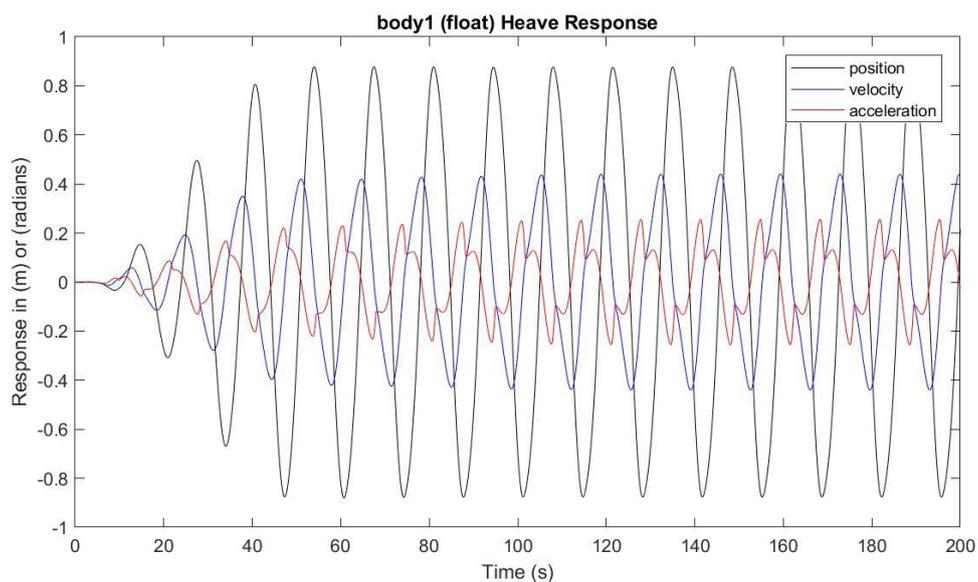
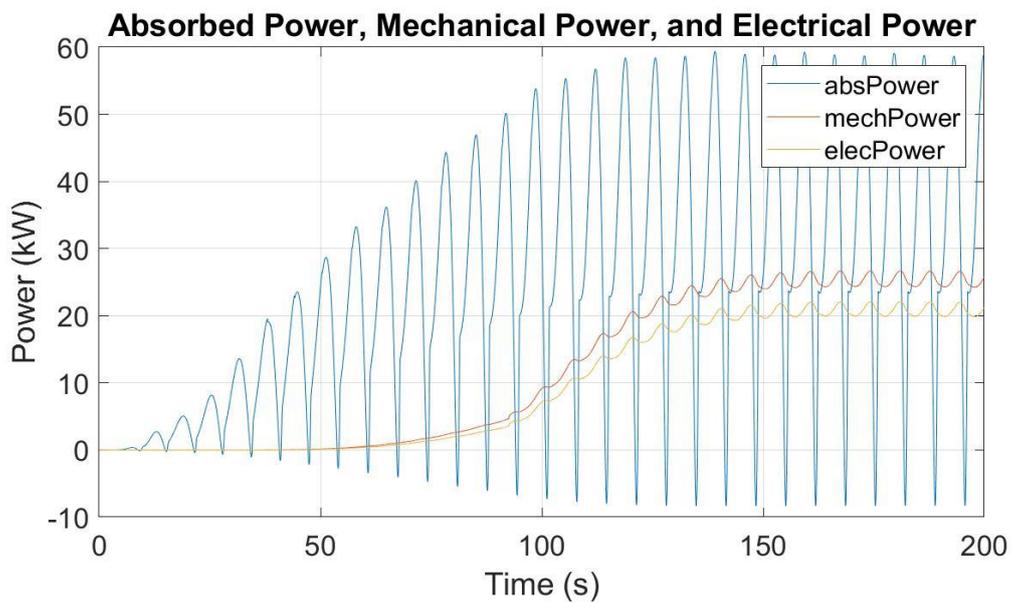
Potencia eléctrica media: 20.8183 kW

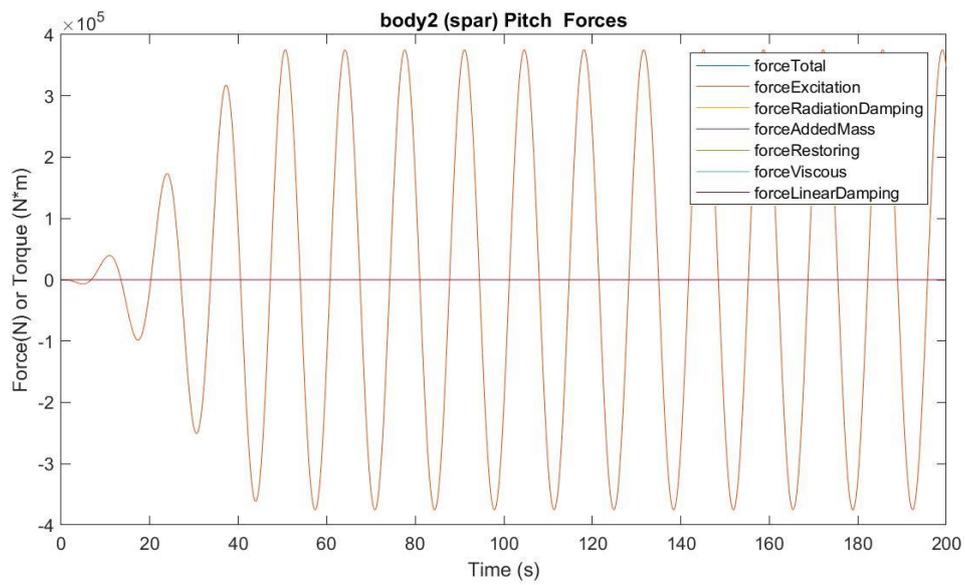
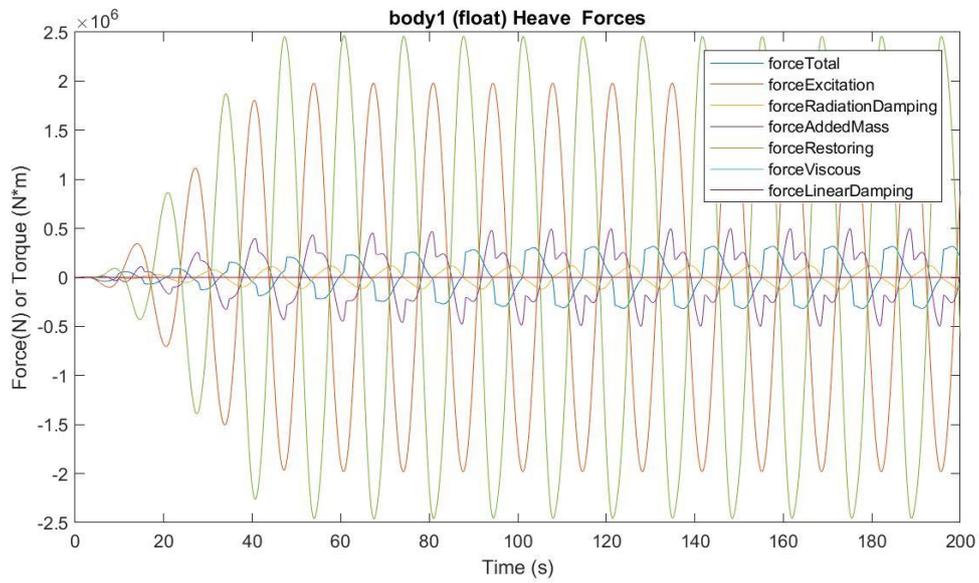
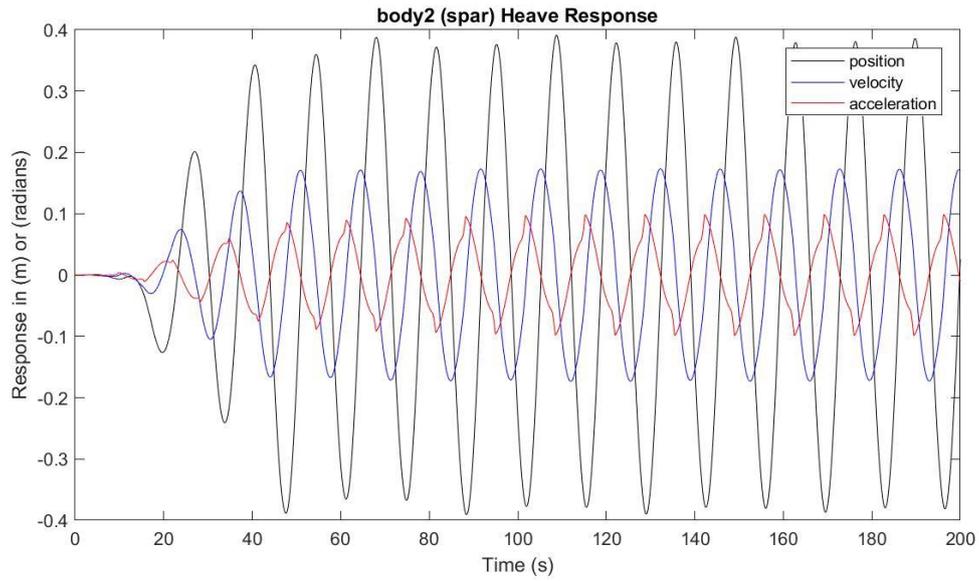
Presión media del acumulador de alta presión: 22.9158 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.2829 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8787 m, 0.4407 m/s y 0.2558 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3914 m, 0.1733 m/s y 0.0991 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

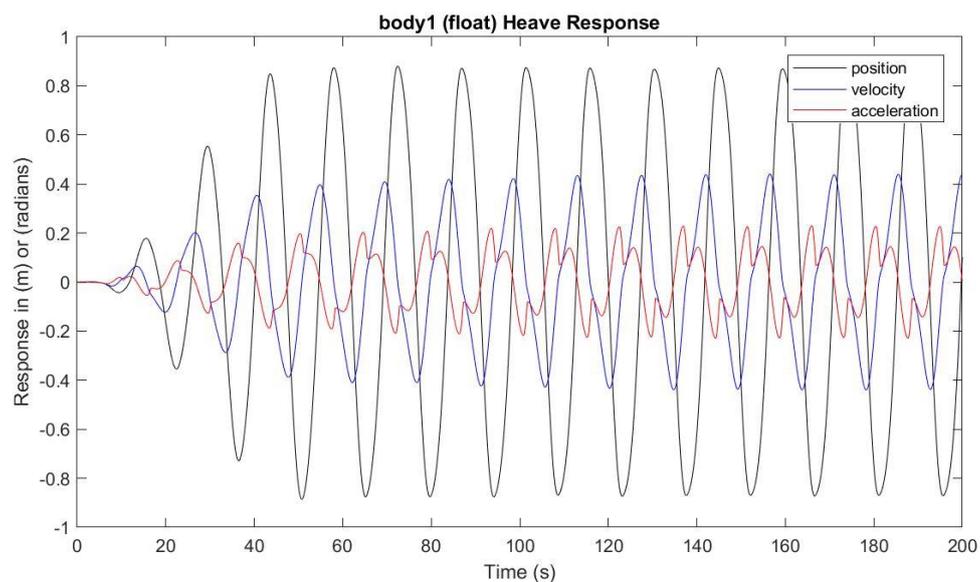
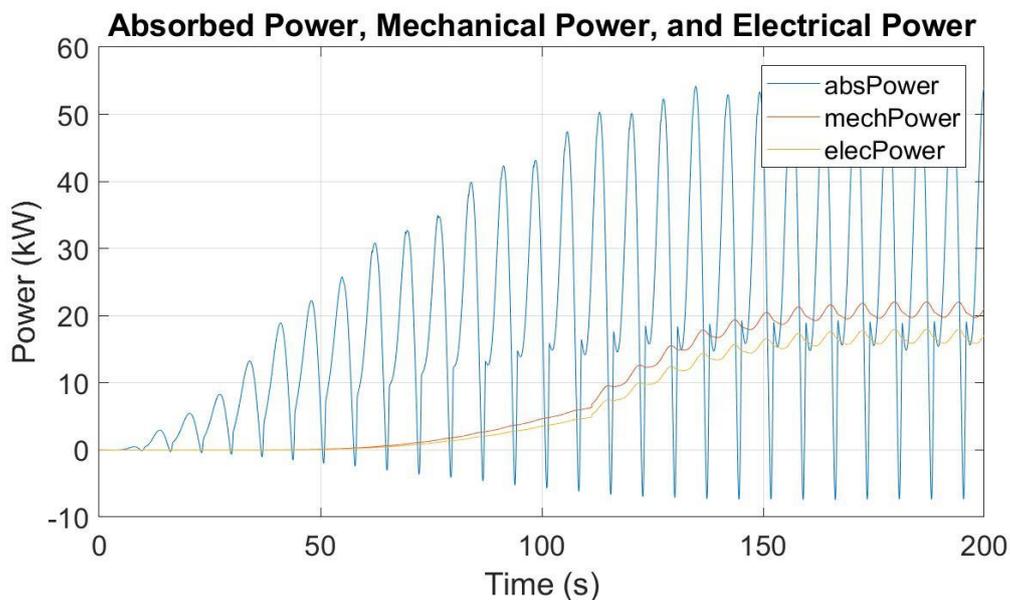
Potencia eléctrica media: 16.6378 kW

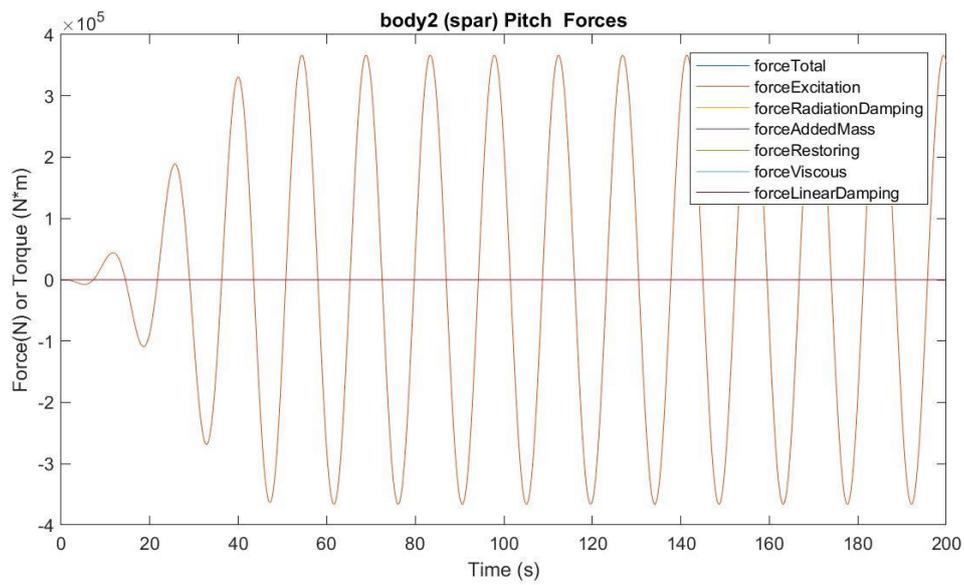
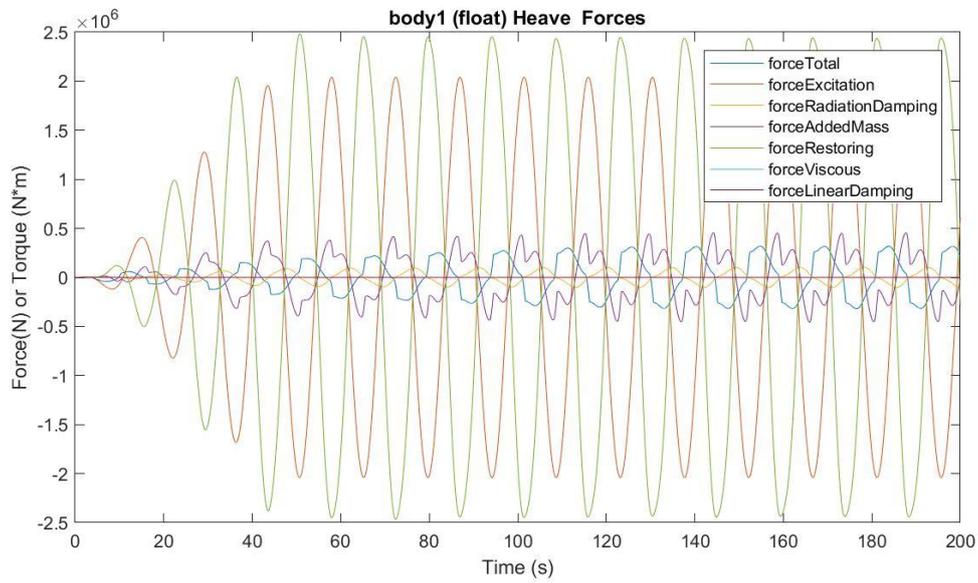
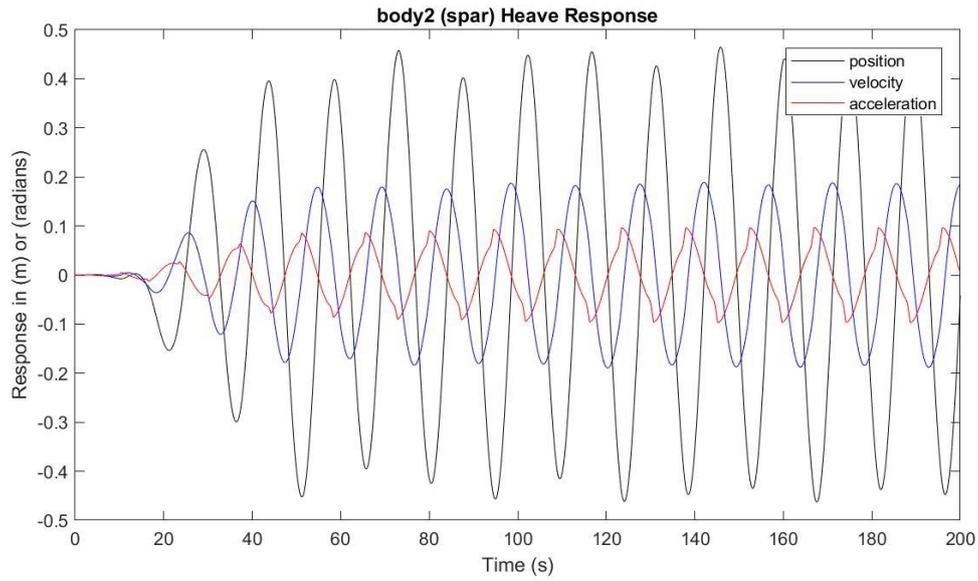
Presión media del acumulador de alta presión: 22.8414 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.4050 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8804 m, 0.4404 m/s y 0.2297 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4648 m, 0.1891 m/s y 0.0974 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

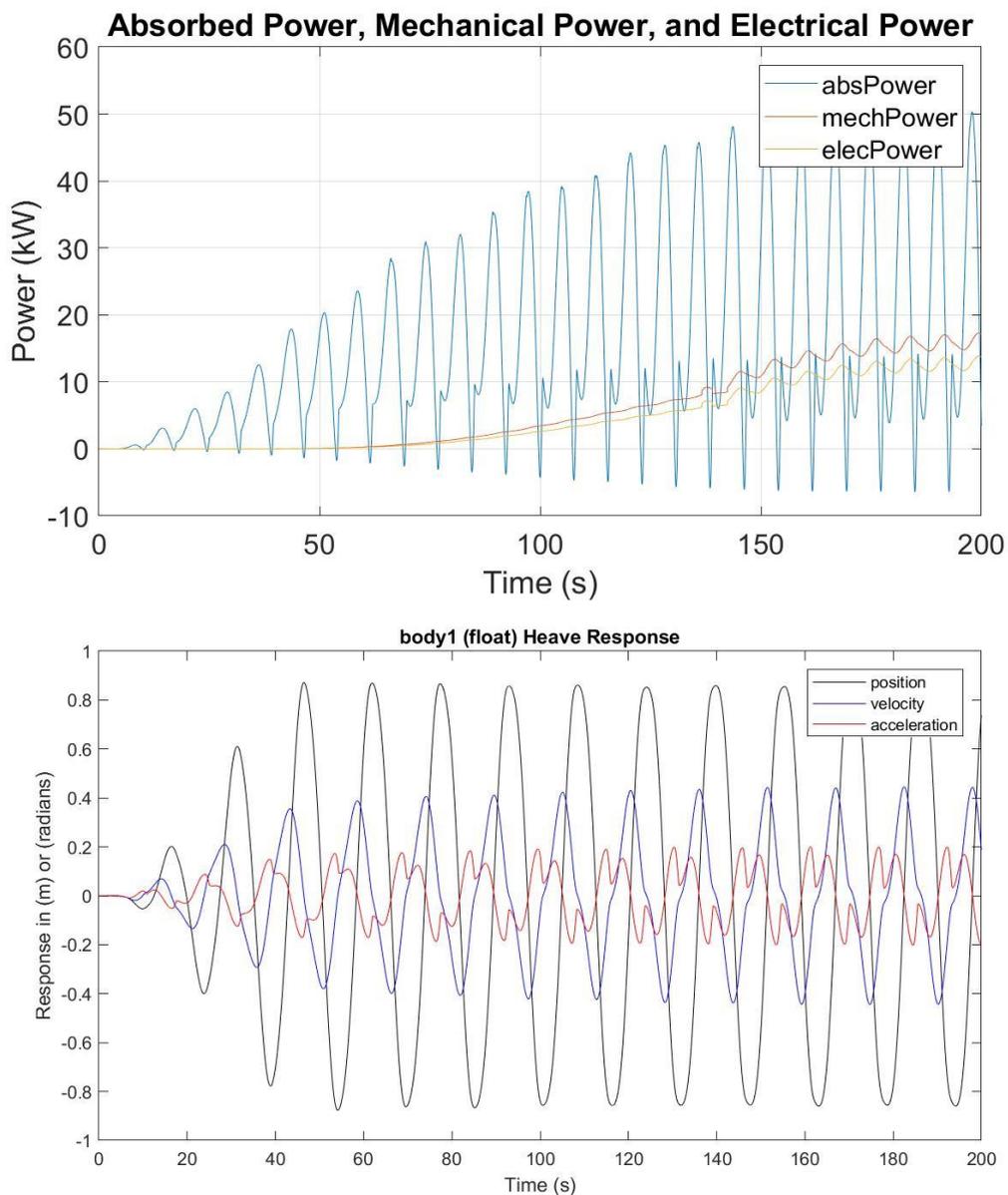
Potencia eléctrica media: 12.0637 kW

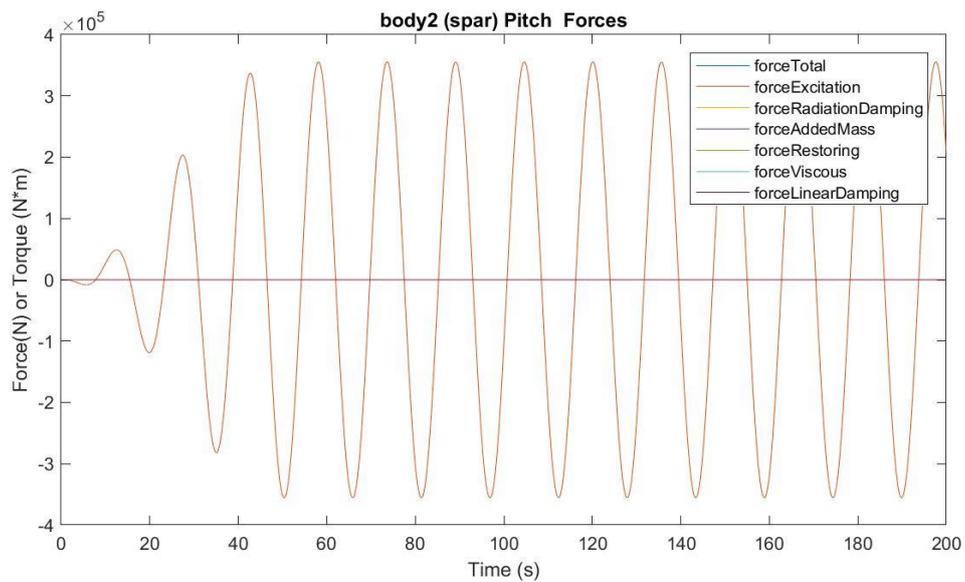
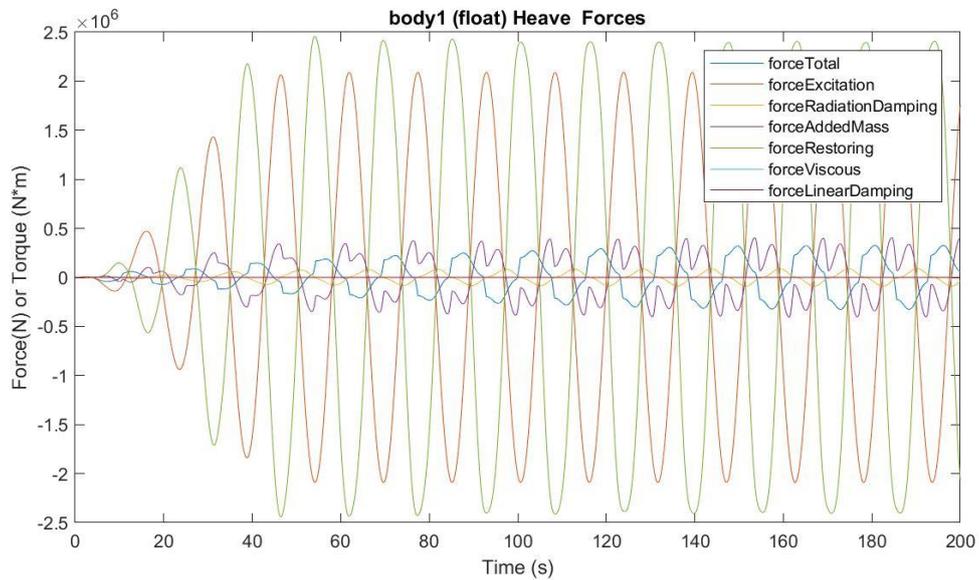
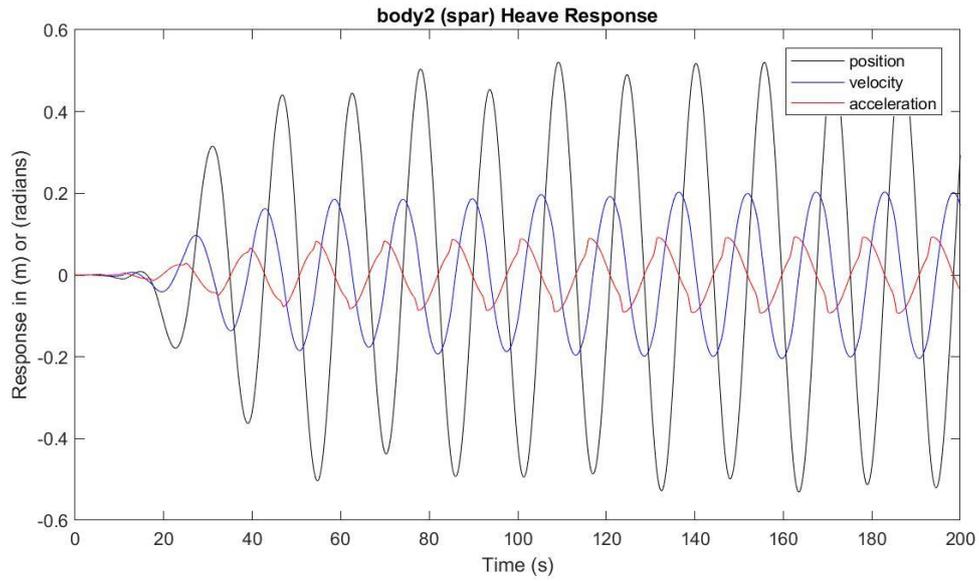
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7573 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.5449 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8718 m, 0.4454 m/s y 0.2004 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5290 m, 0.2030 m/s y 0.0930 m/s²





$H_s = 1.75 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

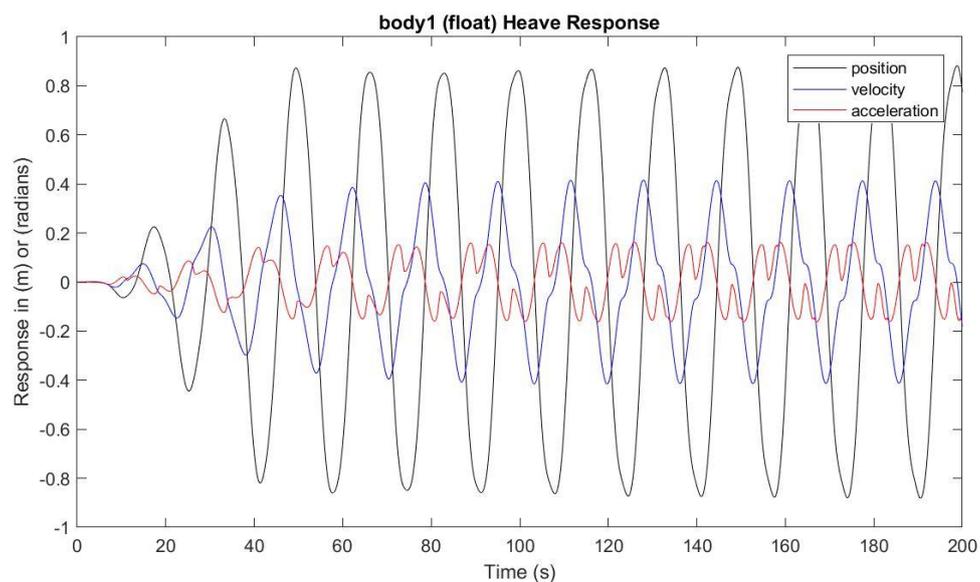
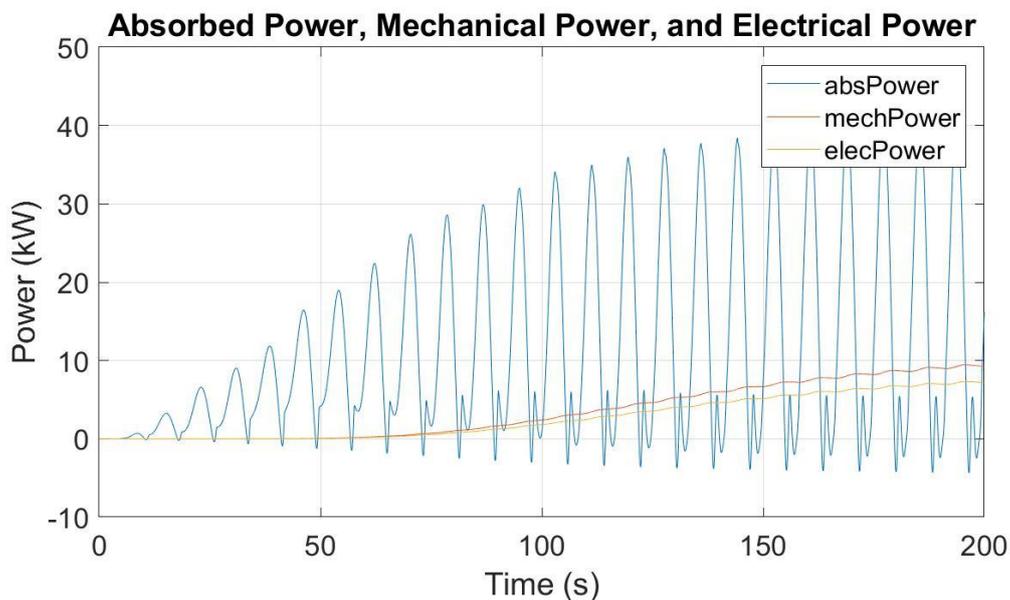
Potencia eléctrica media: 6.6357 kW

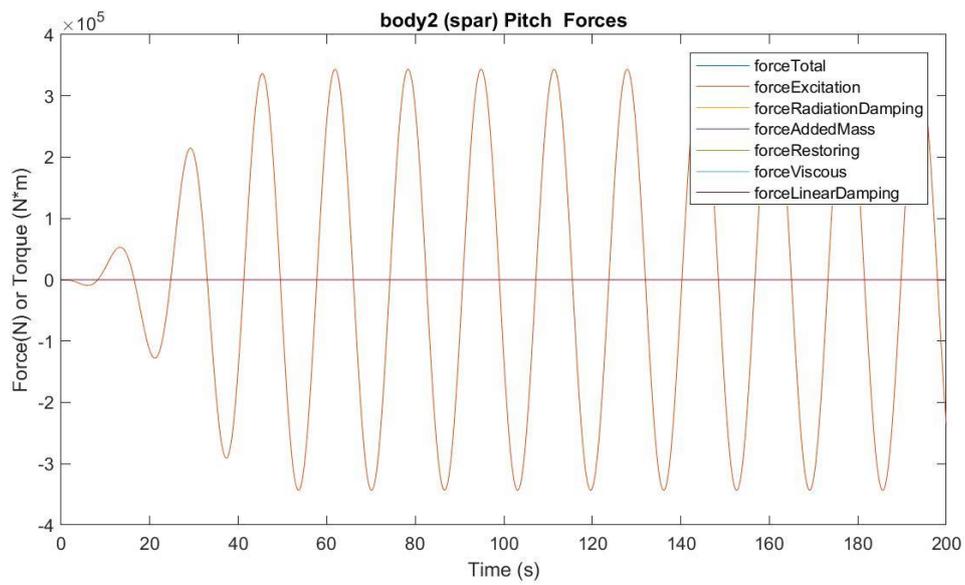
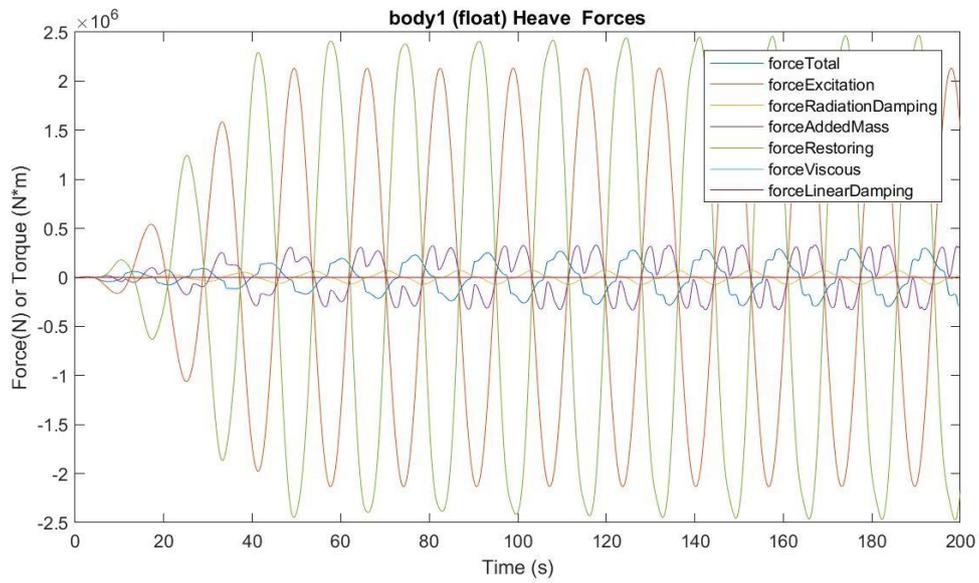
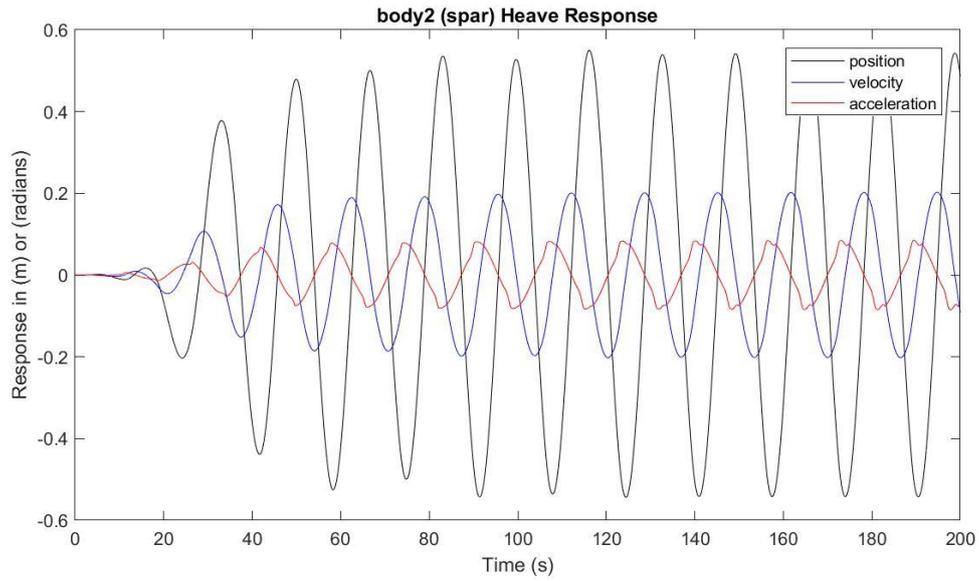
Presión media del acumulador de alta presión: 22.5113 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.9622 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8822 m, 0.4158 m/s y 0.1634 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5499 m, 0.2024 m/s y 0.0847 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 5.5 \text{ s}$

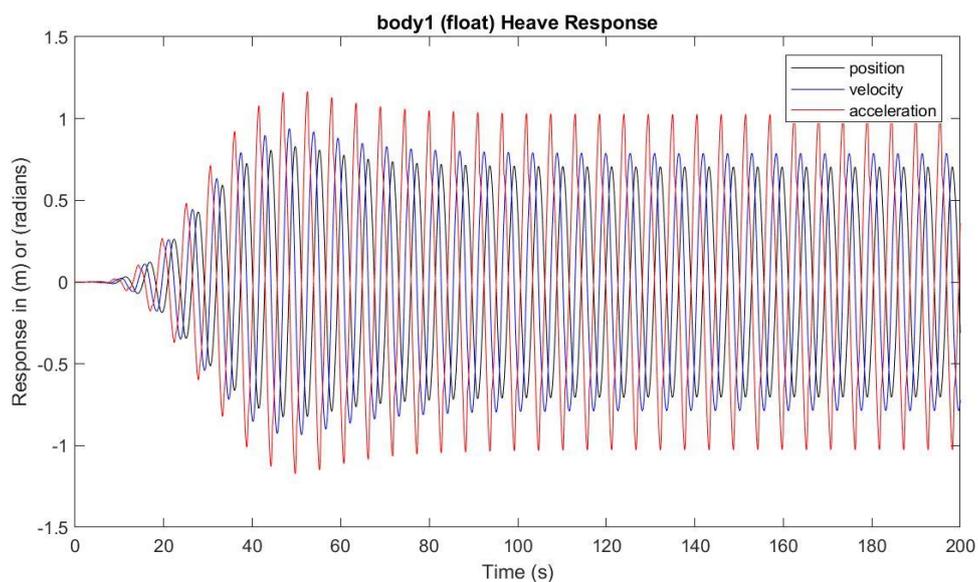
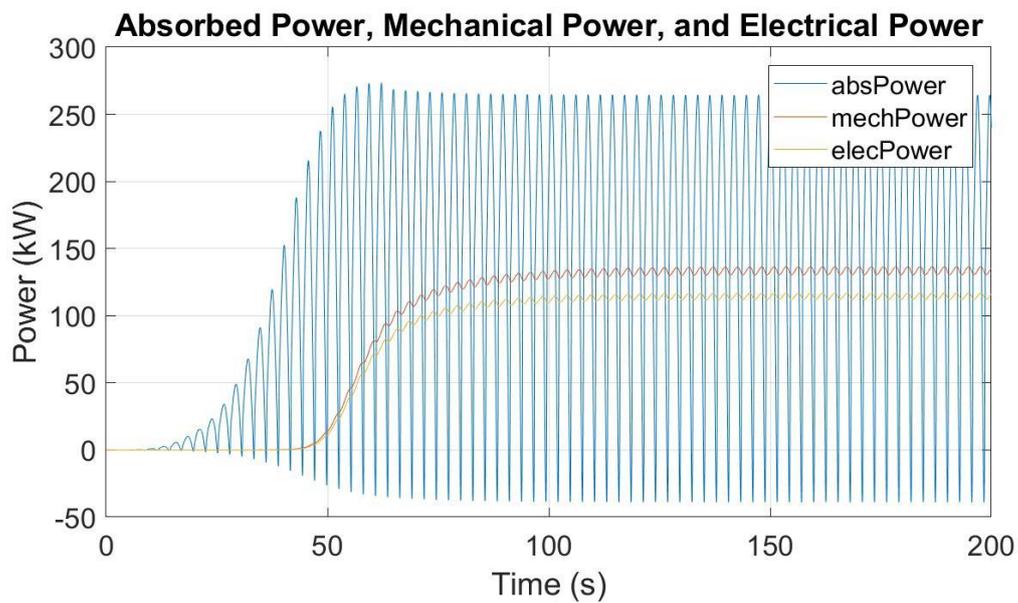
Potencia eléctrica media: 114.5157 kW

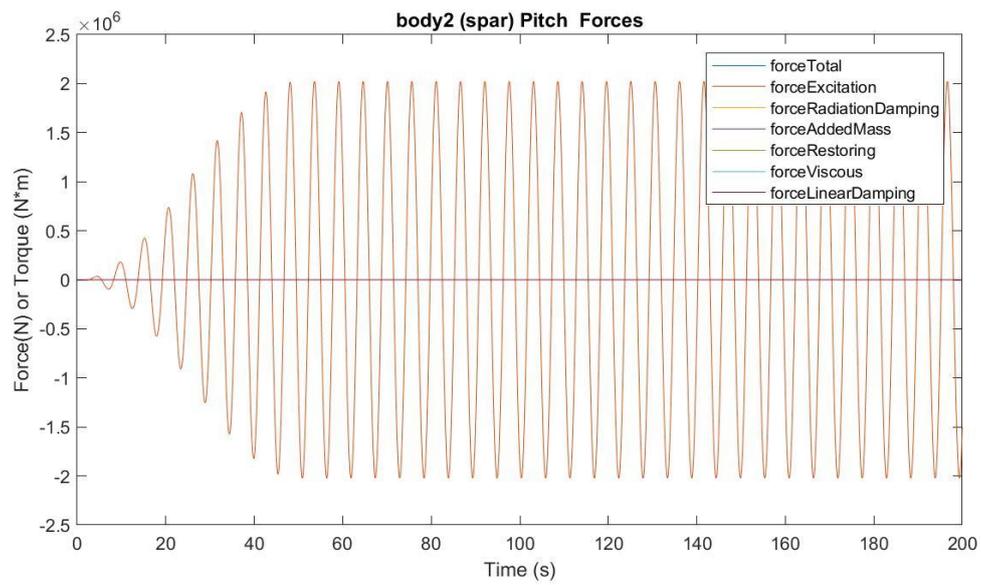
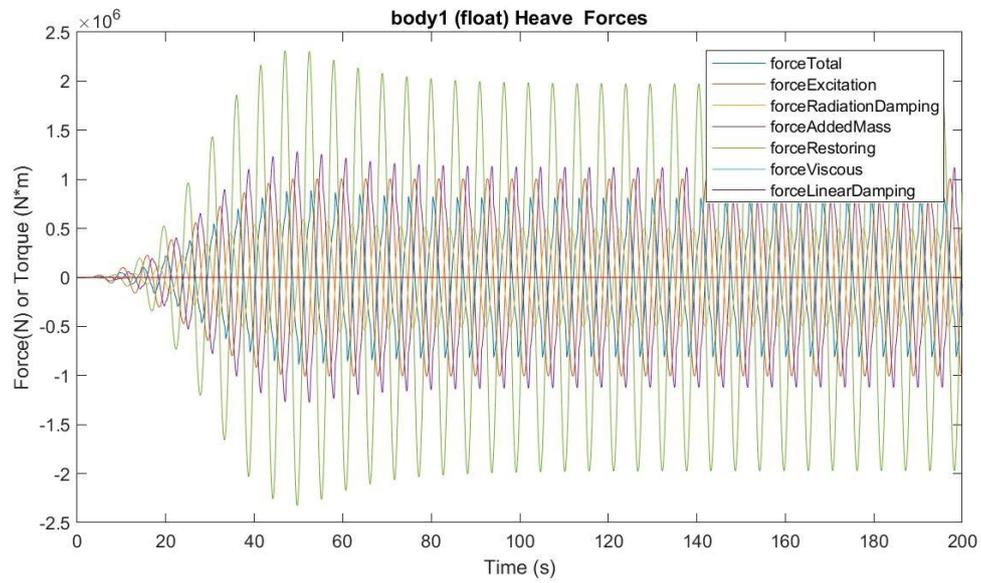
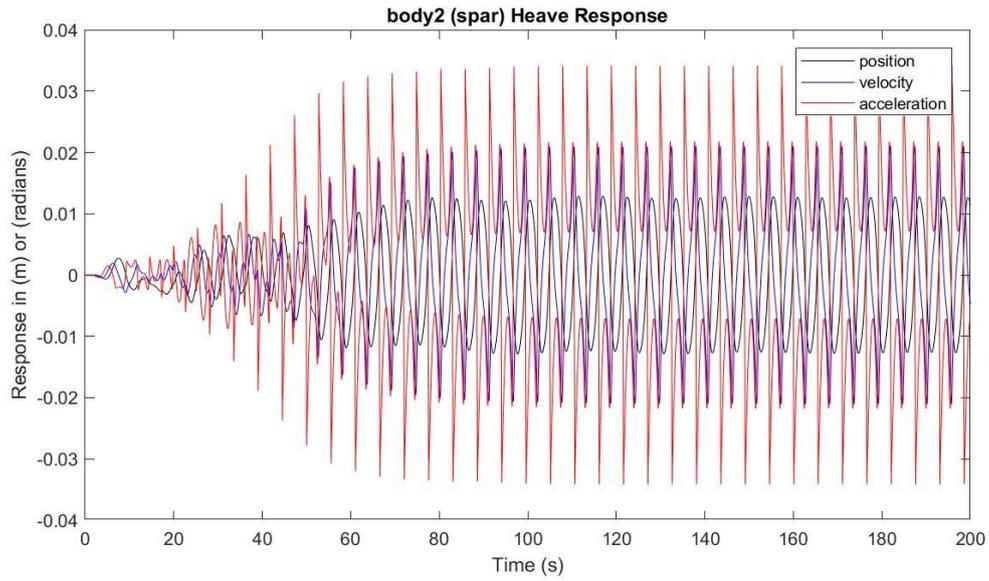
Presión media del acumulador de alta presión: 24.1802 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.4575 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.8304 m, 0.9383 m/s y 1.1667 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0129 m, 0.0210 m/s y 0.0342 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 6.5 \text{ s}$

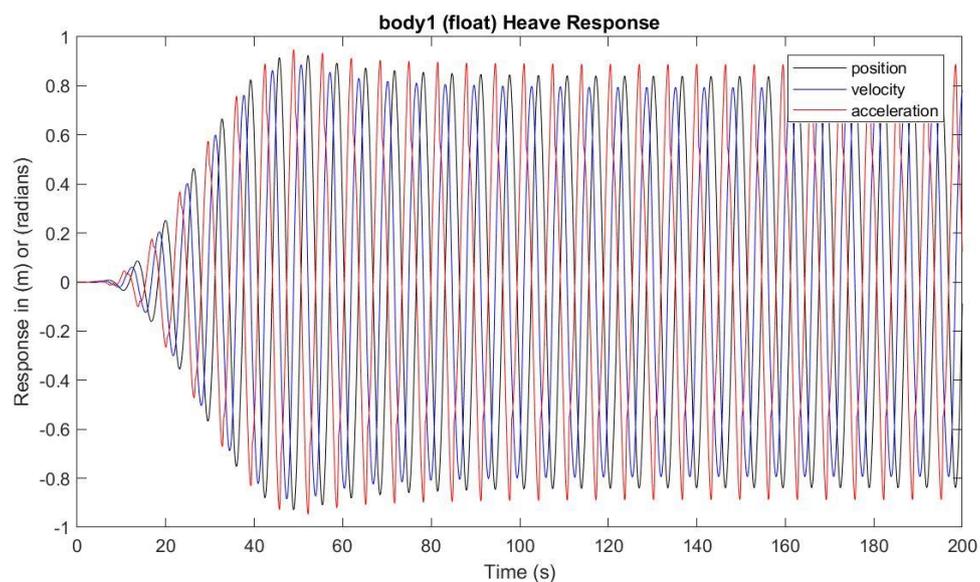
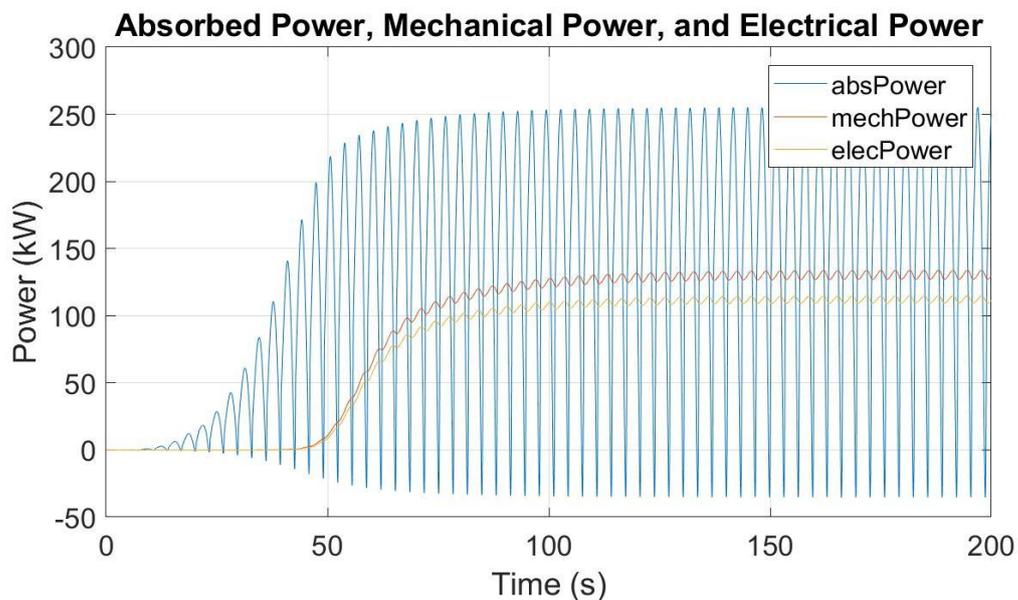
Potencia eléctrica media: 112.0257 kW

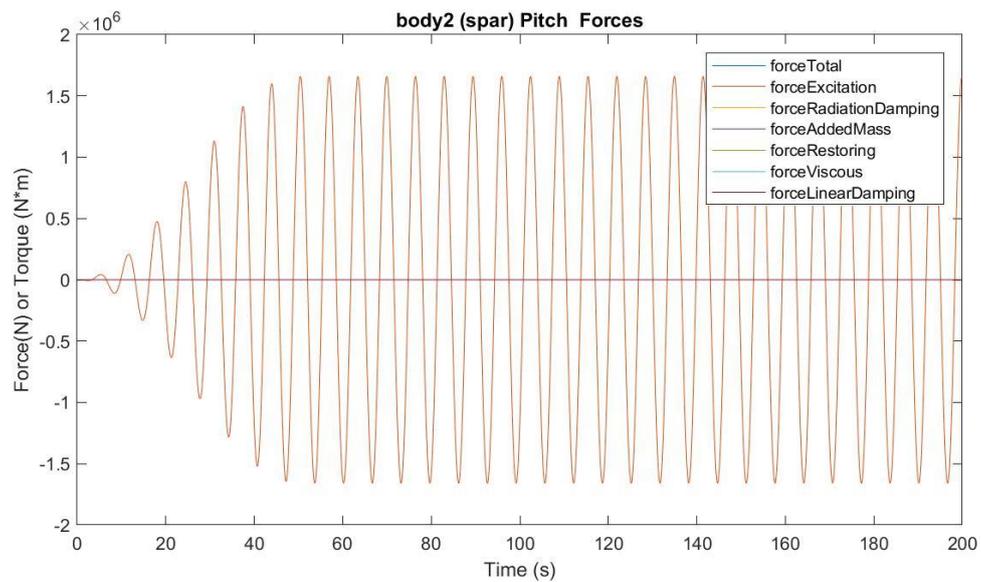
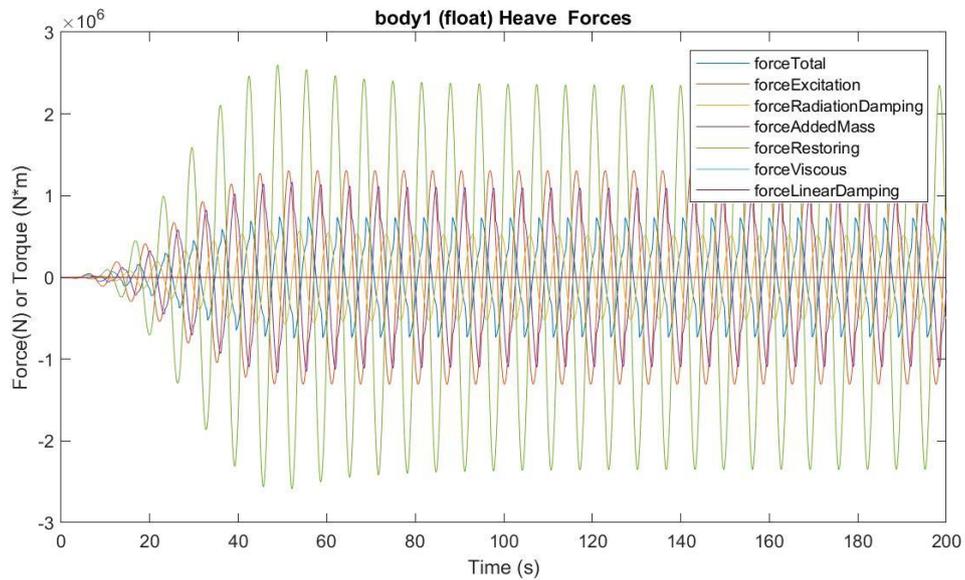
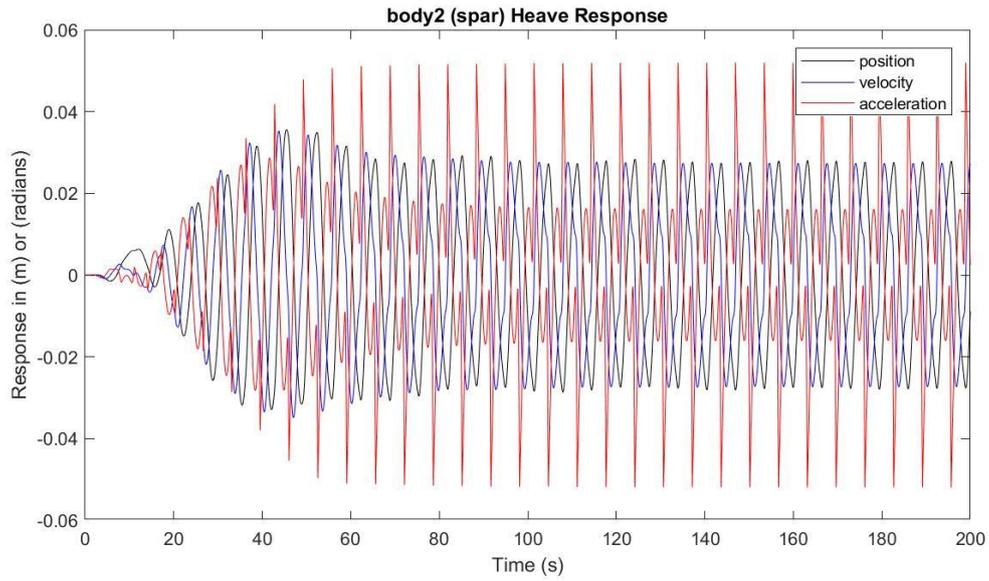
Presión media del acumulador de alta presión: 24.1514 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.4964 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.9238 m, 0.8863 m/s y 0.9477 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0356 m, 0.0352 m/s y 0.0520 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

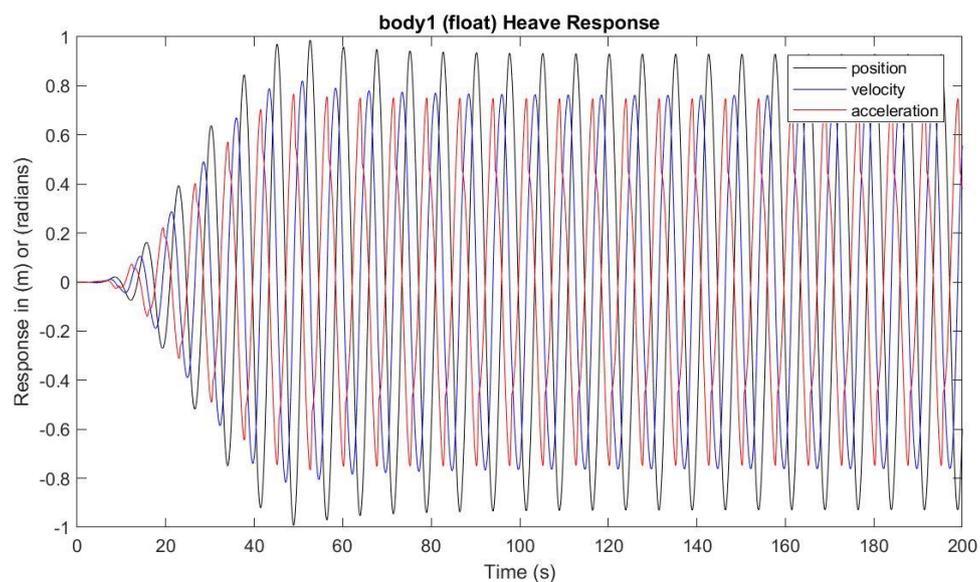
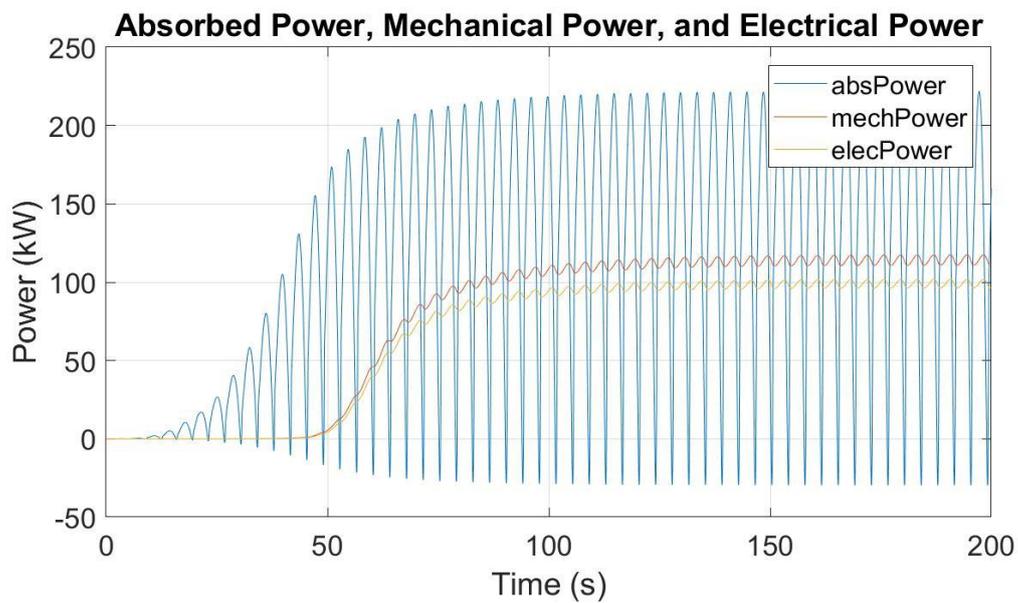
Potencia eléctrica media: 98.9939 kW

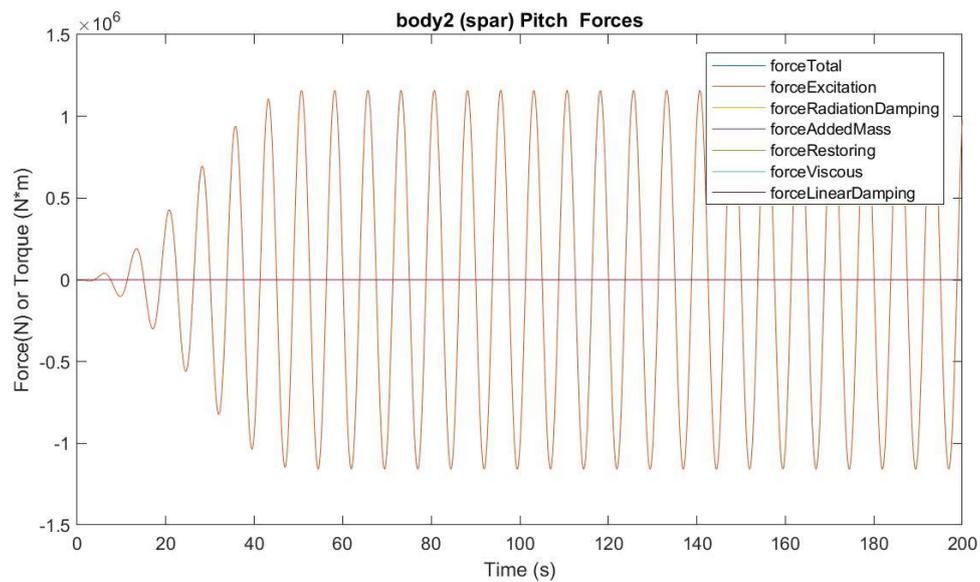
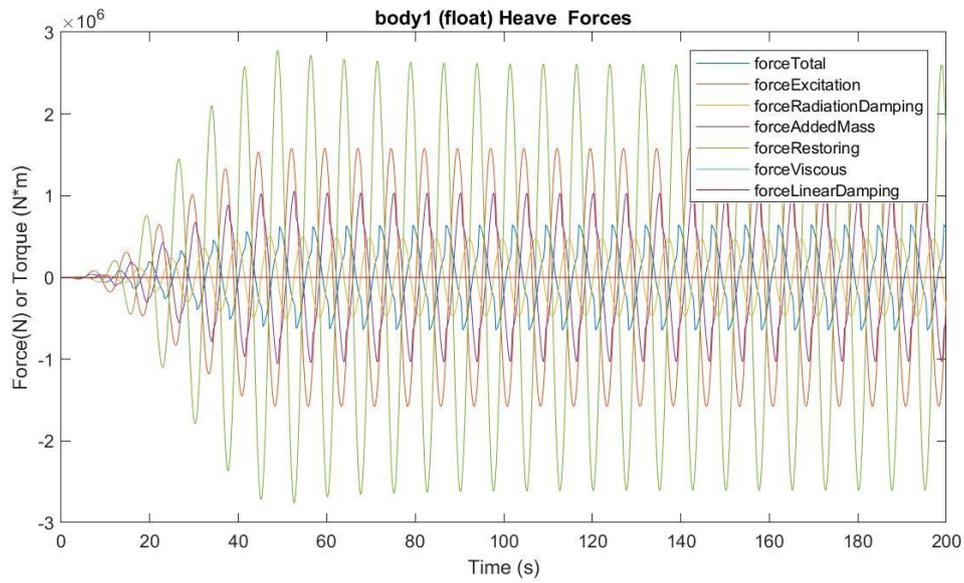
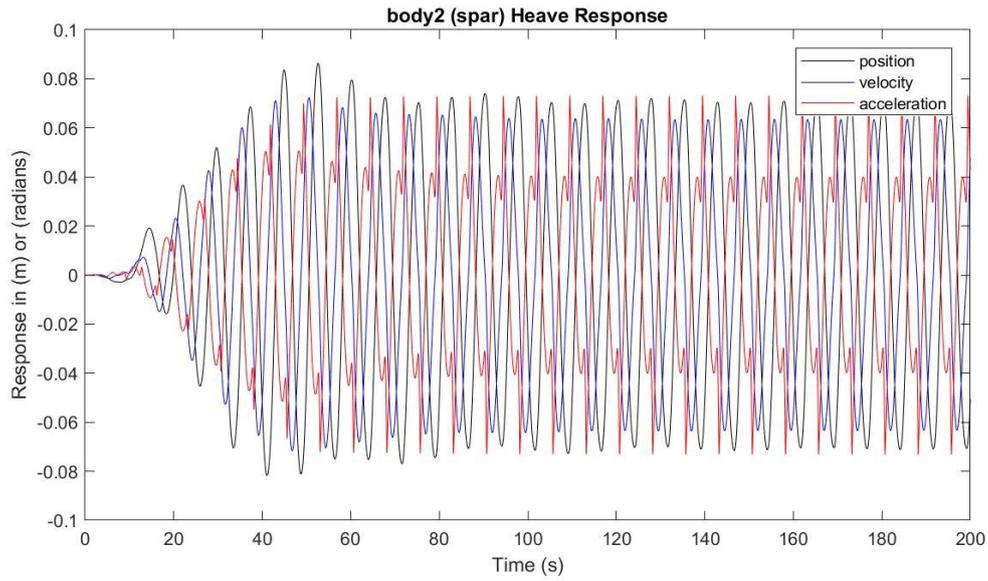
Presión media del acumulador de alta presión: 23.9938 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.7023 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 0.9864 m, 0.8201 m/s y 0.7669 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0864 m, 0.0724 m/s y 0.0731 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$
 $T_e = 8.5 \text{ s}$

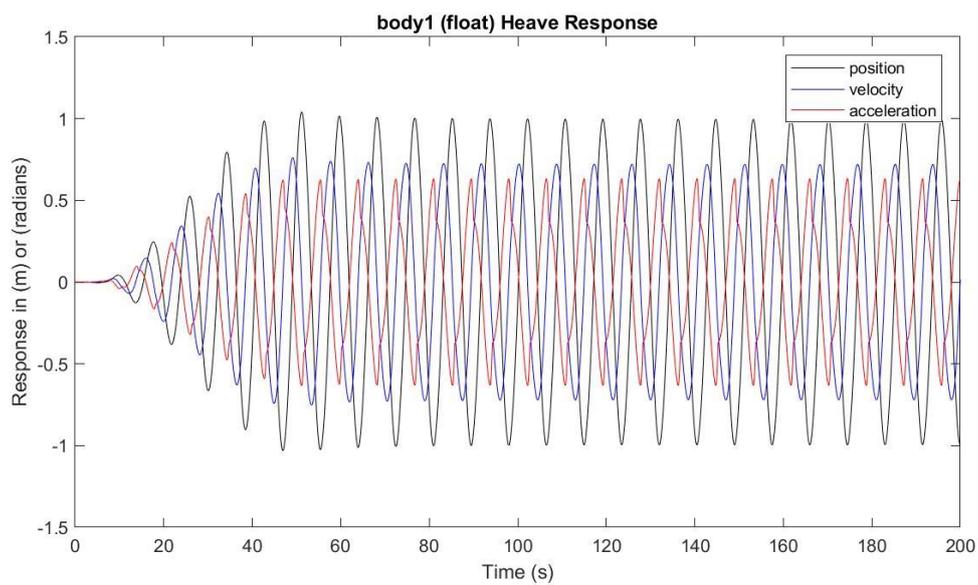
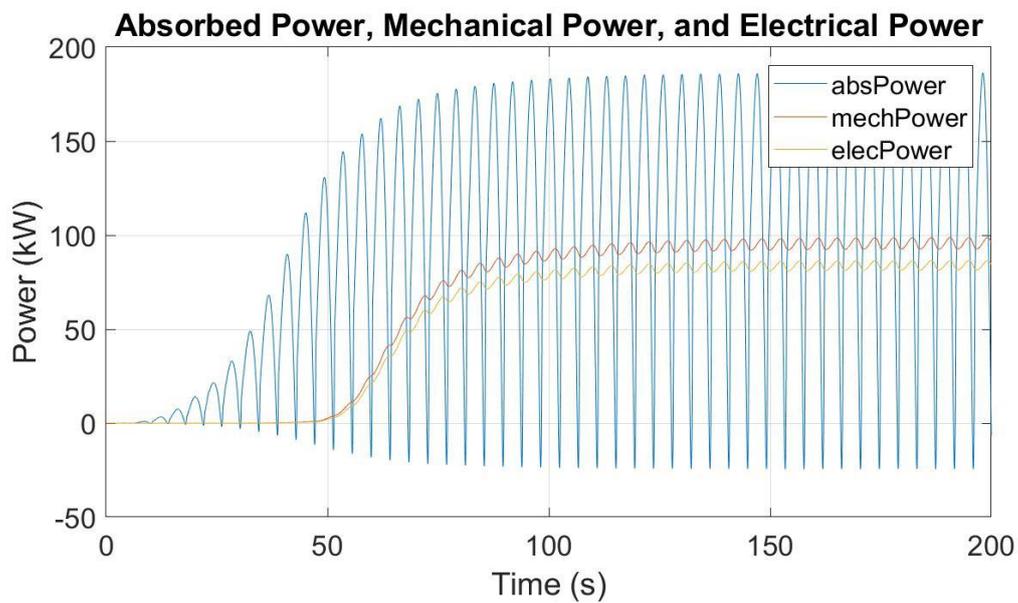
Potencia eléctrica media: 83.9187 kW

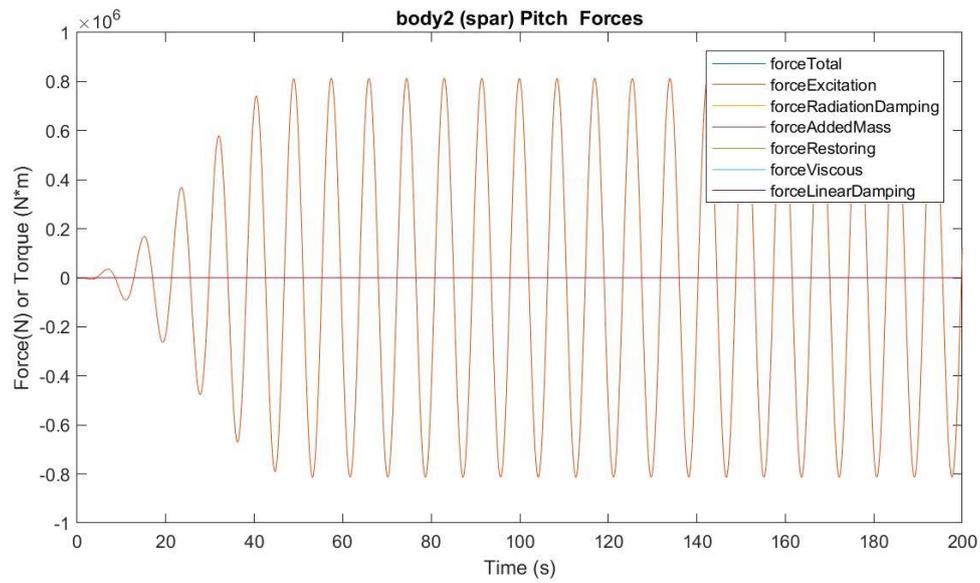
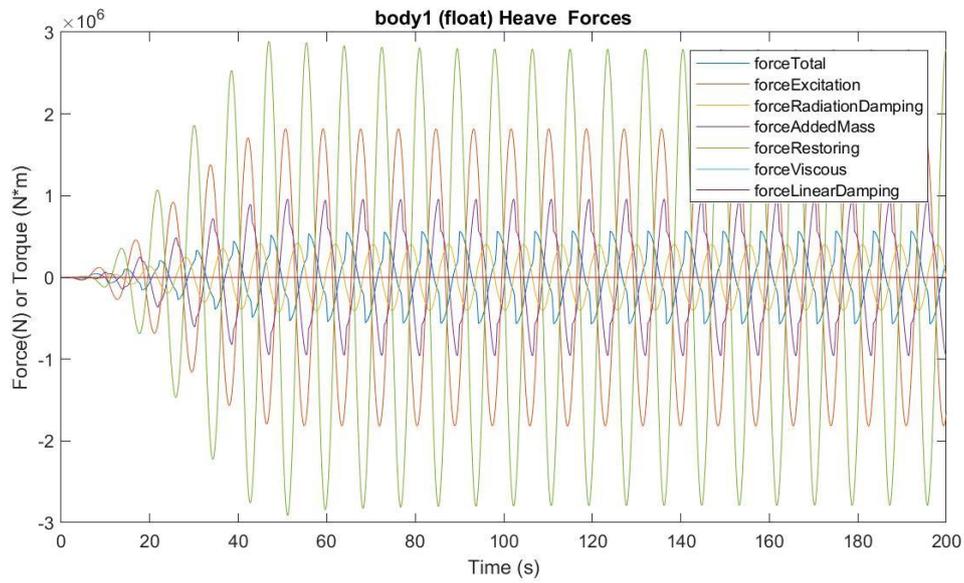
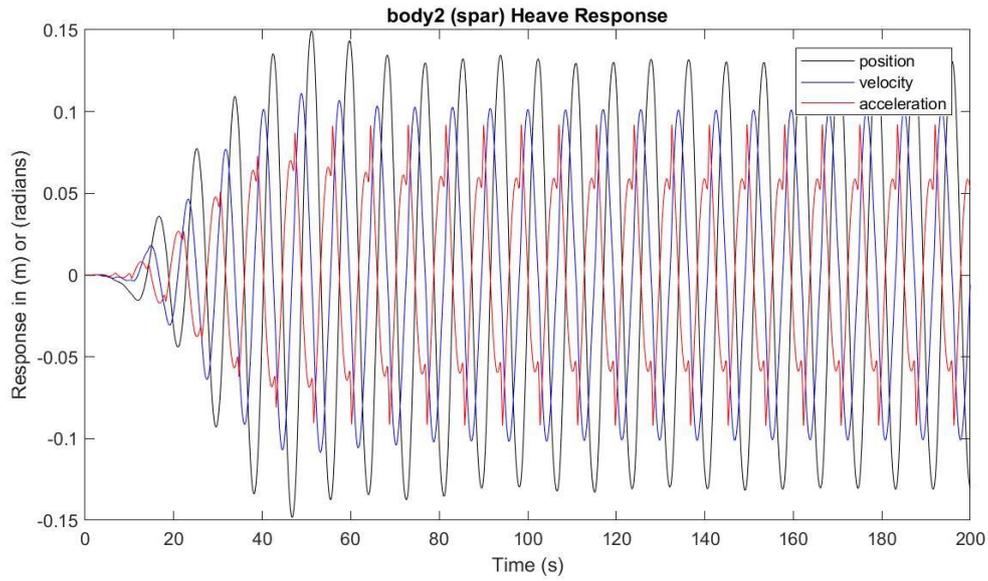
Presión media del acumulador de alta presión: 23.8053 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.9556 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.0400 m, 0.7603 m/s y 0.6328 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1493 m, 0.1112 m/s y 0.0921 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$ $T_e = 9.5 \text{ s}$

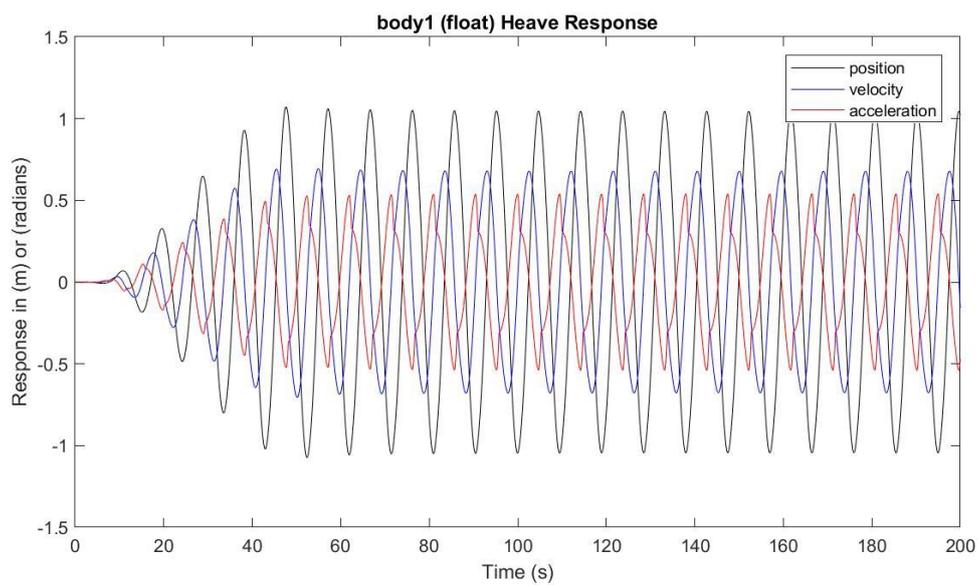
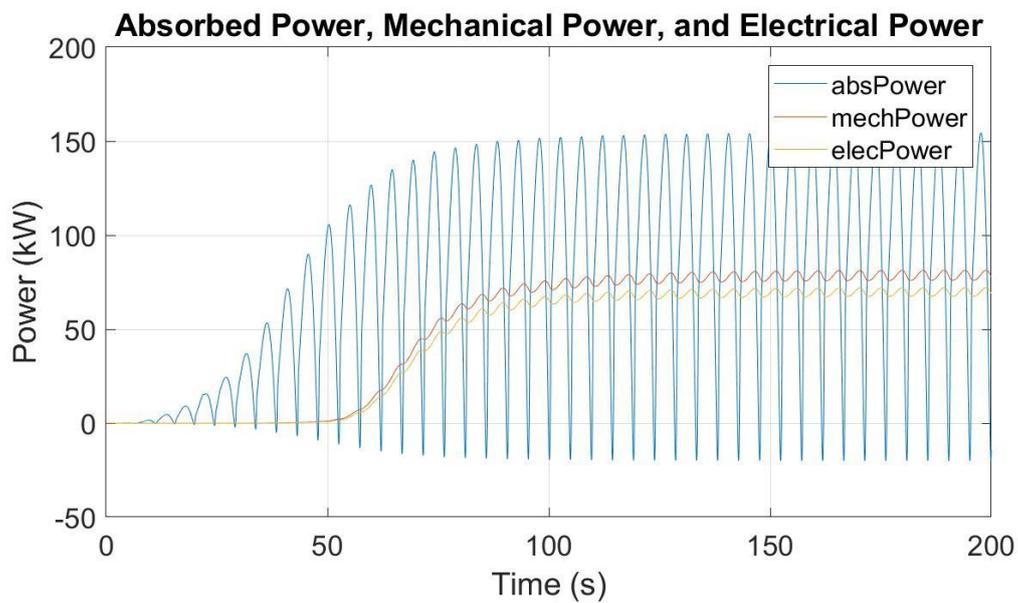
Potencia eléctrica media: 69.6960 kW

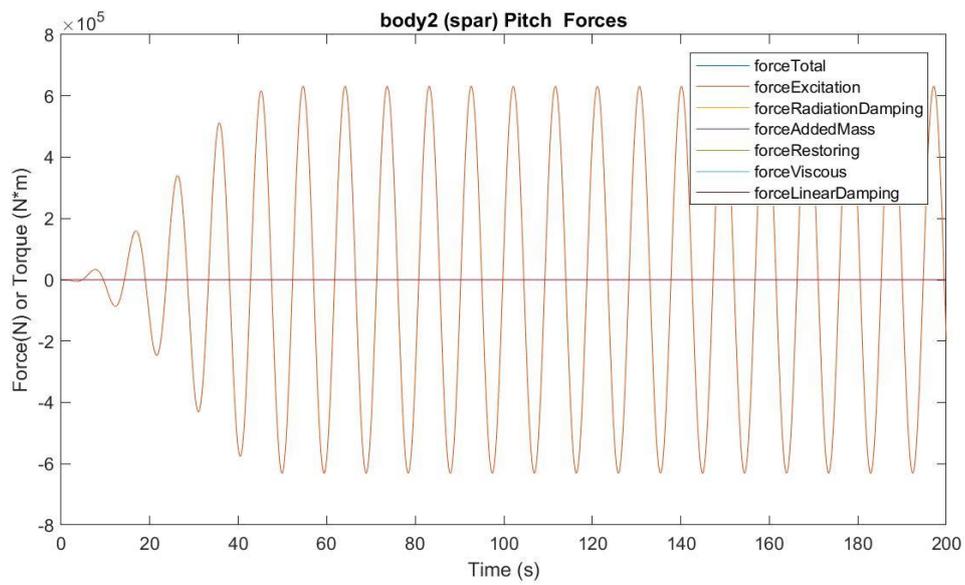
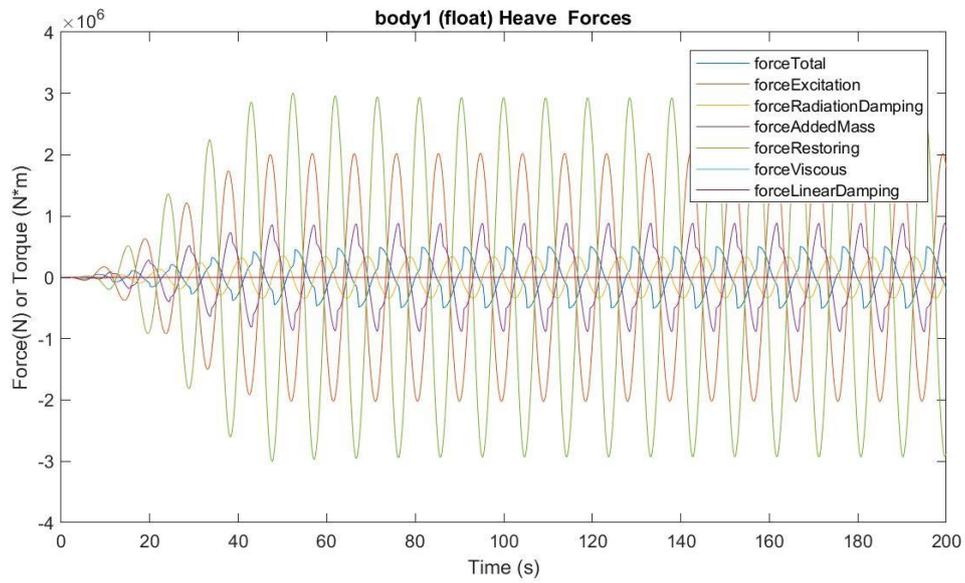
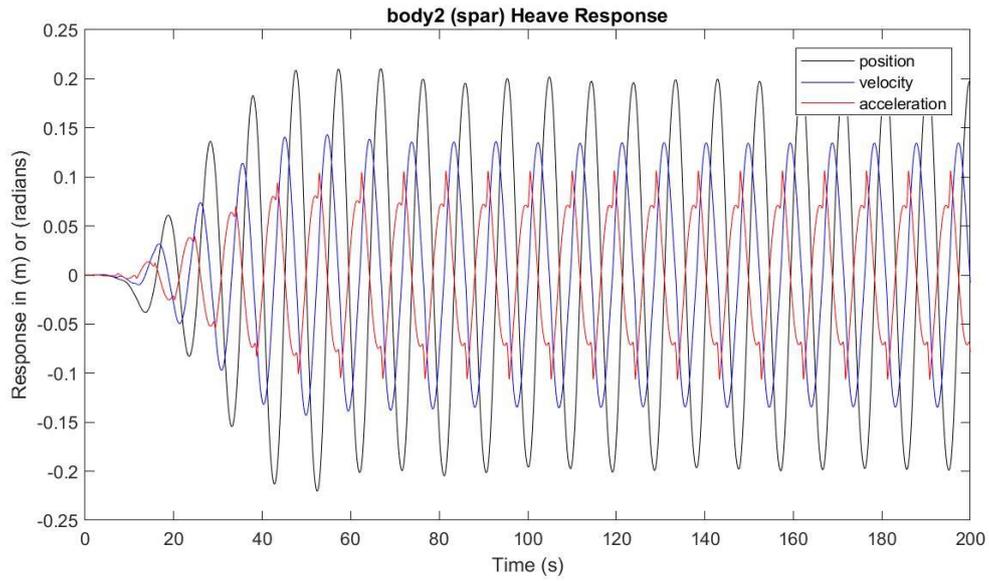
Presión media del acumulador de alta presión: 23.6197 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.2137 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.0717 m, 0.6933 m/s y 0.5398 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2103 m, 0.1432 m/s y 0.1064 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

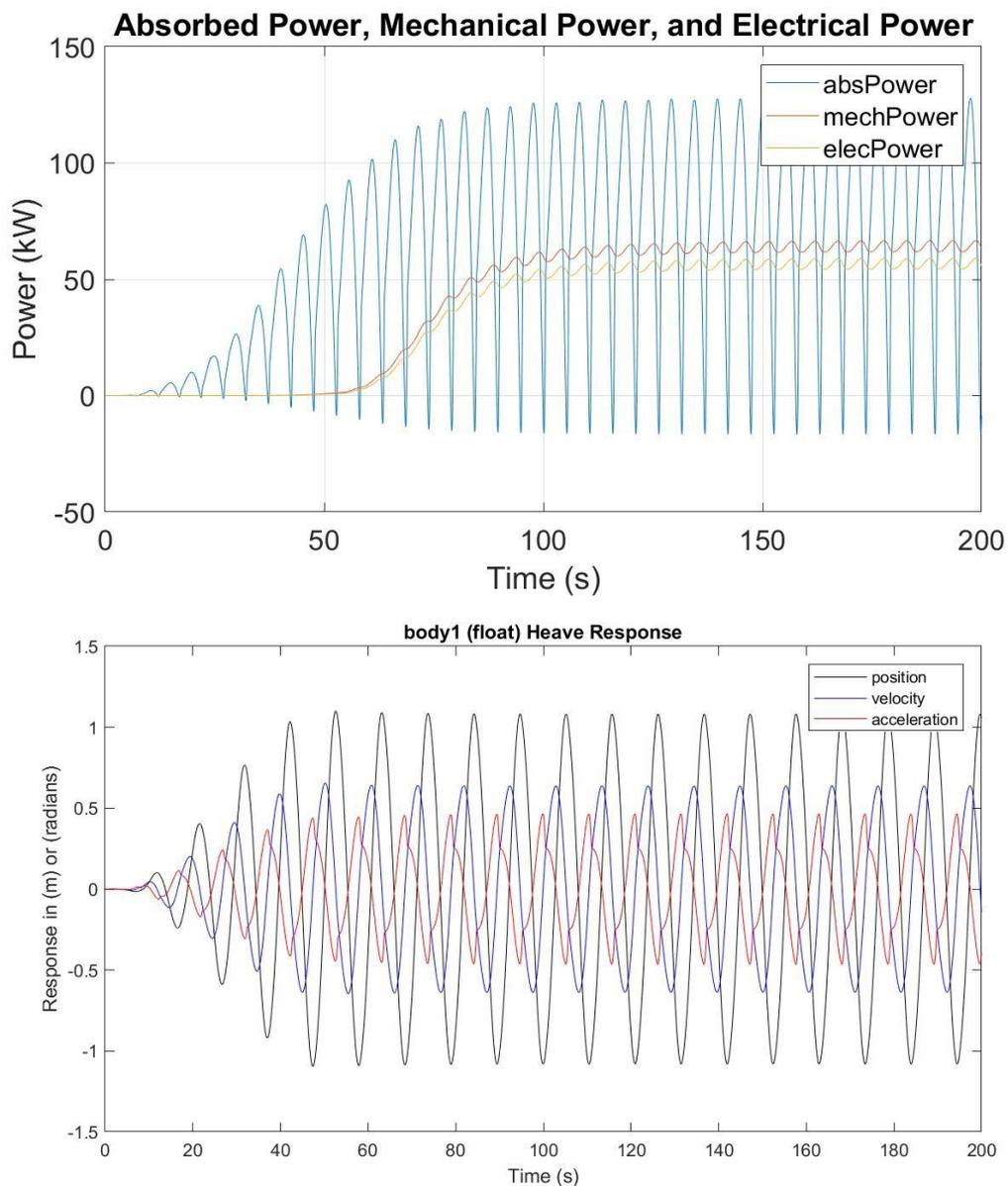
Potencia eléctrica media: 56.6603 kW

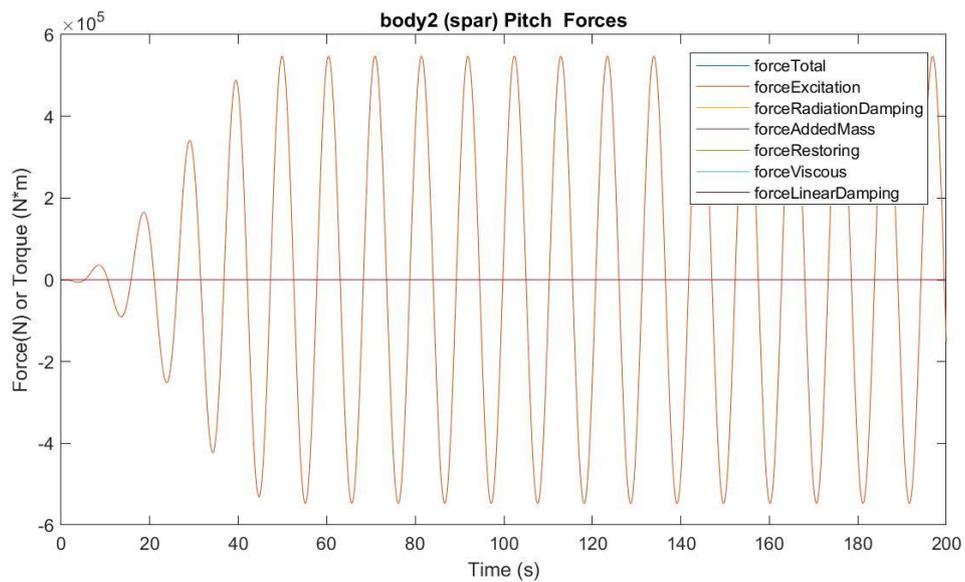
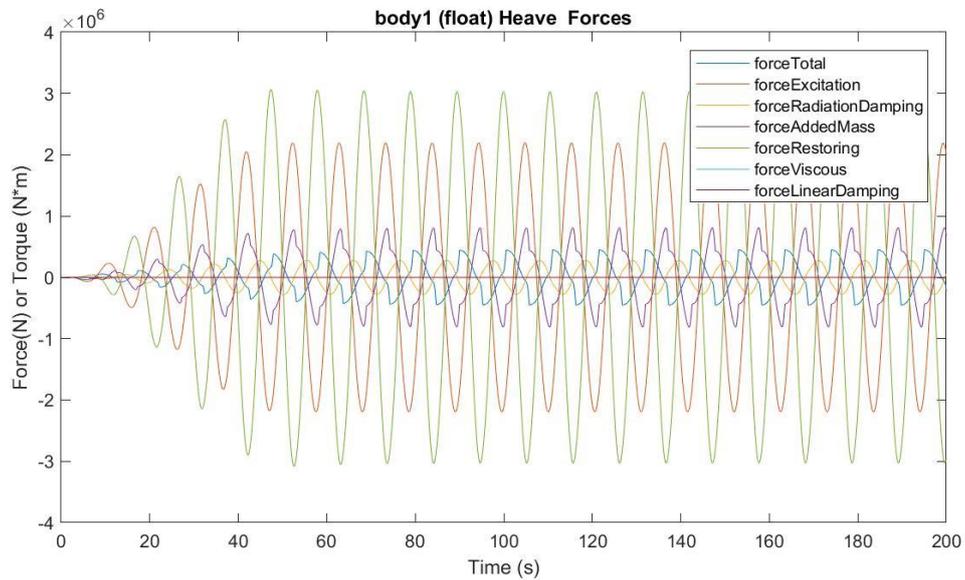
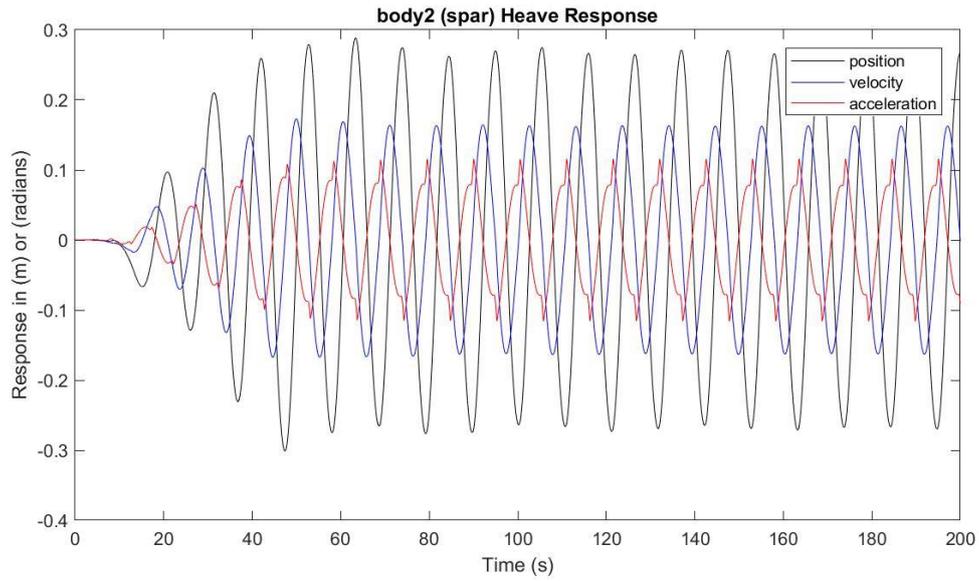
Presión media del acumulador de alta presión: 23.4513 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.4559 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1006 m, 0.6555 m/s y 0.4652 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2883 m, 0.1727 m/s y 0.1158 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

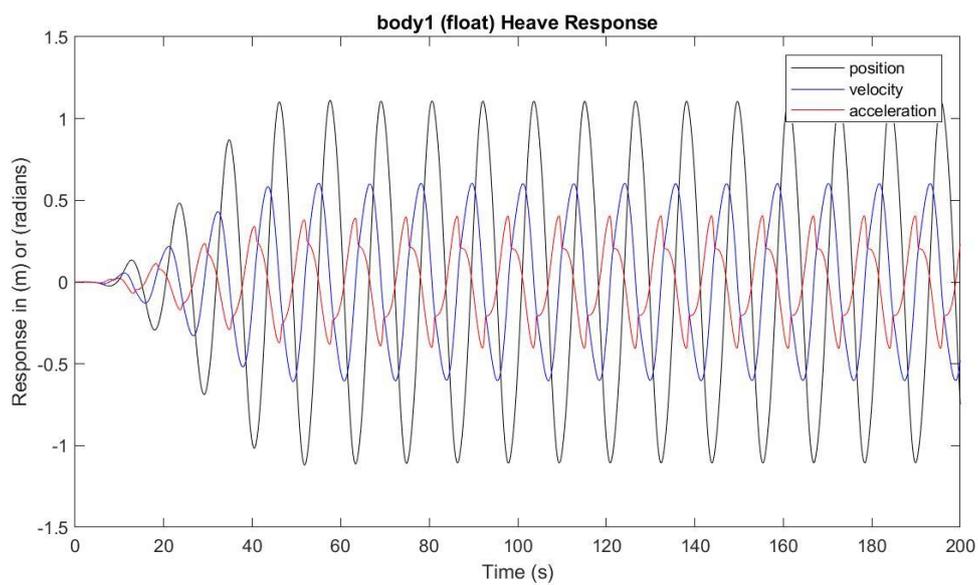
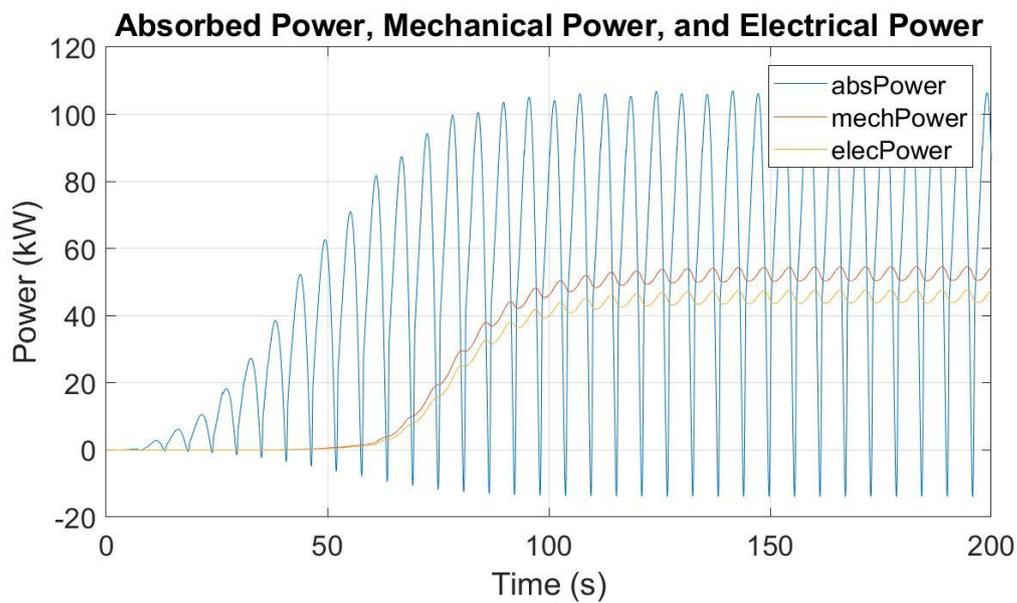
Potencia eléctrica media: 45.5744 kW

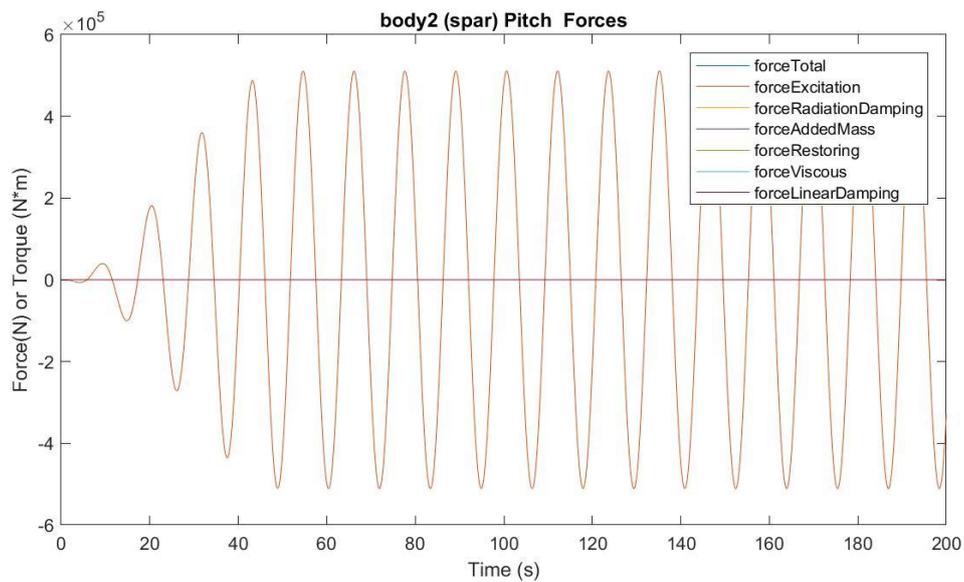
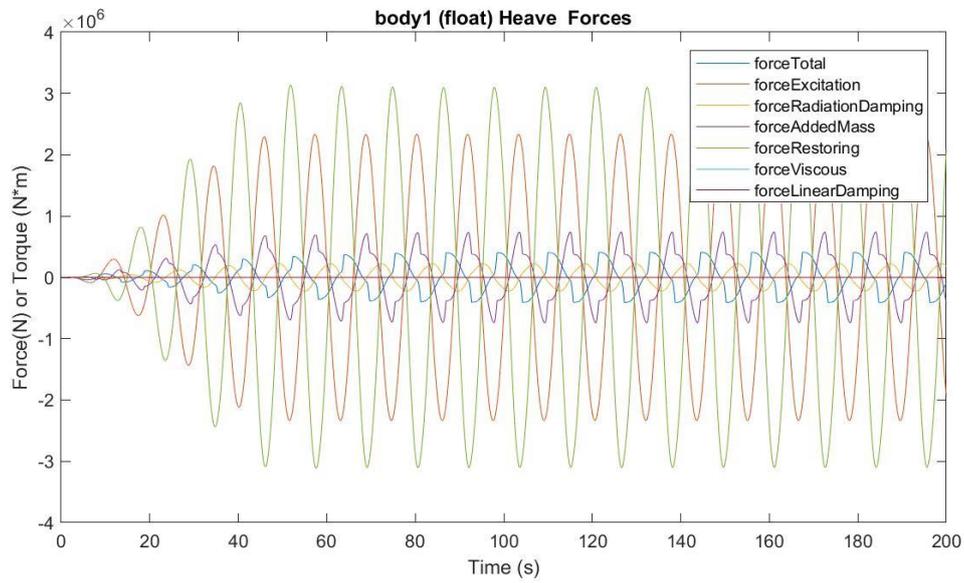
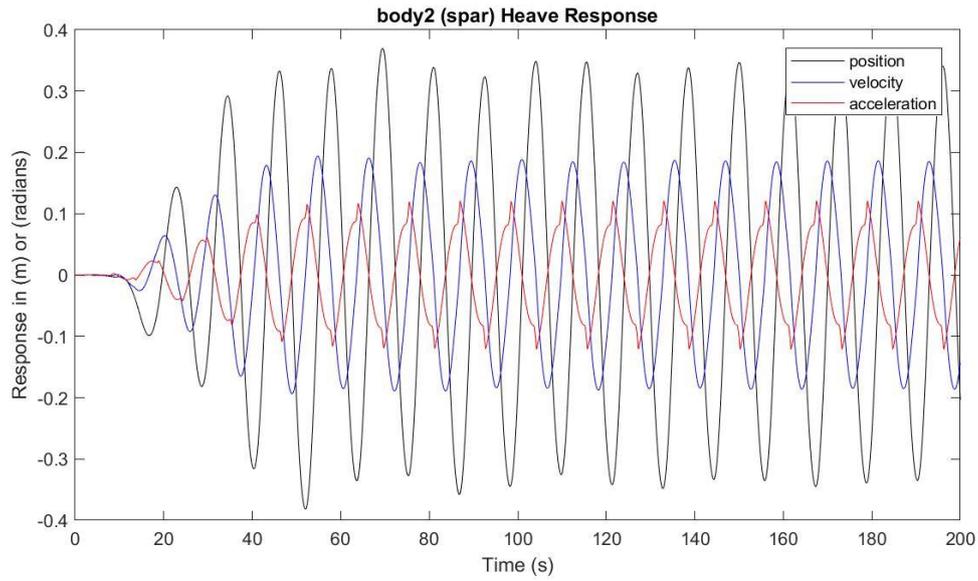
Presión media del acumulador de alta presión: 23.3035 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.6751 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1113 m, 0.6042 m/s y 0.4058 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3698 m, 0.1940 m/s y 0.1211 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

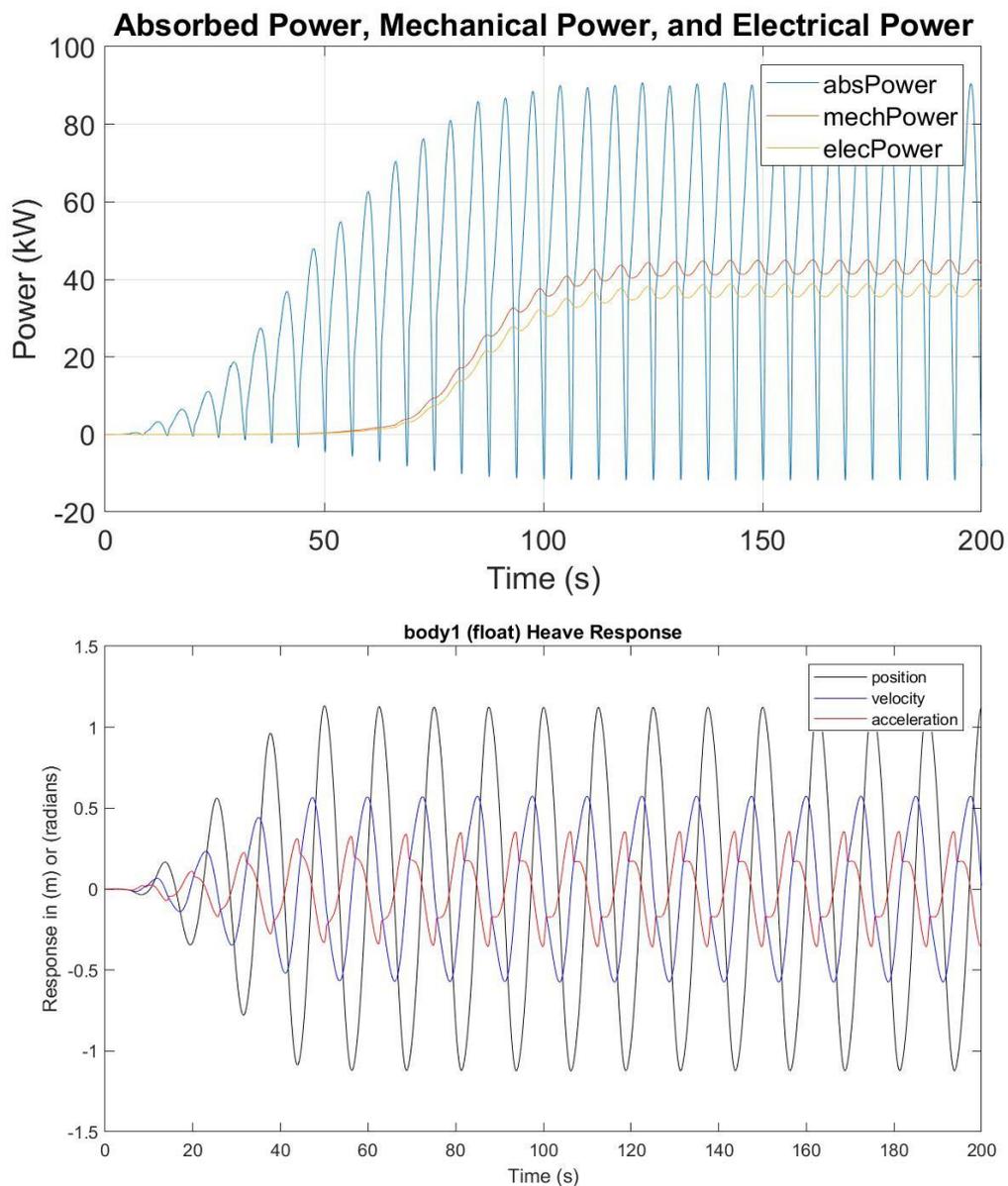
Potencia eléctrica media: 37.0677 kW

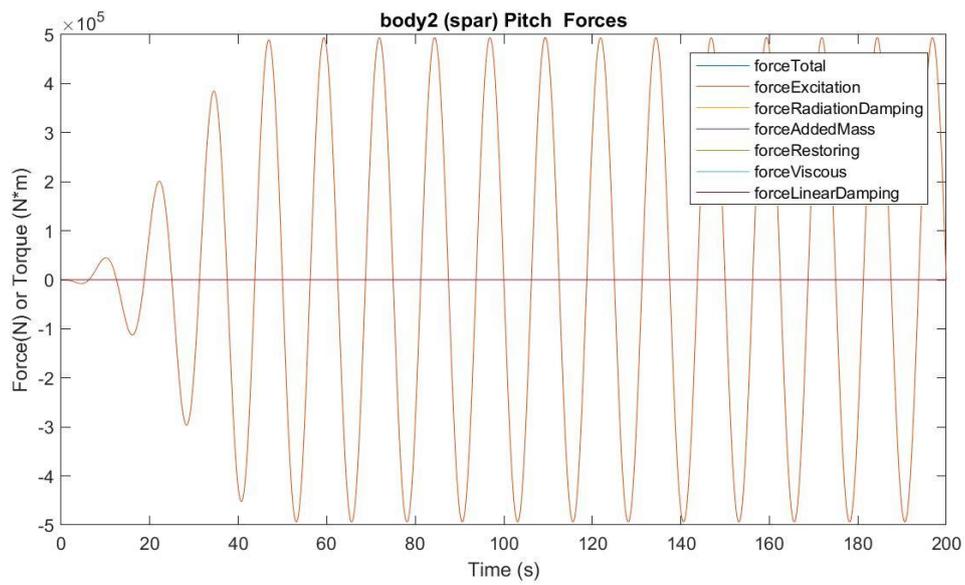
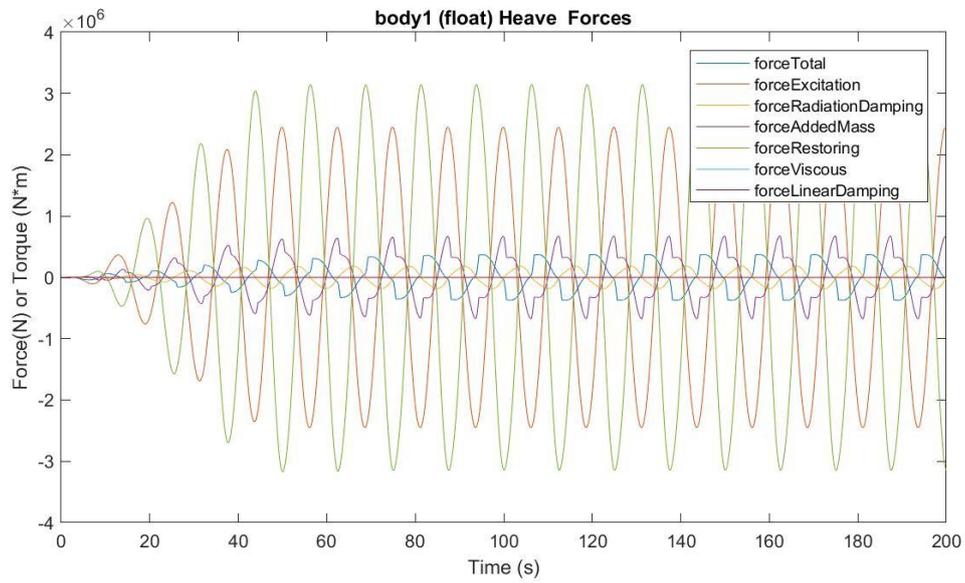
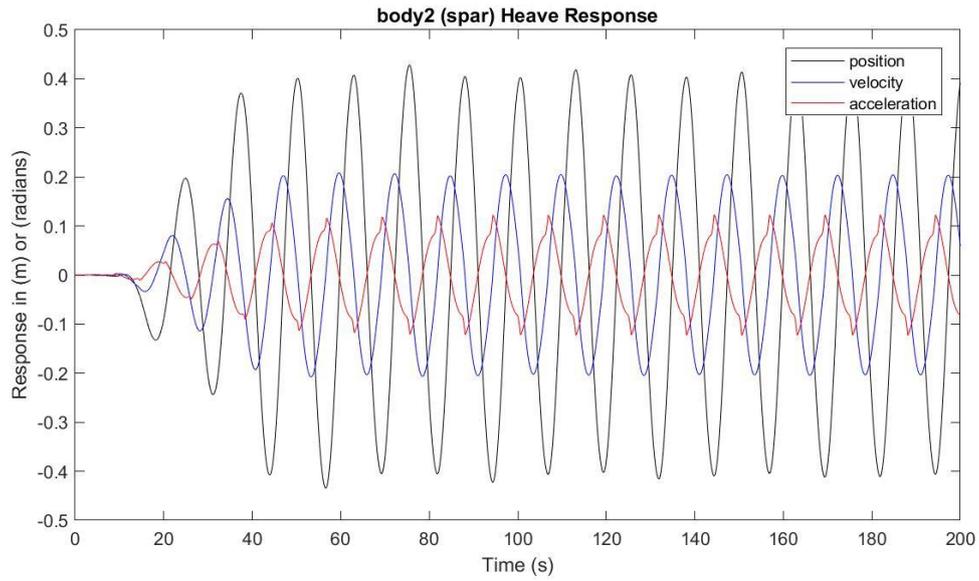
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1794 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.8646 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1328 m, 0.5745 m/s y 0.3569 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4284 m, 0.2084 m/s y 0.1229 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

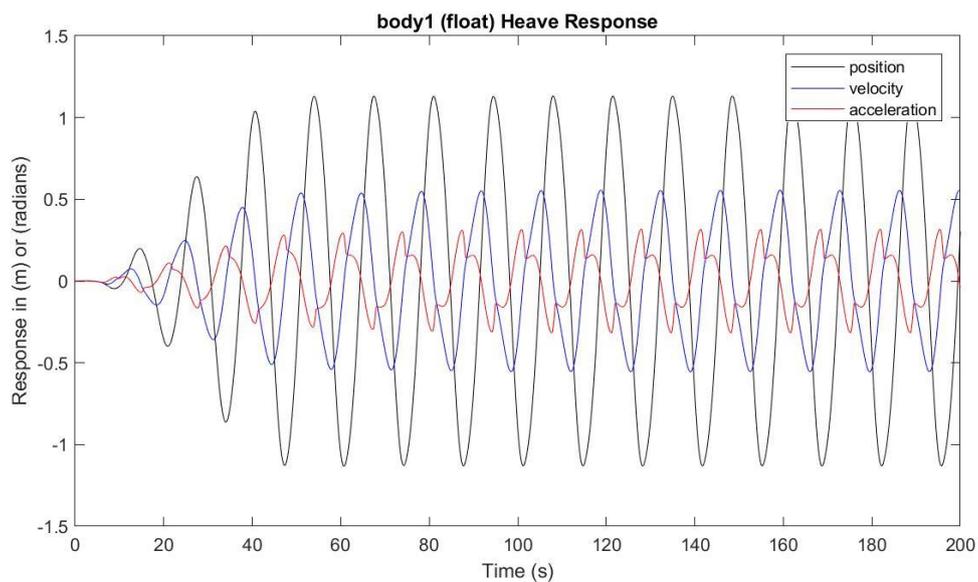
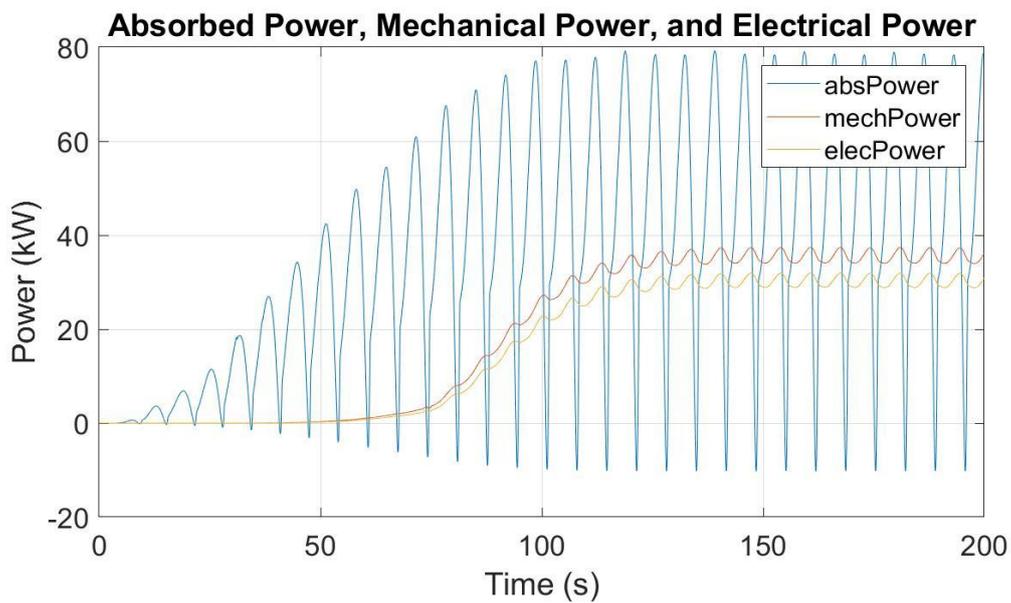
Potencia eléctrica media: 30.1814 kW

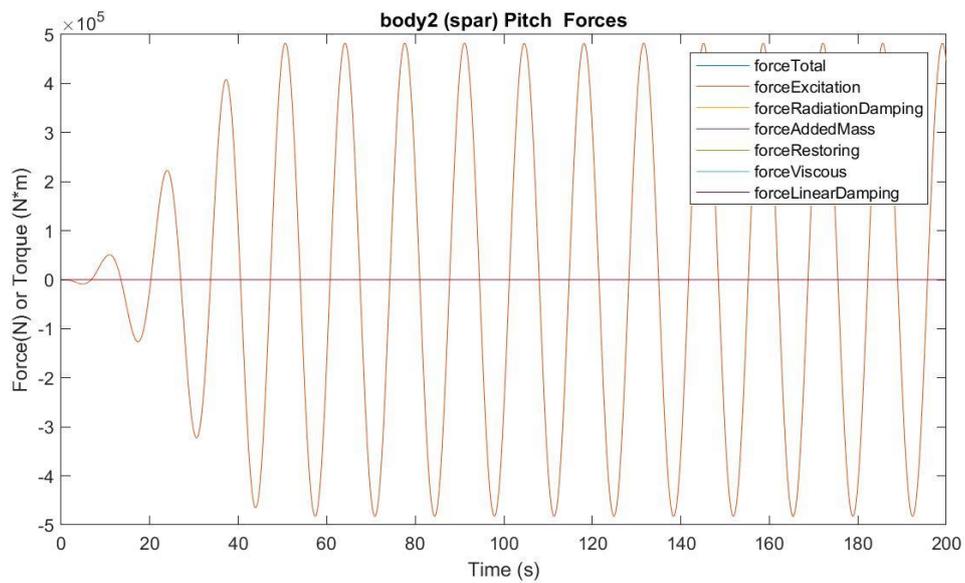
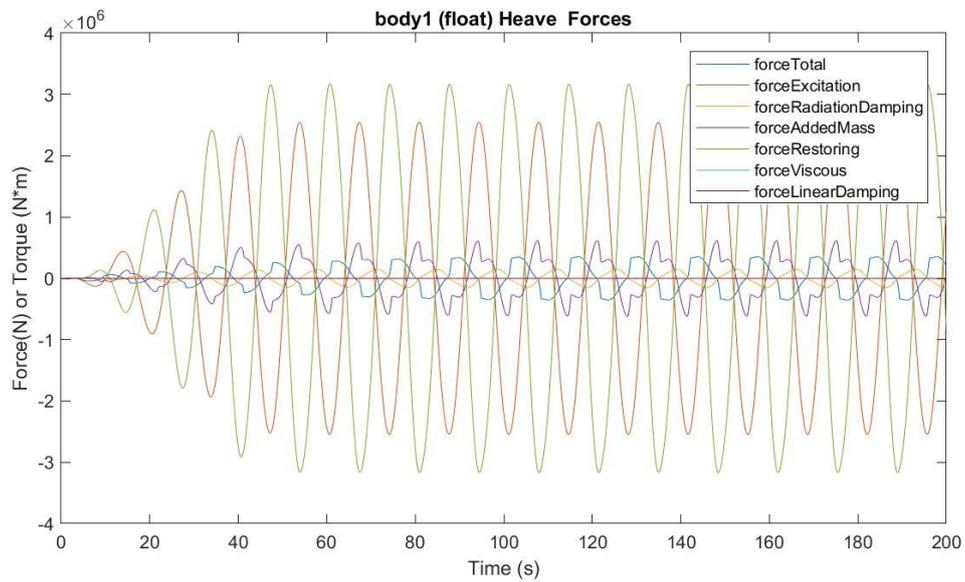
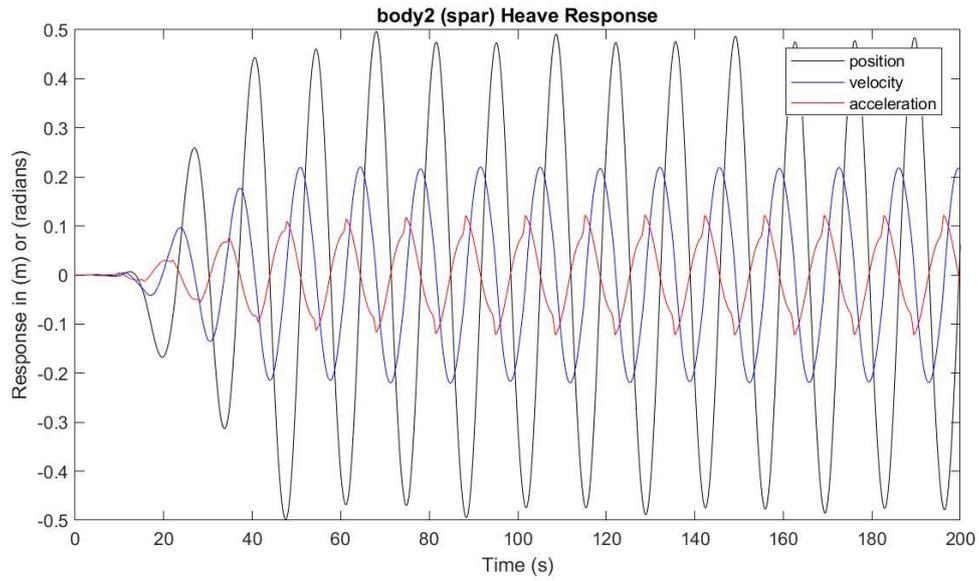
Presión media del acumulador de alta presión: 23.0706 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.0342 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1313 m, 0.5555 m/s y 0.3173 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4967 m, 0.2200 m/s y 0.1223 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

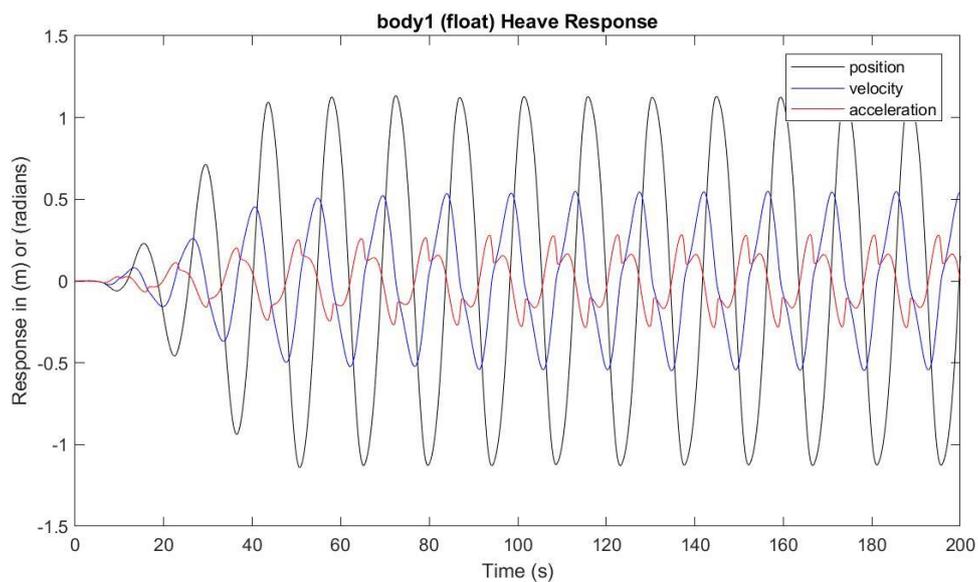
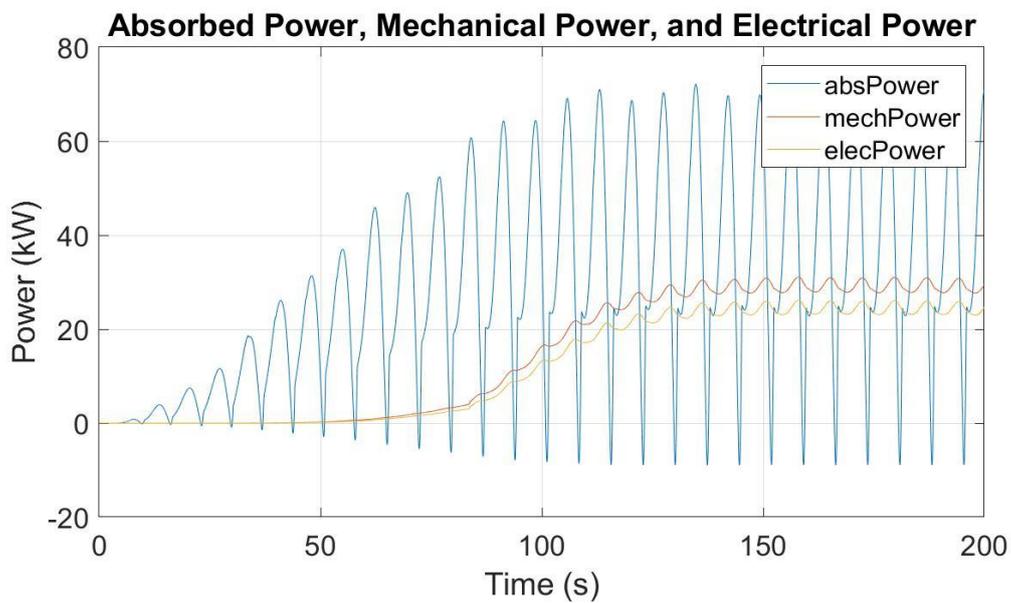
Potencia eléctrica media: 24.2361 kW

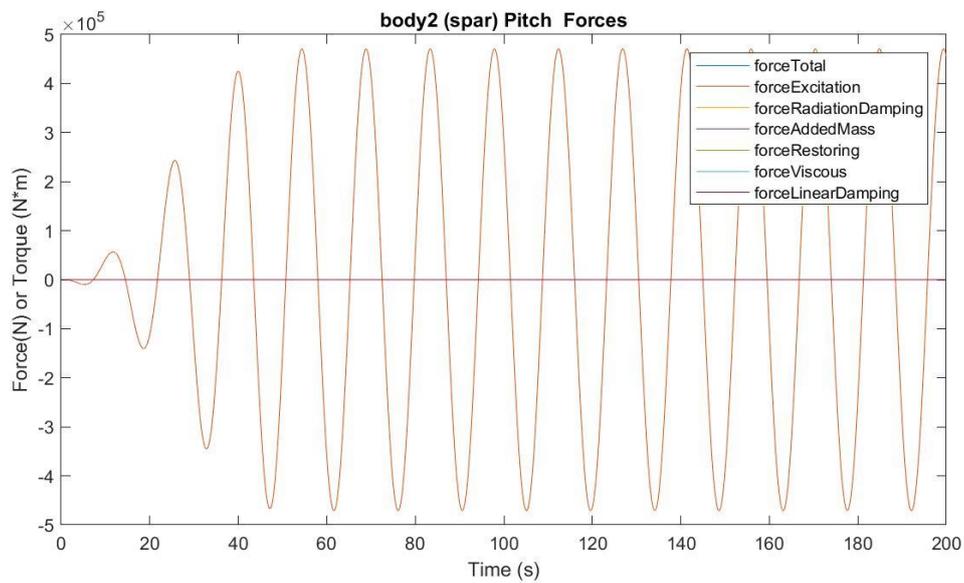
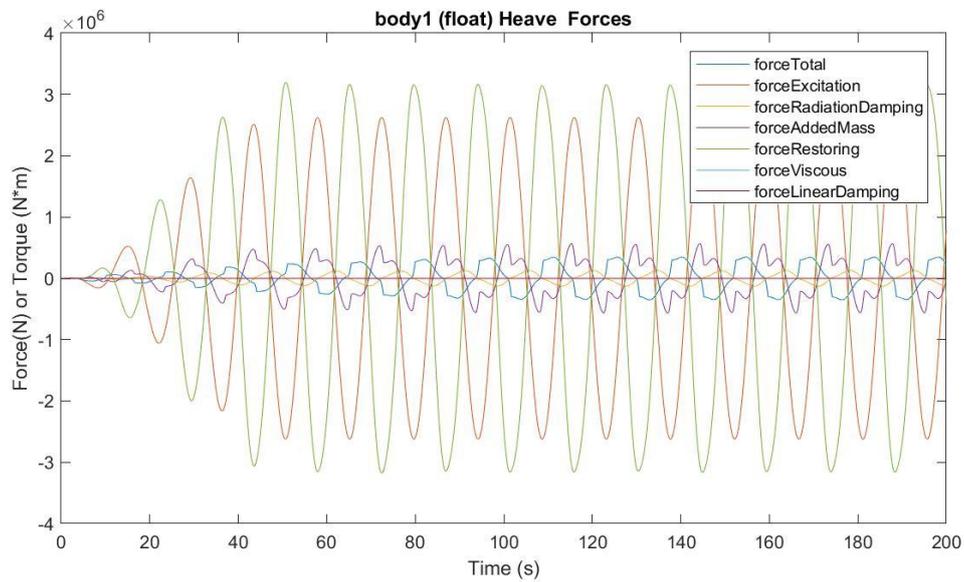
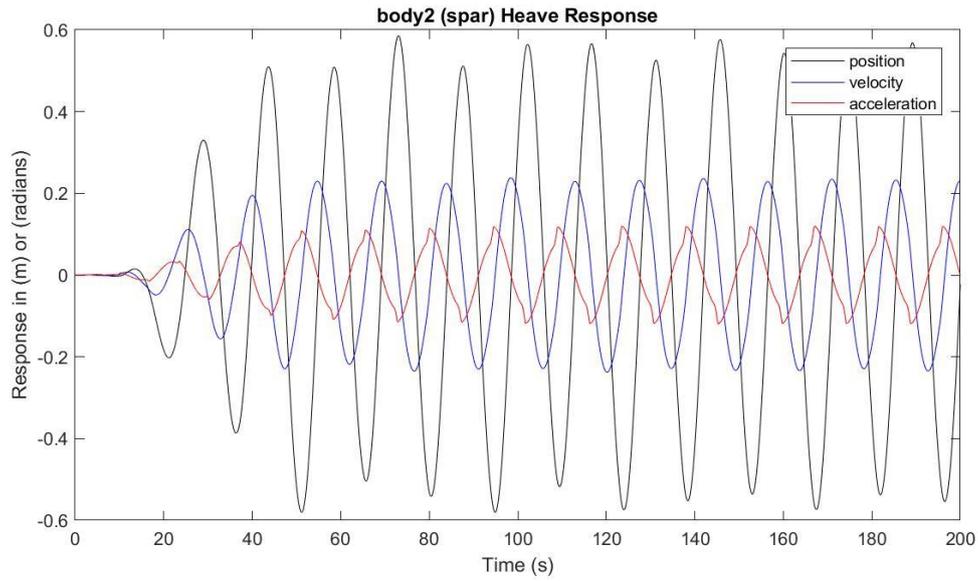
Presión media del acumulador de alta presión: 22.9741 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.1880 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1341 m, 0.5479 m/s y 0.2848 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5855 m, 0.2380 m/s y 0.1199 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

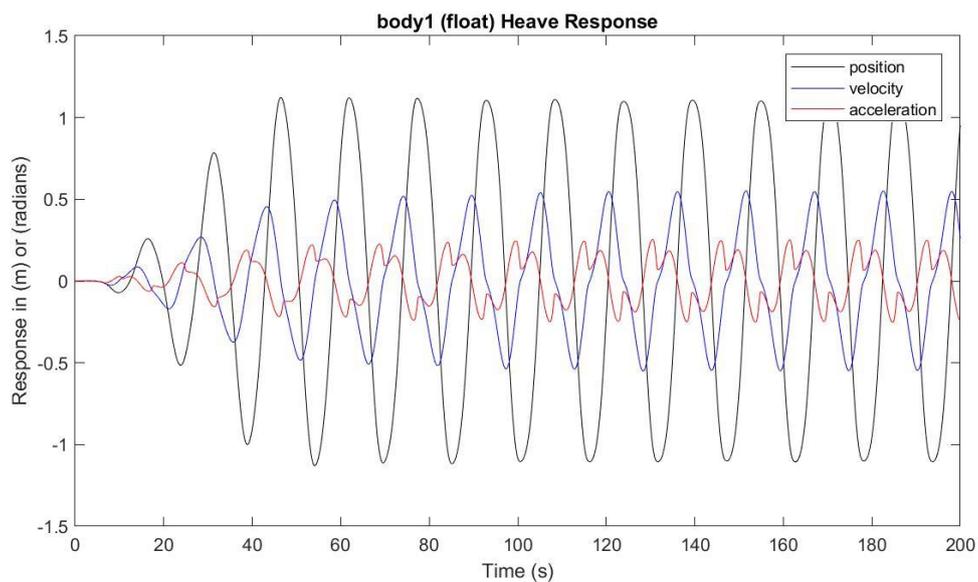
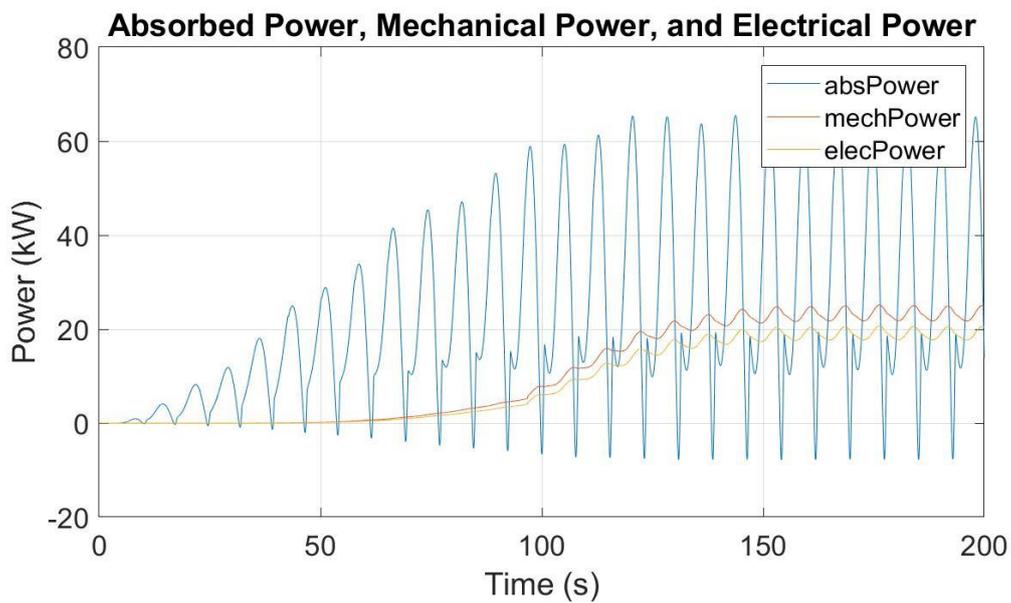
Potencia eléctrica media: 19.0110 kW

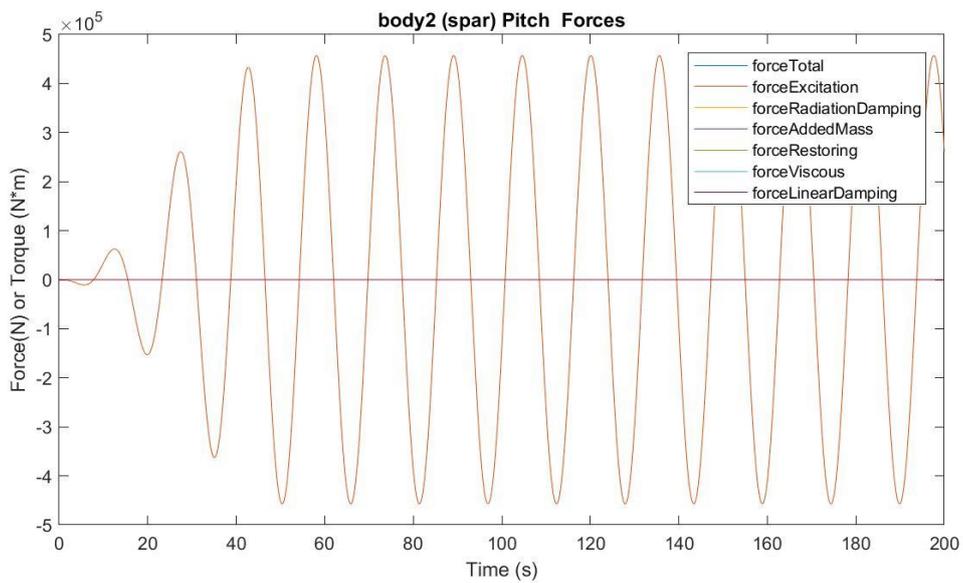
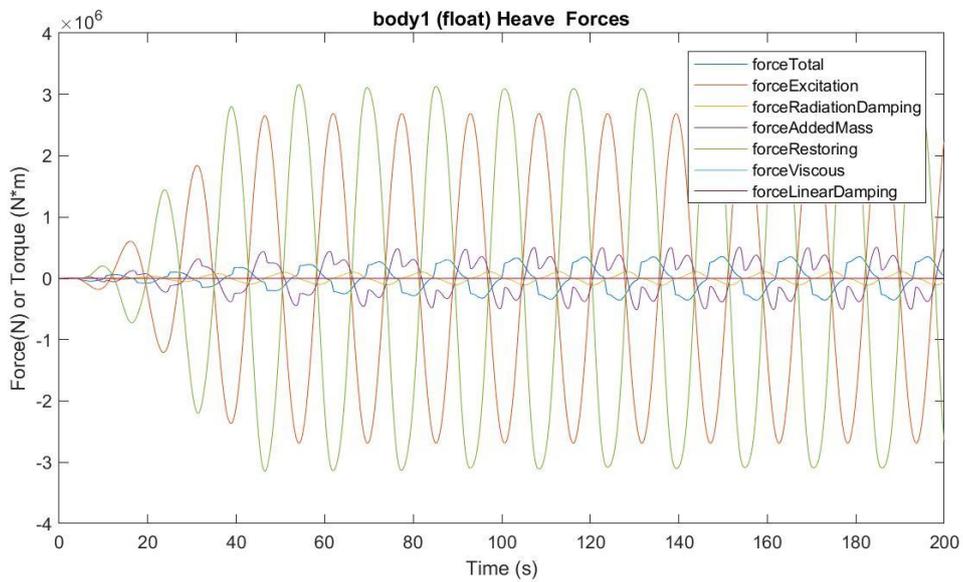
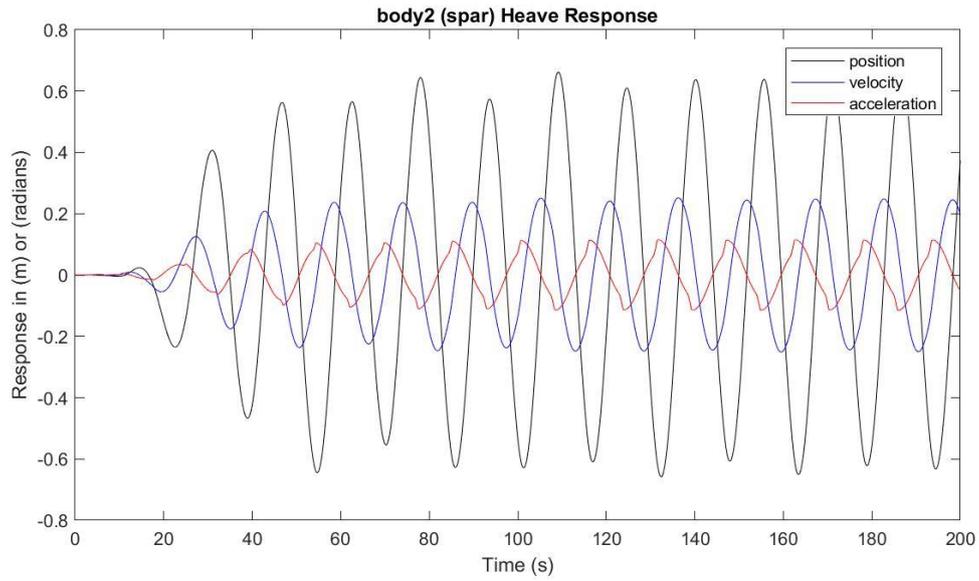
Presión media del acumulador de alta presión: 22.8827 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.3365 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1228 m, 0.5514 m/s y 0.2537 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.6620 m, 0.2520 m/s y 0.1149 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

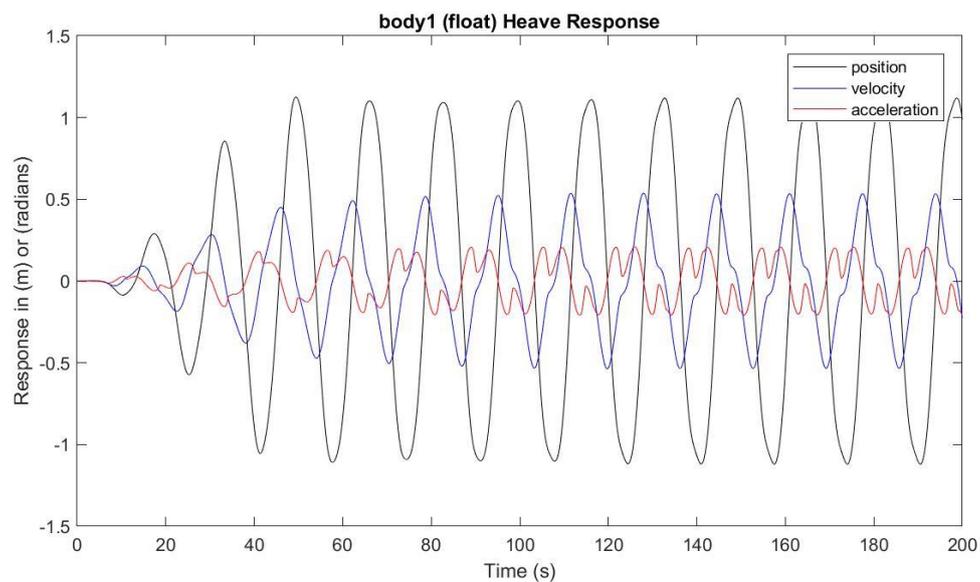
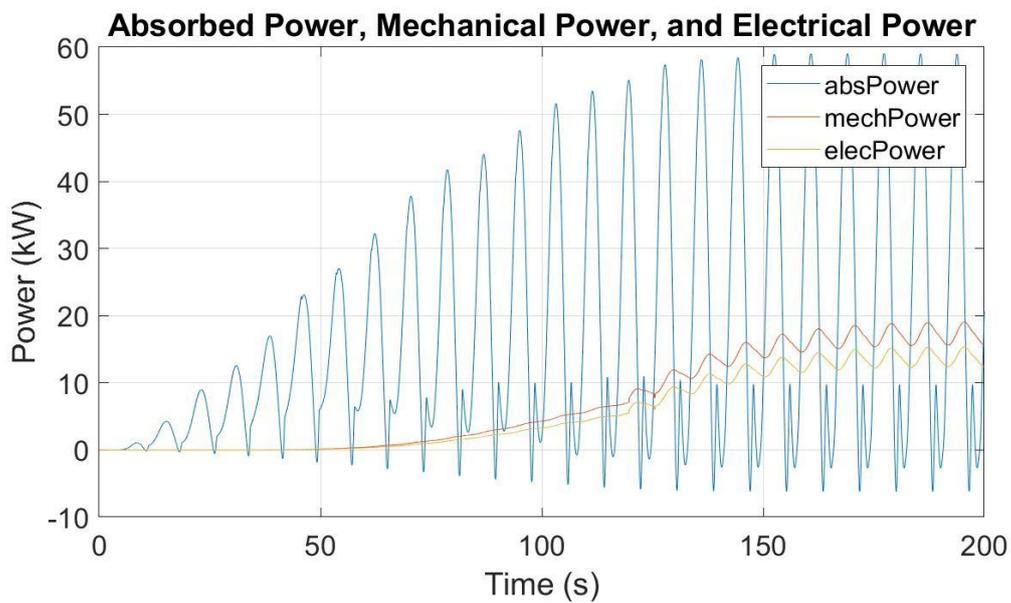
Potencia eléctrica media: 13.6306 kW

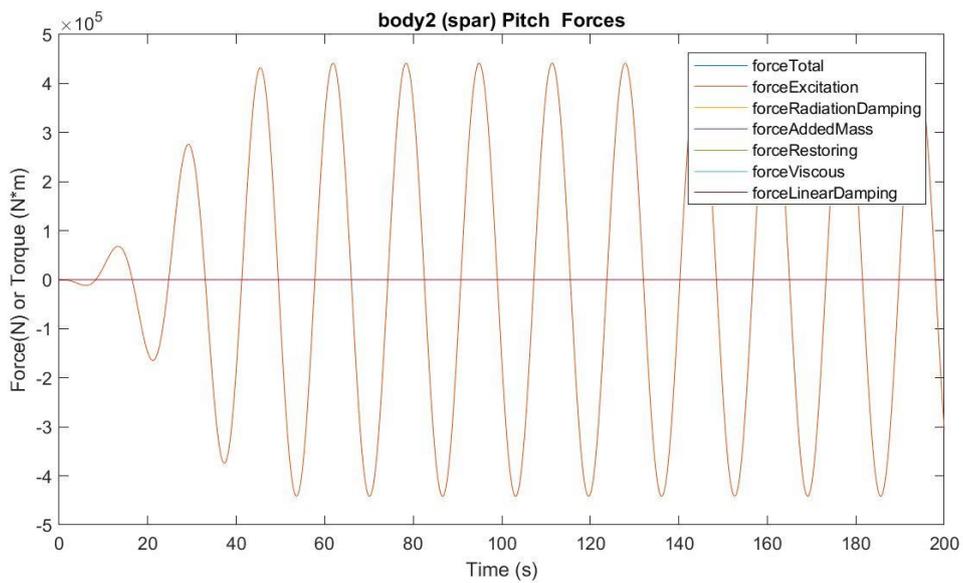
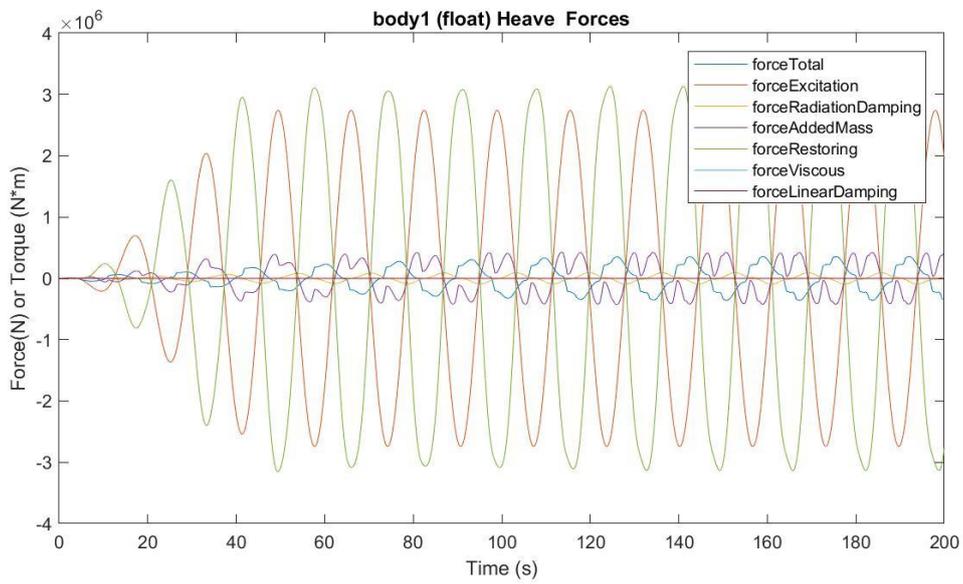
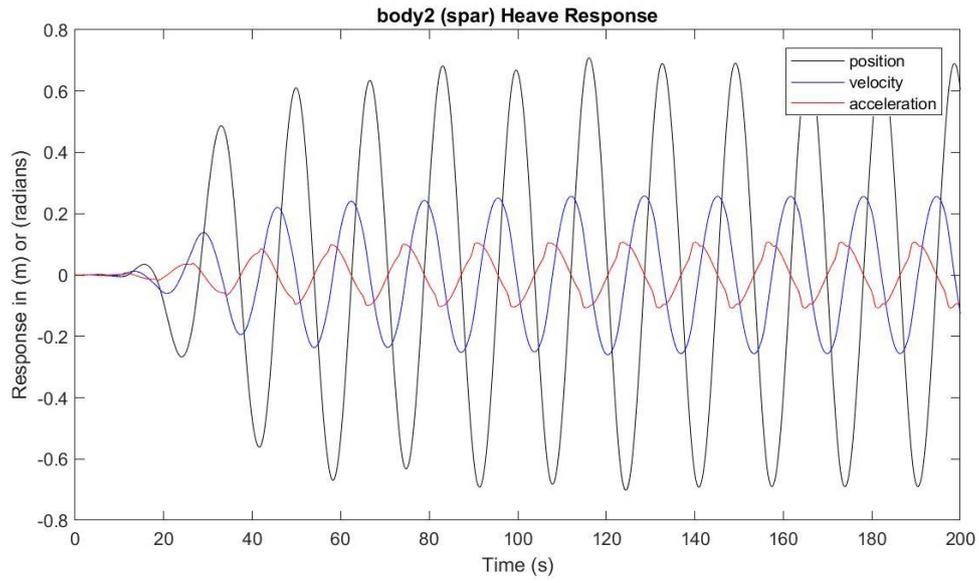
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7833 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 28.5009 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1253 m, 0.5375 m/s y 0.2103 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7086 m, 0.2581 m/s y 0.1070 m/s²





$H_s = 2.25 \text{ m}$

$T_e = 17.5 \text{ s}$

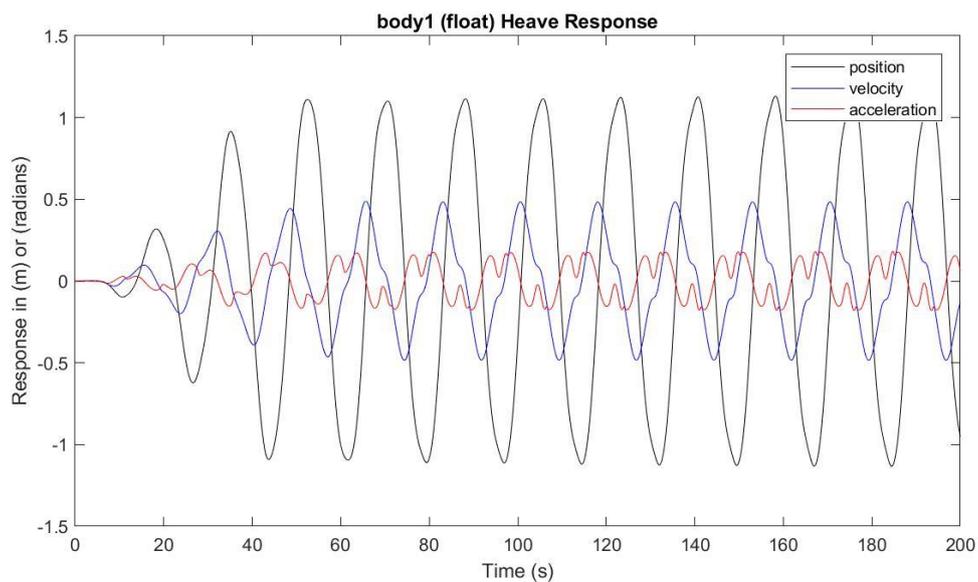
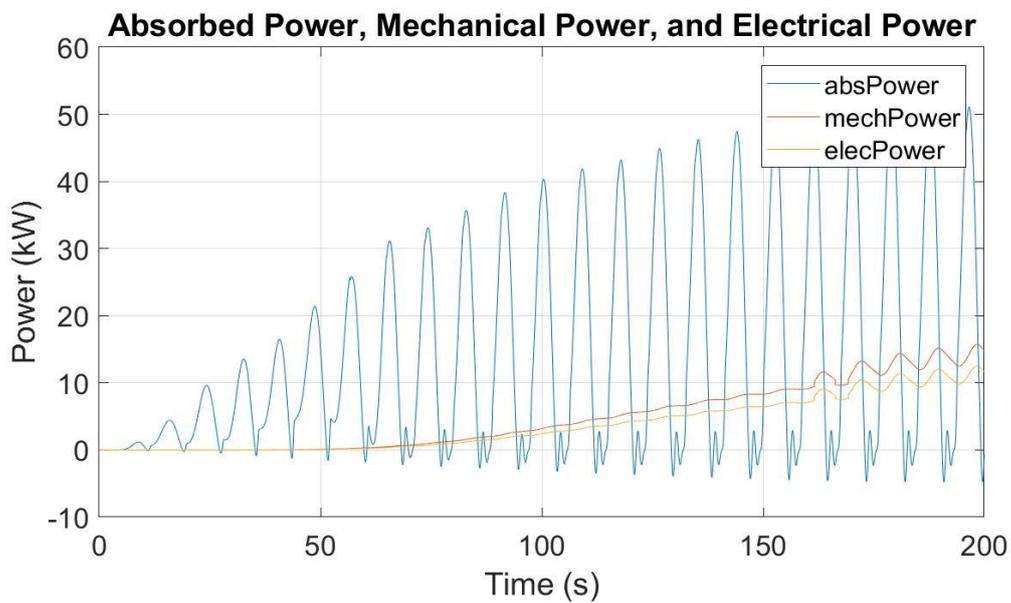
Potencia eléctrica media: 9.9006 kW

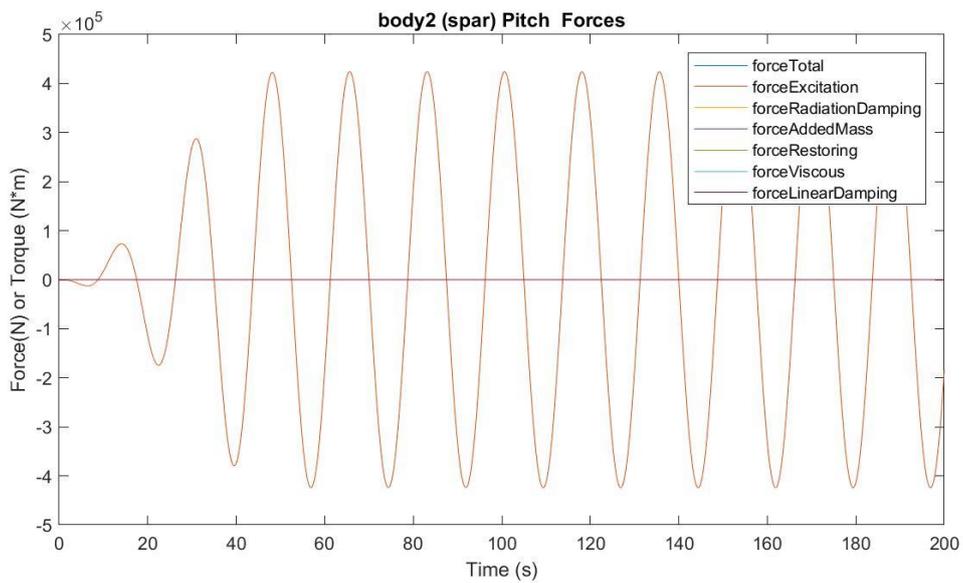
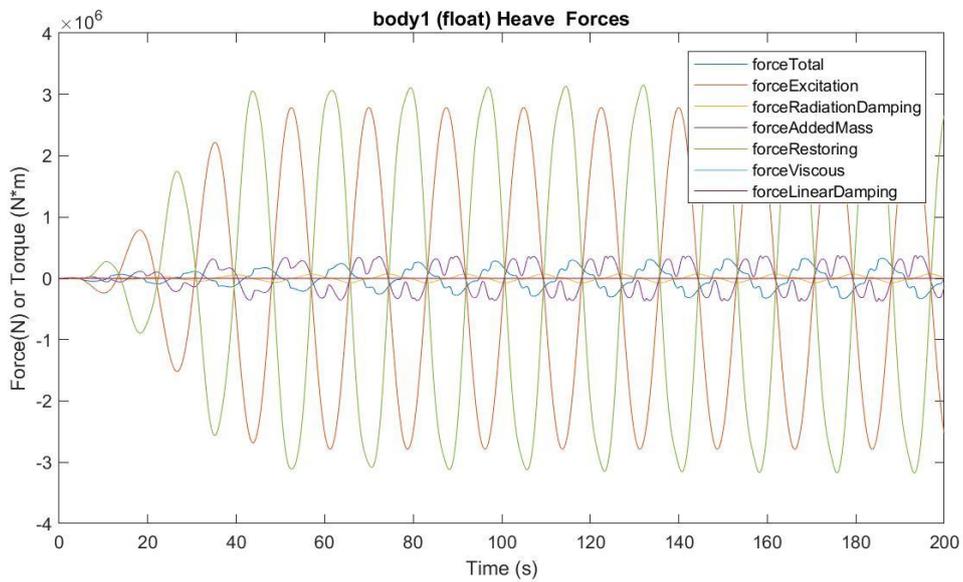
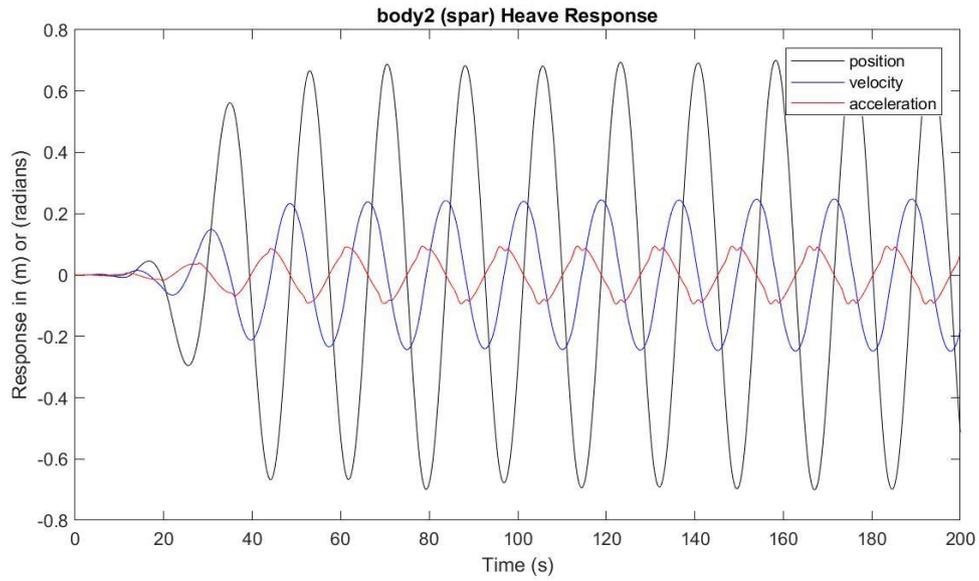
Presión media del acumulador de alta presión: 22.7117 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.6214 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1334 m, 0.4883 m/s y 0.1811 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7006 m, 0.2481 m/s y 0.0942 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$ $T_e = 6.5 \text{ s}$

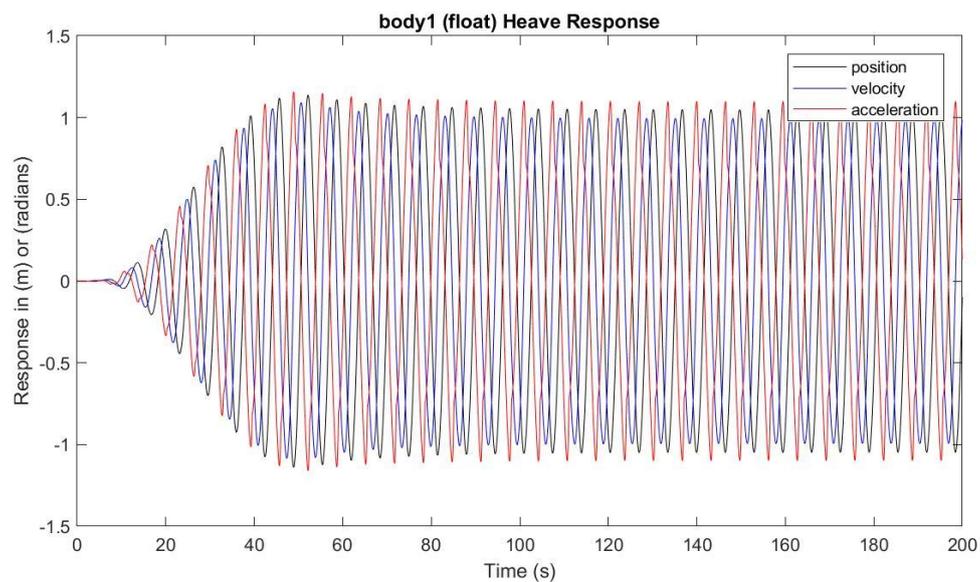
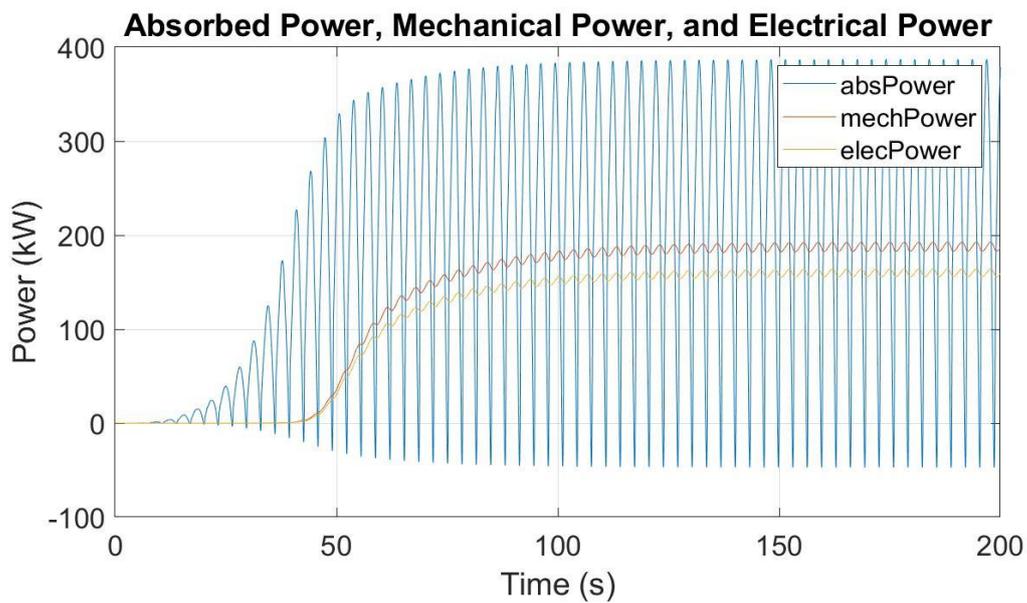
Potencia eléctrica media: 159.7447 kW

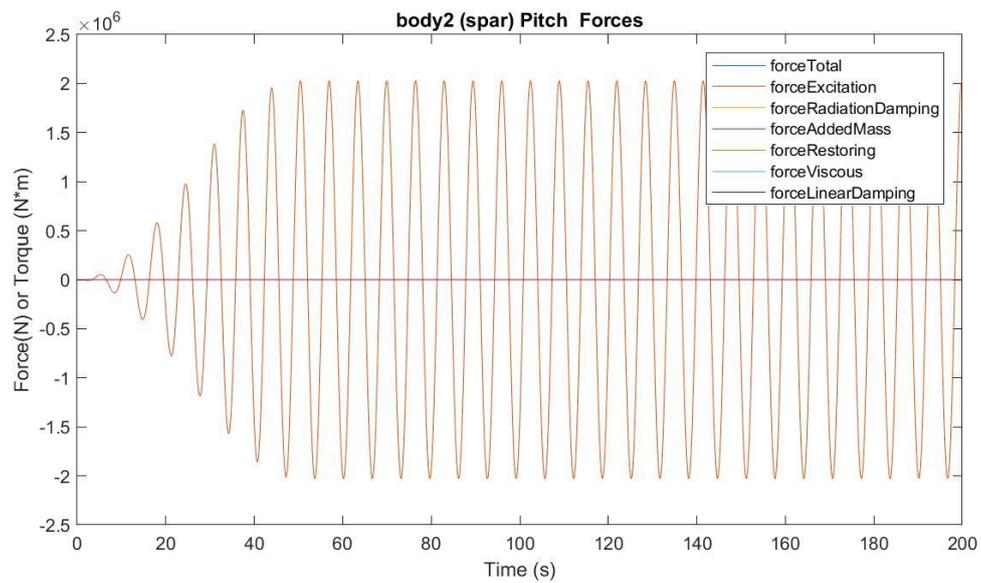
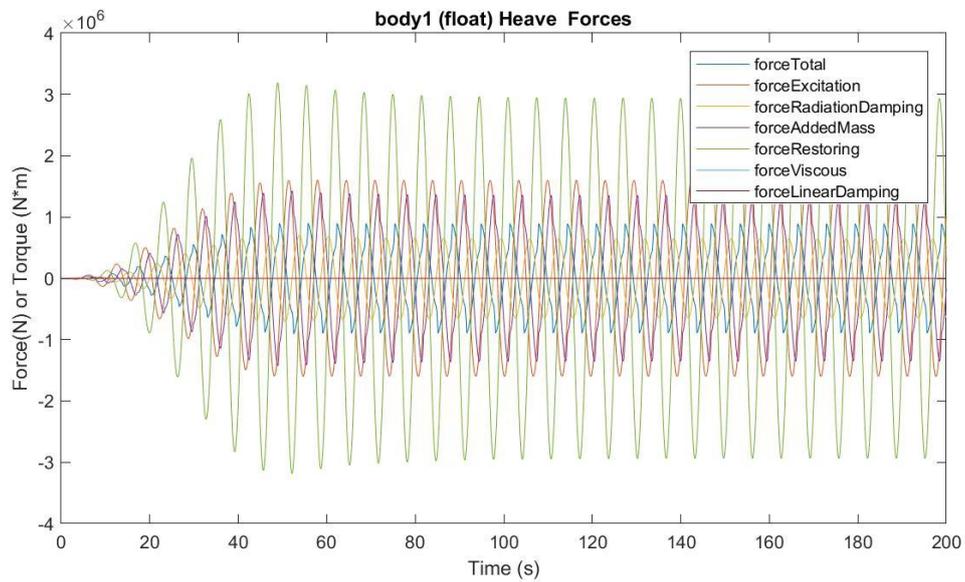
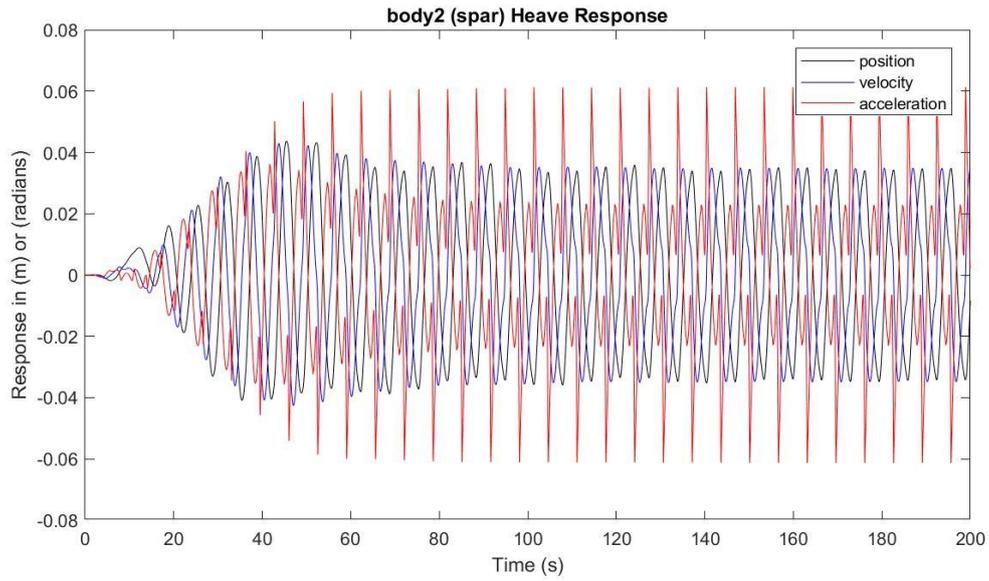
Presión media del acumulador de alta presión: 24.6603 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.8740 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.1376 m, 1.0908 m/s y 1.1580 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.0437 m, 0.0429 m/s y 0.0613 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

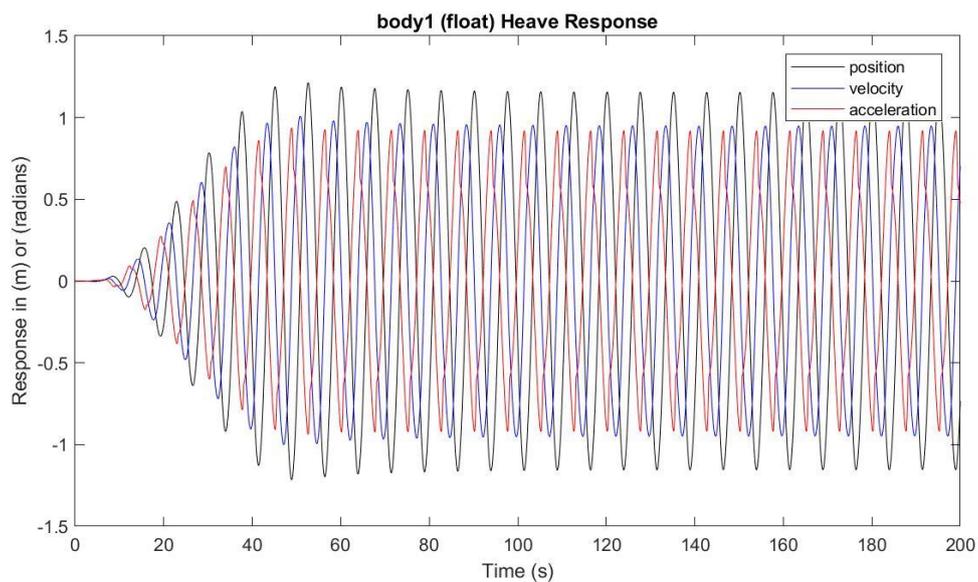
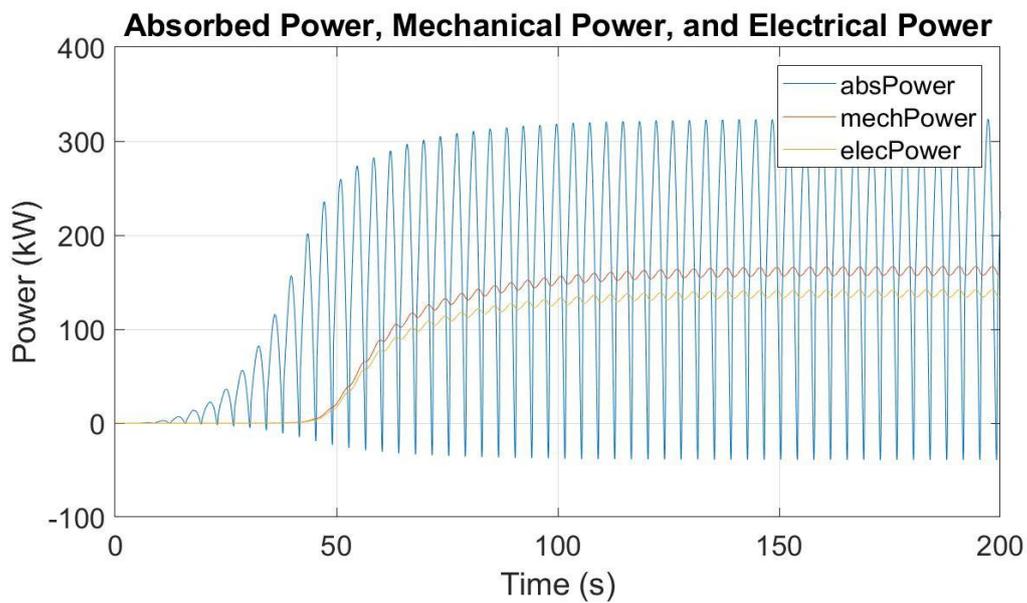
Potencia eléctrica media: 137.8987 kW

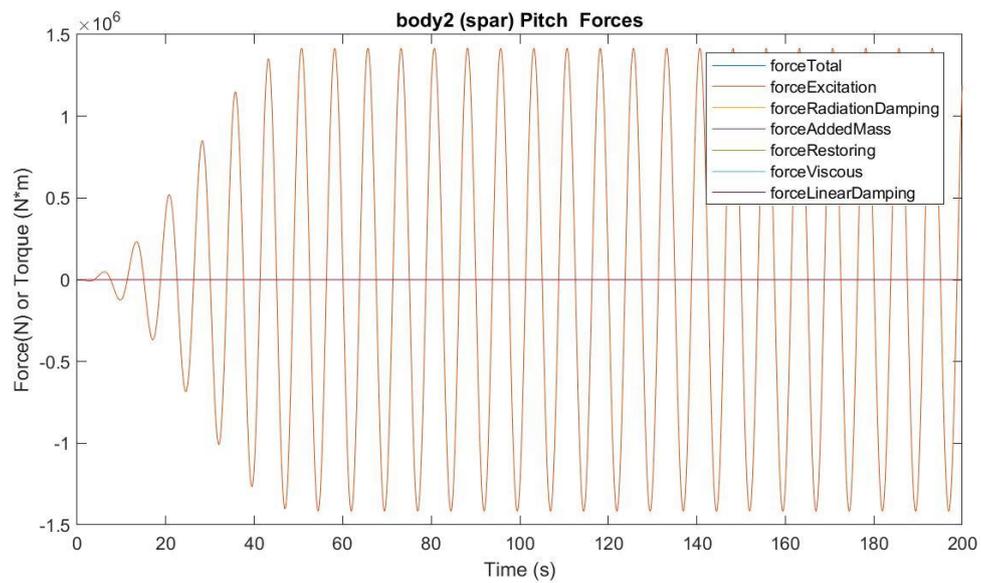
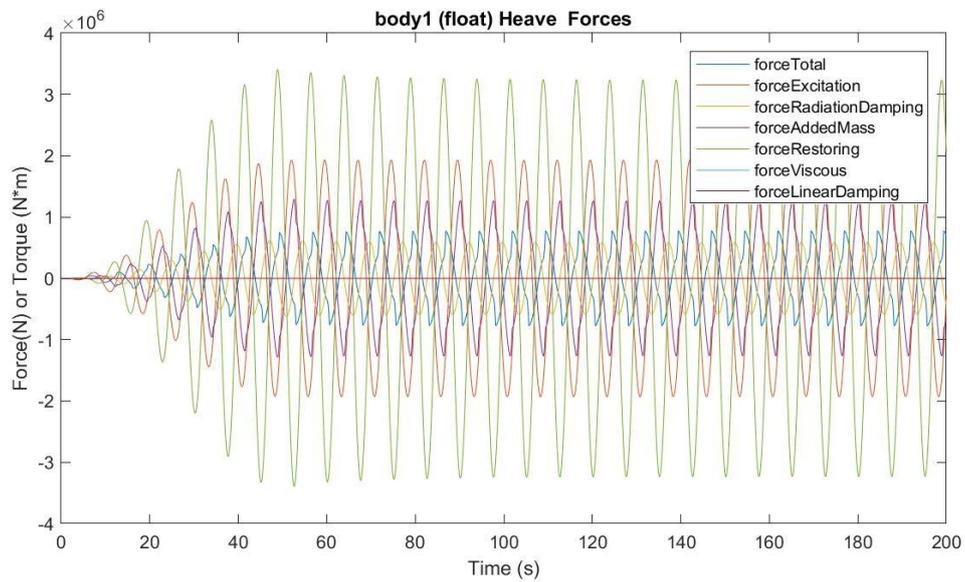
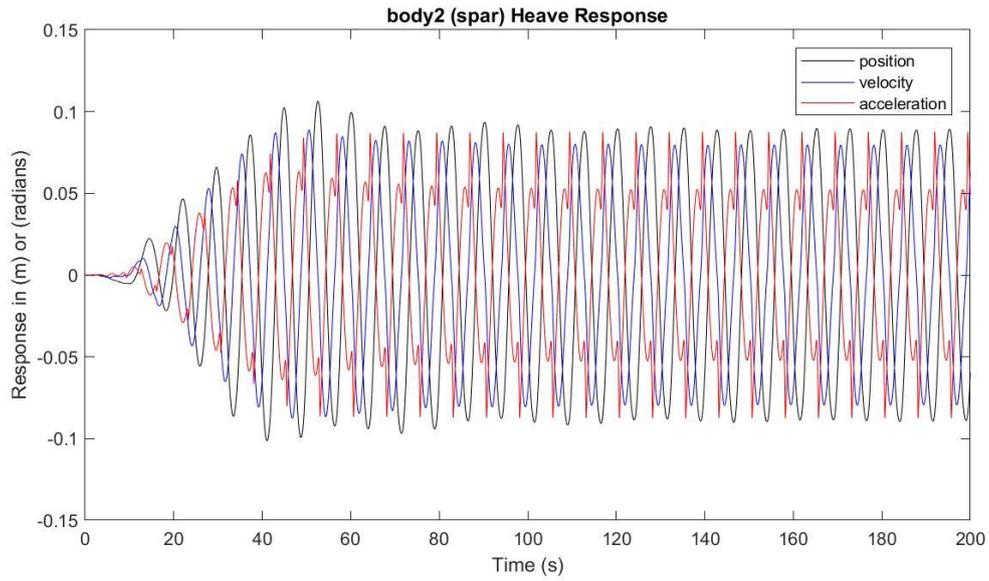
Presión media del acumulador de alta presión: 24.4394 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.1383 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.2133 m, 1.0085 m/s y 0.9368 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1064 m, 0.0888 m/s y 0.0876 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$
 $T_e = 8.5 \text{ s}$

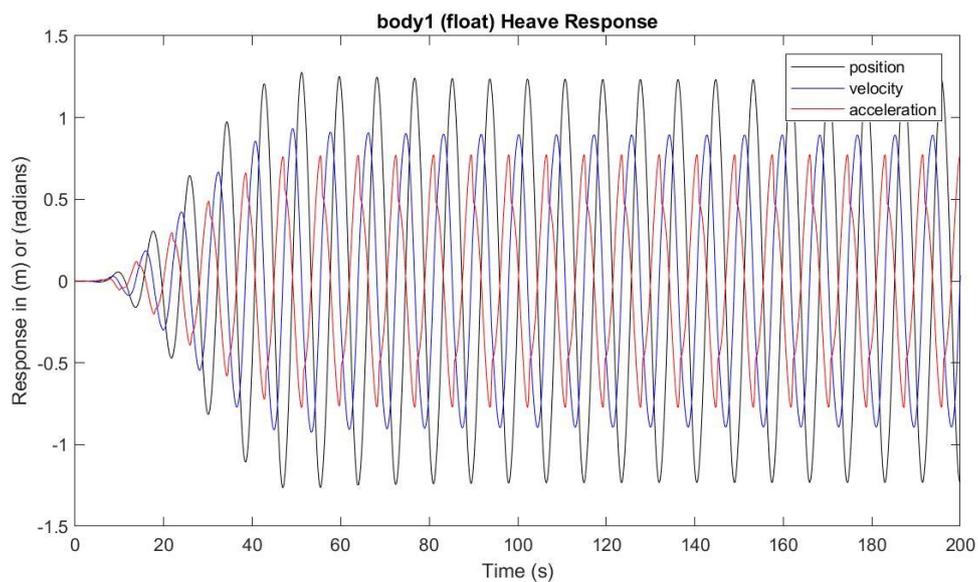
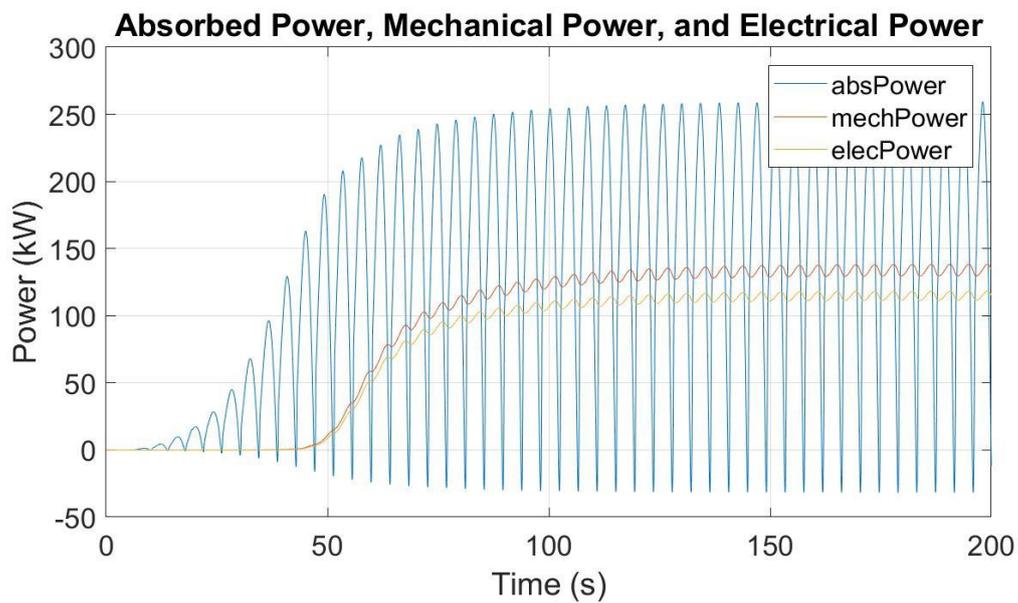
Potencia eléctrica media: 114.8594 kW

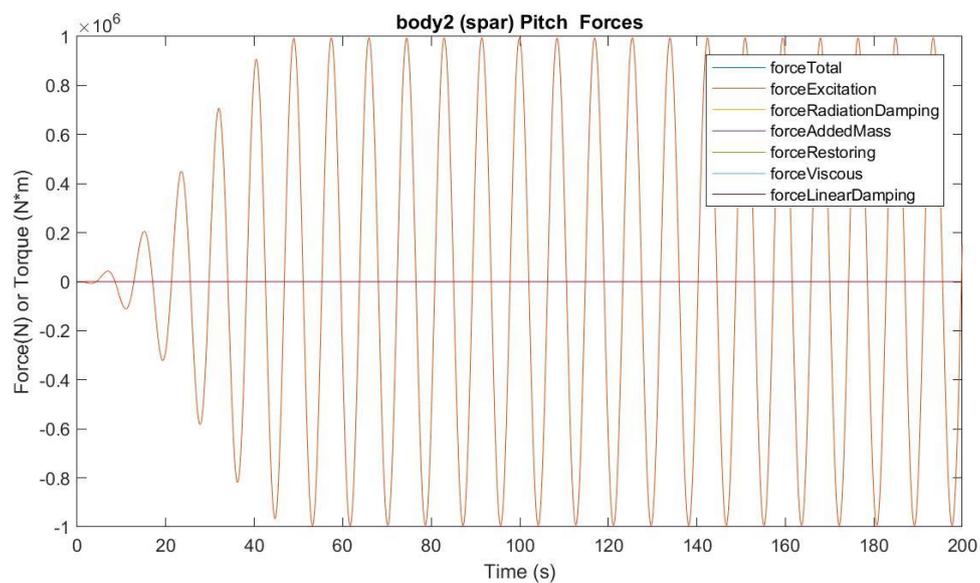
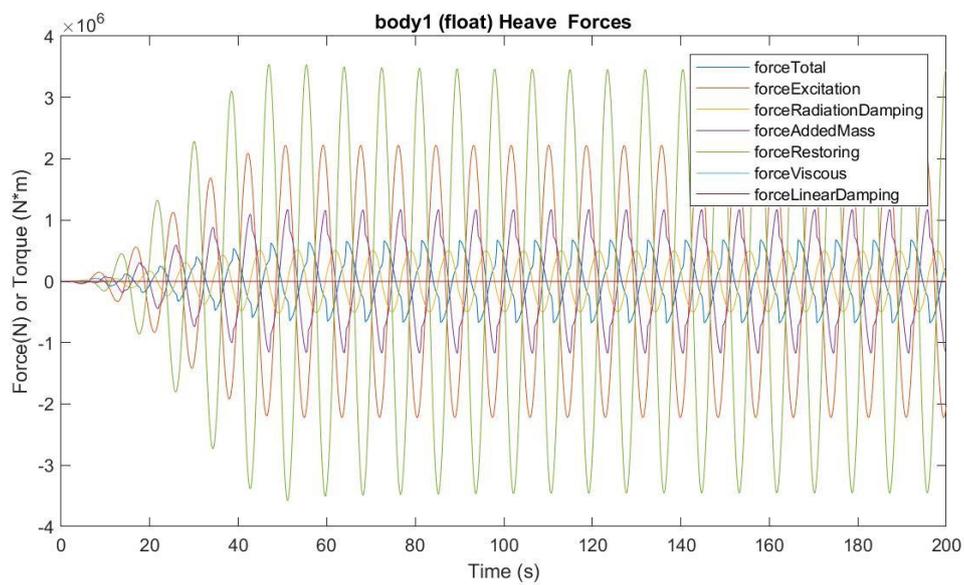
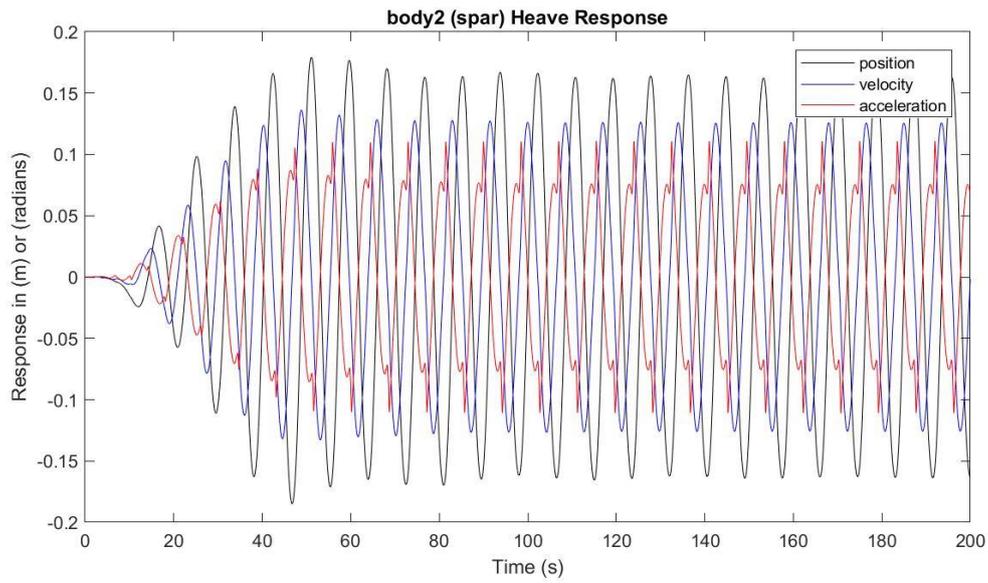
Presión media del acumulador de alta presión: 24.1862 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.4543 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.2765 m, 0.9331 m/s y 0.7737 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1791 m, 0.1362 m/s y 0.1109 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

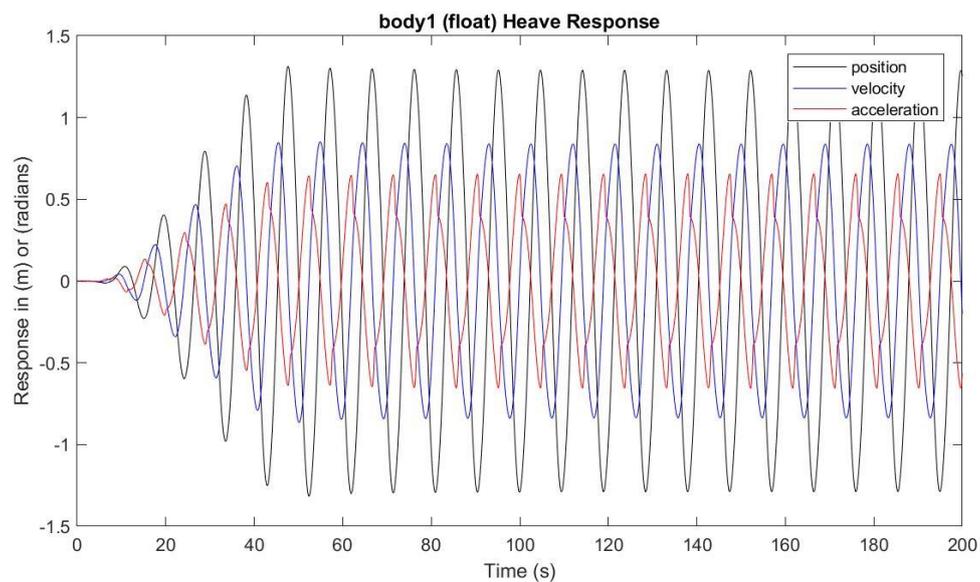
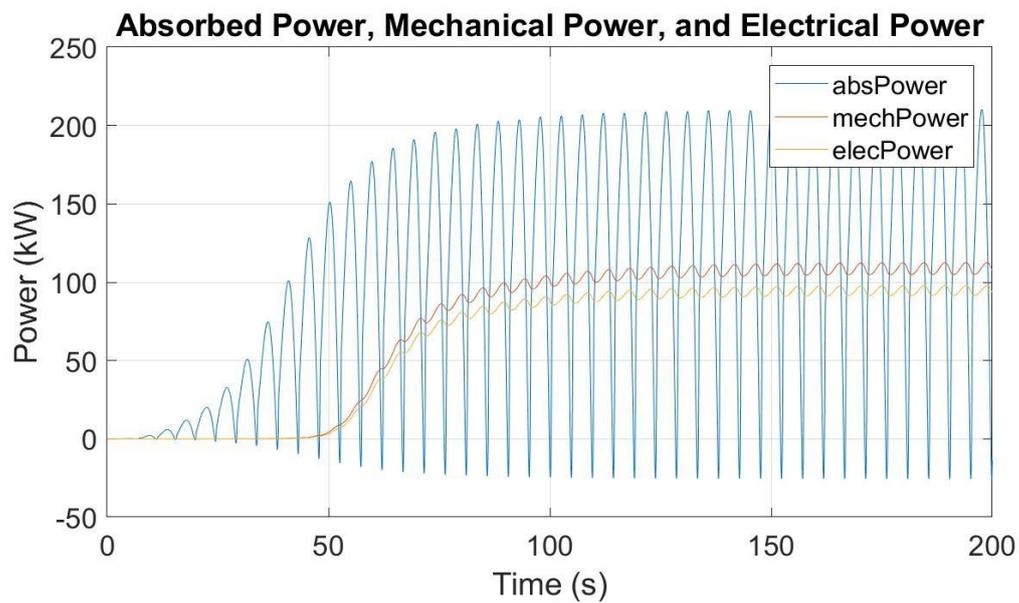
Potencia eléctrica media: 94.5794 kW

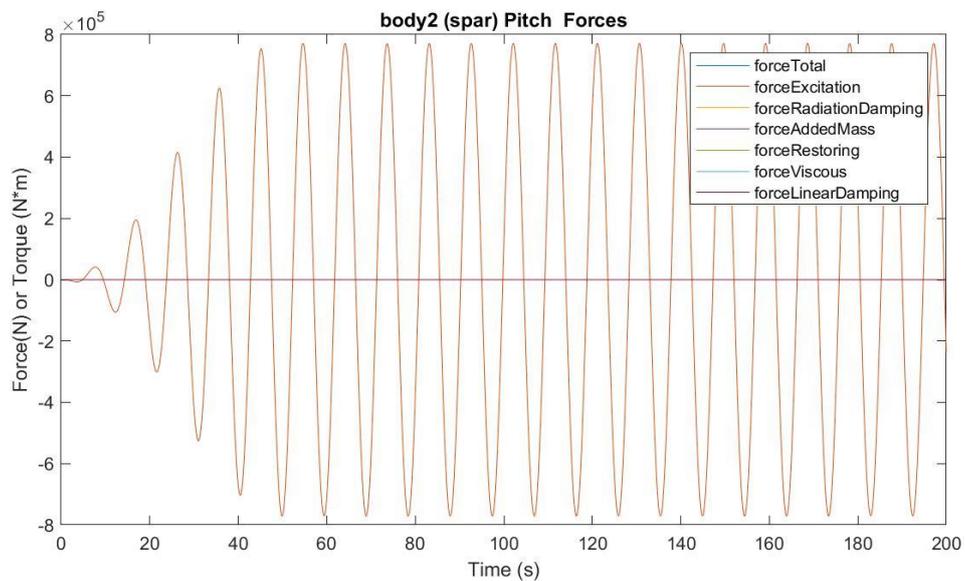
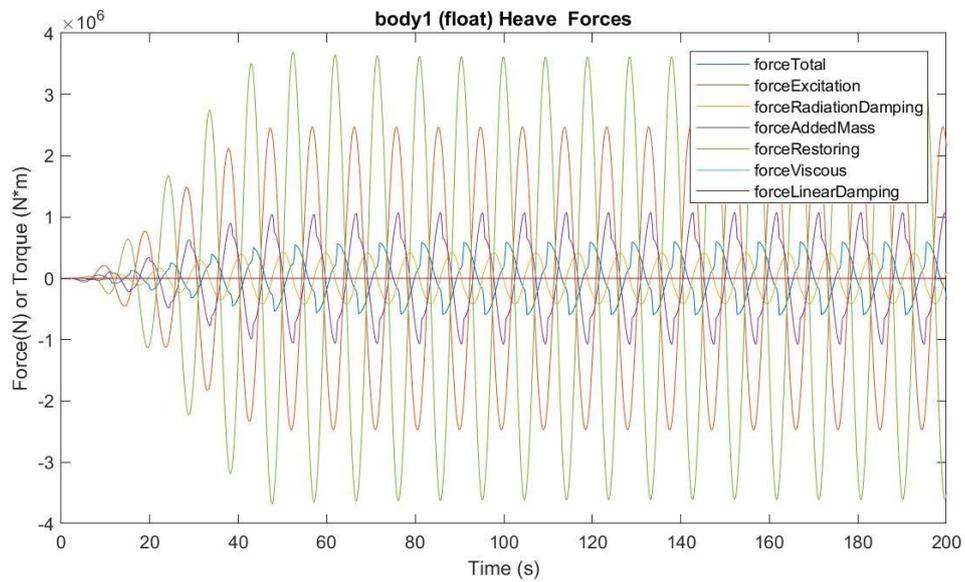
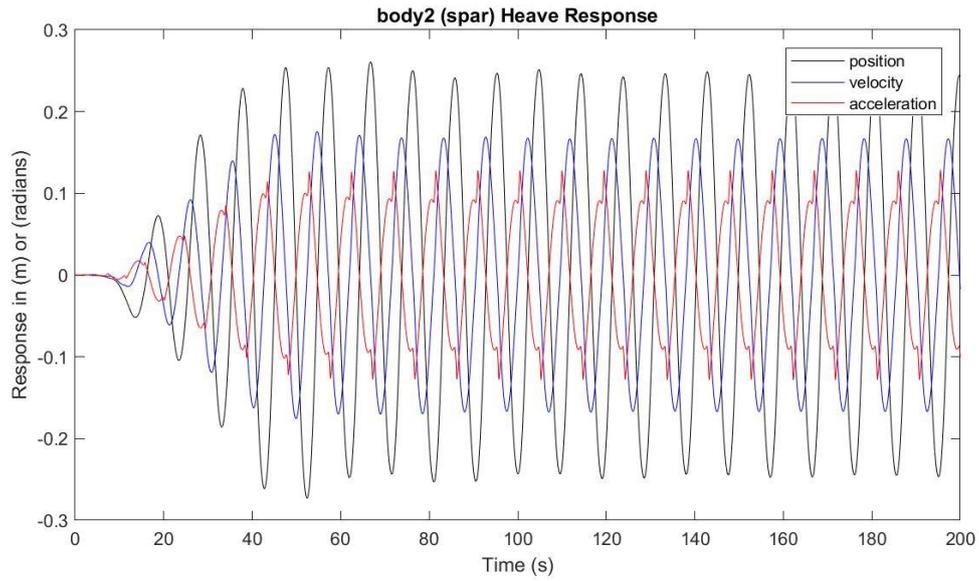
Presión media del acumulador de alta presión: 23.9397 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.7751 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3127 m, 0.8515 m/s y 0.6562 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2608 m, 0.1756 m/s y 0.1281 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

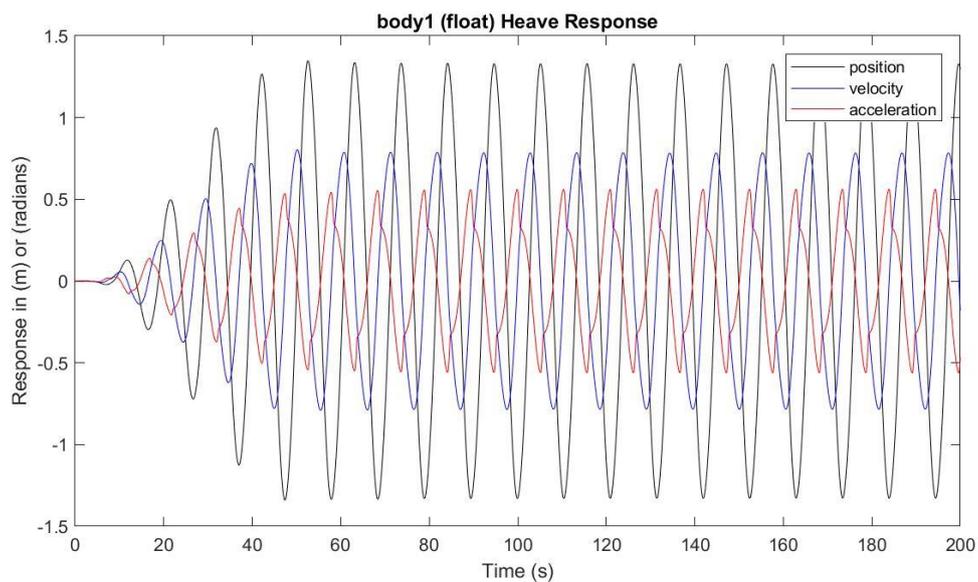
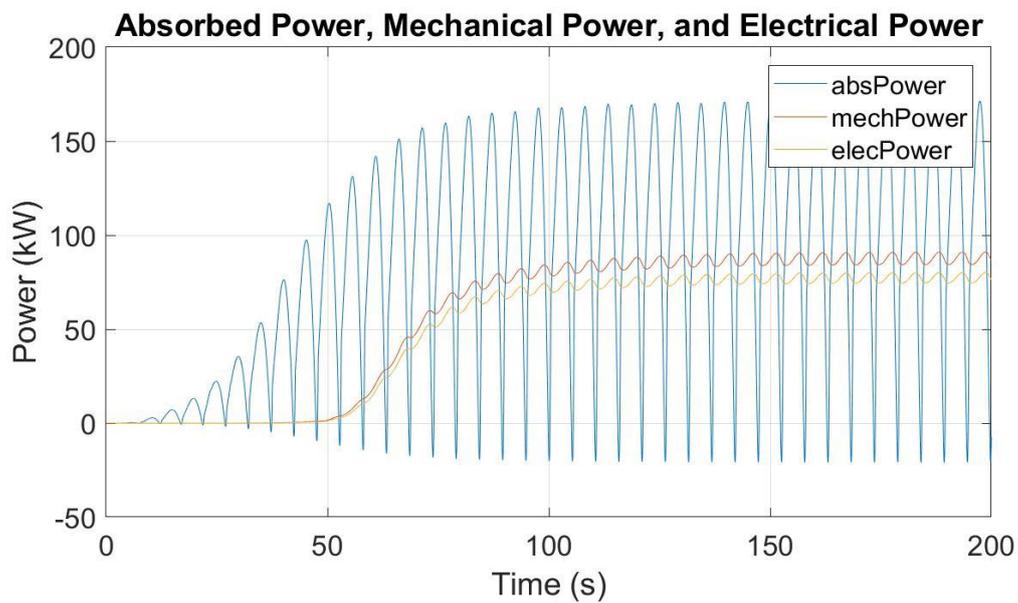
Potencia eléctrica media: 77.2549 kW

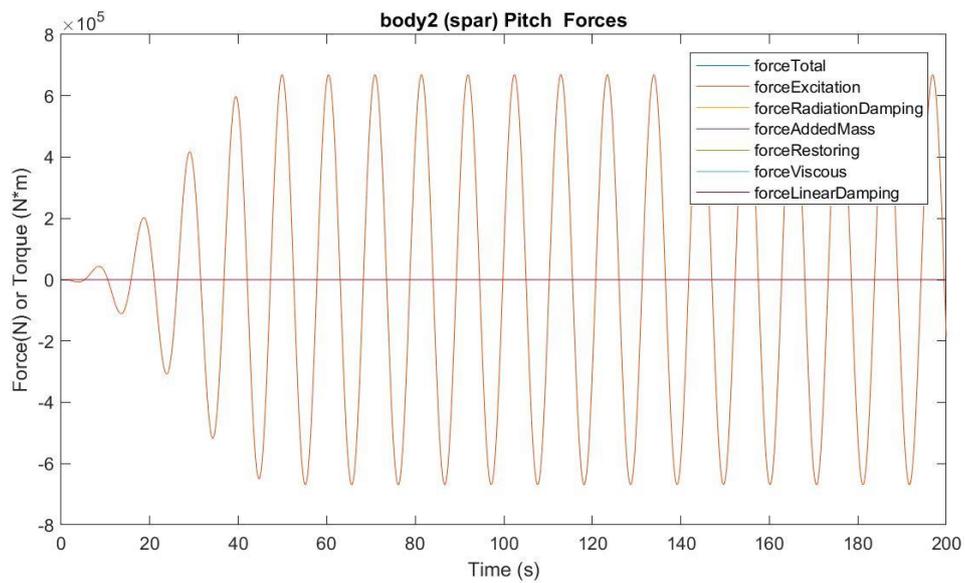
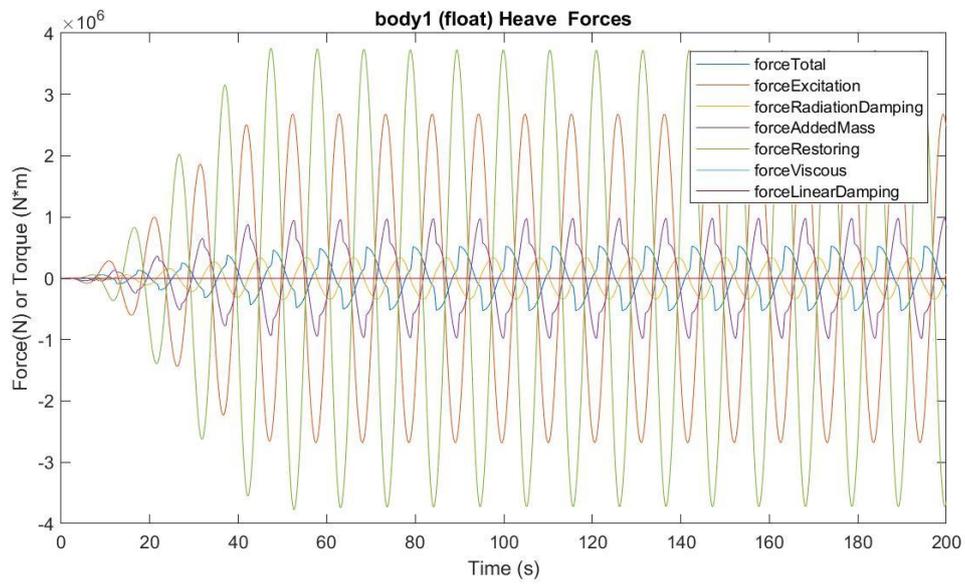
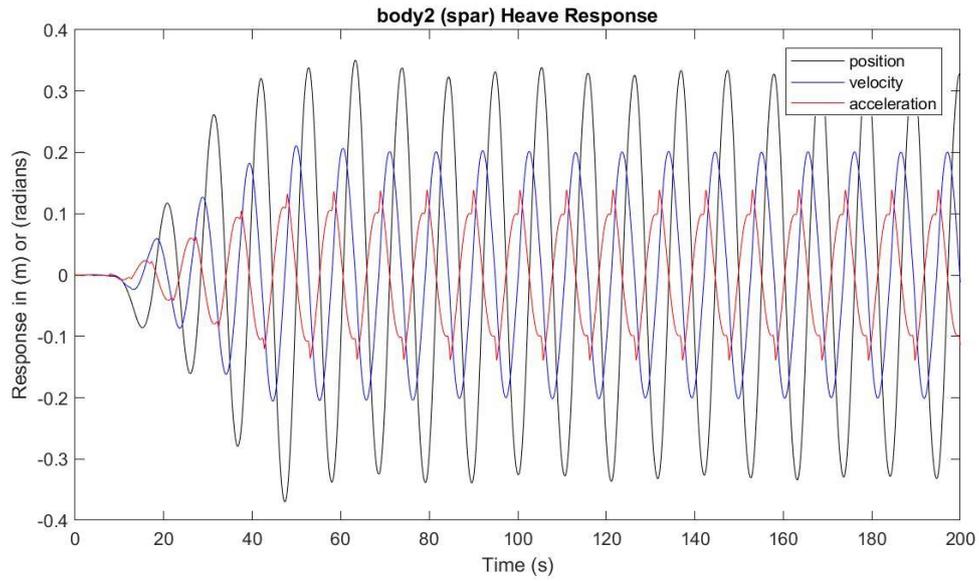
Presión media del acumulador de alta presión: 23.7195 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.0742 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3475 m, 0.8026 m/s y 0.5623 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3505 m, 0.2110 m/s y 0.1390 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

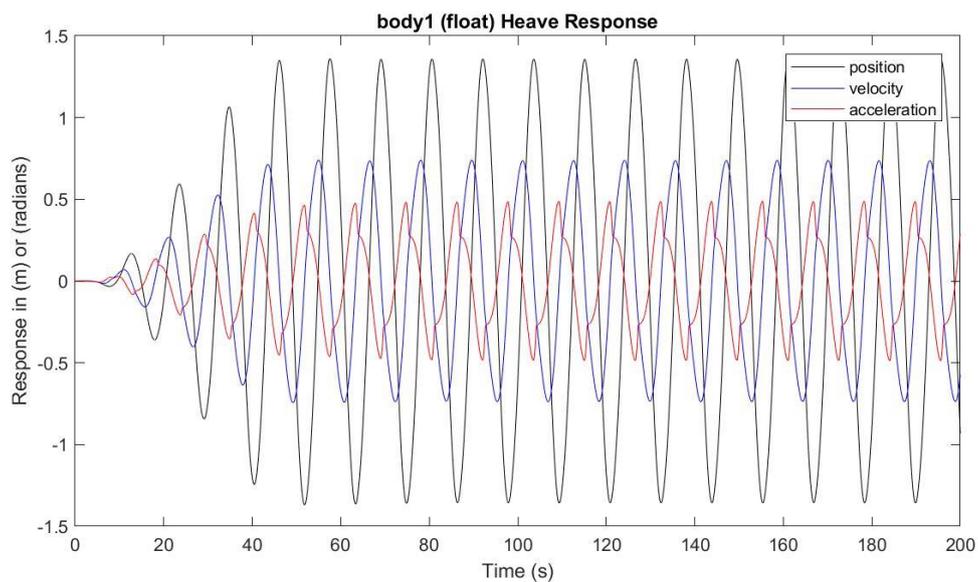
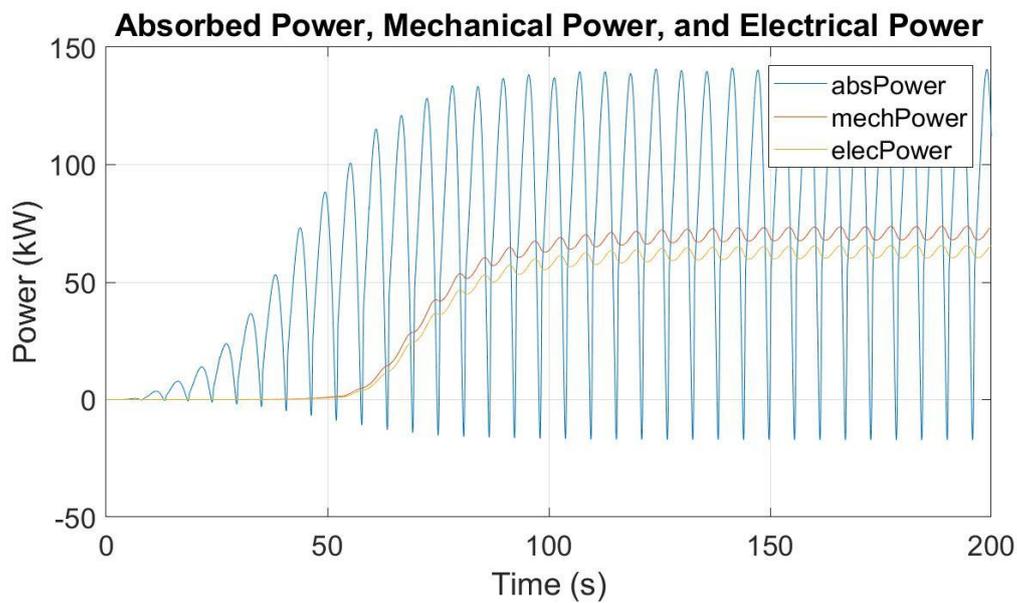
Potencia eléctrica media: 62.7822 kW

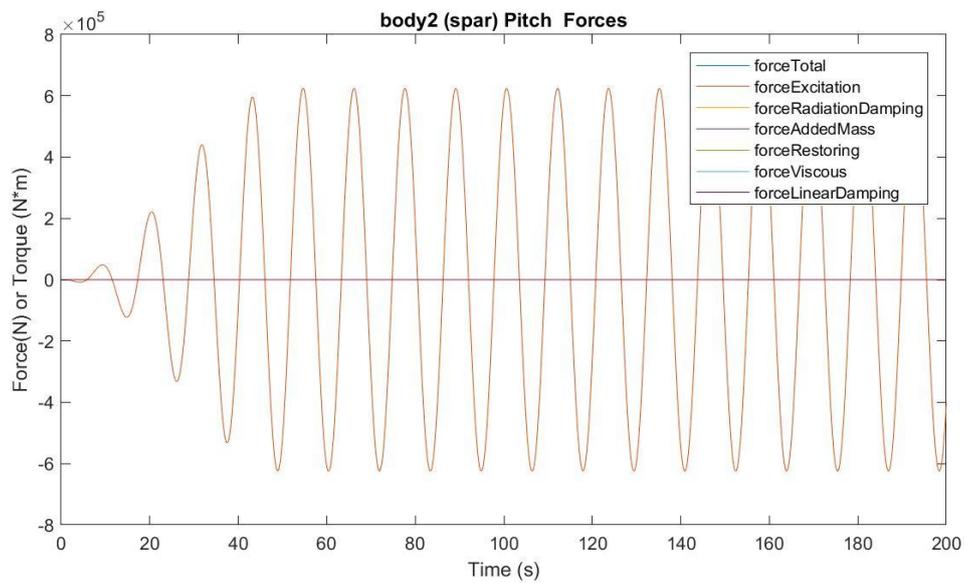
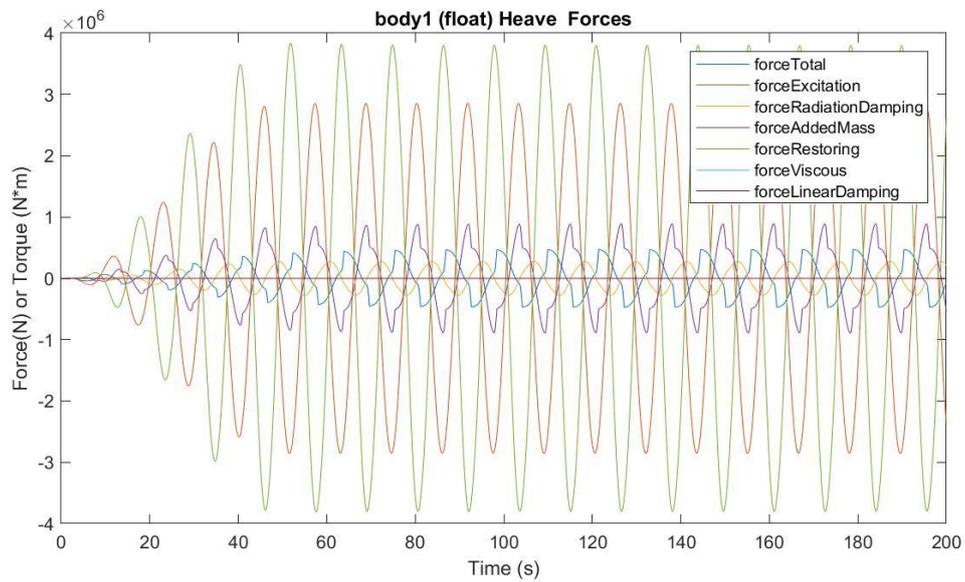
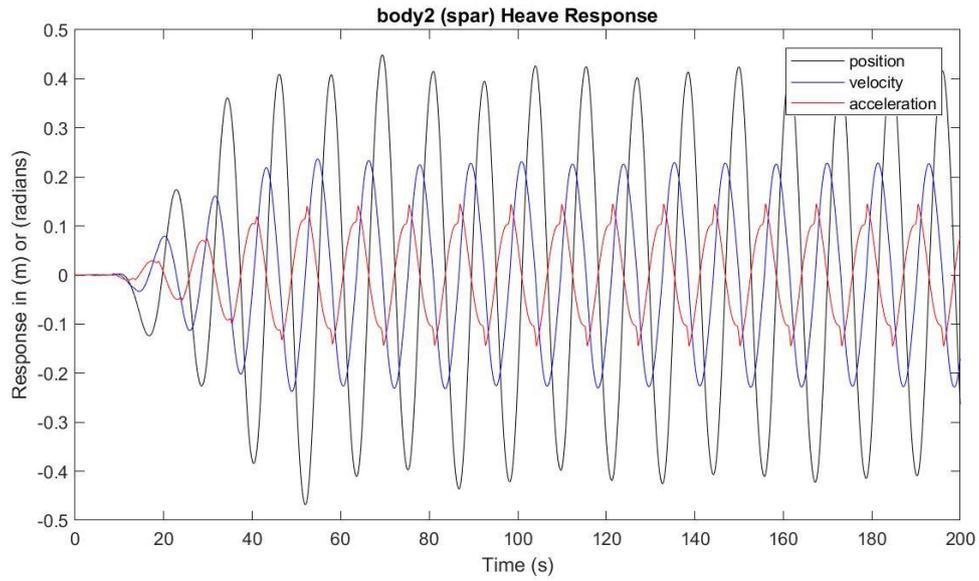
Presión media del acumulador de alta presión: 23.5281 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.3446 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3597 m, 0.7390 m/s y 0.4872 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4490 m, 0.2369 m/s y 0.1449 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

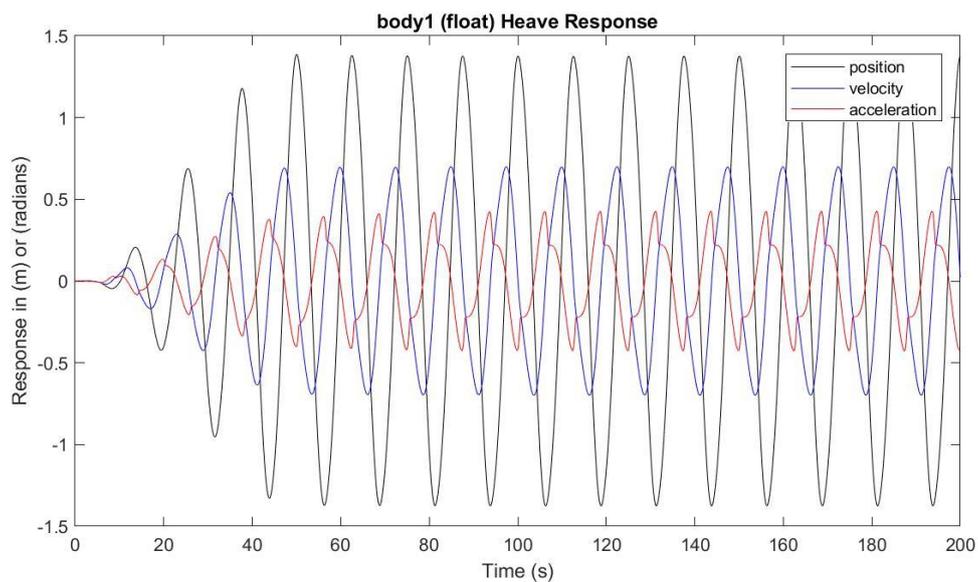
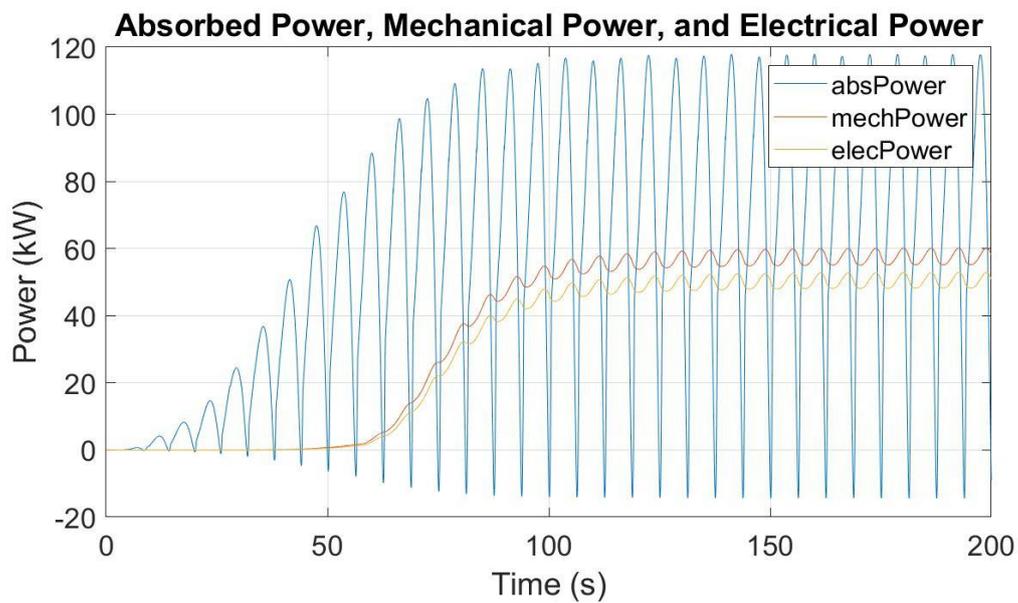
Potencia eléctrica media: 50.3851 kW

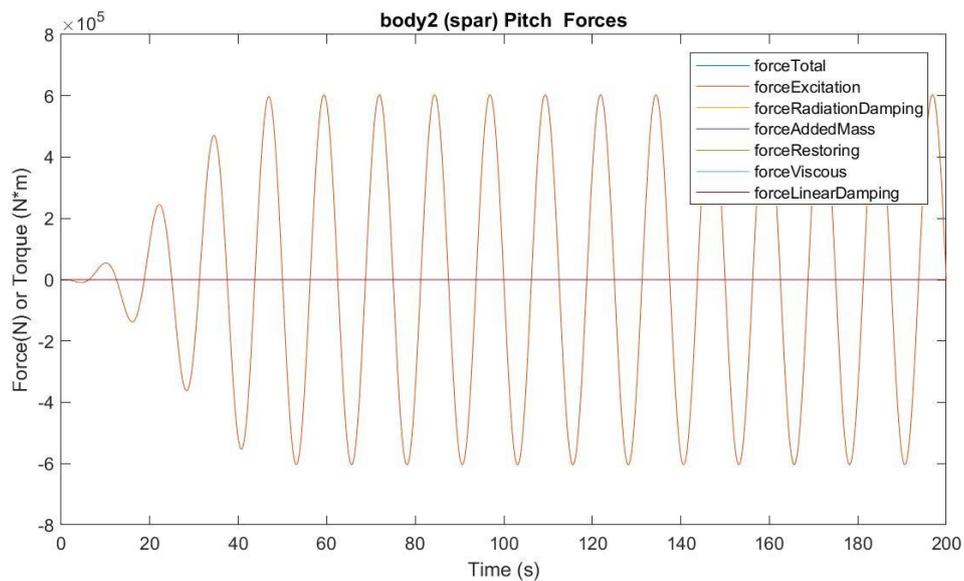
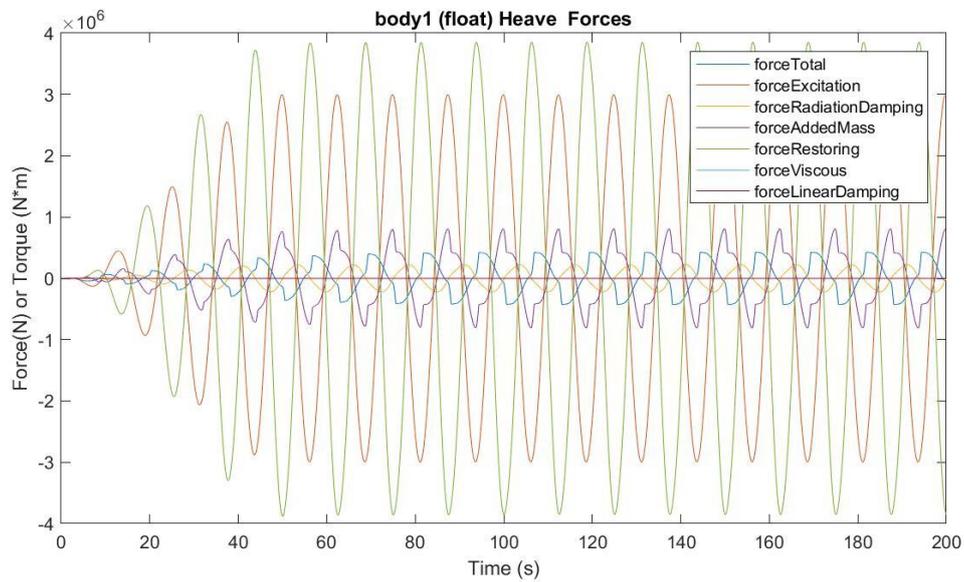
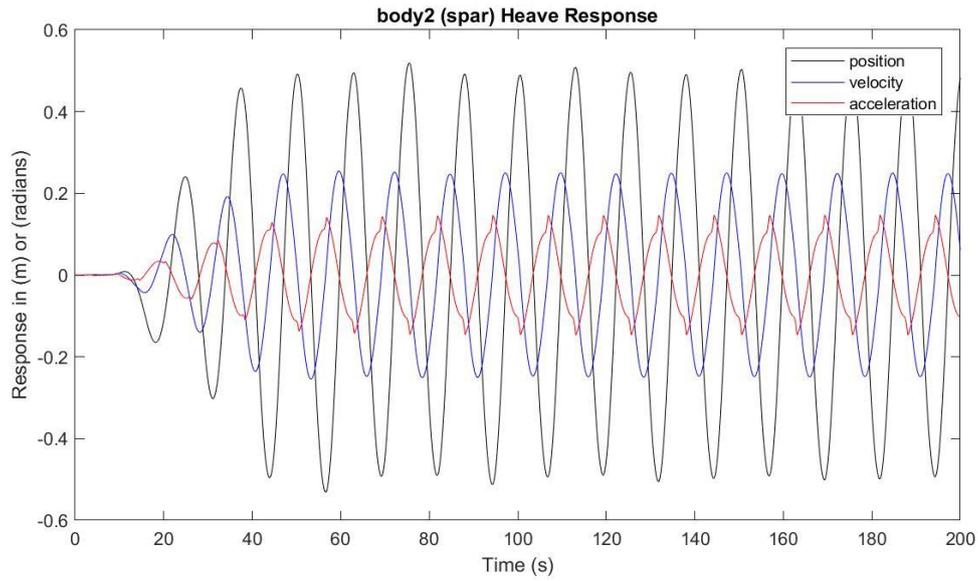
Presión media del acumulador de alta presión: 23.3694 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.5767 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3853 m, 0.6991 m/s y 0.4271 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5190 m, 0.2545 m/s y 0.1467 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

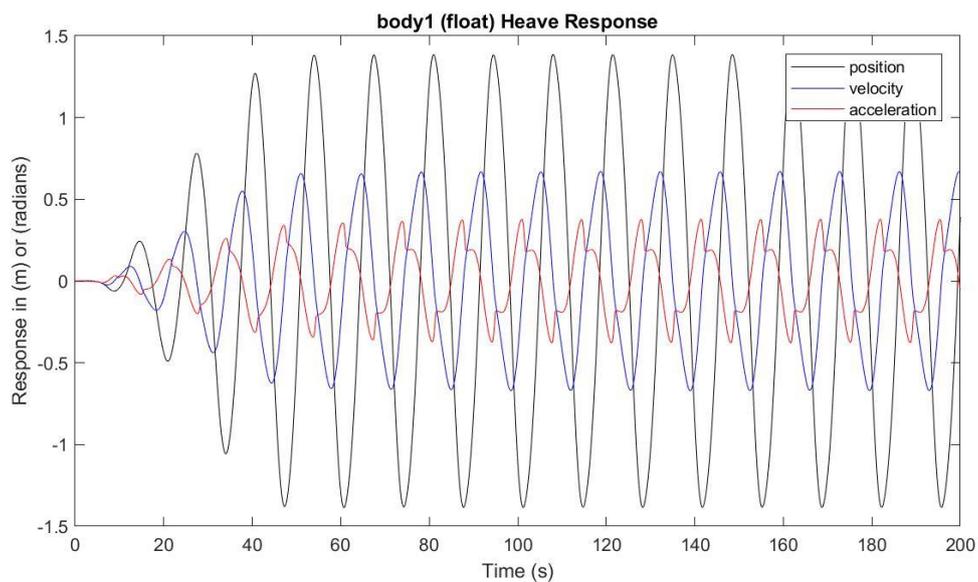
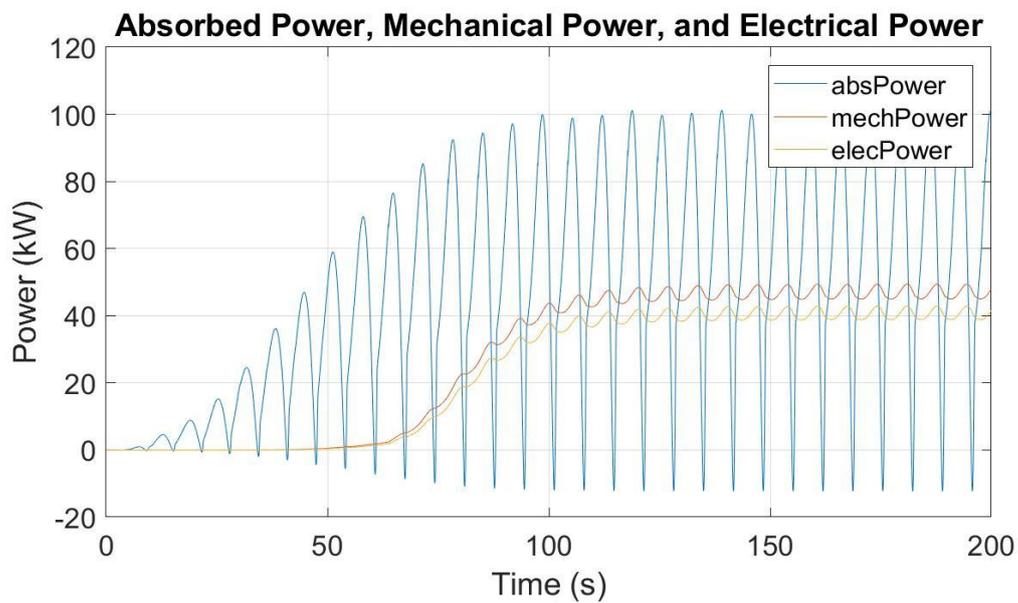
Potencia eléctrica media: 40.5702 kW

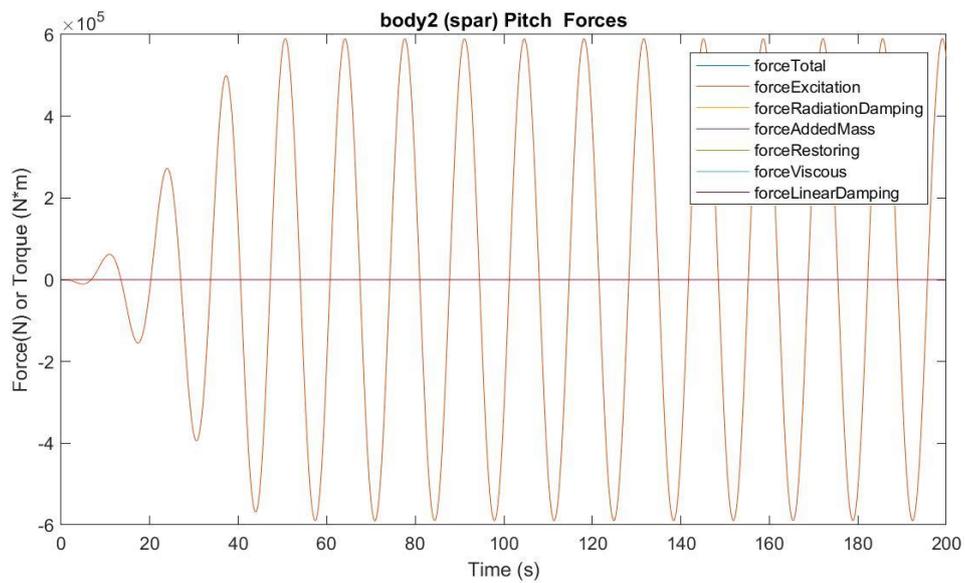
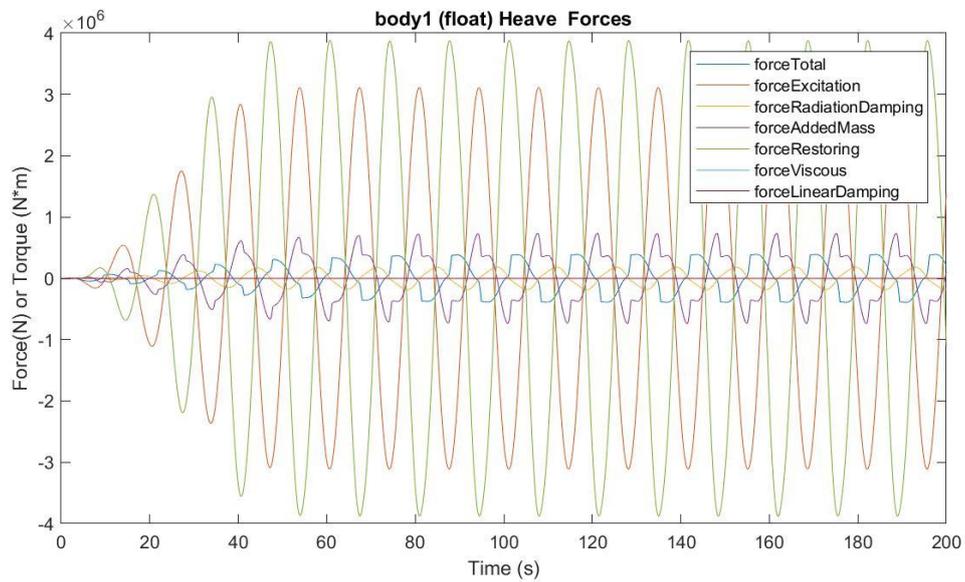
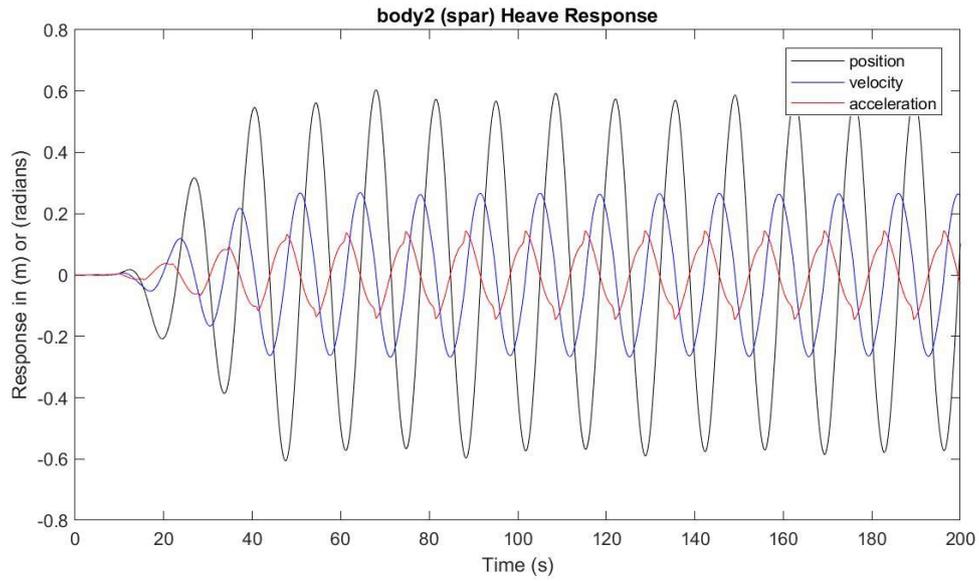
Presión media del acumulador de alta presión: 23.2316 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.7841 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3850 m, 0.6707 m/s y 0.3784 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.6044 m, 0.2688 m/s y 0.1454 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

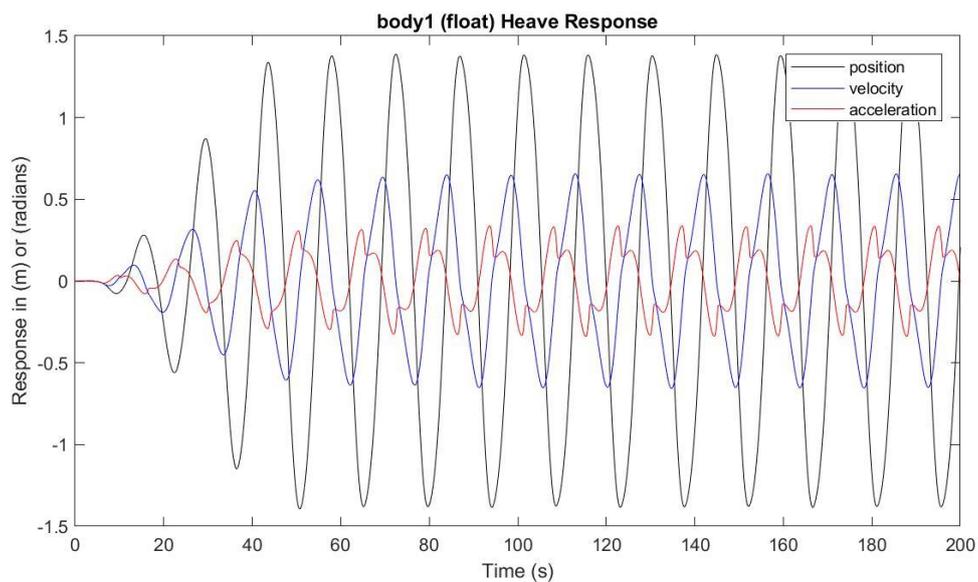
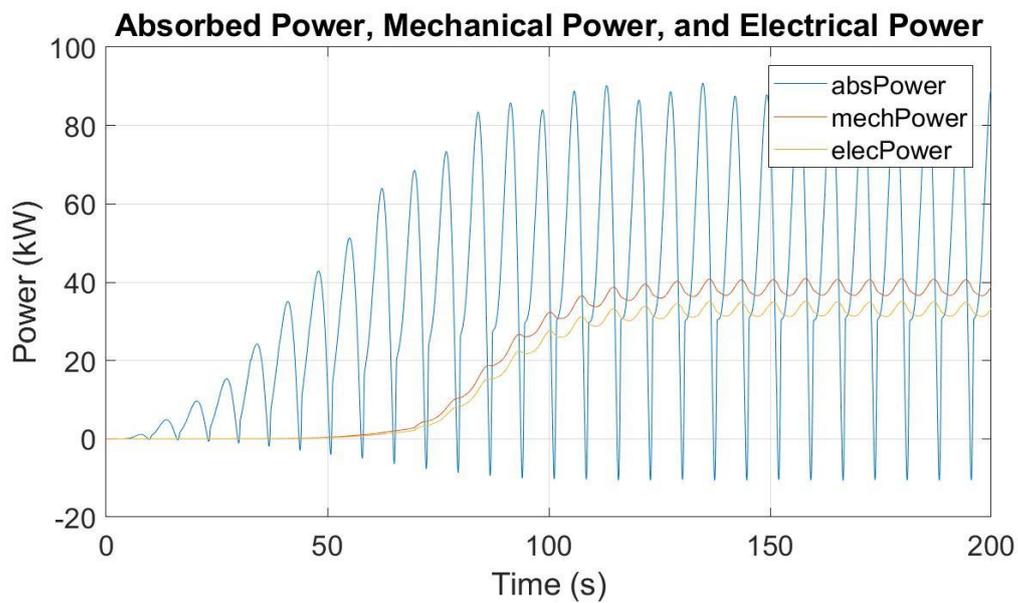
Potencia eléctrica media: 32.7520 kW

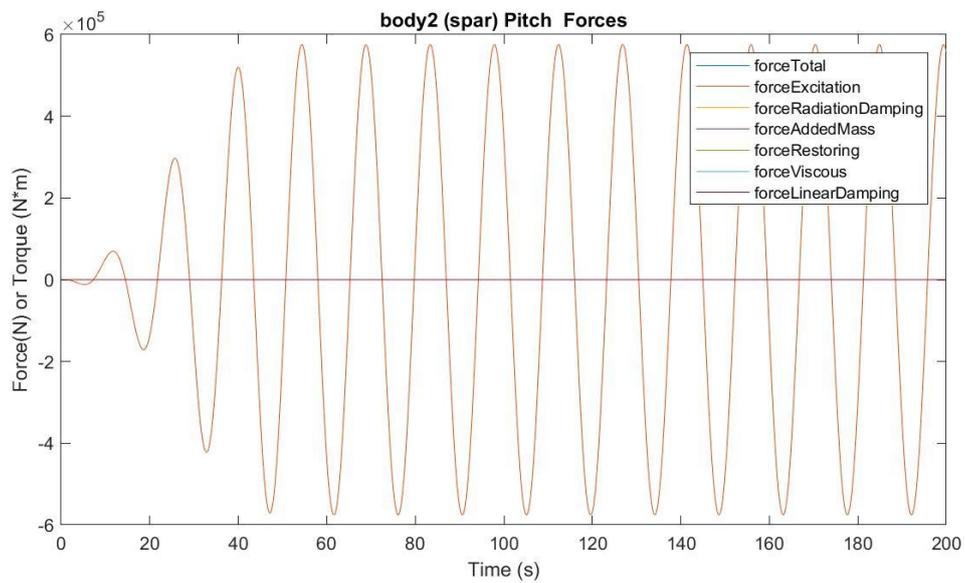
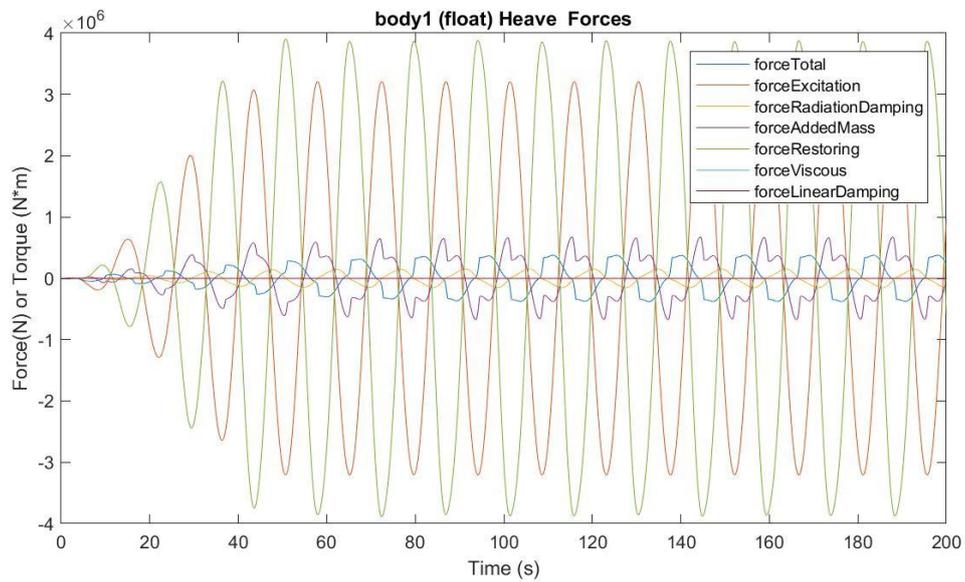
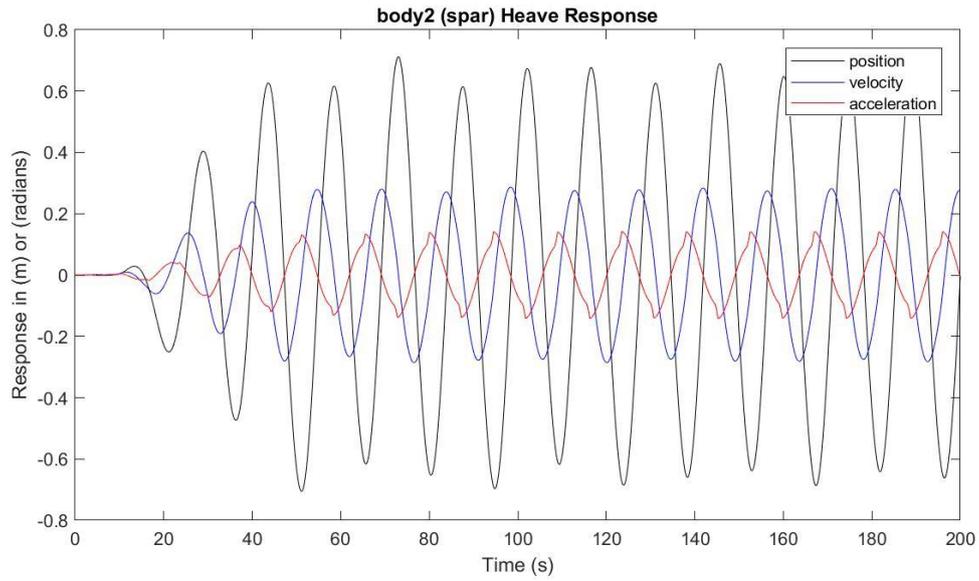
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1116 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.9695 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3874 m, 0.6567 m/s y 0.3388 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7119 m, 0.2868 m/s y 0.1423 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

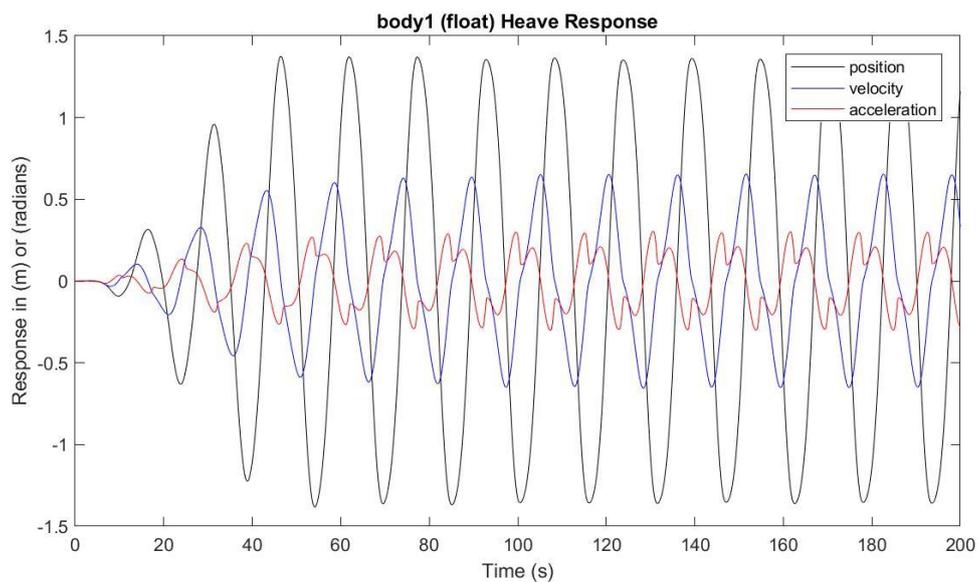
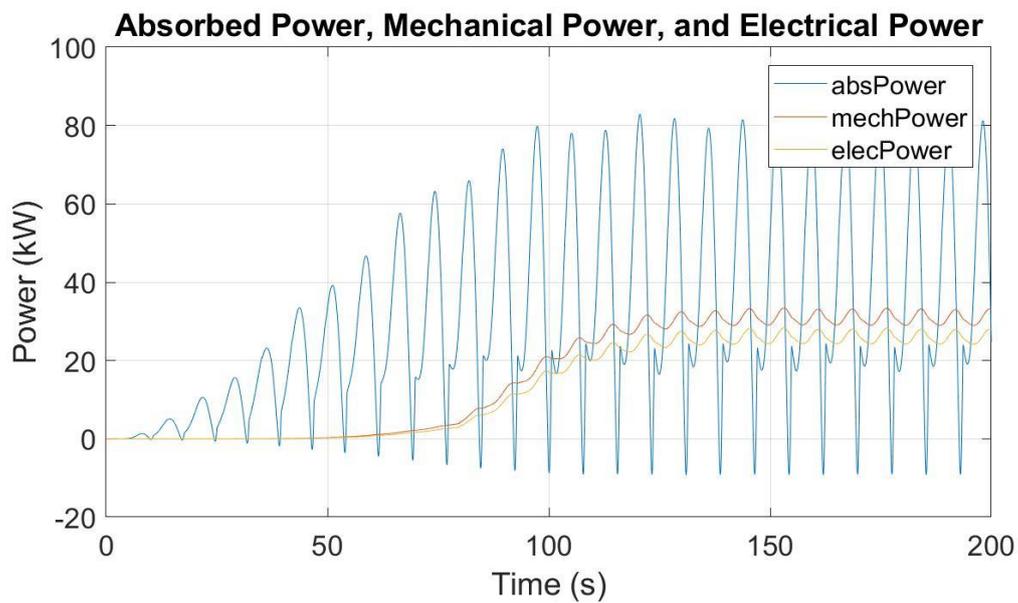
Potencia eléctrica media: 25.9523 kW

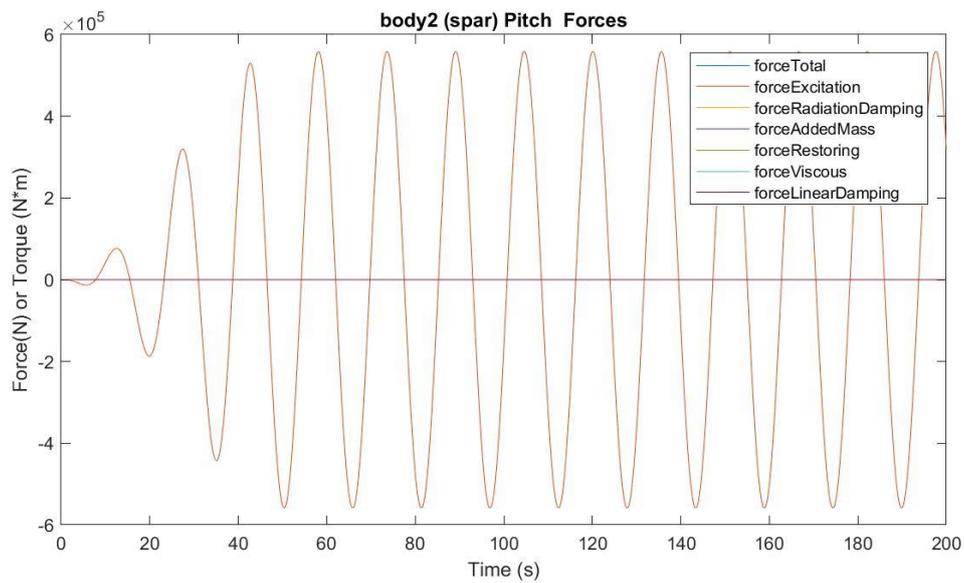
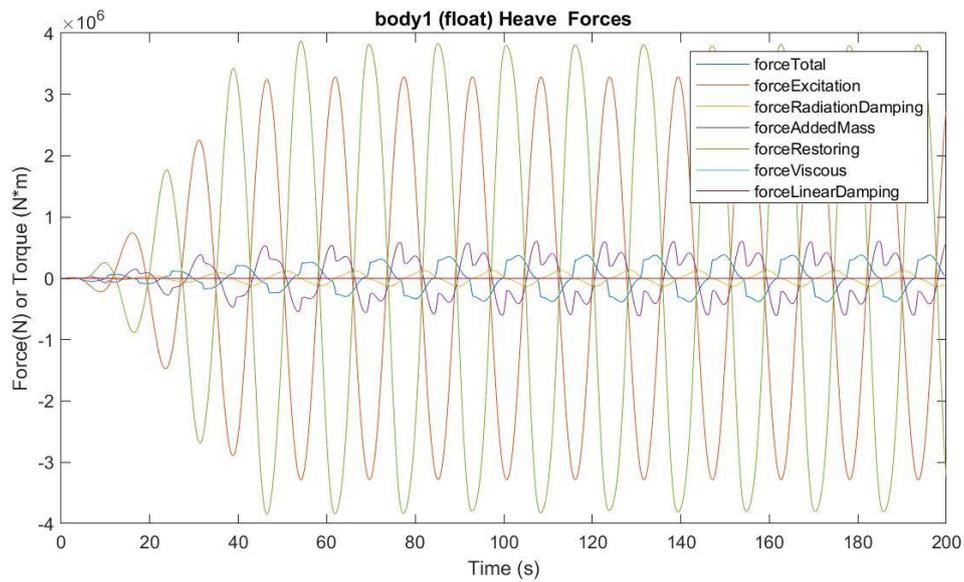
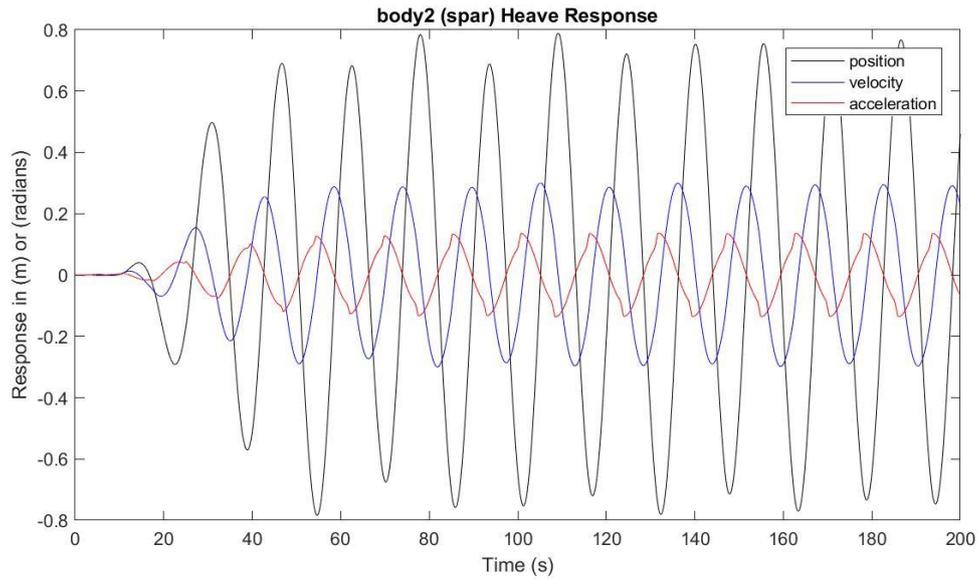
Presión media del acumulador de alta presión: 23.0024 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 28.1424 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3742 m, 0.6548 m/s y 0.3036 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7891 m, 0.3005 m/s y 0.1365 m/s²





$H_s = 2.75 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

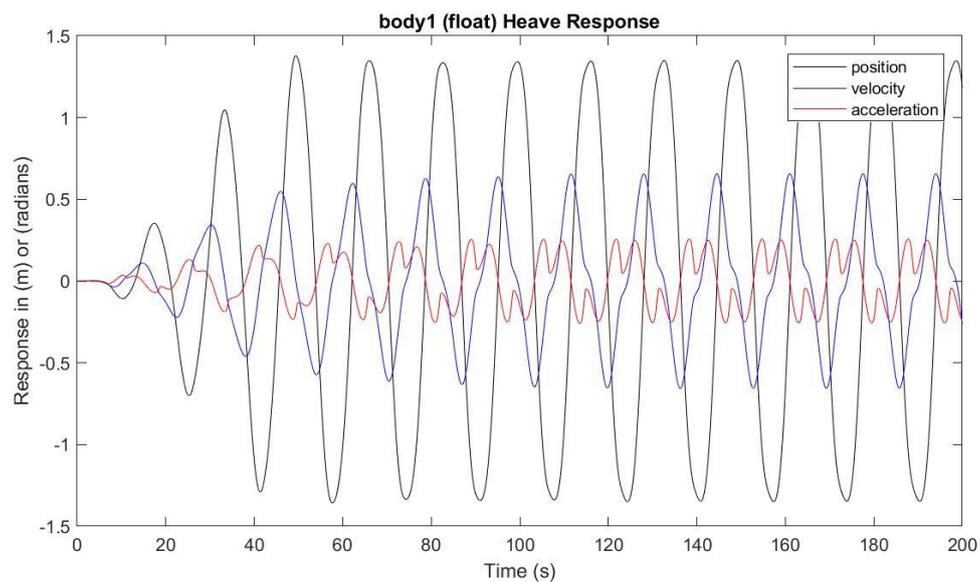
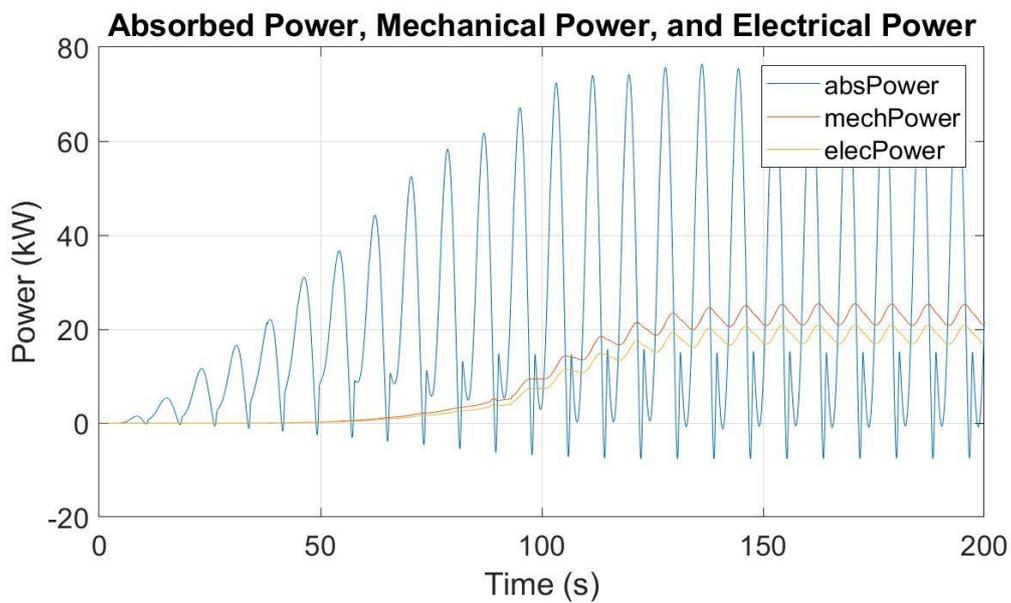
Potencia eléctrica media: 18.8253 kW

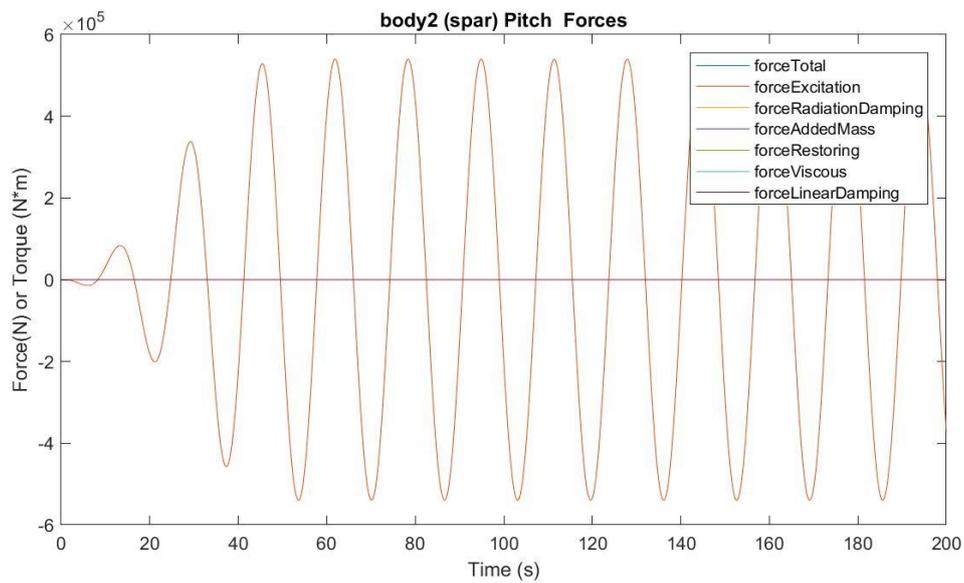
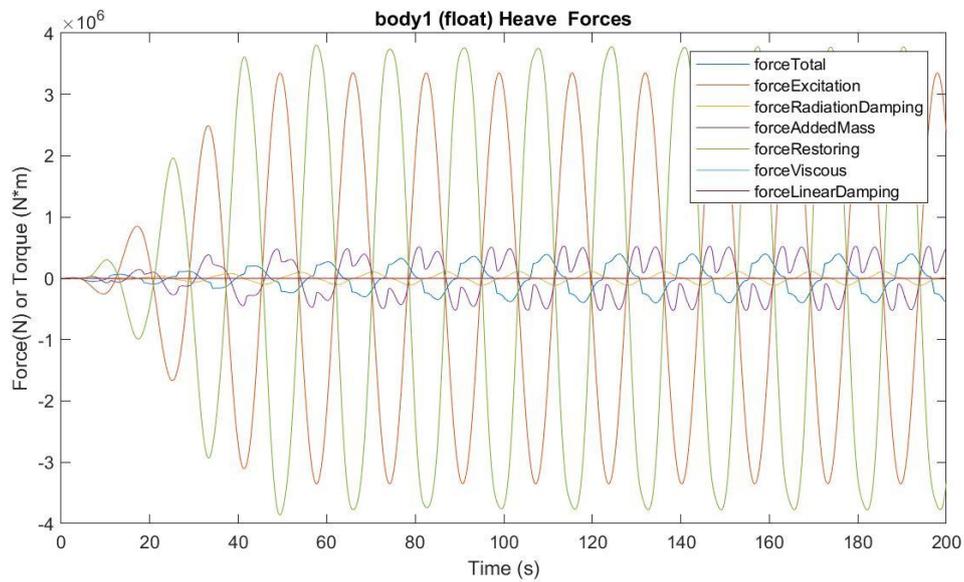
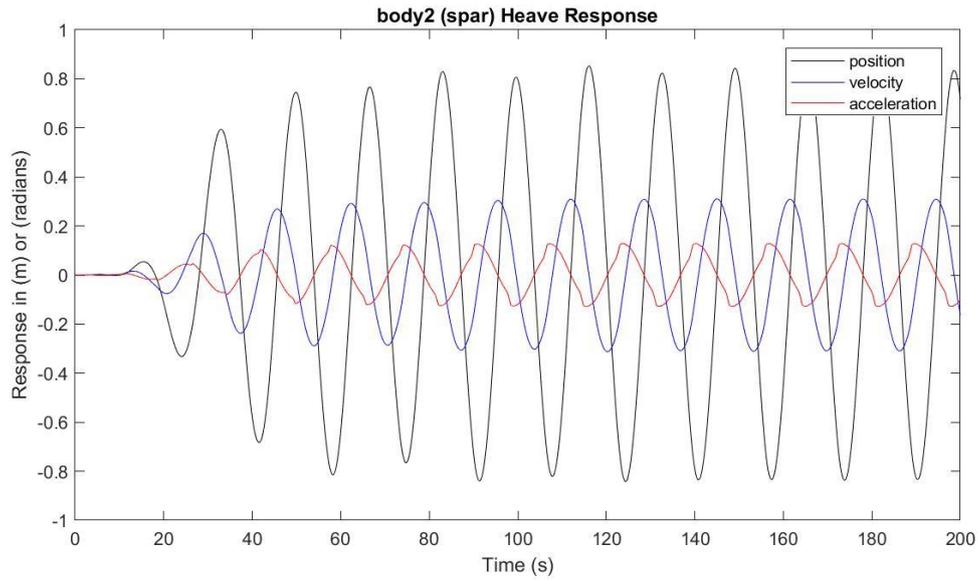
Presión media del acumulador de alta presión: 22.8779 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.3435 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.3777 m, 0.6563 m/s y 0.2562 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.8525 m, 0.3105 m/s y 0.1281 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

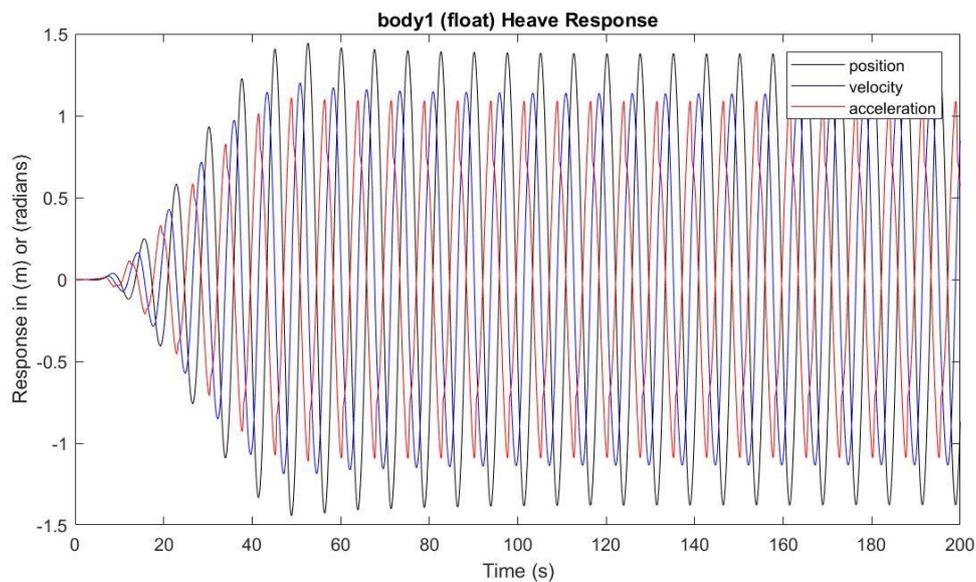
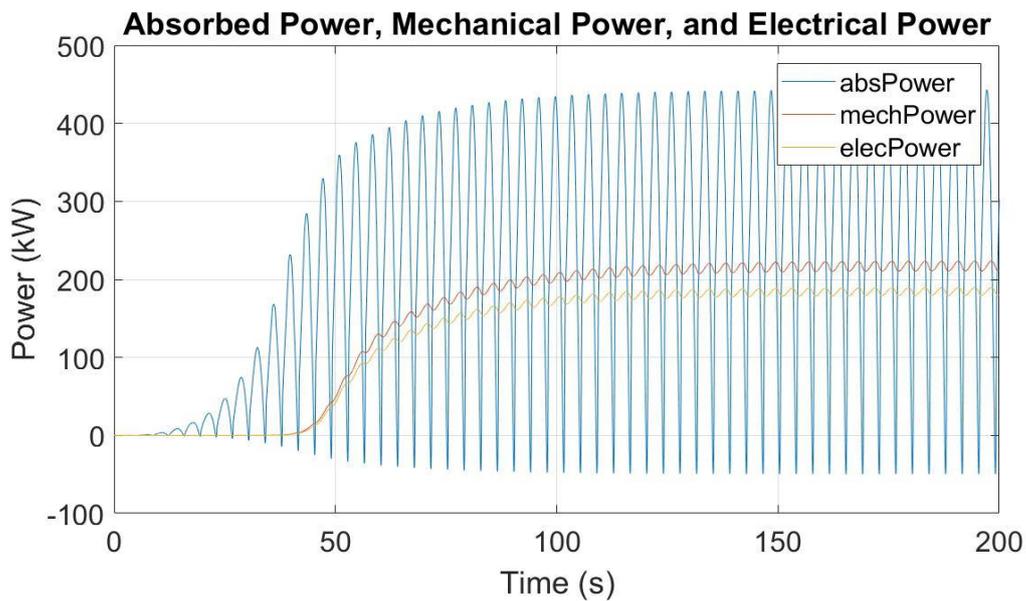
Potencia eléctrica media: 182.1156 kW

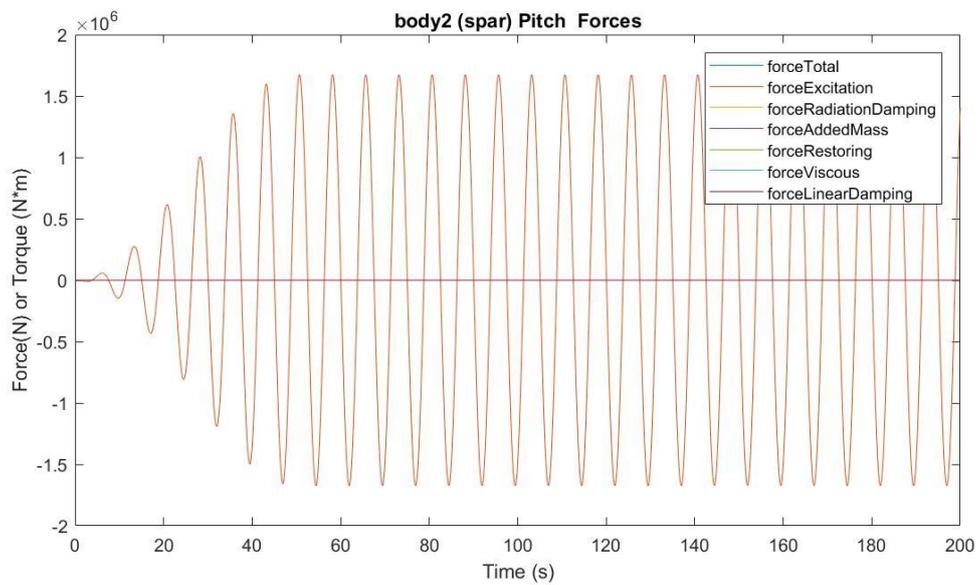
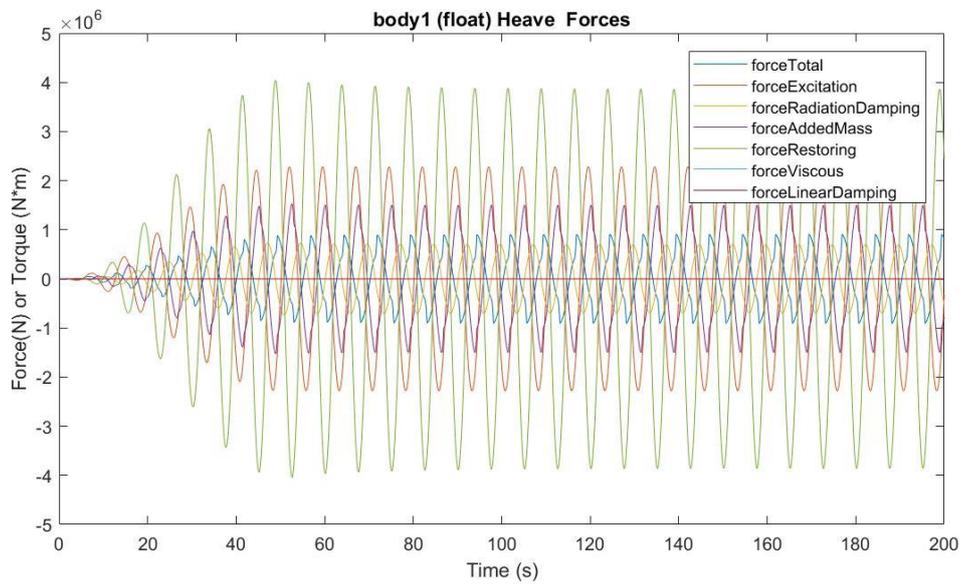
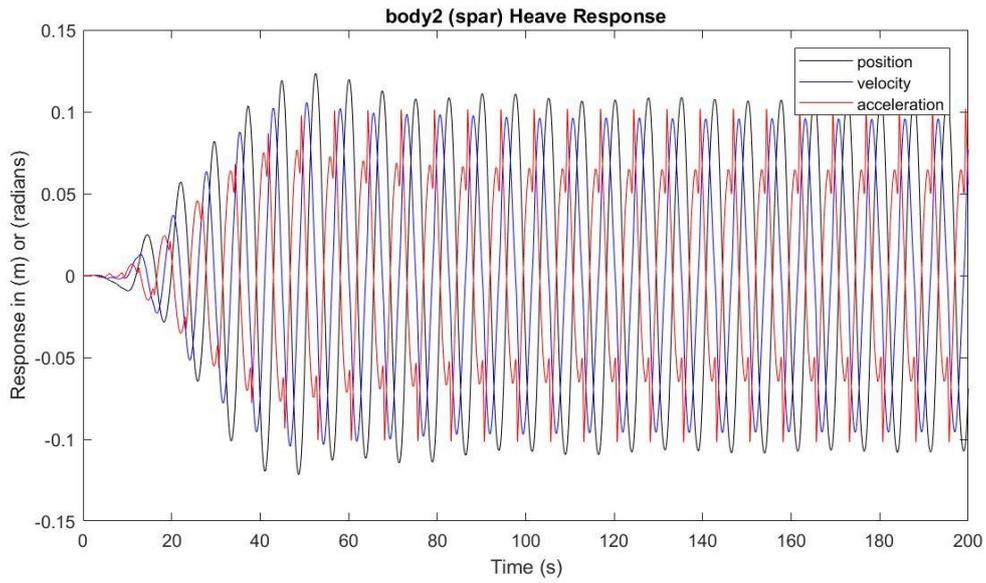
Presión media del acumulador de alta presión: 24.8927 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.6389 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.4431 m, 1.2002 m/s y 1.1084 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1234 m, 0.1057 m/s y 0.1019 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$ $T_e = 8.5 \text{ s}$

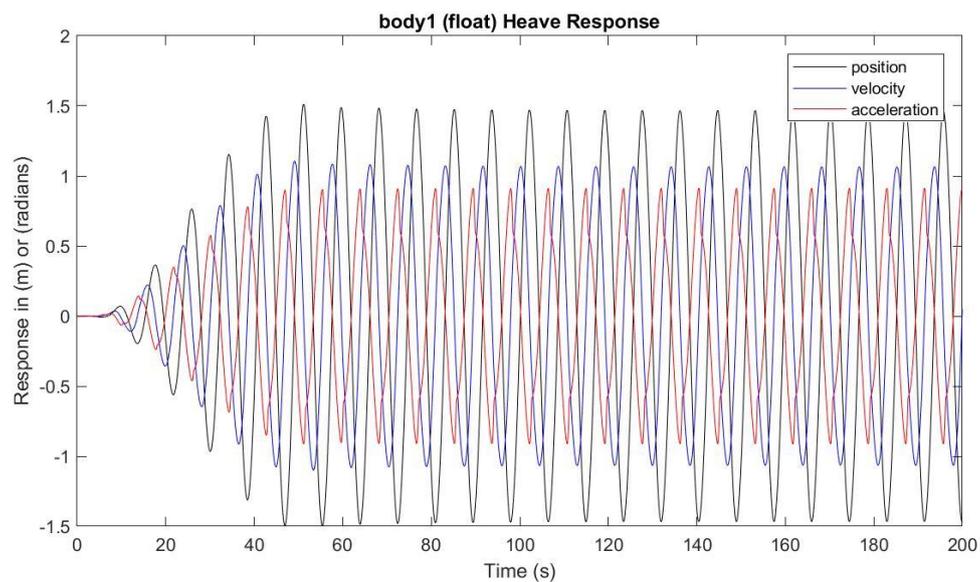
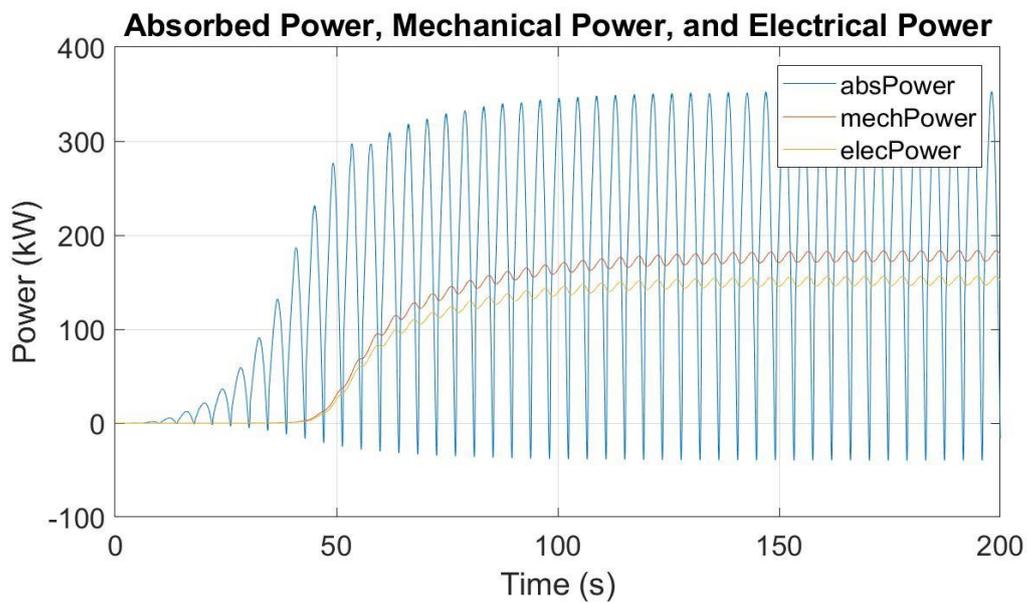
Potencia eléctrica media: 149.0725 kW

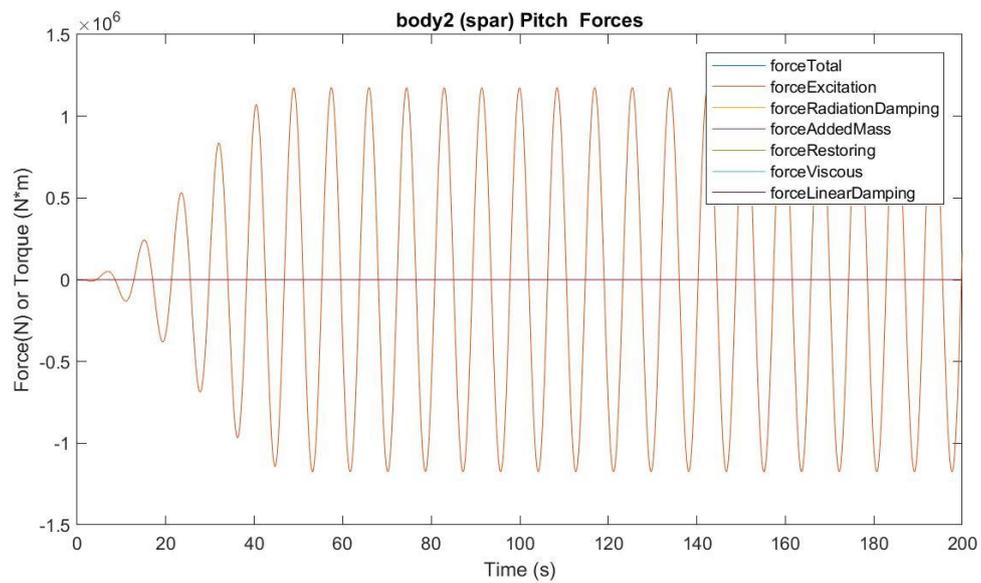
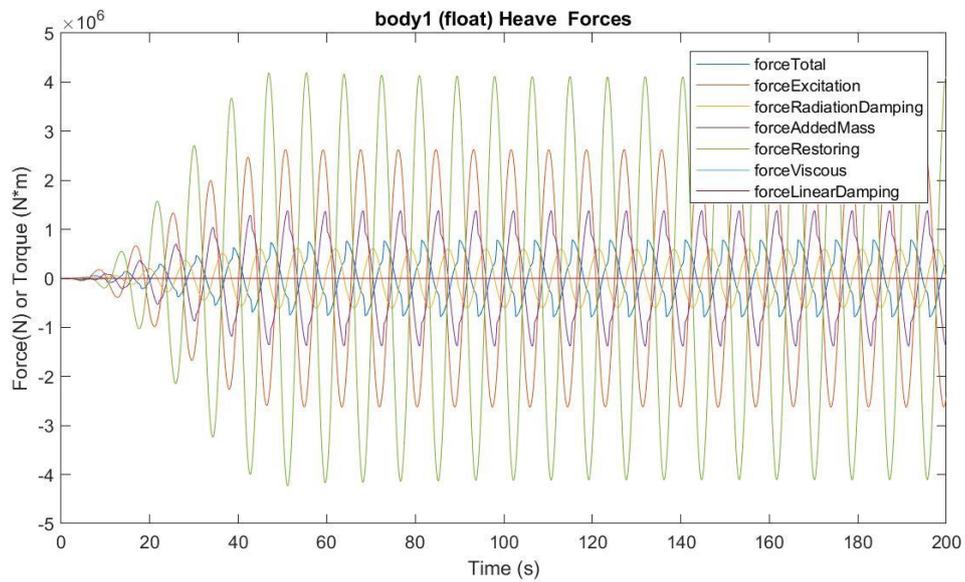
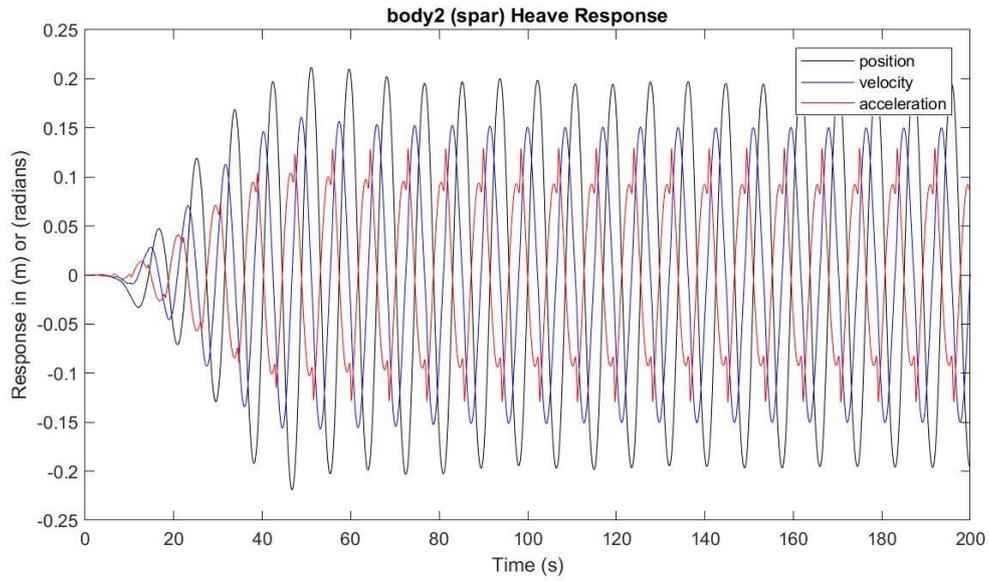
Presión media del acumulador de alta presión: 24.5655 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.0122 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.5121 m, 1.1064 m/s y 0.9127 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2117 m, 0.1608 m/s y 0.1294 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

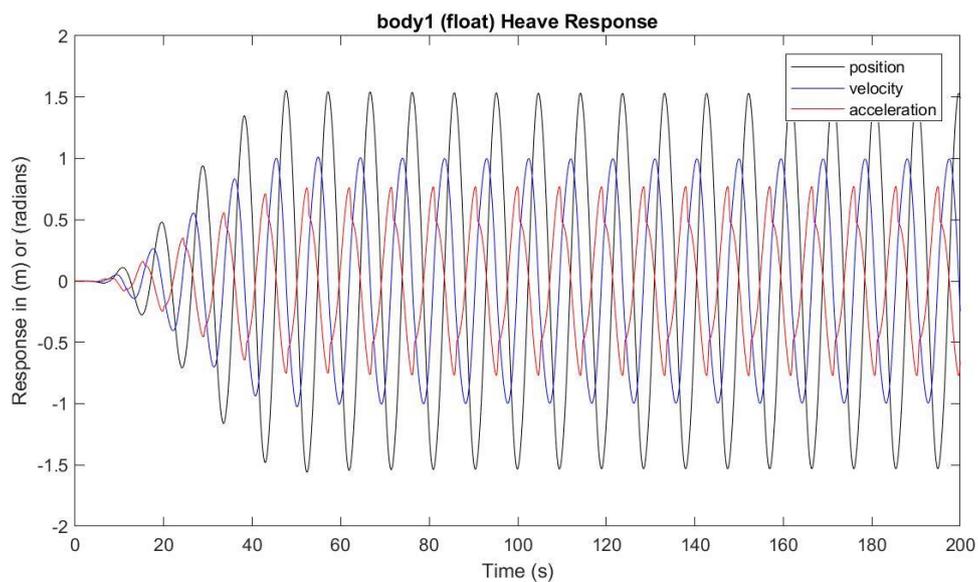
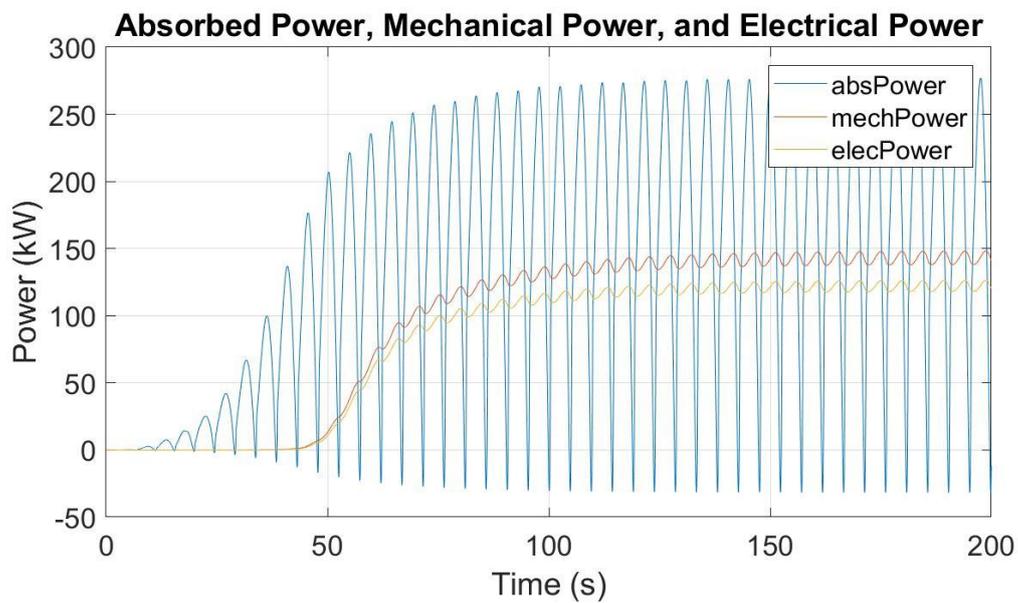
Potencia eléctrica media: 120.1008 kW

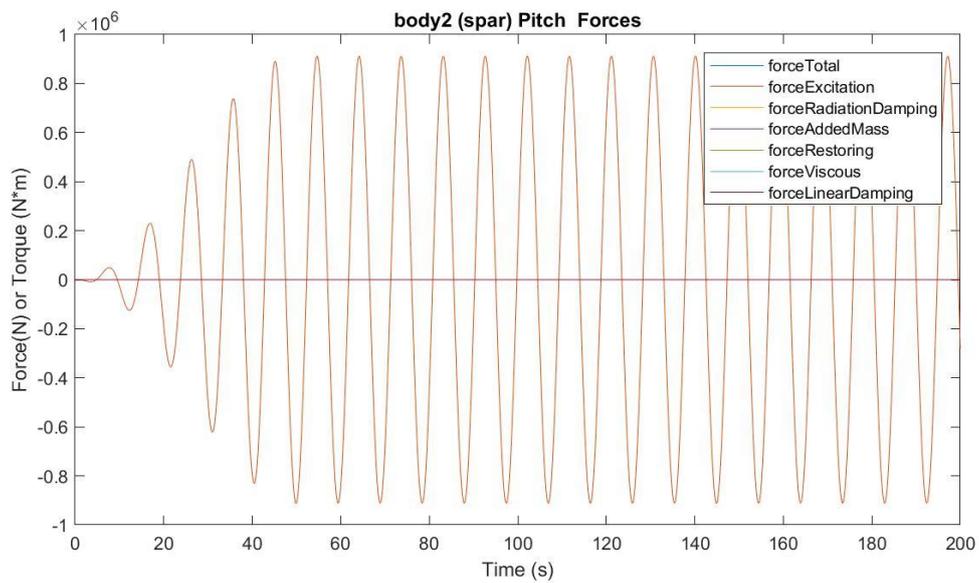
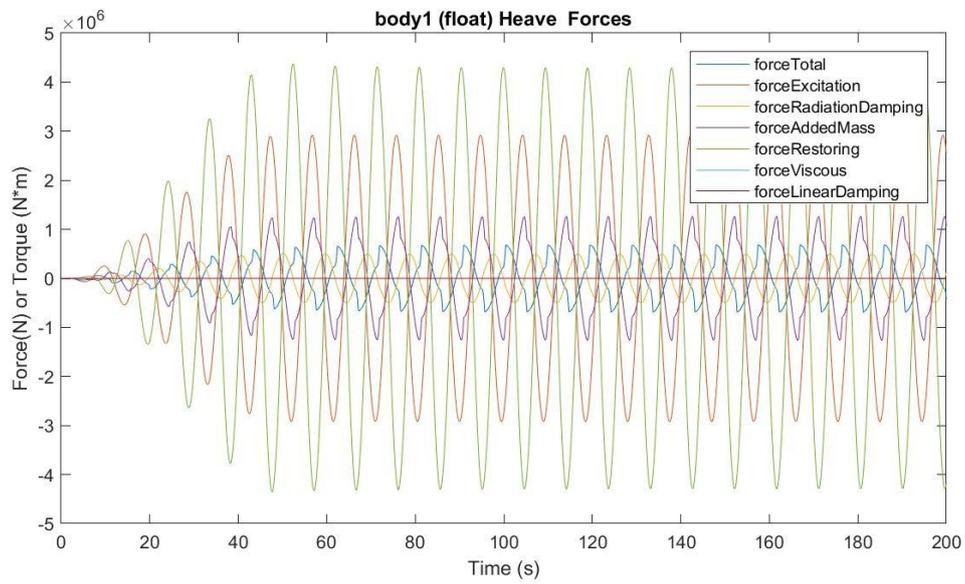
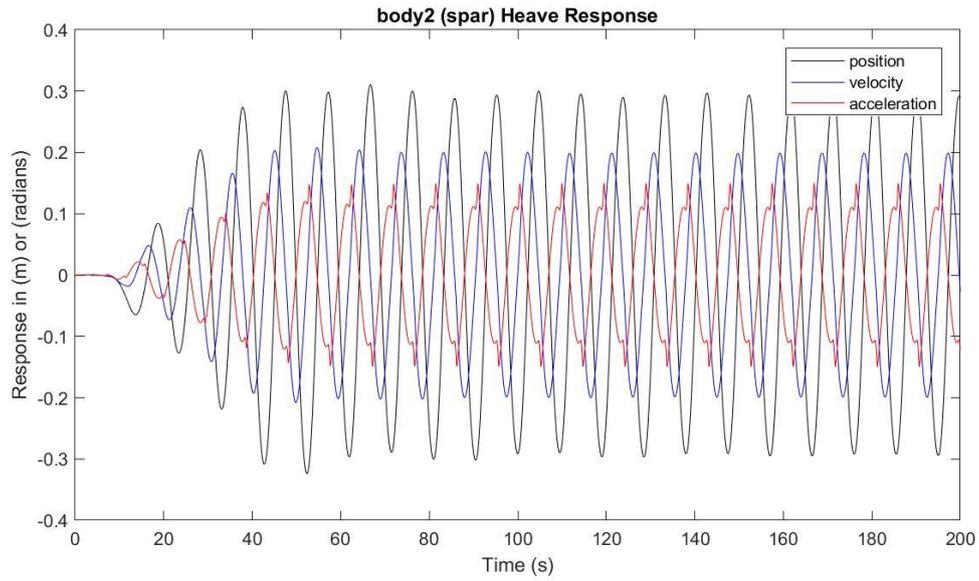
Presión media del acumulador de alta presión: 24.2569 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.3856 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.5538 m, 1.0112 m/s y 0.7719 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3104 m, 0.2077 m/s y 0.1497 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

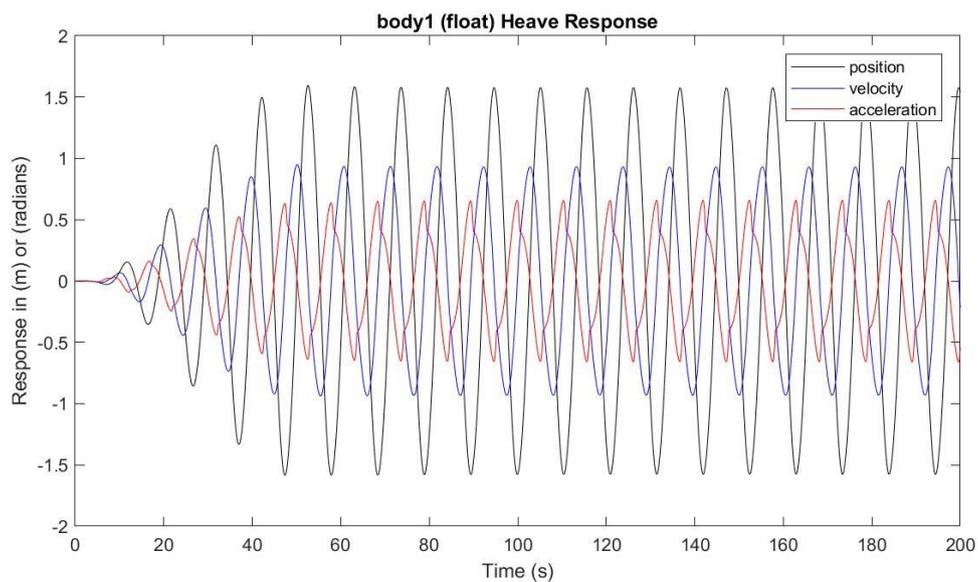
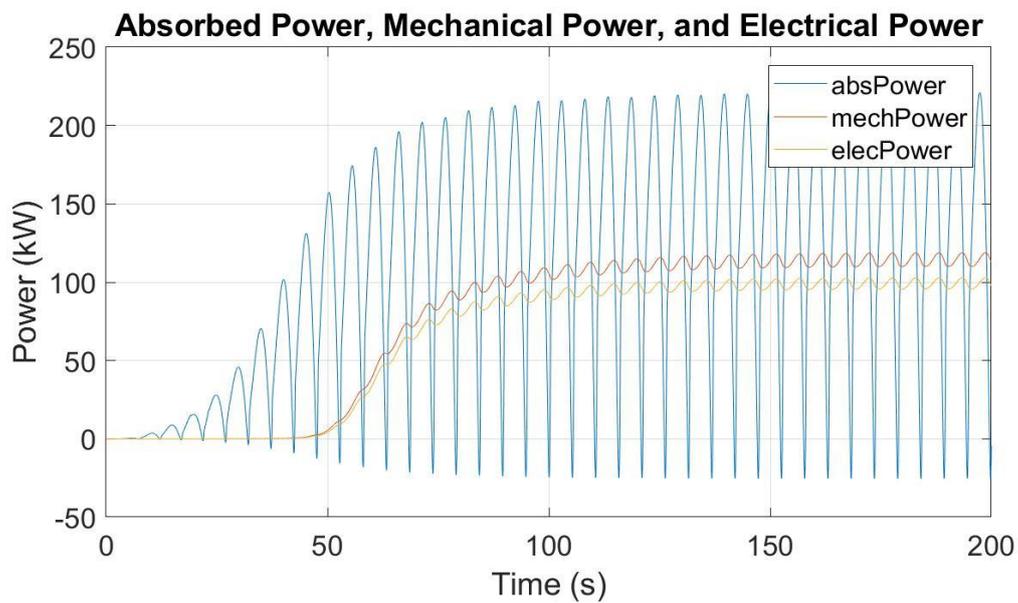
Potencia eléctrica media: 97.5336 kW

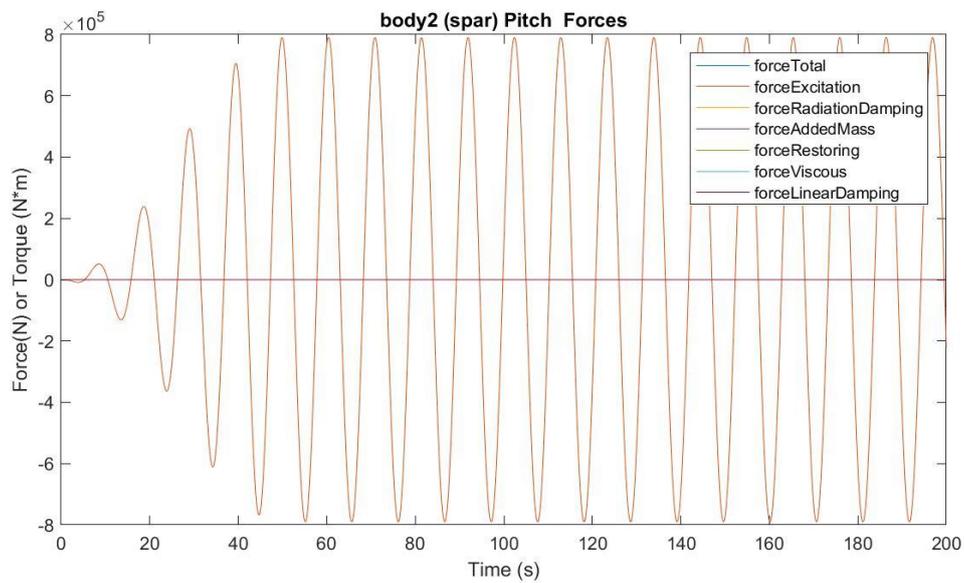
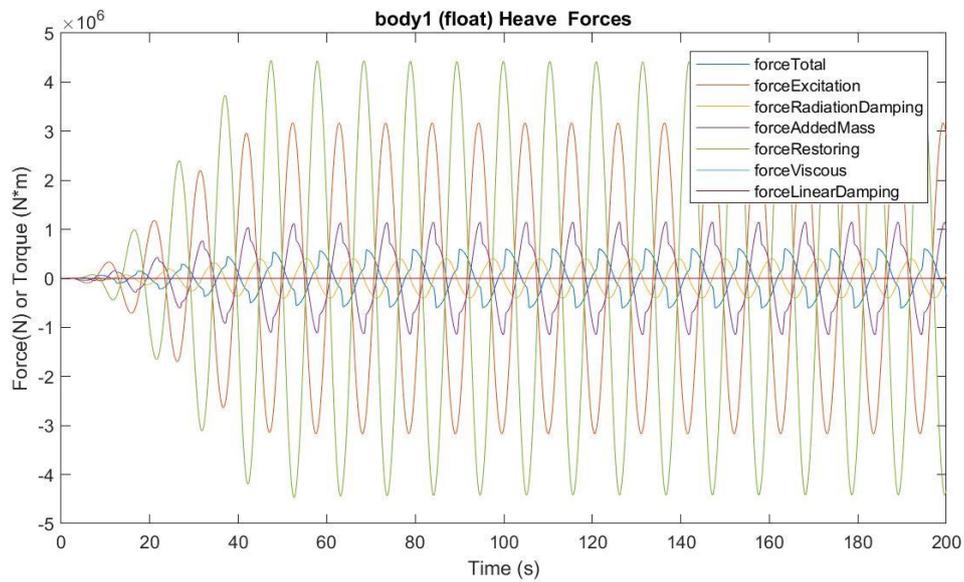
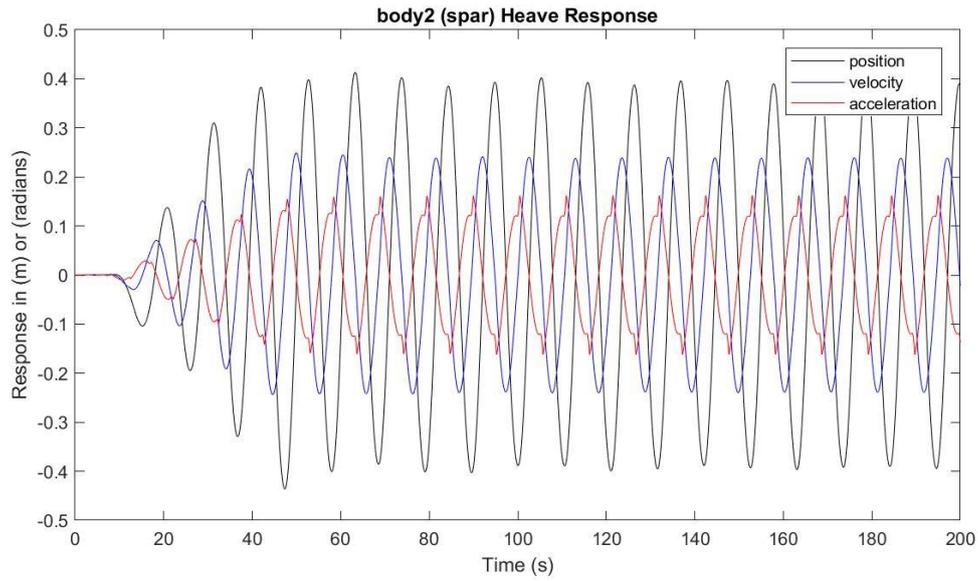
Presión media del acumulador de alta presión: 23.9835 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.7340 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.5954 m, 0.9503 m/s y 0.6592 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4134 m, 0.2491 m/s y 0.1623 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

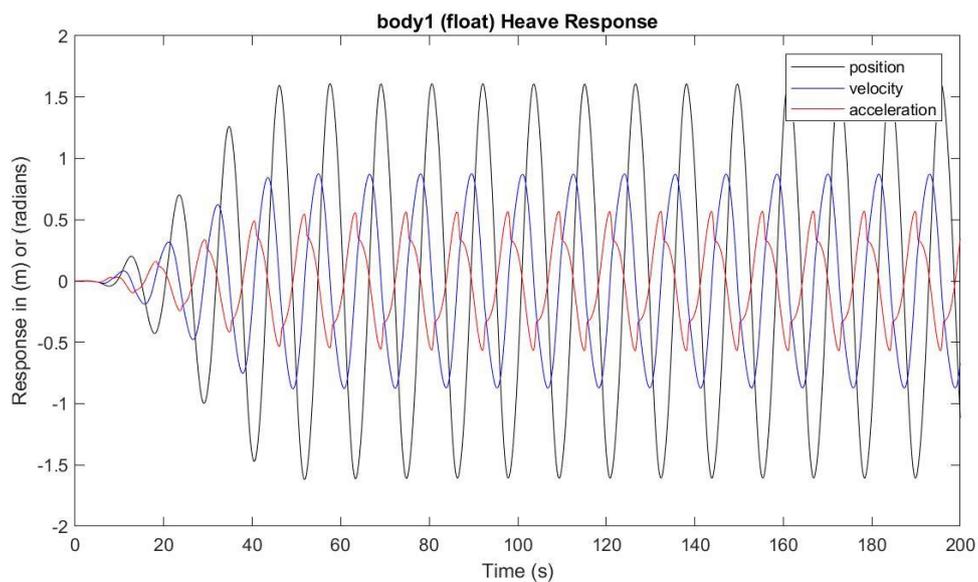
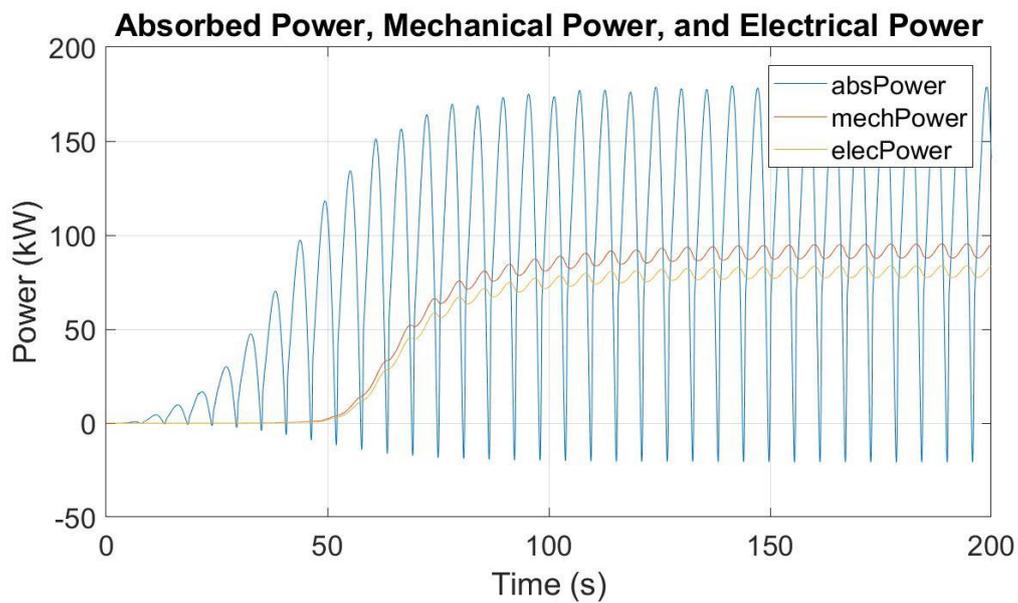
Potencia eléctrica media: 79.1828 kW

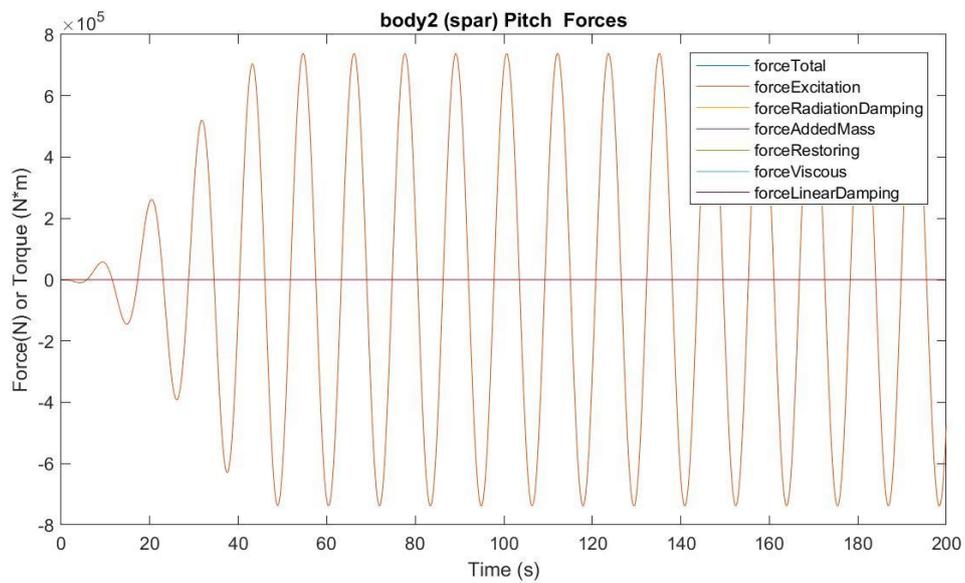
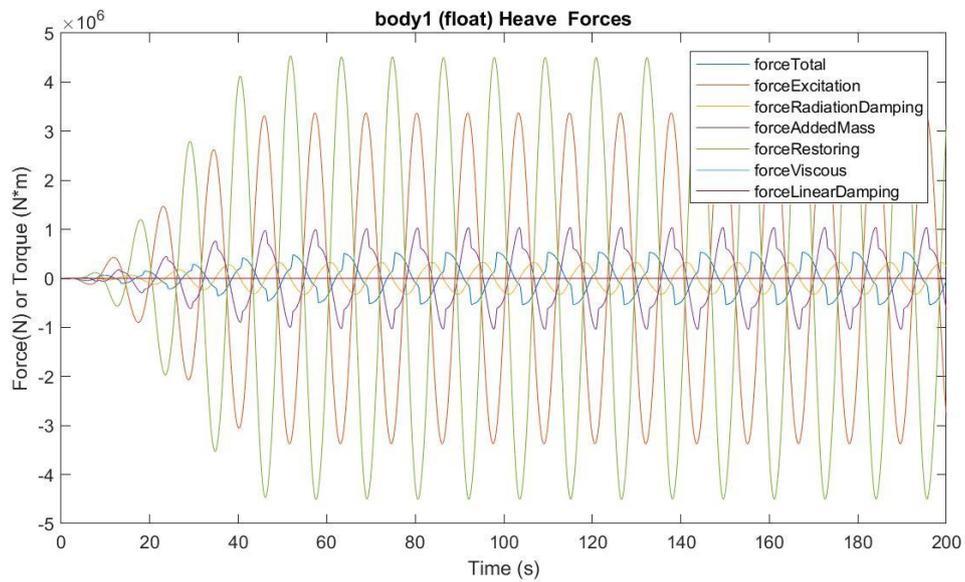
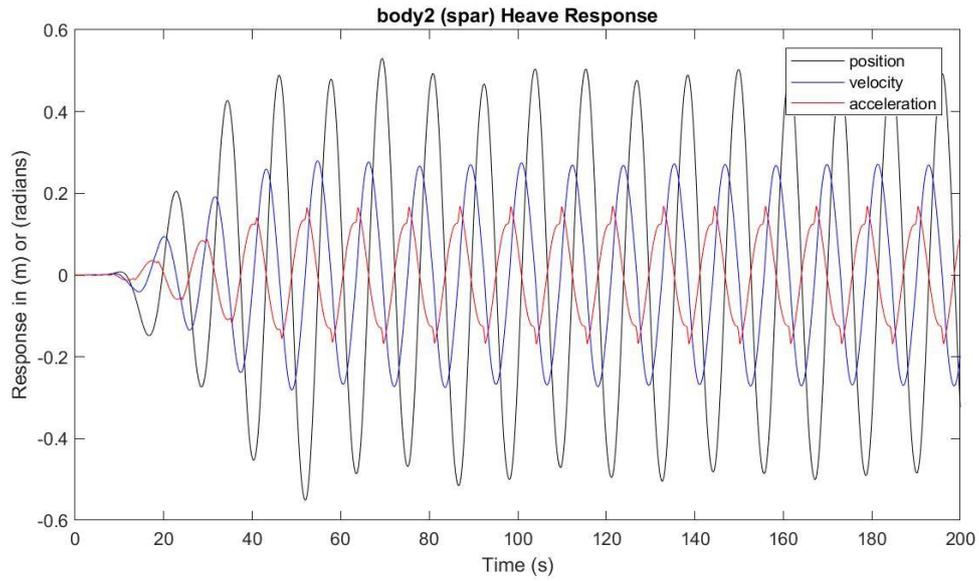
Presión media del acumulador de alta presión: 23.7504 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.0455 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6093 m, 0.8746 m/s y 0.5691 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5295 m, 0.2793 m/s y 0.1687 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

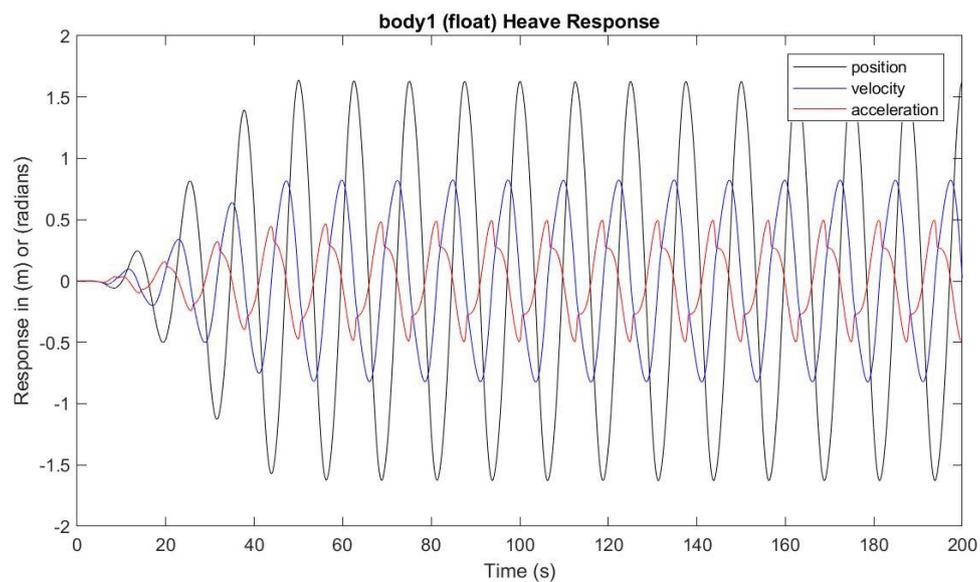
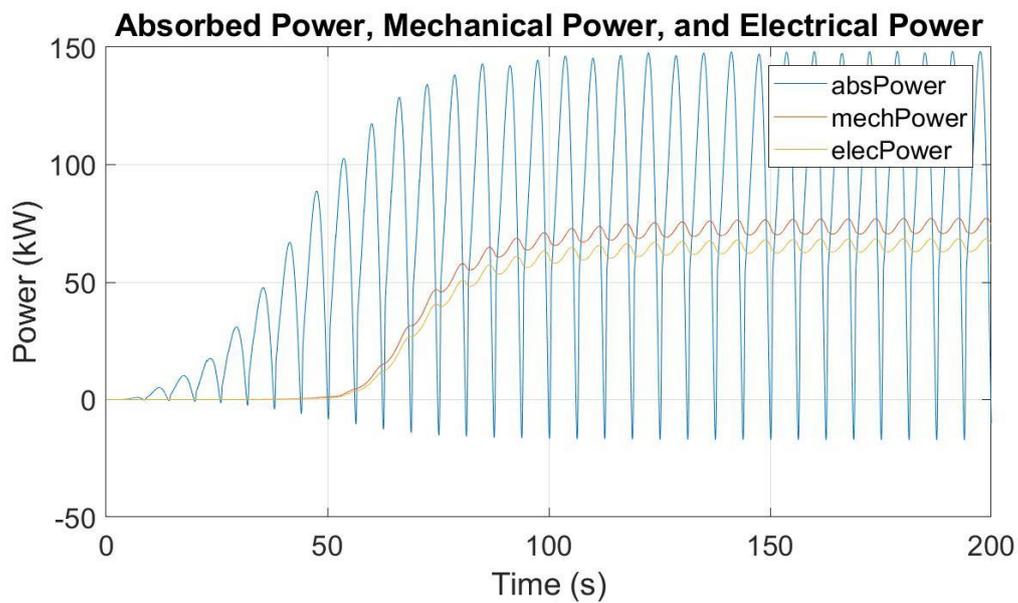
Potencia eléctrica media: 64.4626 kW

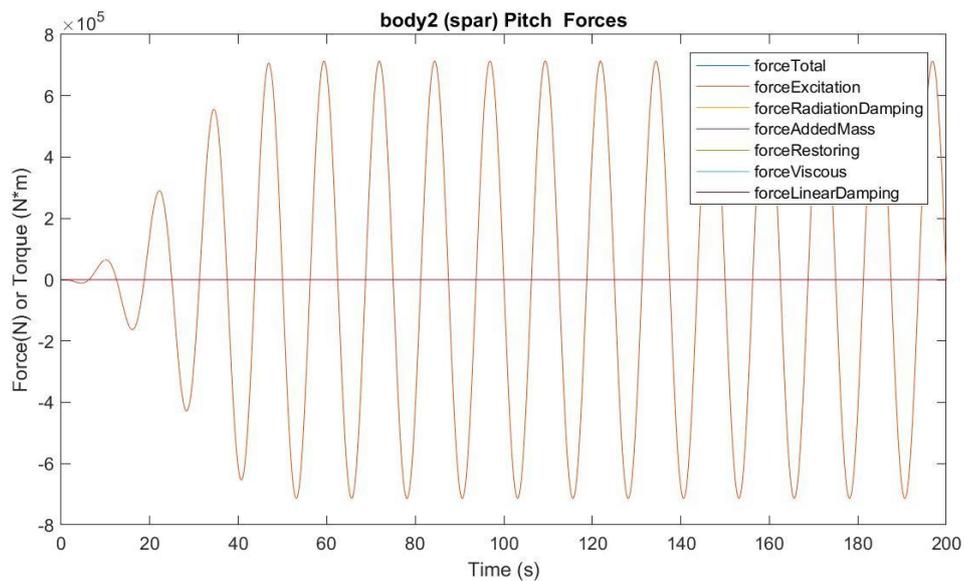
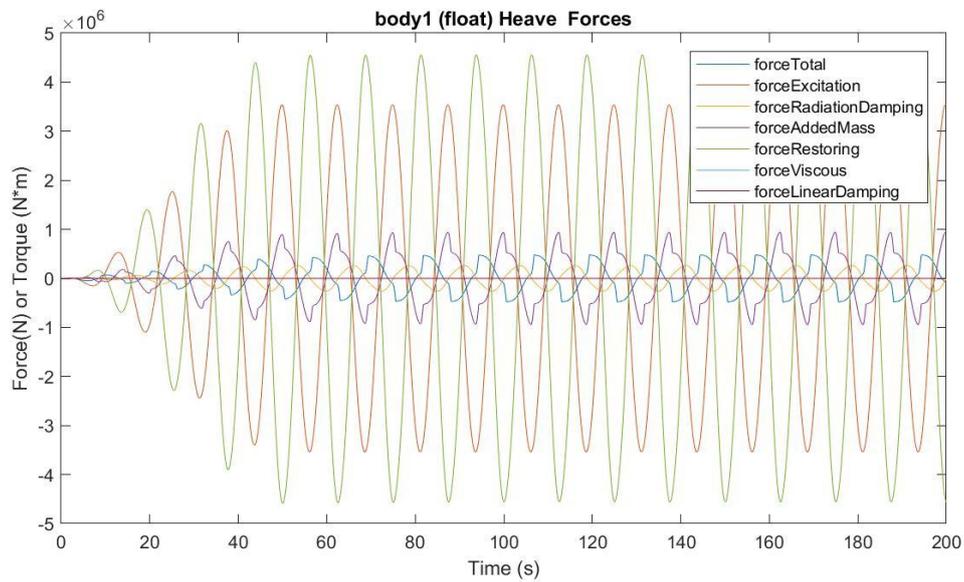
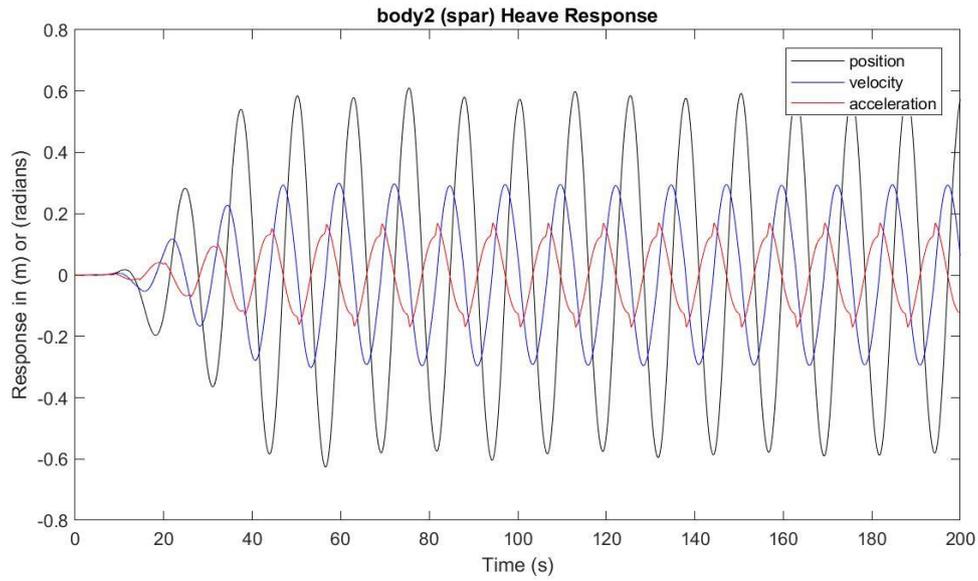
Presión media del acumulador de alta presión: 23.5550 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.3177 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6379 m, 0.8240 m/s y 0.4965 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.6105 m, 0.2999 m/s y 0.1703 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

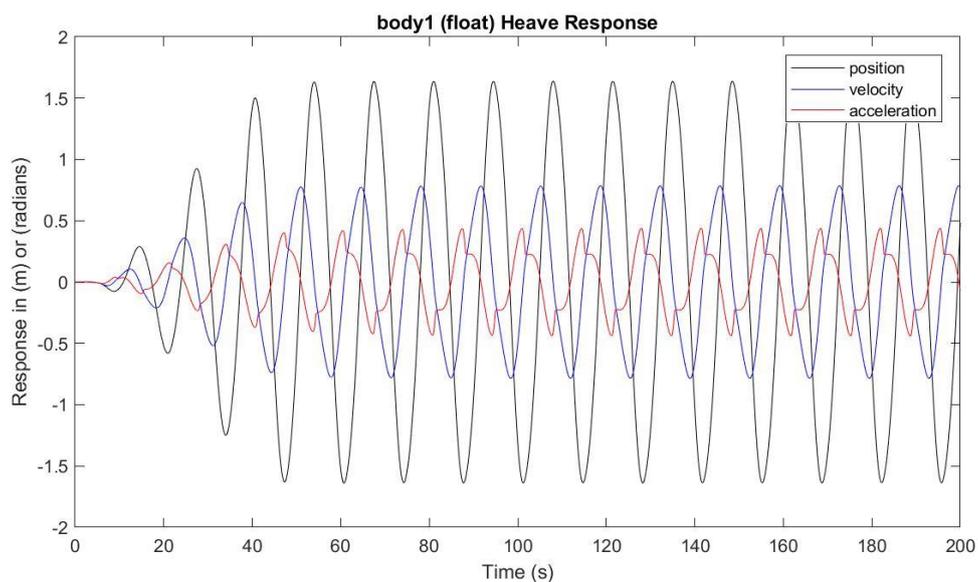
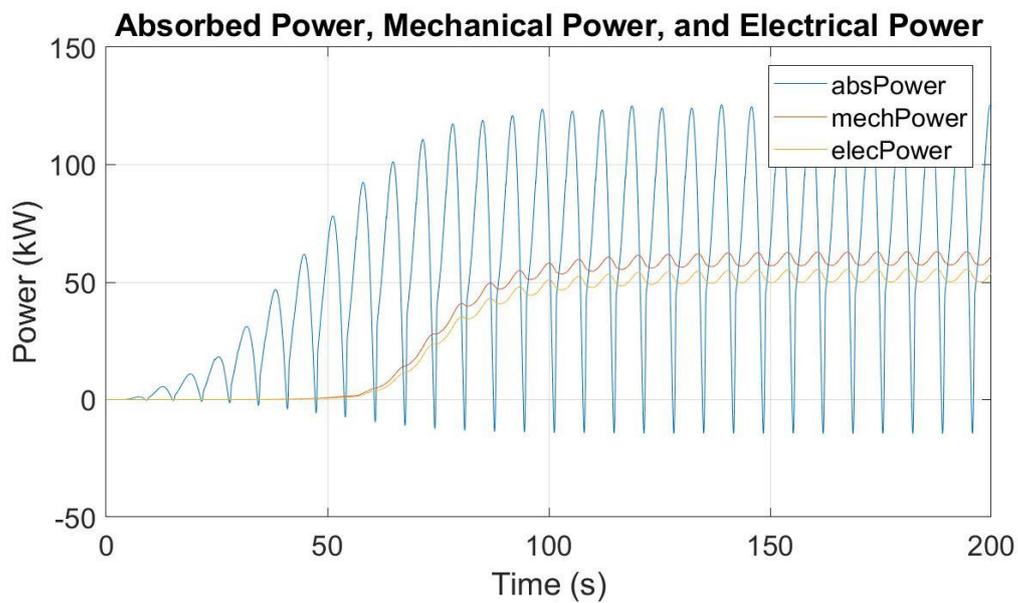
Potencia eléctrica media: 51.7006 kW

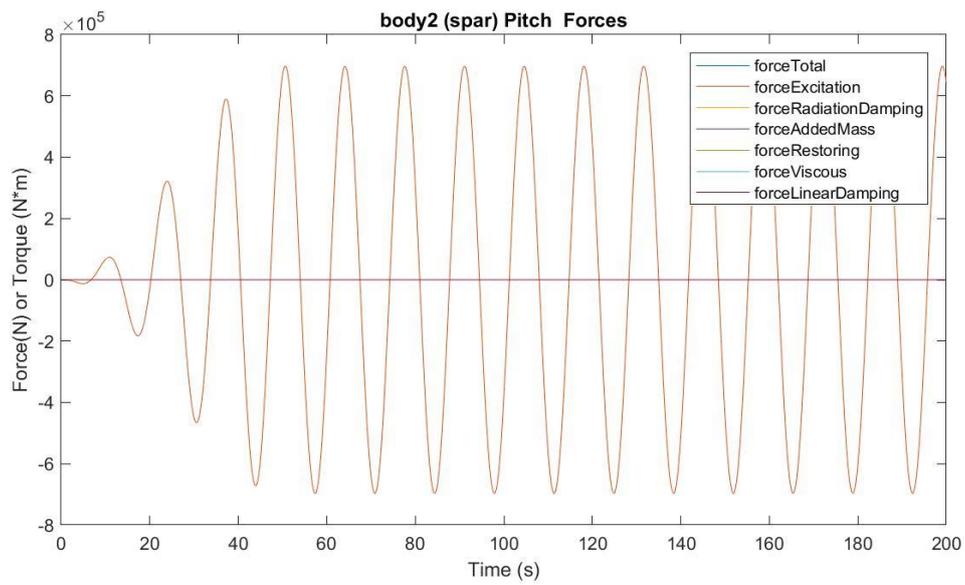
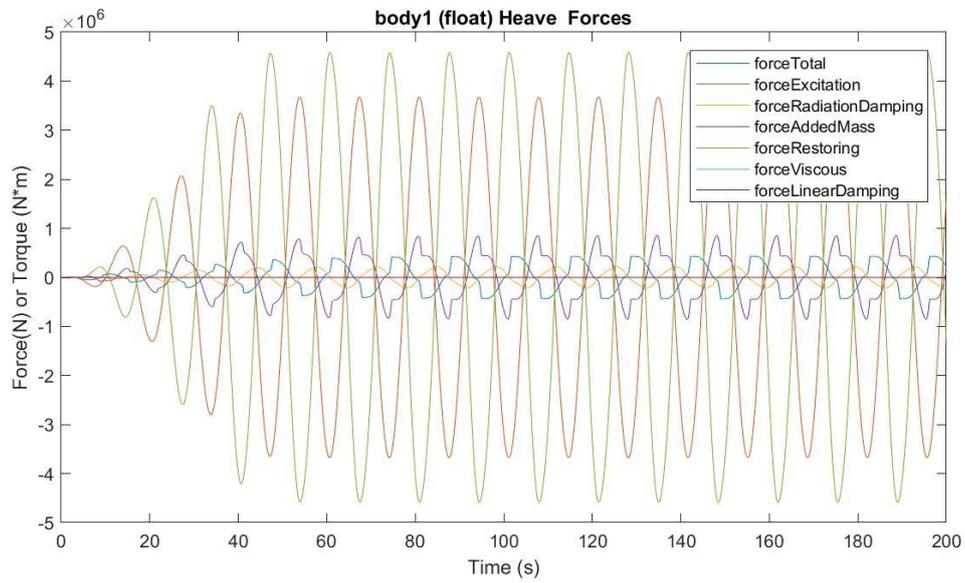
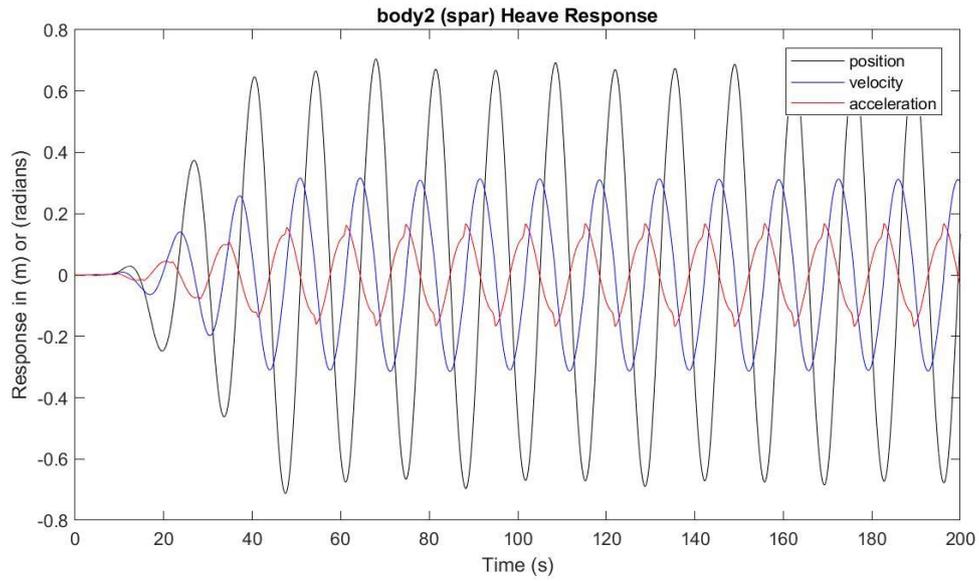
Presión media del acumulador de alta presión: 23.3917 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.5534 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6384 m, 0.7861 m/s y 0.4384 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7048 m, 0.3162 m/s y 0.1685 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

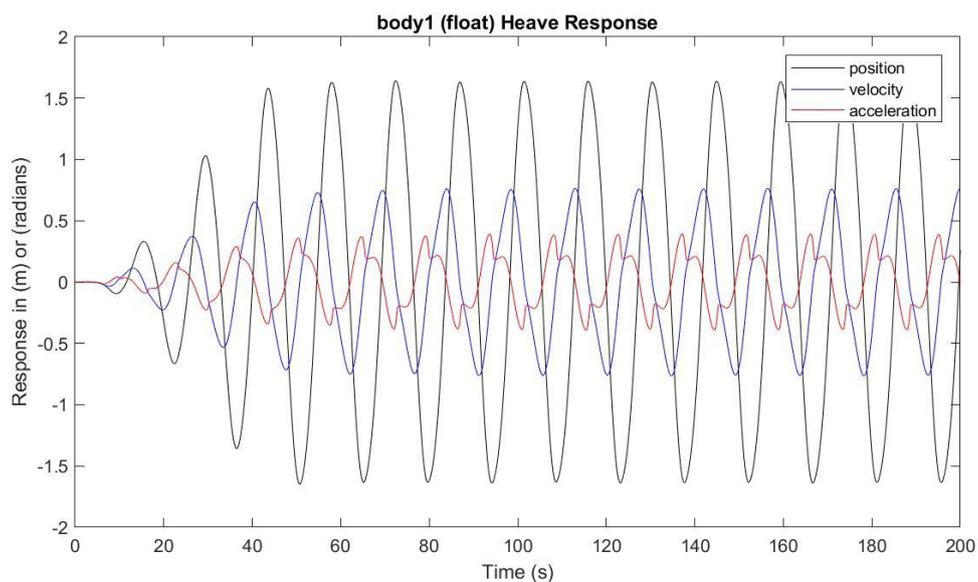
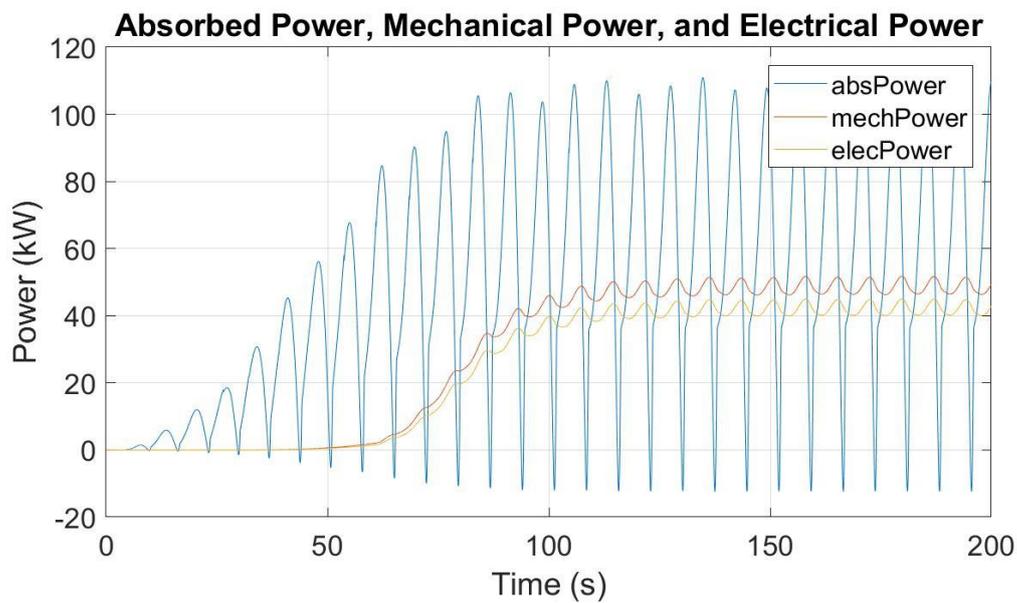
Potencia eléctrica media: 41.5477 kW

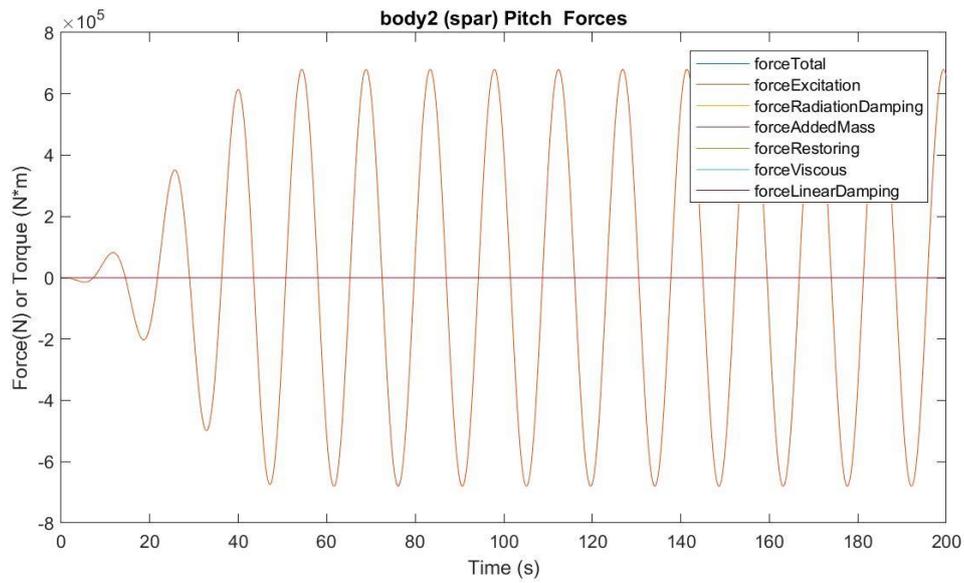
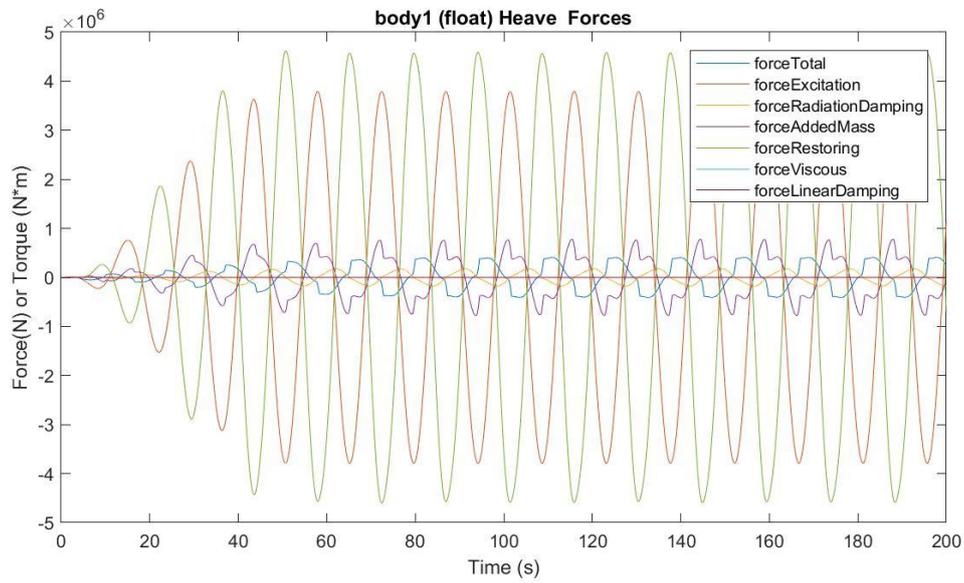
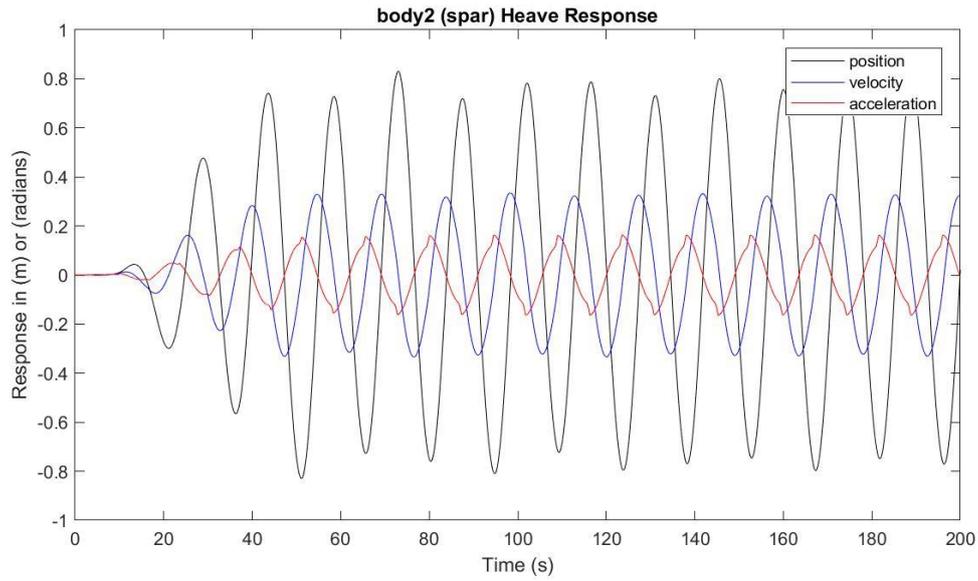
Presión media del acumulador de alta presión: 23.2521 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.7613 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6417 m, 0.7641 m/s y 0.3918 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.8310 m, 0.3350 m/s y 0.1647 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

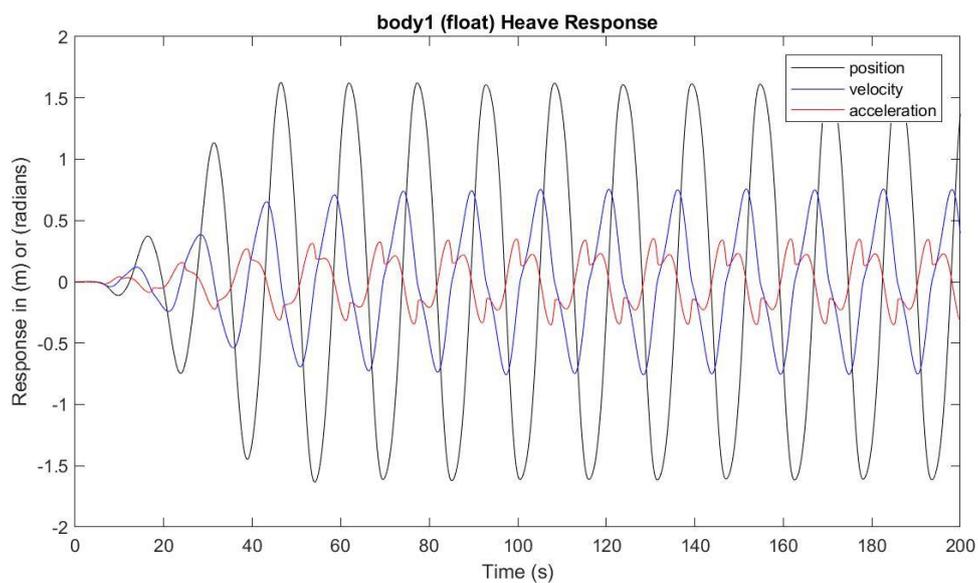
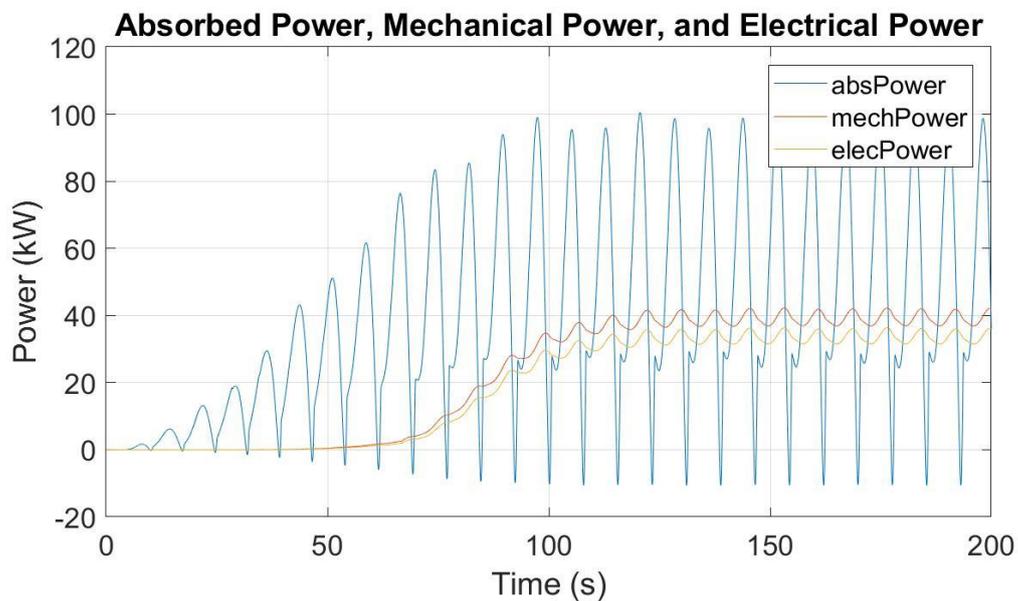
Potencia eléctrica media: 32.9438 kW

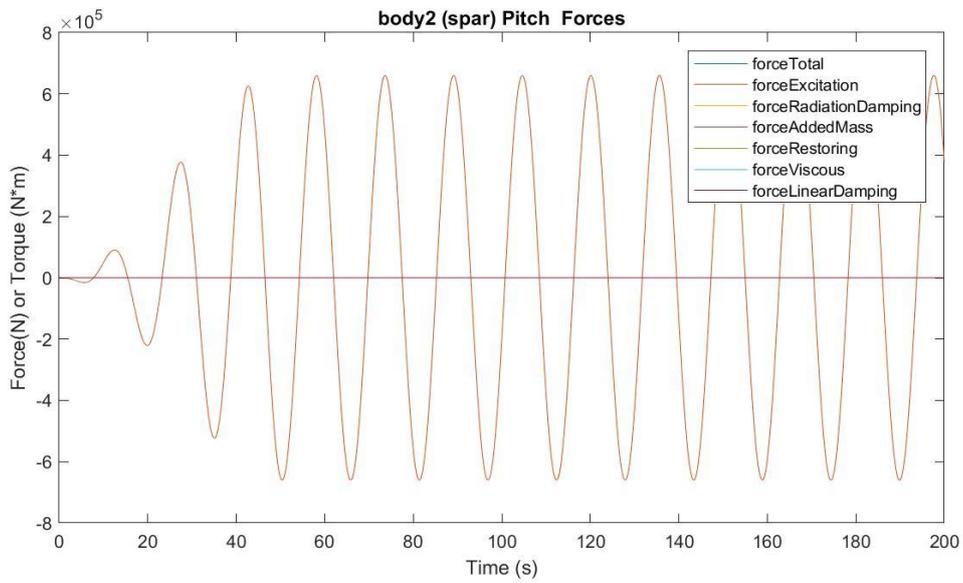
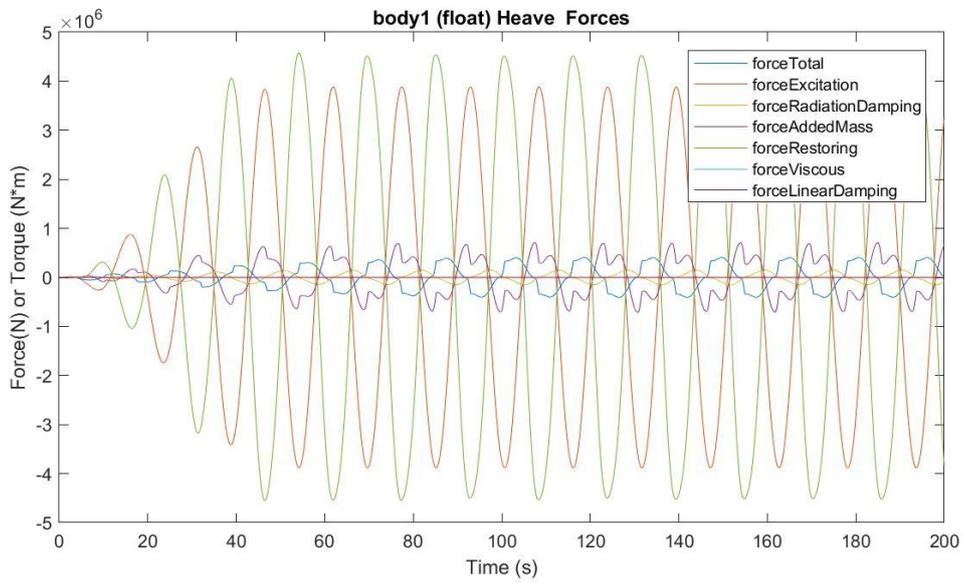
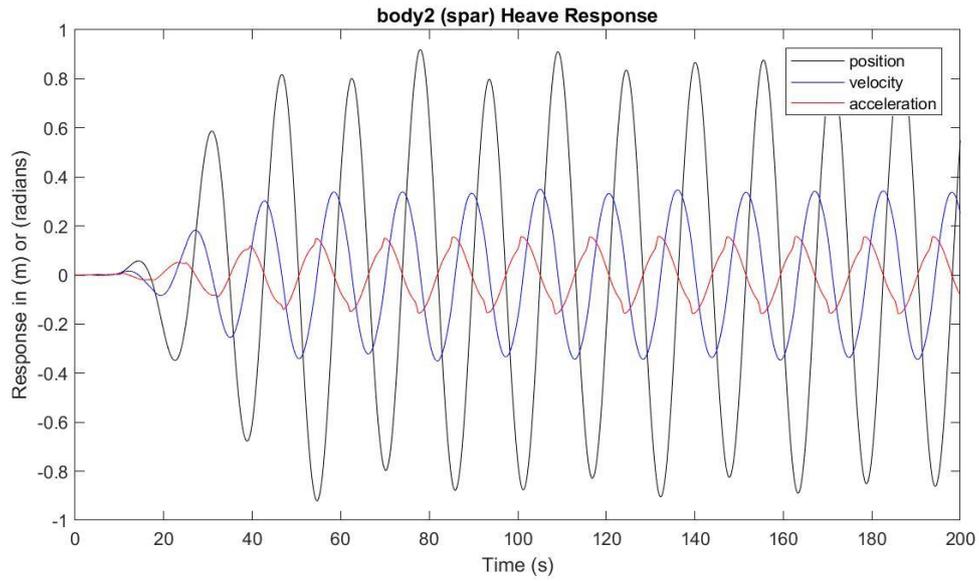
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1246 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.9561 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6251 m, 0.7579 m/s y 0.3517 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9196 m, 0.3497 m/s y 0.1580 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

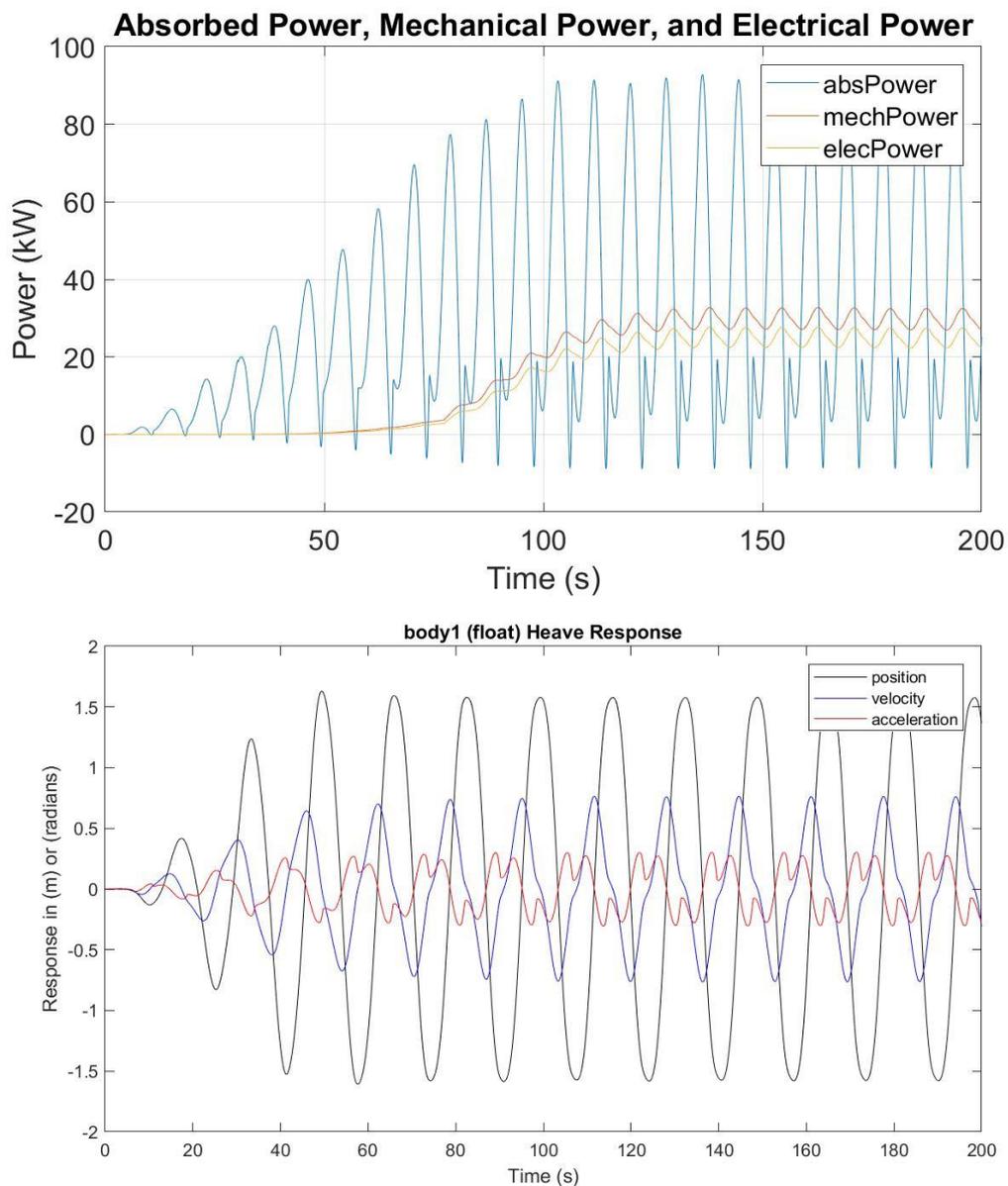
Potencia eléctrica media: 24.0351 kW

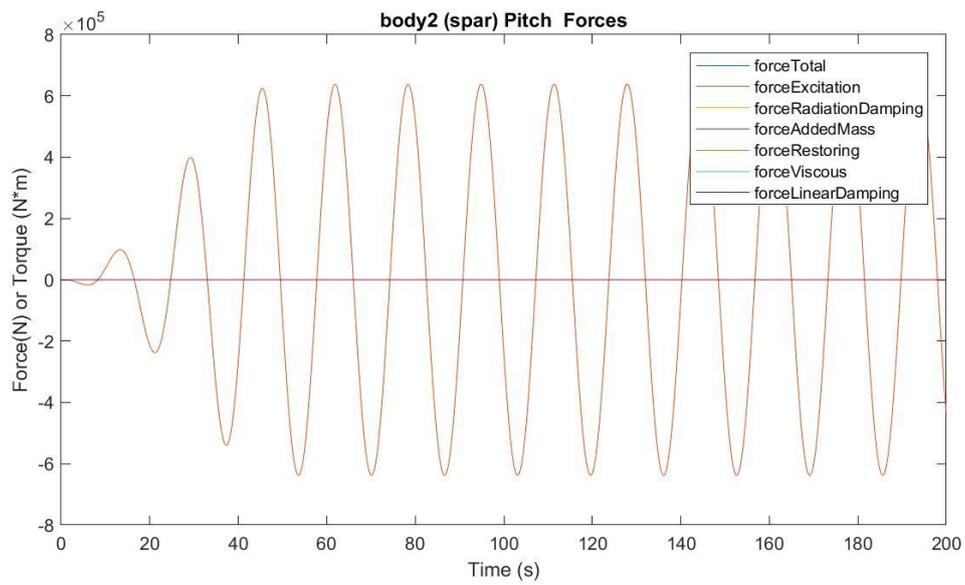
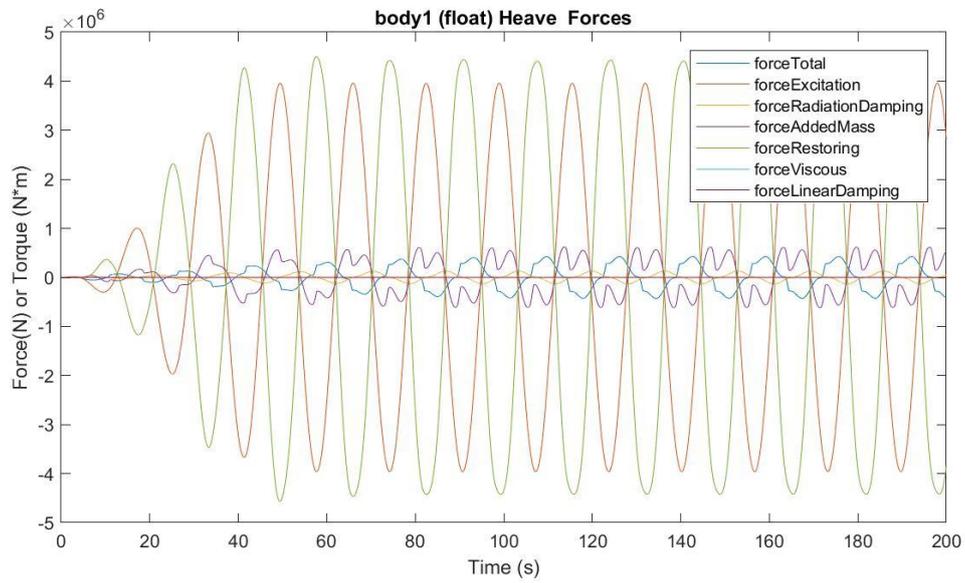
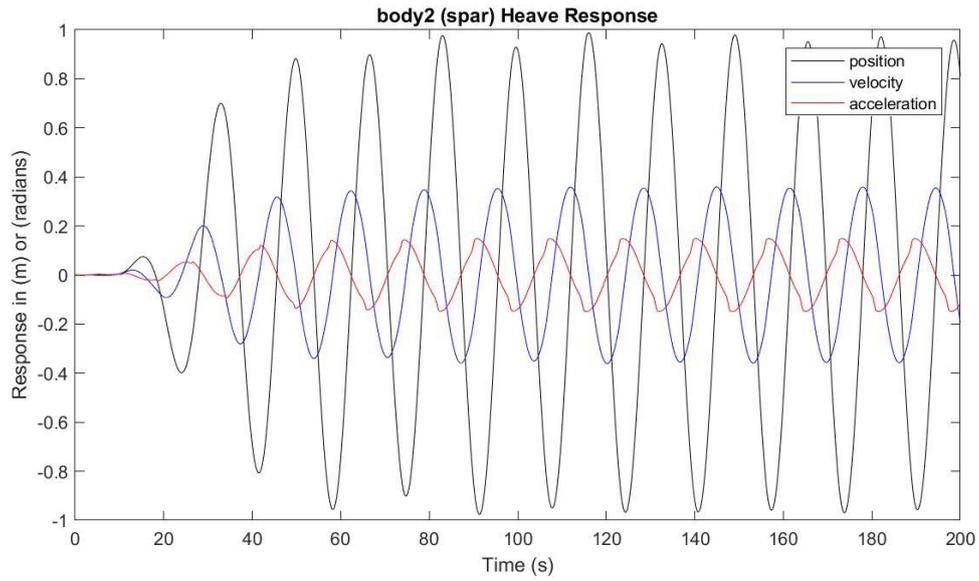
Presión media del acumulador de alta presión: 22.9873 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.1716 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6303 m, 0.7647 m/s y 0.3031 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9885 m, 0.3597 m/s y 0.1483 m/s²





$H_s = 3.25 \text{ m}$

$T_e = 17.5 \text{ s}$

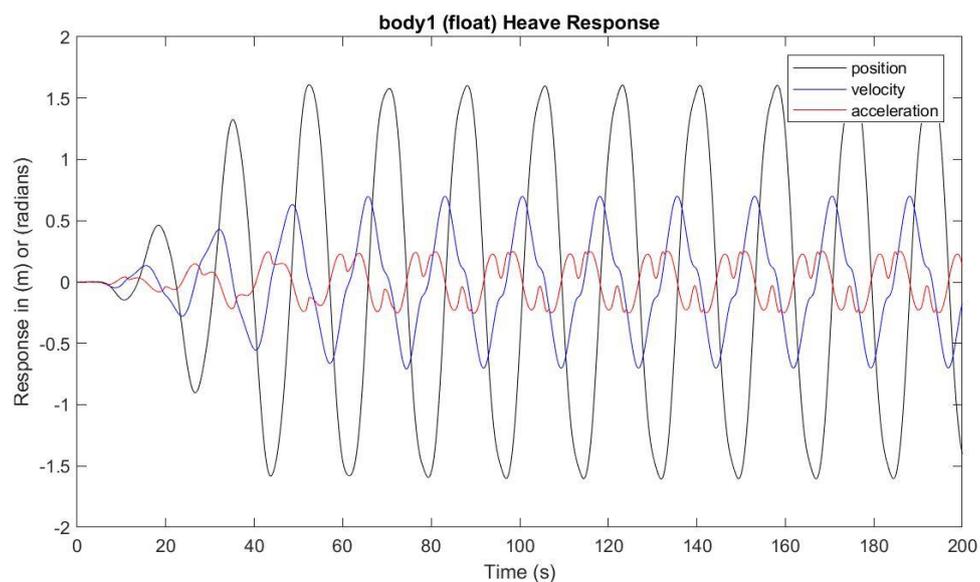
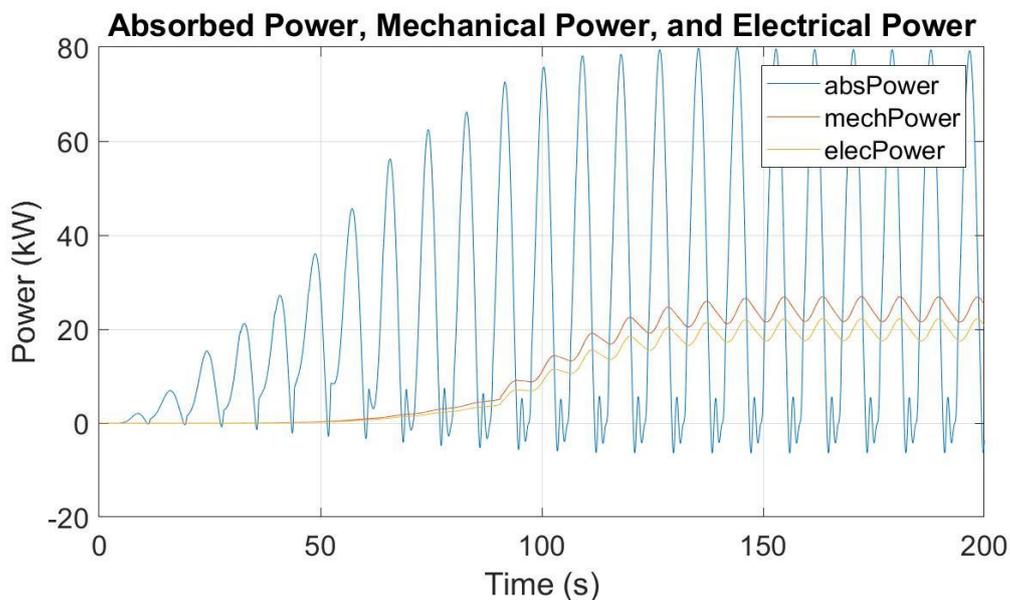
Potencia eléctrica media: 18.1639 kW

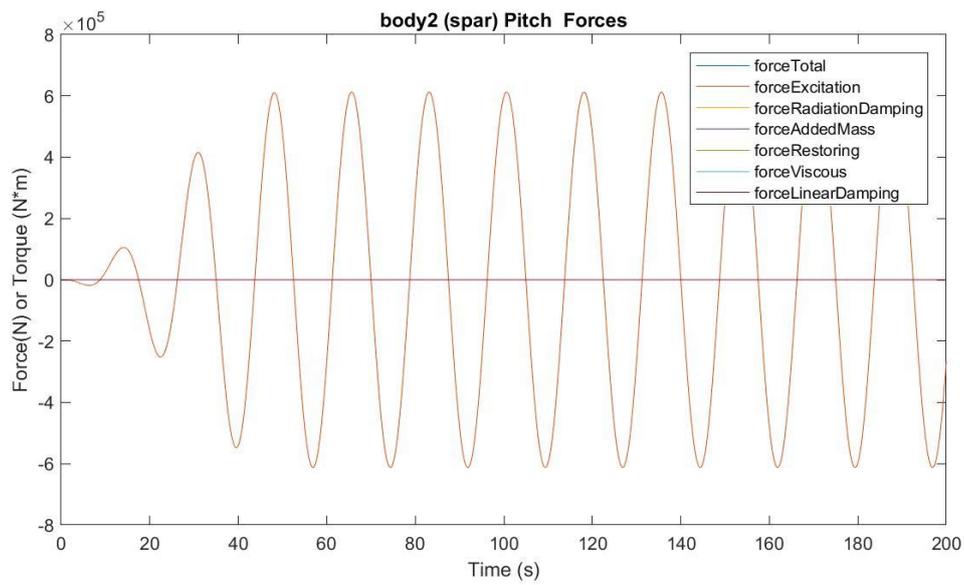
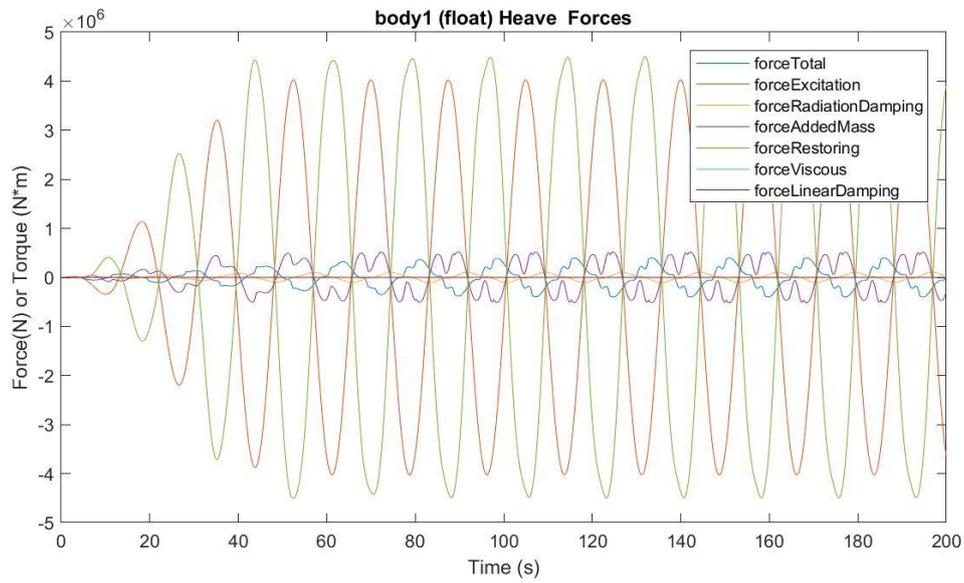
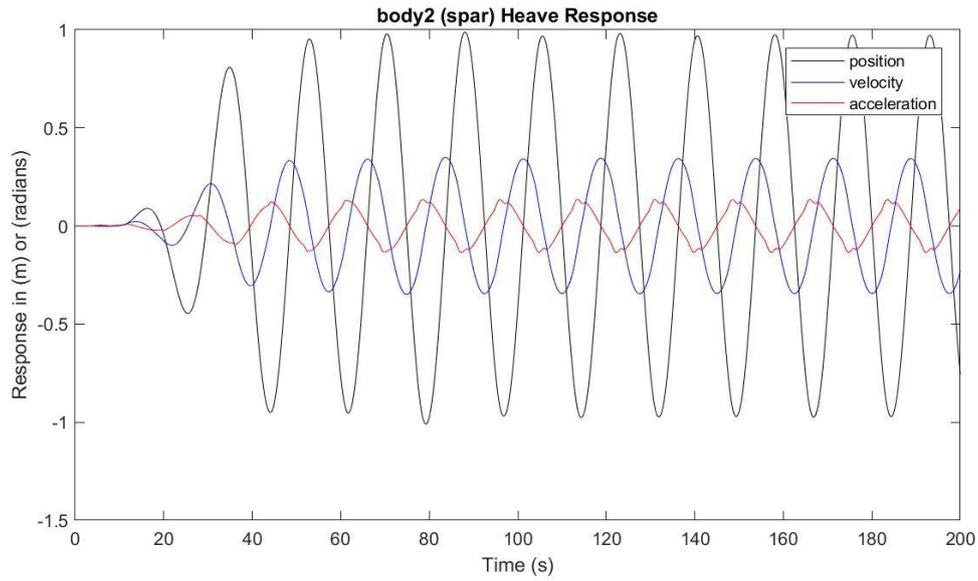
Presión media del acumulador de alta presión: 22.8933 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.3231 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6084 m, 0.7007 m/s y 0.2509 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9887 m, 0.3501 m/s y 0.1351 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 7.5 \text{ s}$

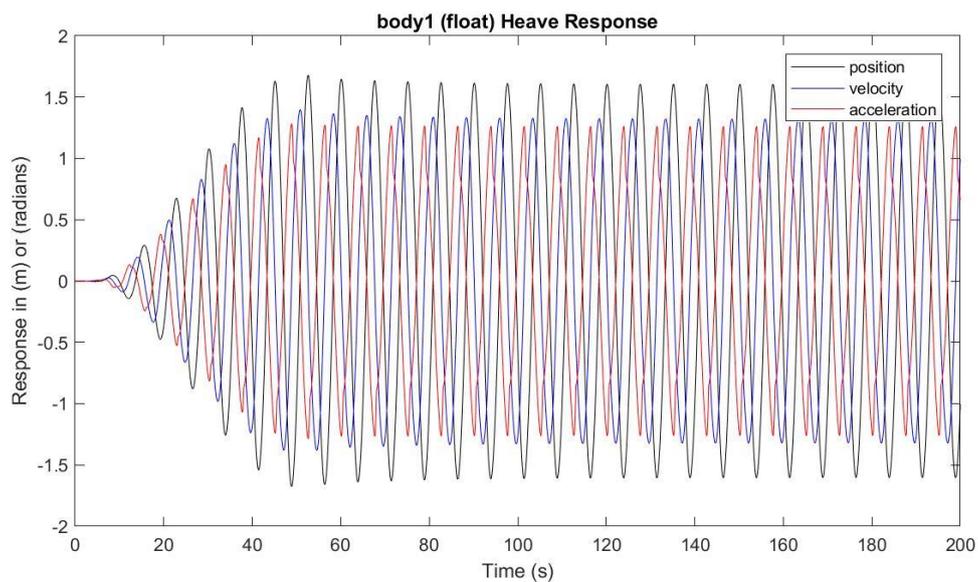
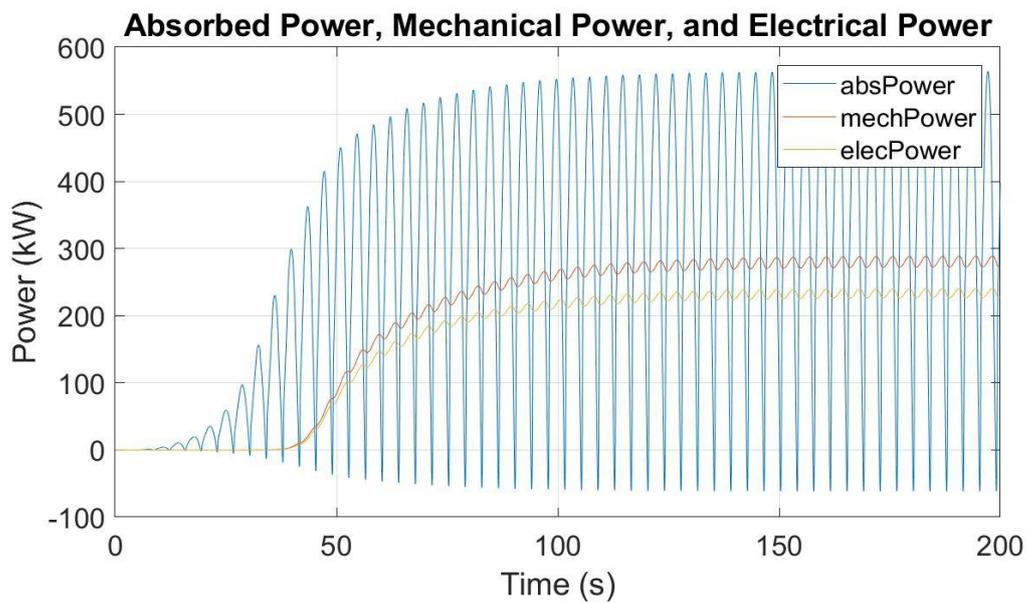
Potencia eléctrica media: 233.4000 kW

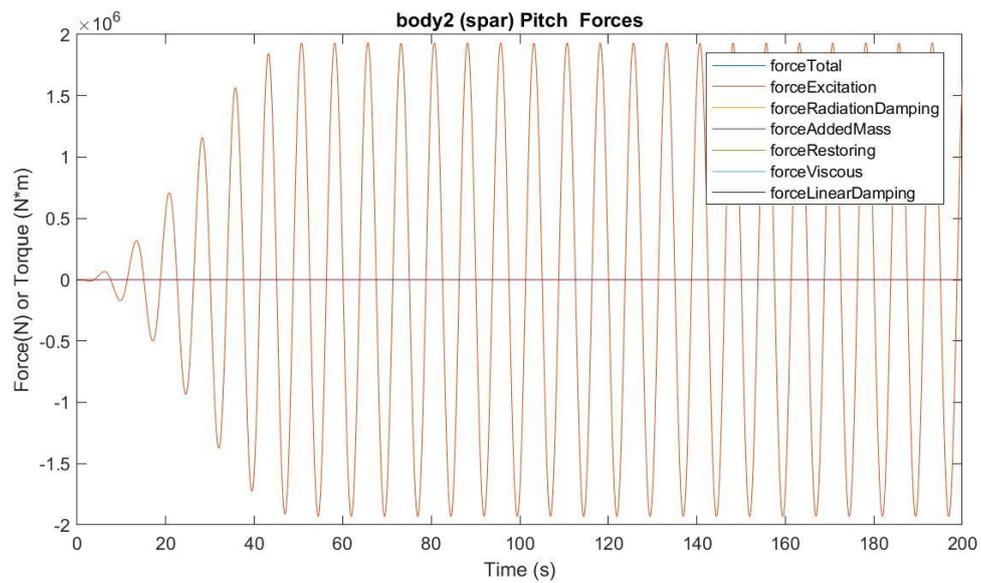
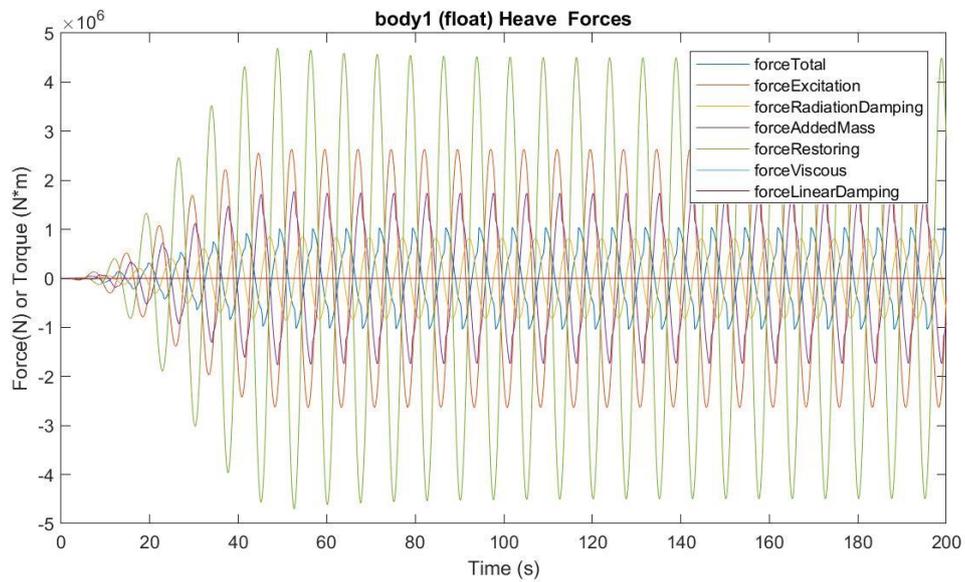
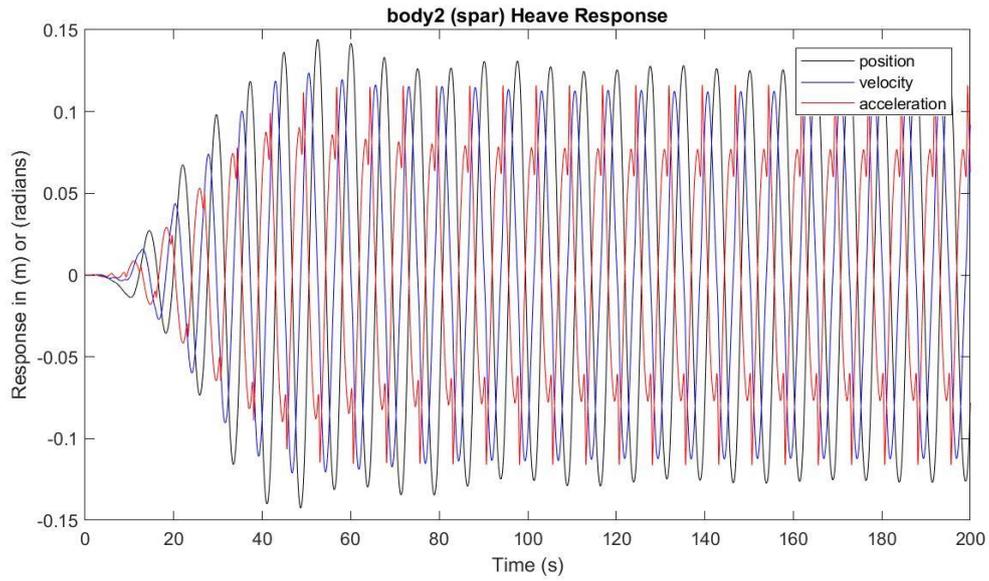
Presión media del acumulador de alta presión: 25.3912 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.0760 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6778 m, 1.3965 m/s y 1.2836 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1442 m, 0.1236 m/s y 0.1163 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 8.5 \text{ s}$

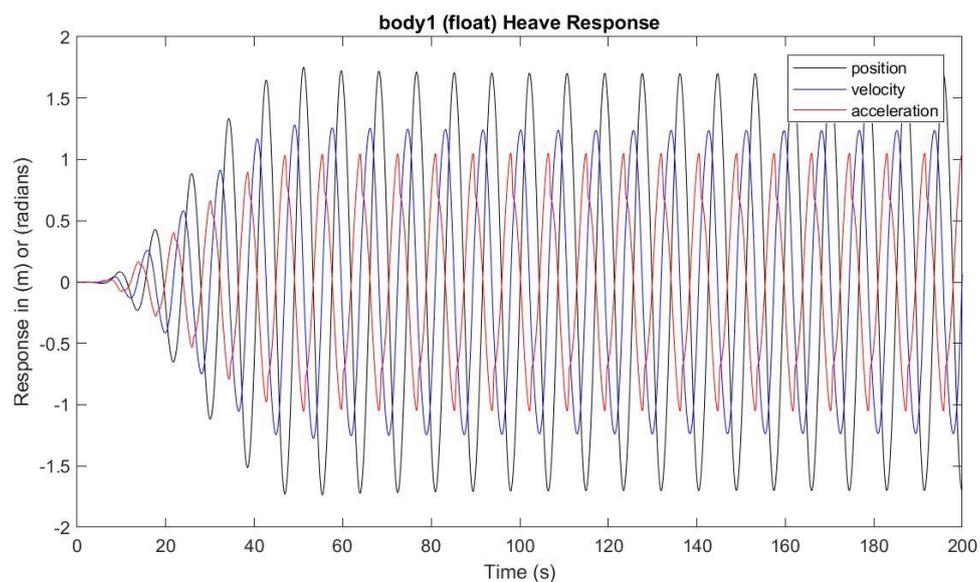
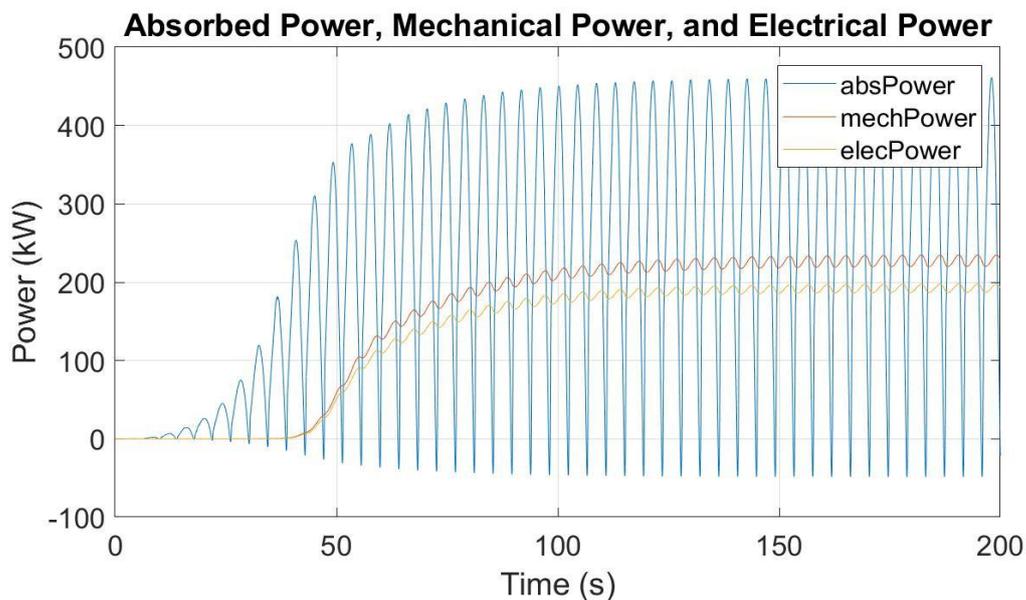
Potencia eléctrica media: 192.1092 kW

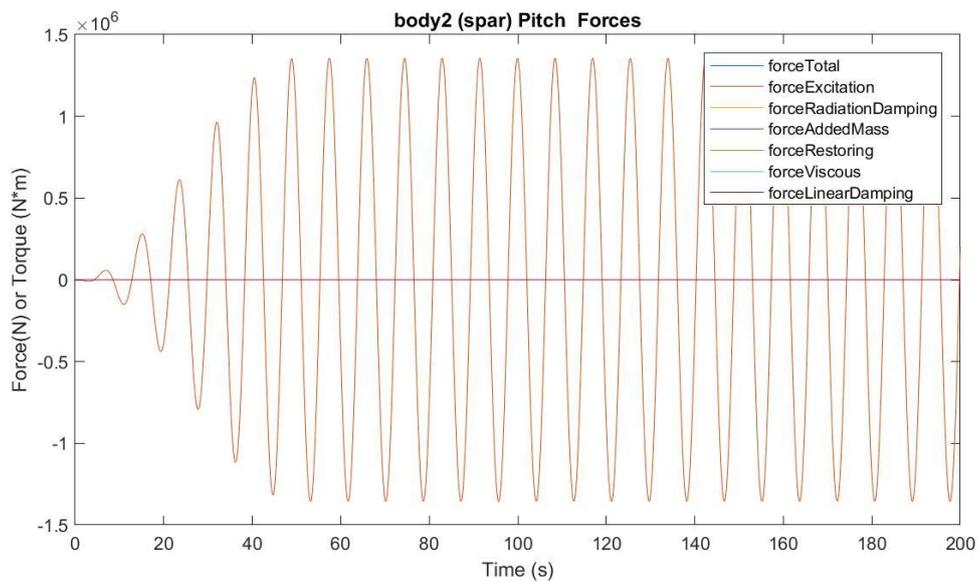
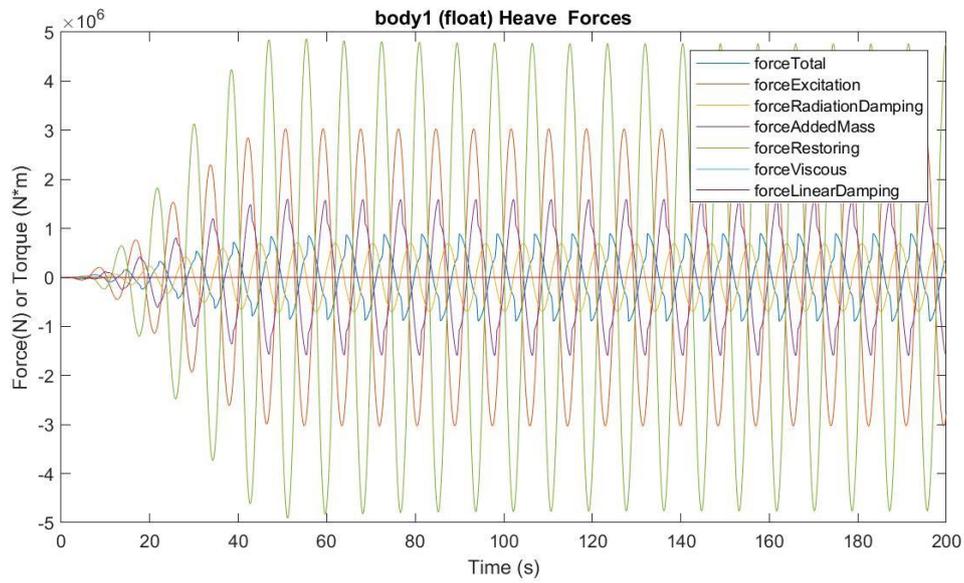
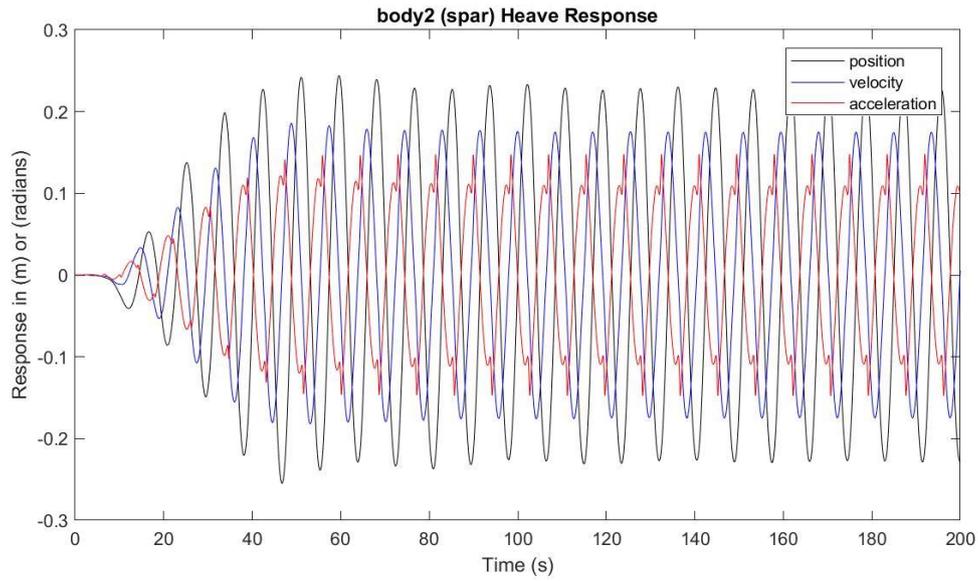
Presión media del acumulador de alta presión: 25.3912 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.0760 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.6778 m, 1.3965 m/s y 1.2836 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.1442 m, 0.1232 m/s y 0.1163 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$ $T_e = 9.5 \text{ s}$

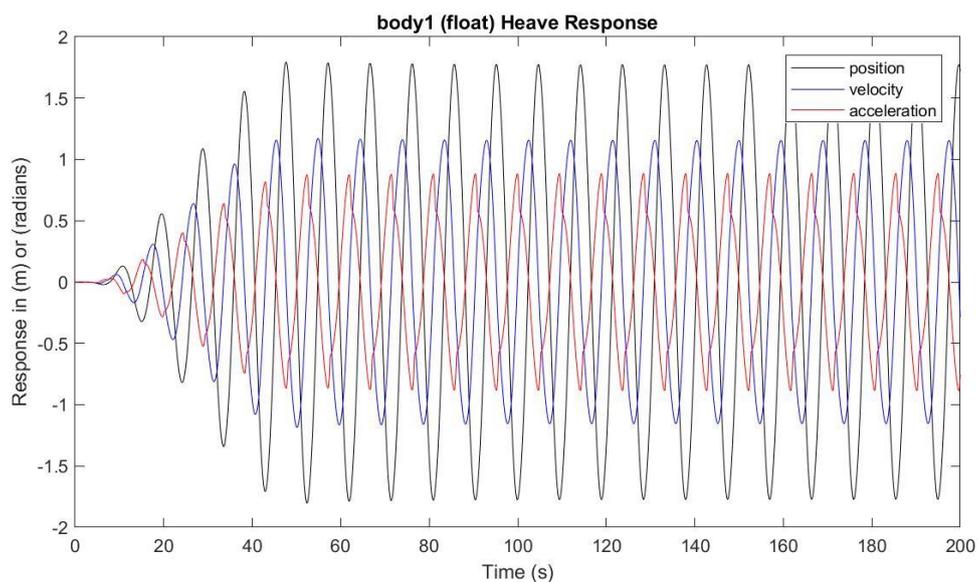
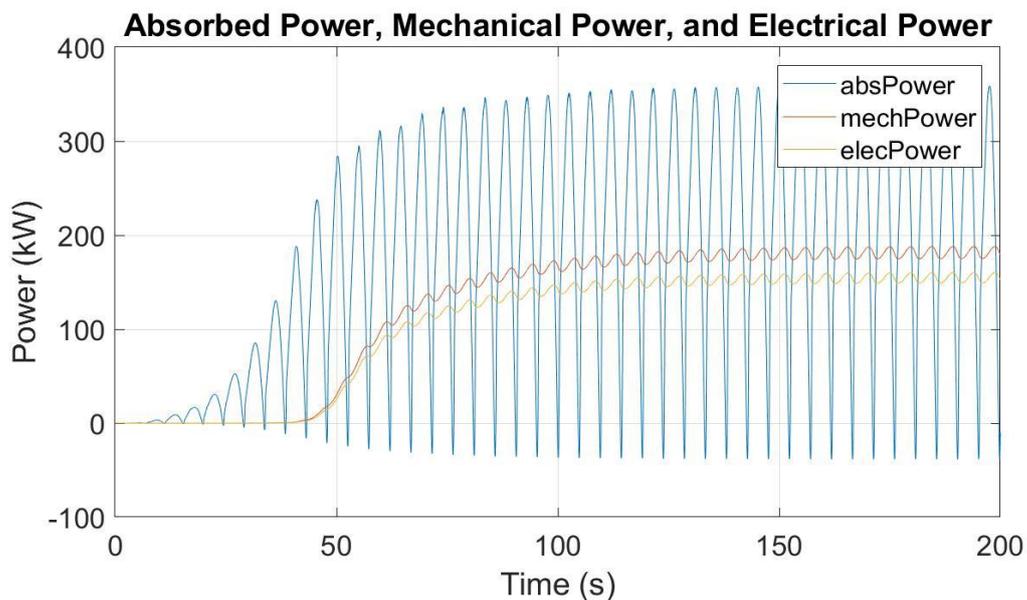
Potencia eléctrica media: 154.5010 kW

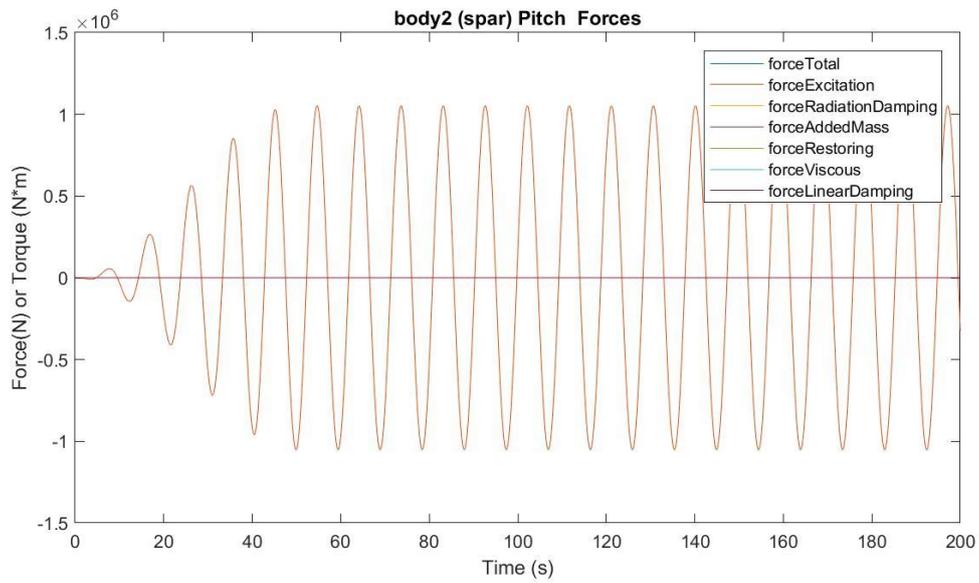
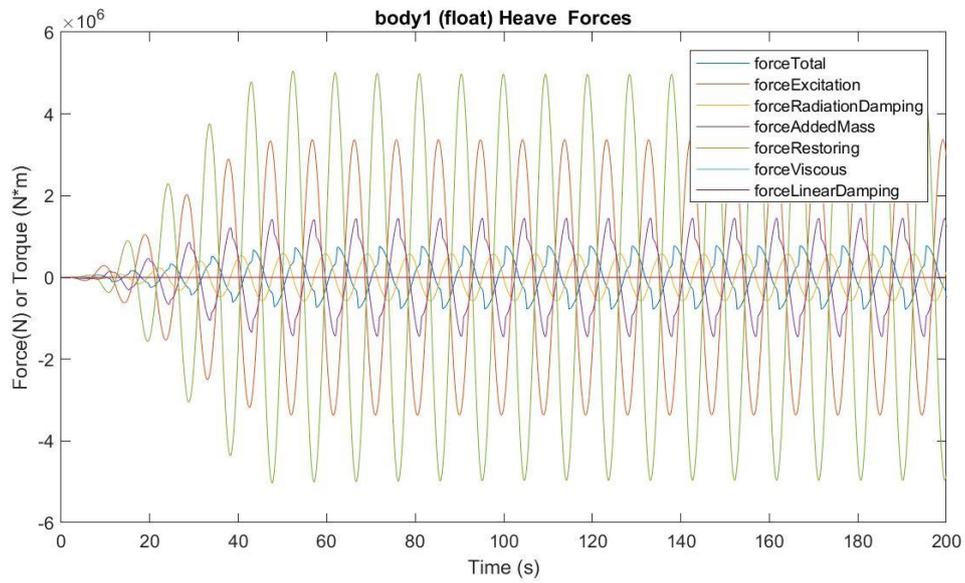
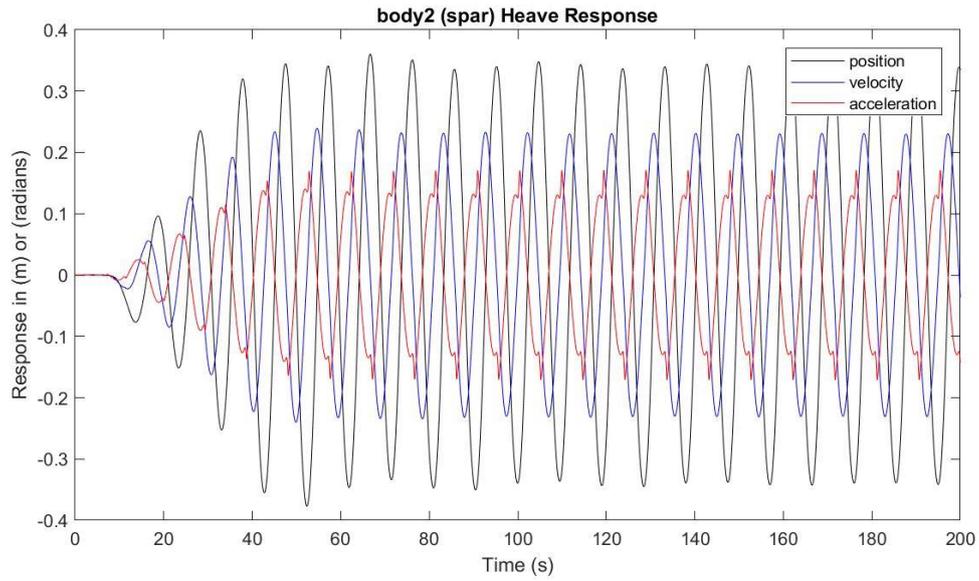
Presión media del acumulador de alta presión: 24.6094 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.9366 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.7949 m, 1.1708 m/s y 0.8866 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.3602 m, 0.2397 m/s y 0.1711 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

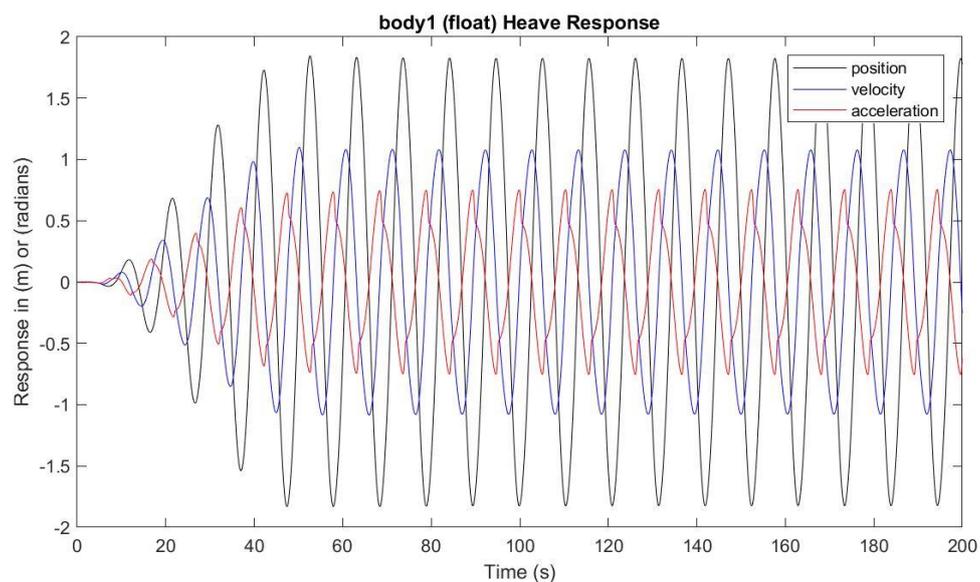
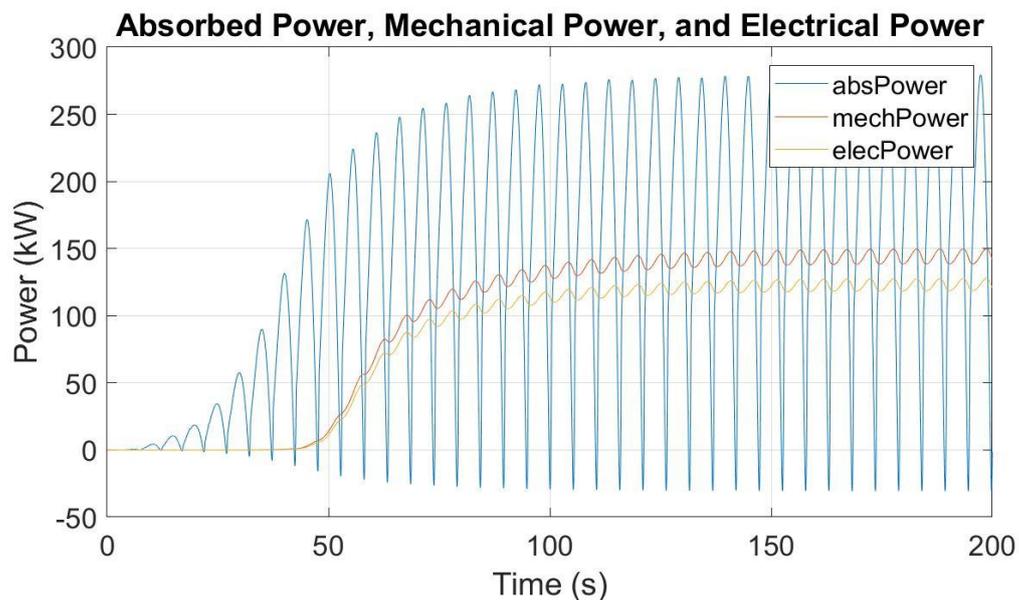
Potencia eléctrica media: 122.8893 kW

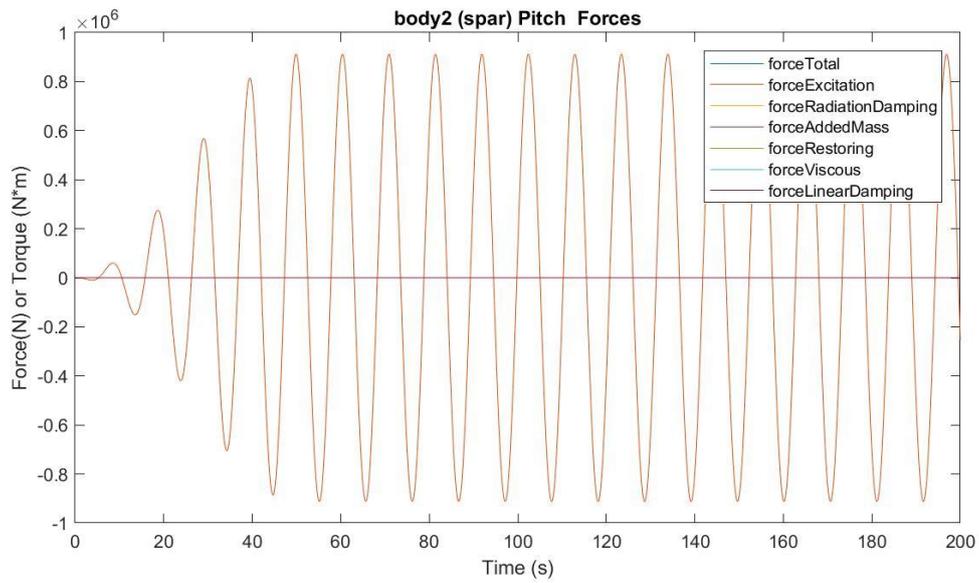
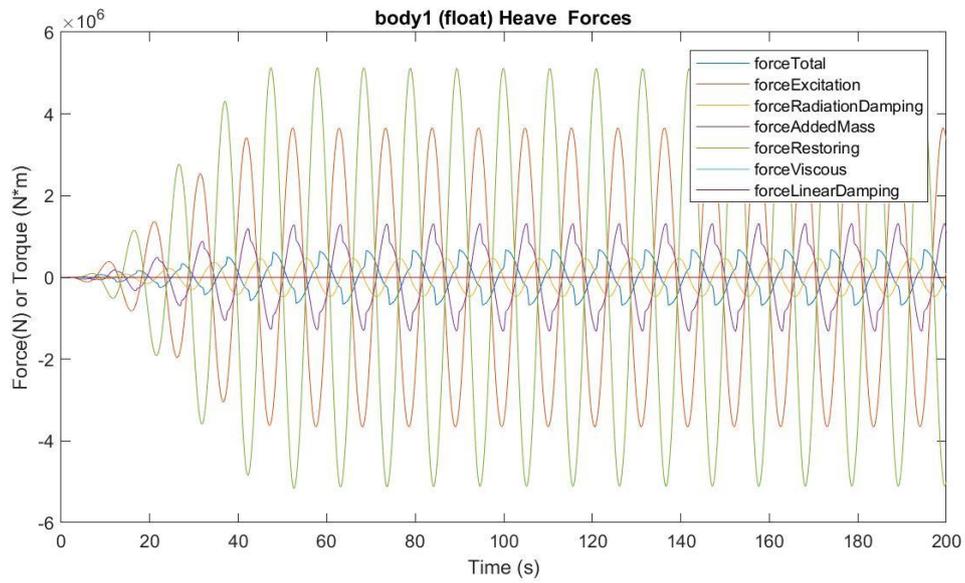
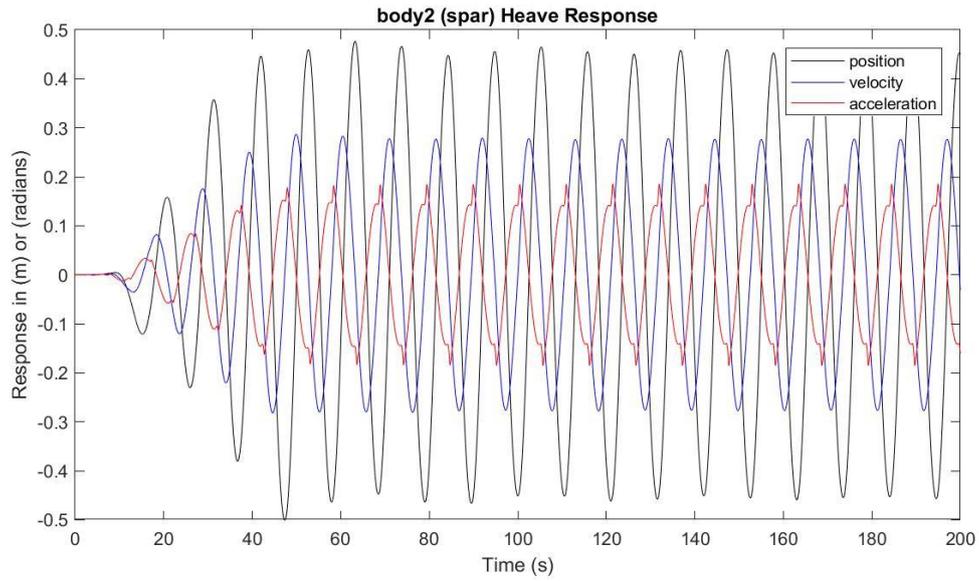
Presión media del acumulador de alta presión: 24.2801 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.3367 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.8436 m, 1.0984 m/s y 0.7557 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4764 m, 0.2870 m/s y 0.1856 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

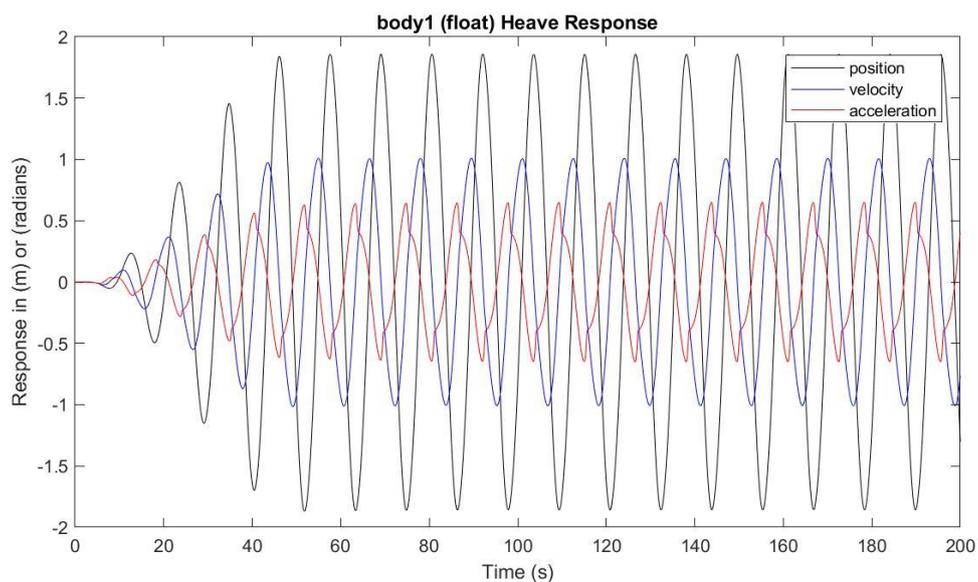
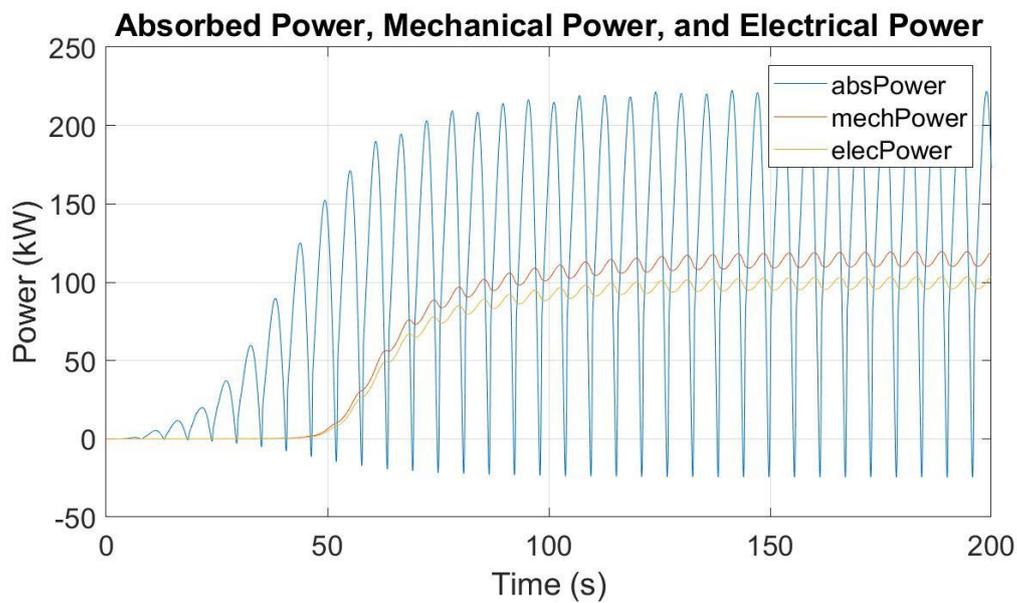
Potencia eléctrica media: 99.1662 kW

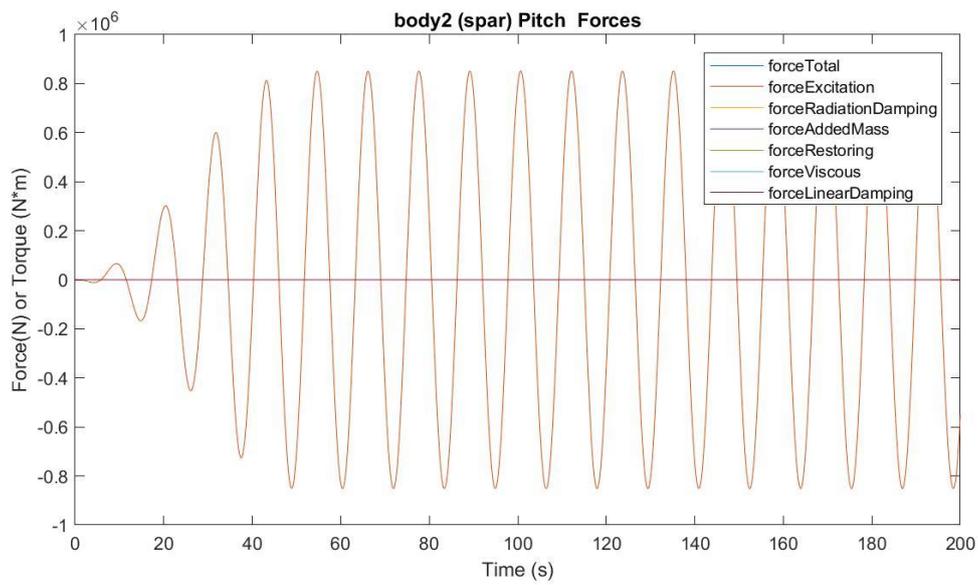
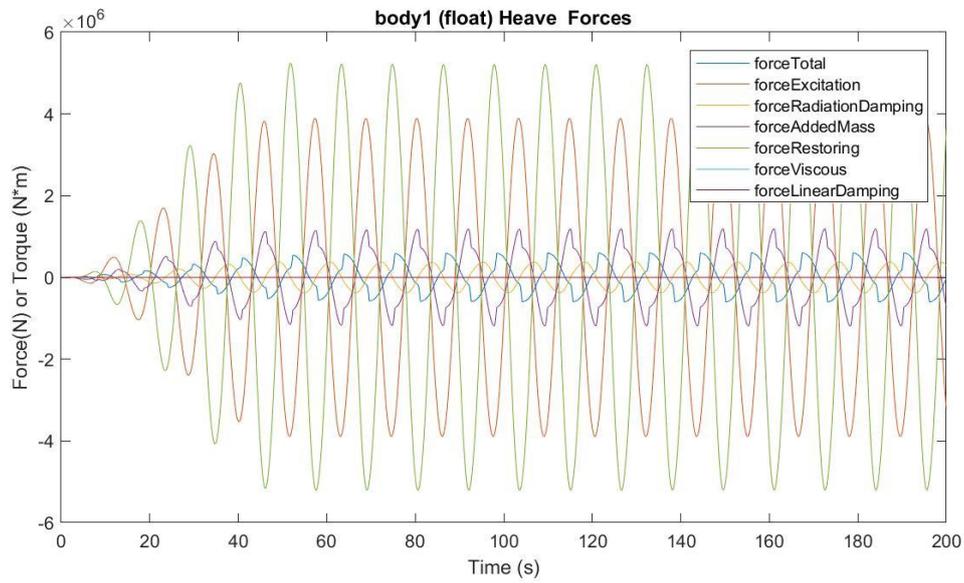
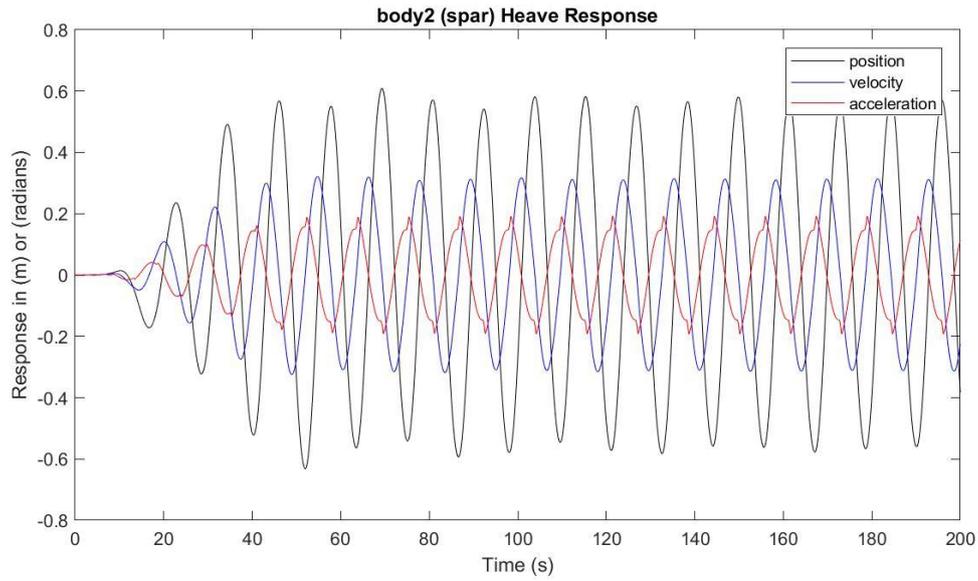
Presión media del acumulador de alta presión: 23.9964 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.7001 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.8597 m, 1.0104 m/s y 0.6508 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.6086 m, 0.3214 m/s y 0.1927 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

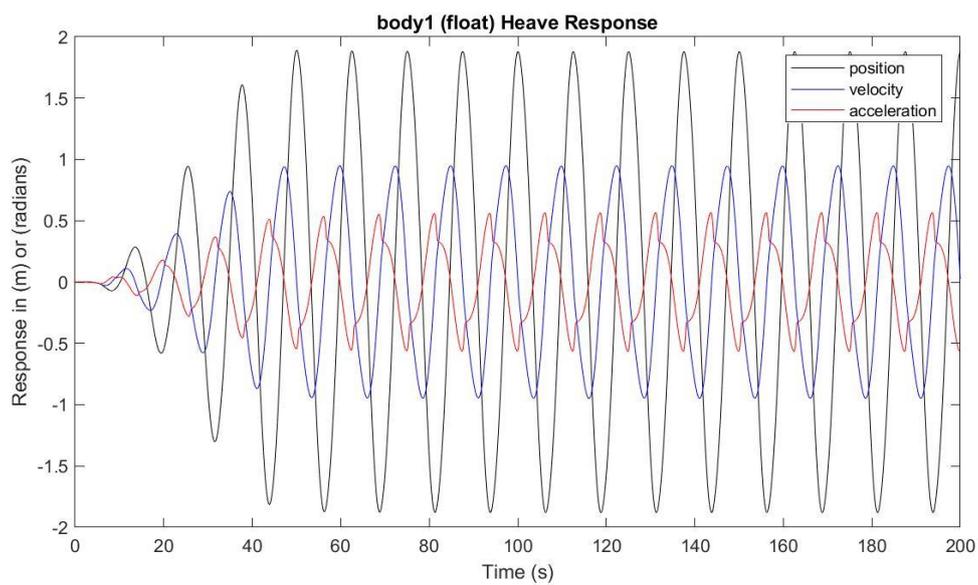
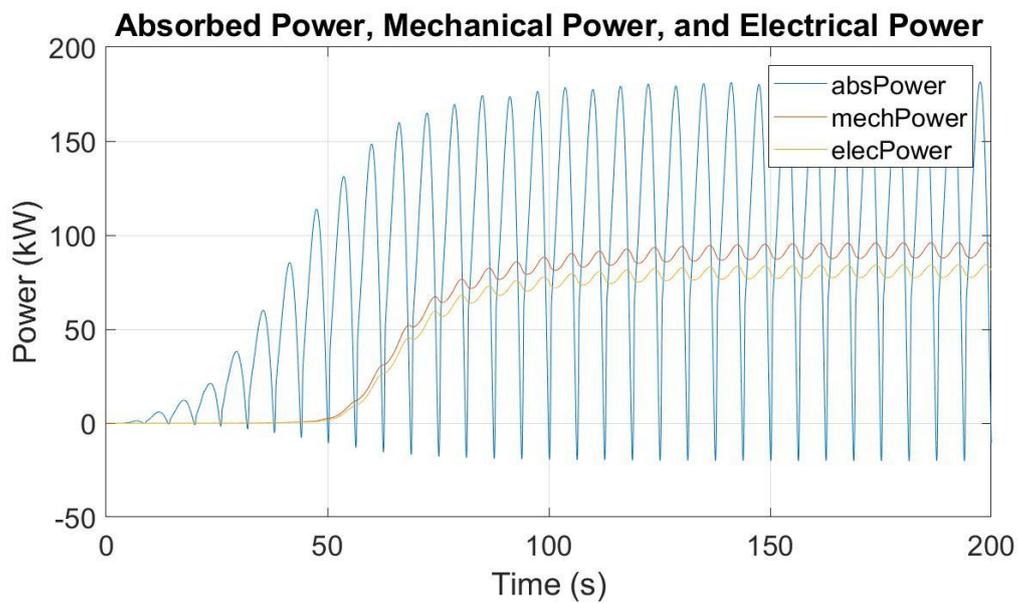
Potencia eléctrica media: 80.6759 kW

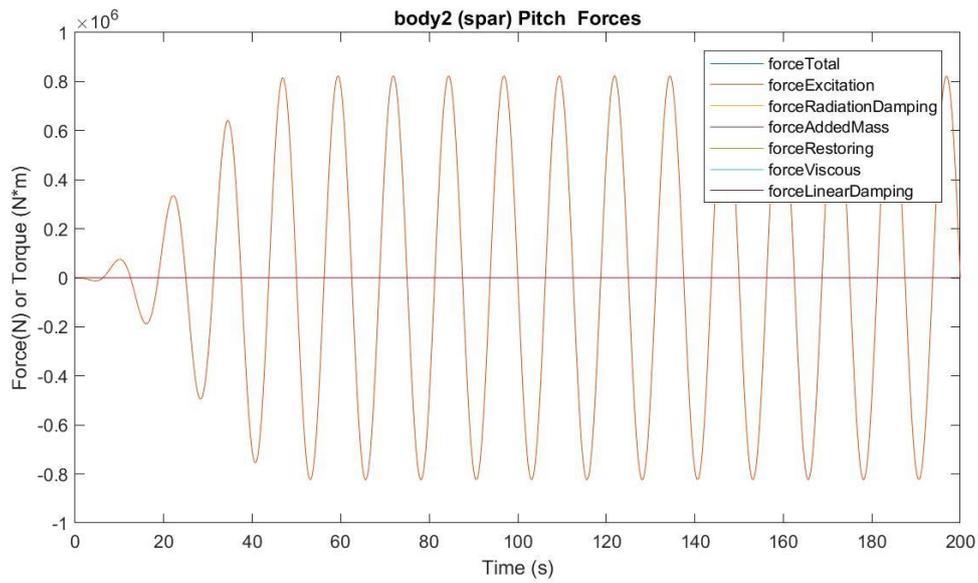
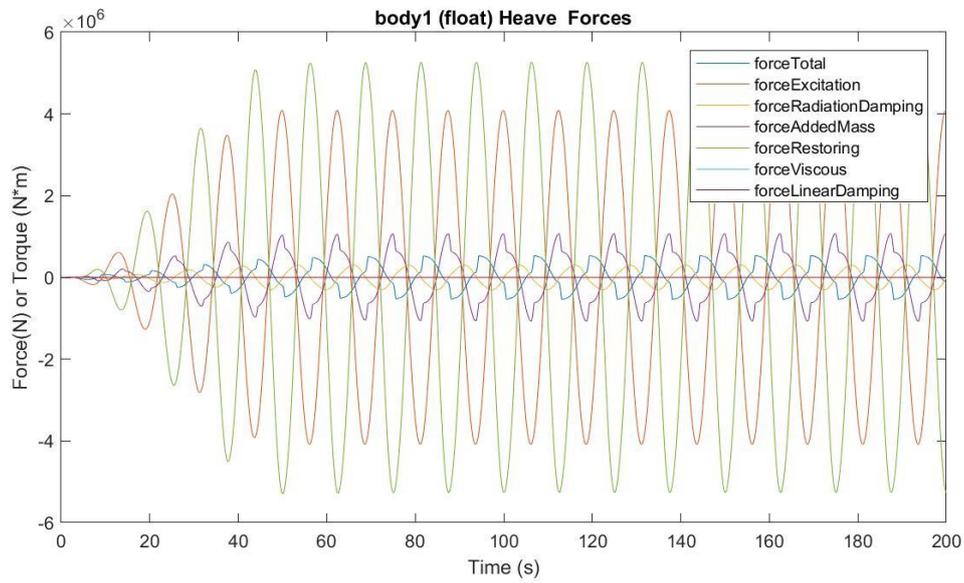
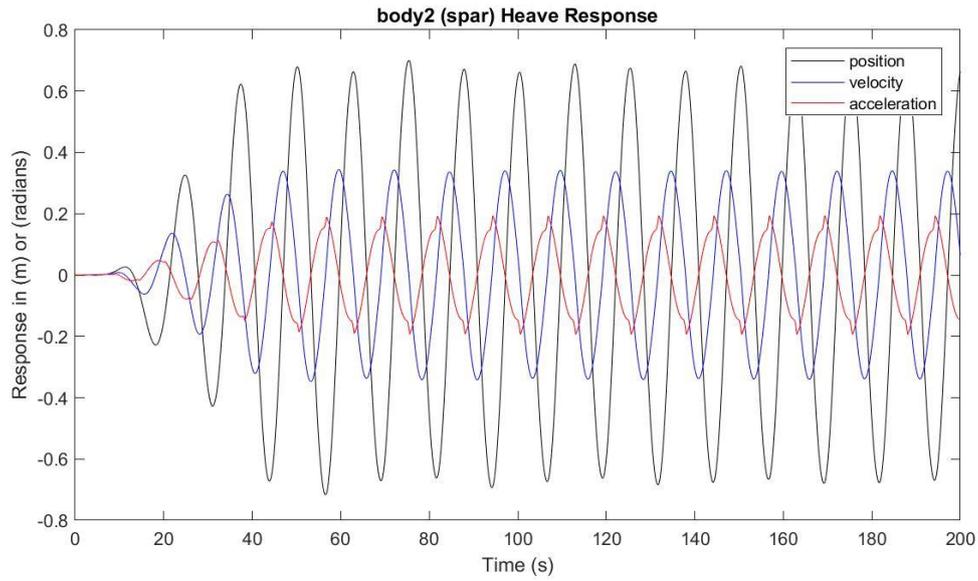
Presión media del acumulador de alta presión: 23.7639 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.0131 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.8909 m, 0.9489 m/s y 0.5663 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.6998 m, 0.3444 m/s y 0.1940 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

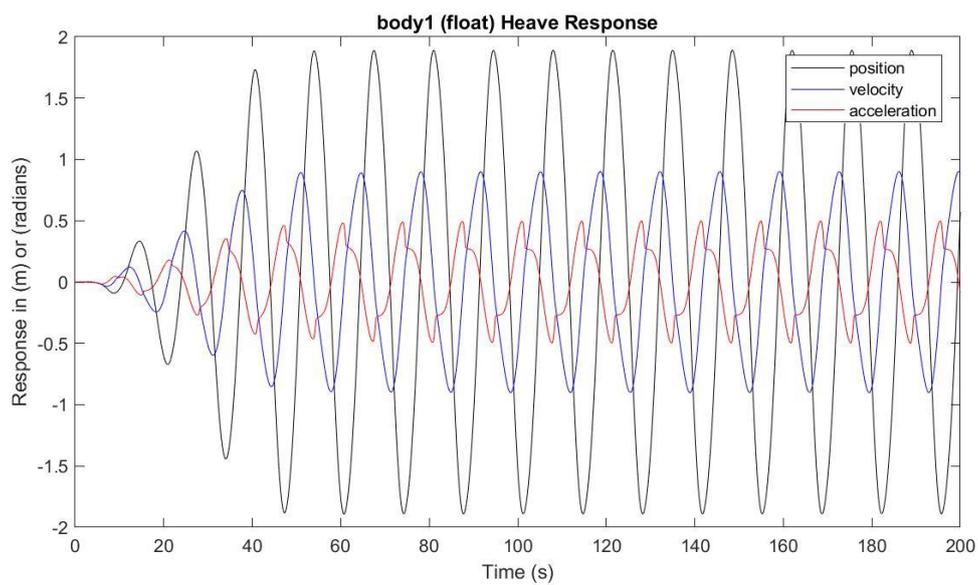
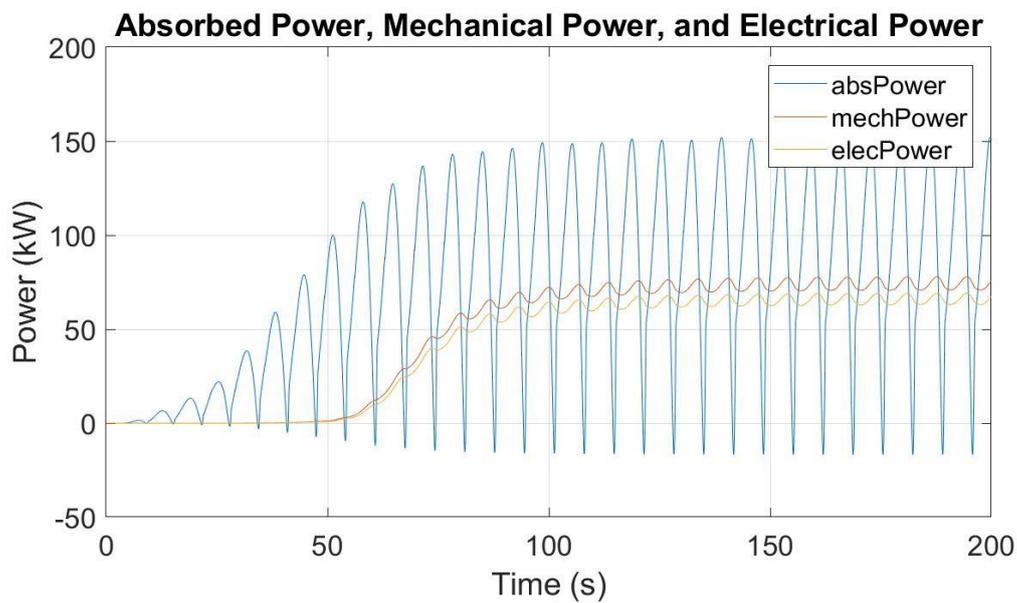
Potencia eléctrica media: 65.6879 kW

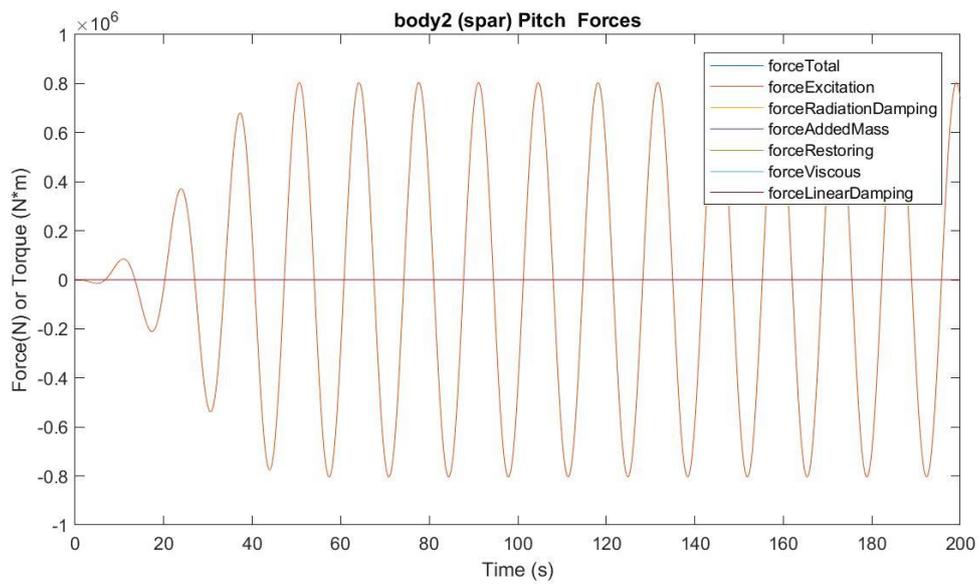
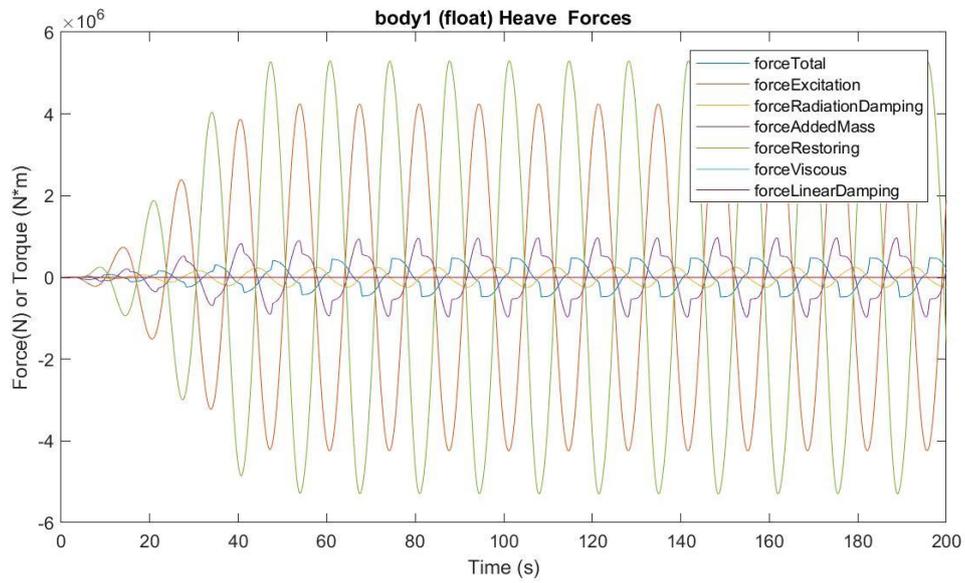
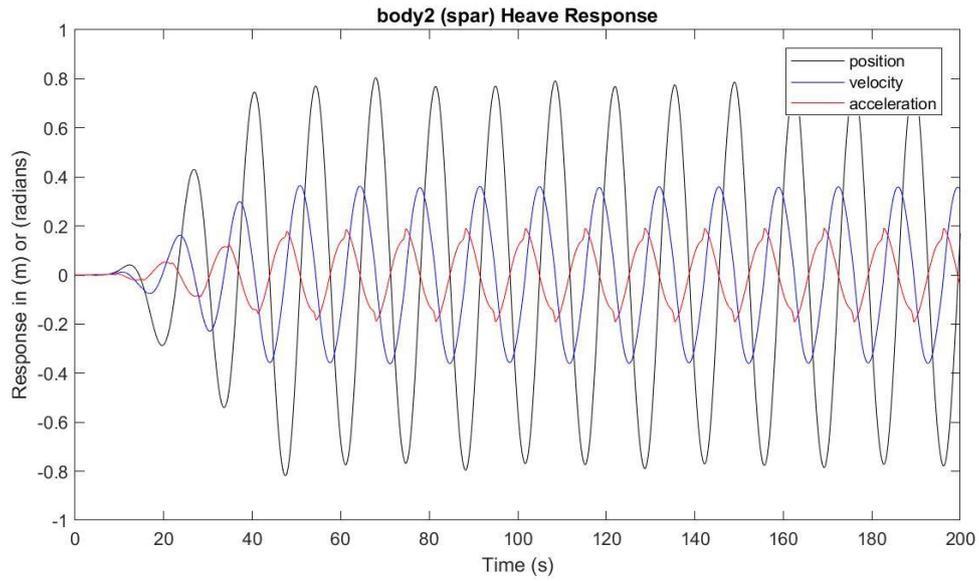
Presión media del acumulador de alta presión: 23.5657 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.2905 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.8914 m, 0.9020 m/s y 0.4985 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.8044 m, 0.3648 m/s y 0.1916 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

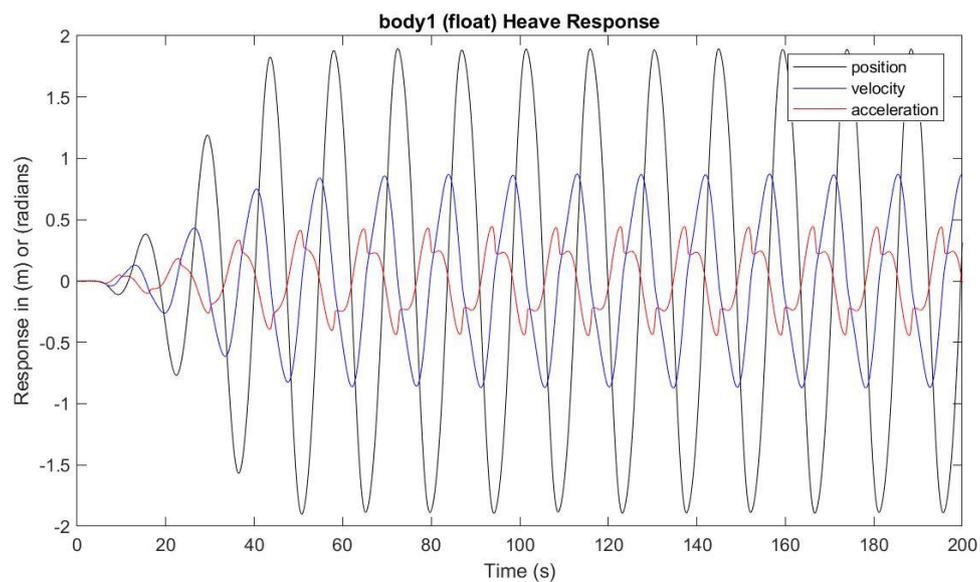
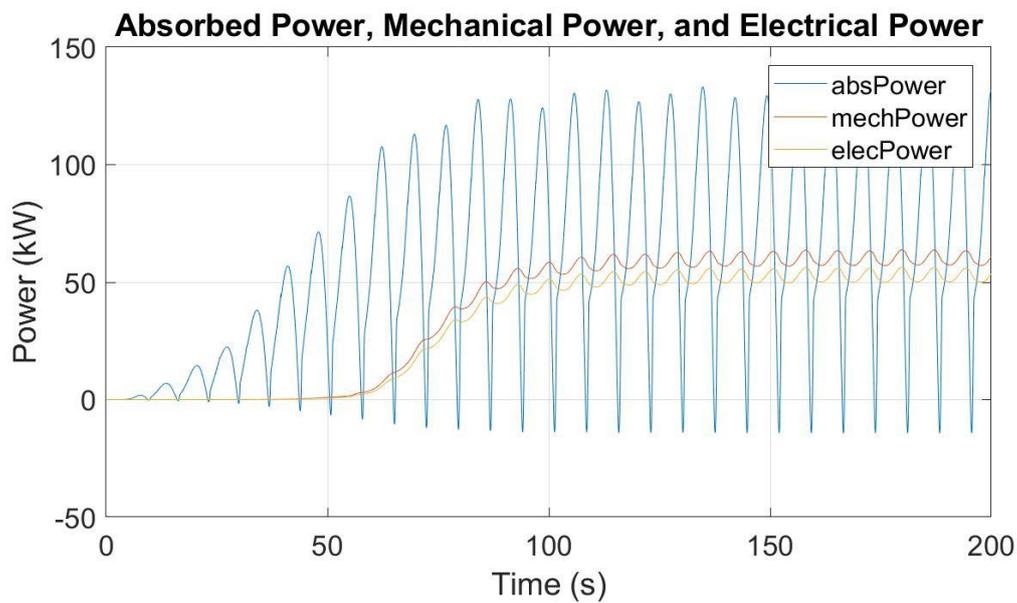
Potencia eléctrica media: 52.5012 kW

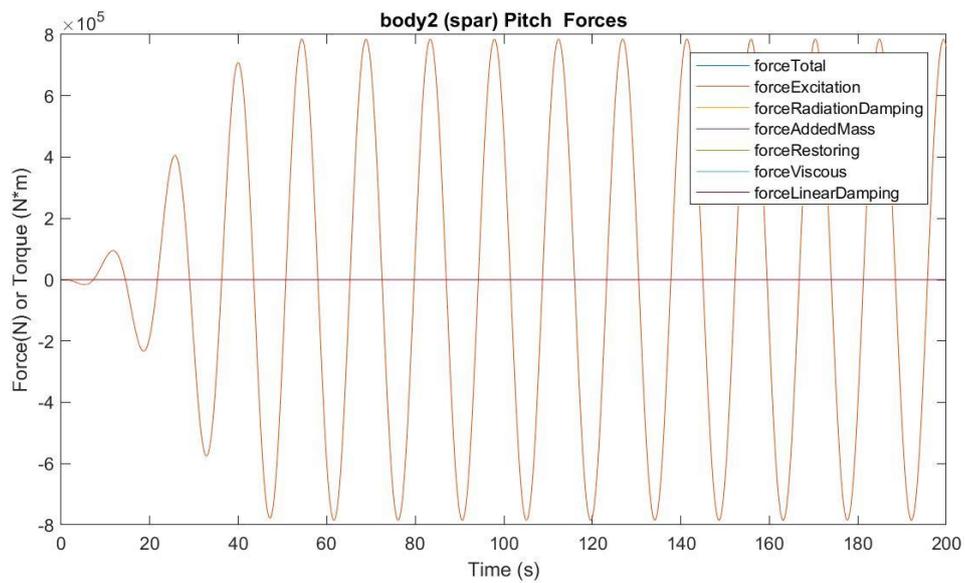
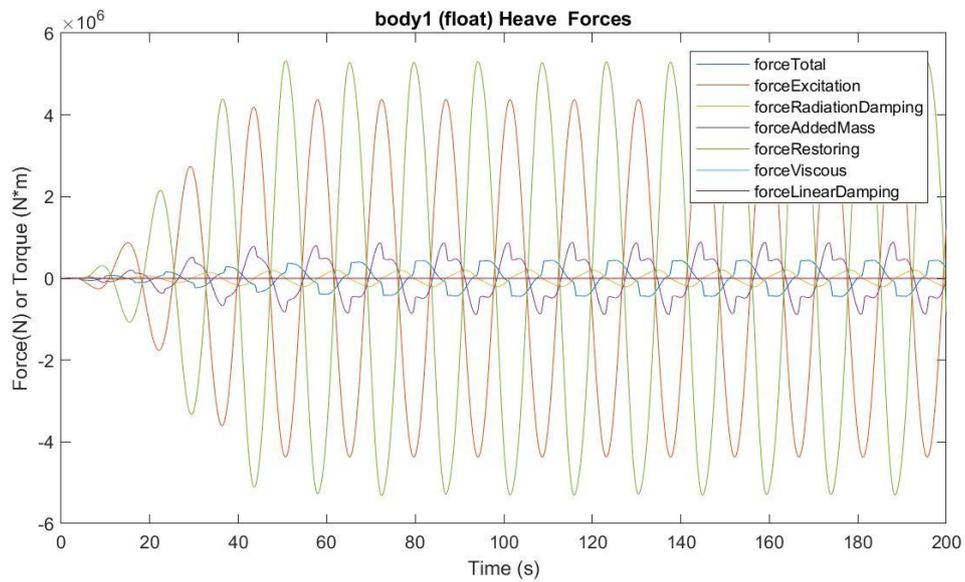
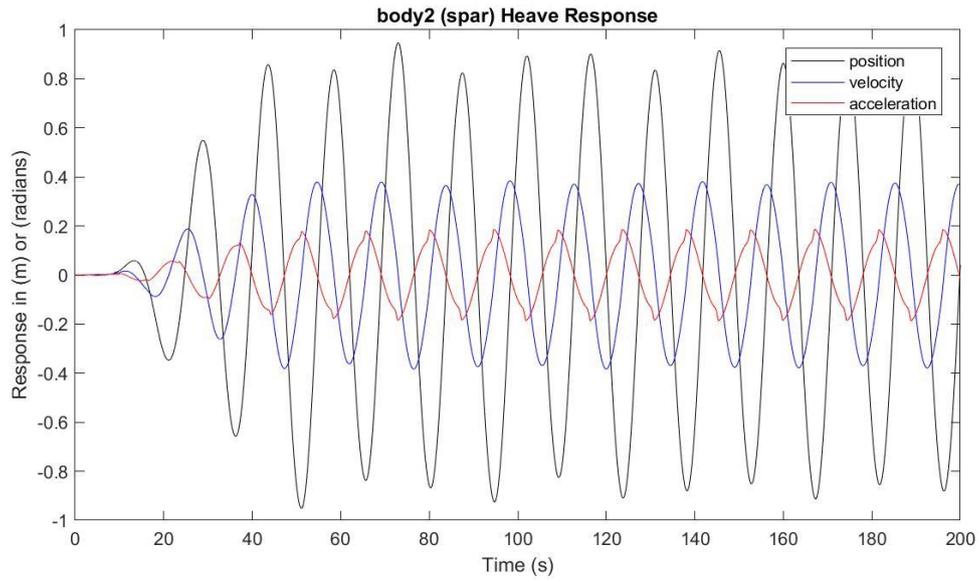
Presión media del acumulador de alta presión: 23.3973 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.5348 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.8961 m, 0.8727 m/s y 0.4454 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9471 m, 0.3839 m/s y 0.1871 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

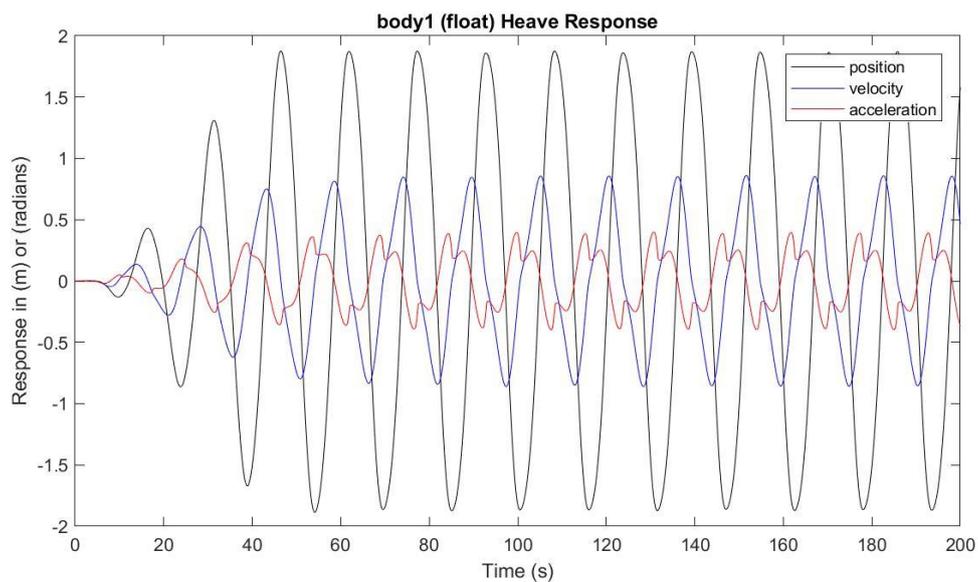
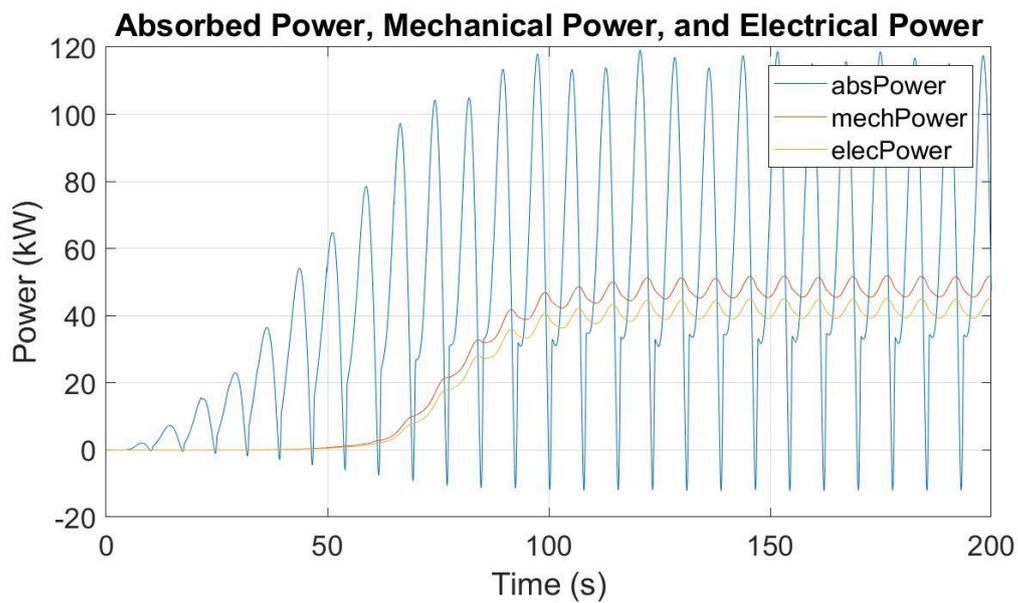
Potencia eléctrica media: 41.8769 kW

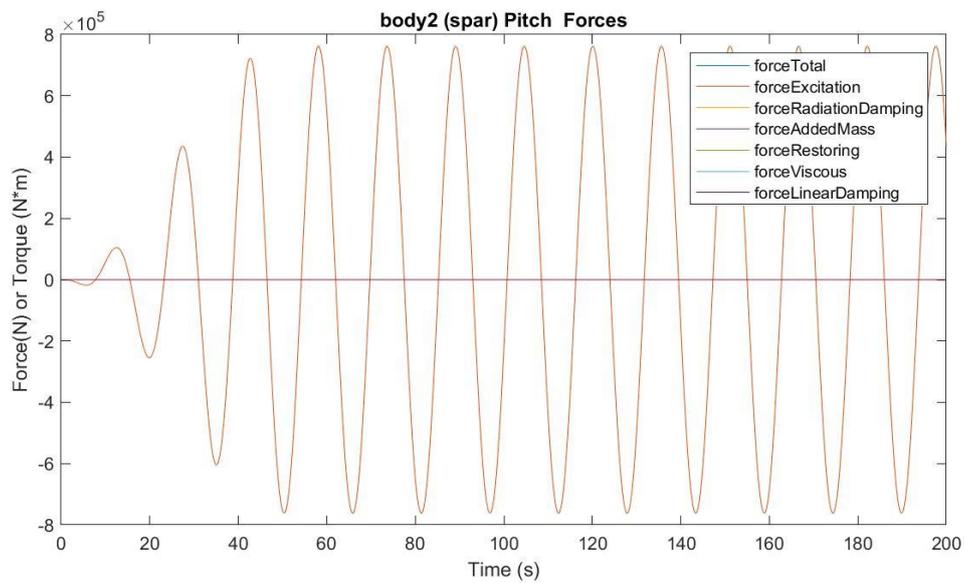
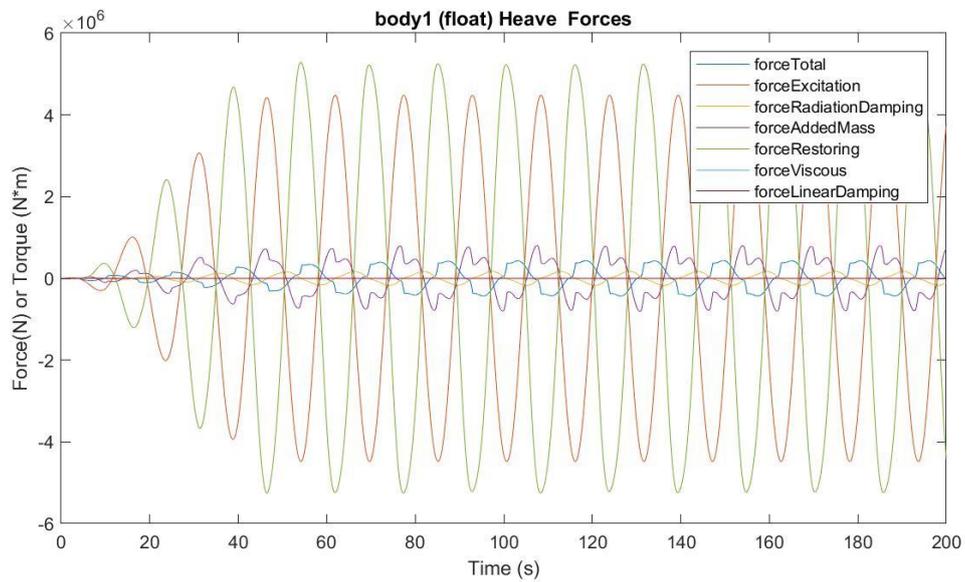
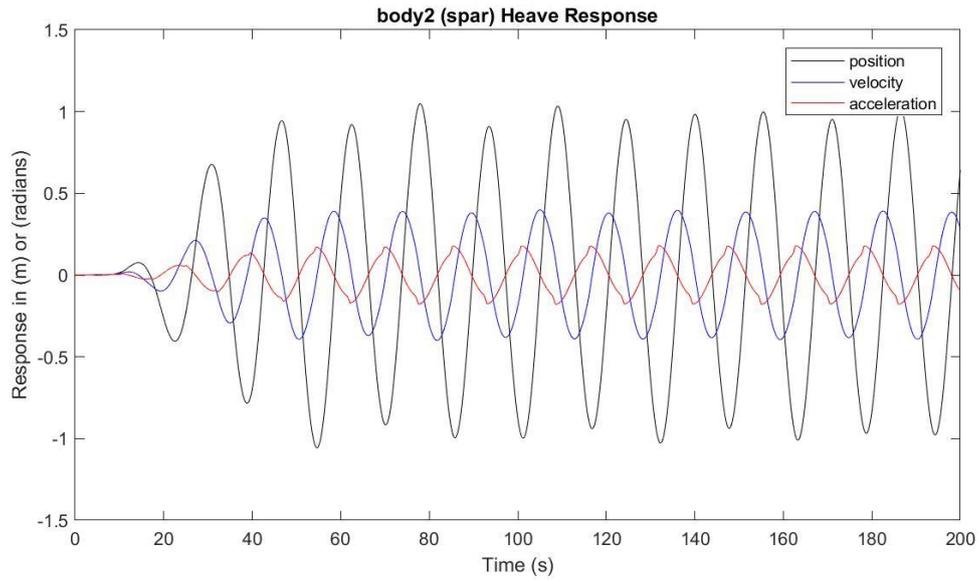
Presión media del acumulador de alta presión: 23.2505 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.5348 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.8961 m, 0.8961 m/s y 0.4454 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9471 m, 0.3839 m/s y 0.1871 m/s²





$H_s = 3.75 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

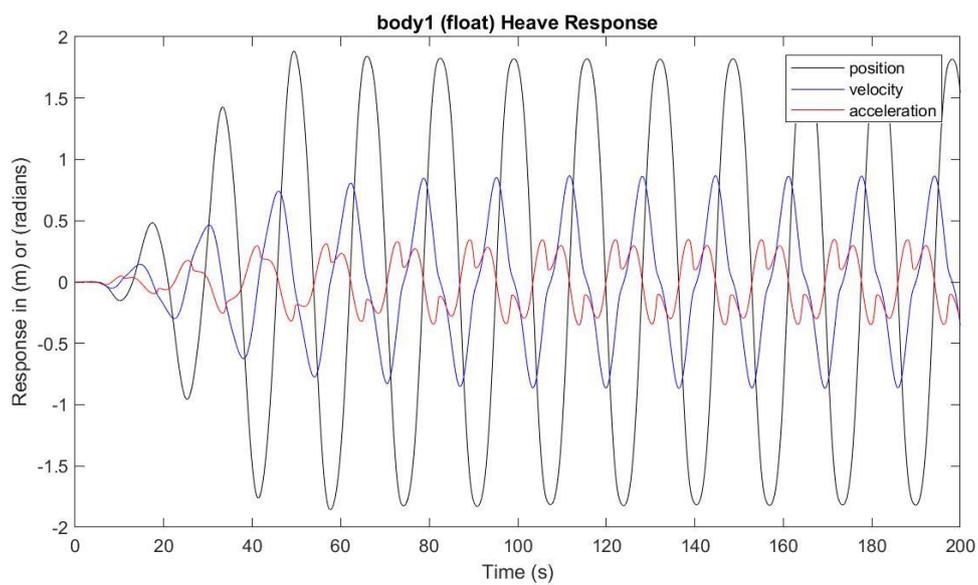
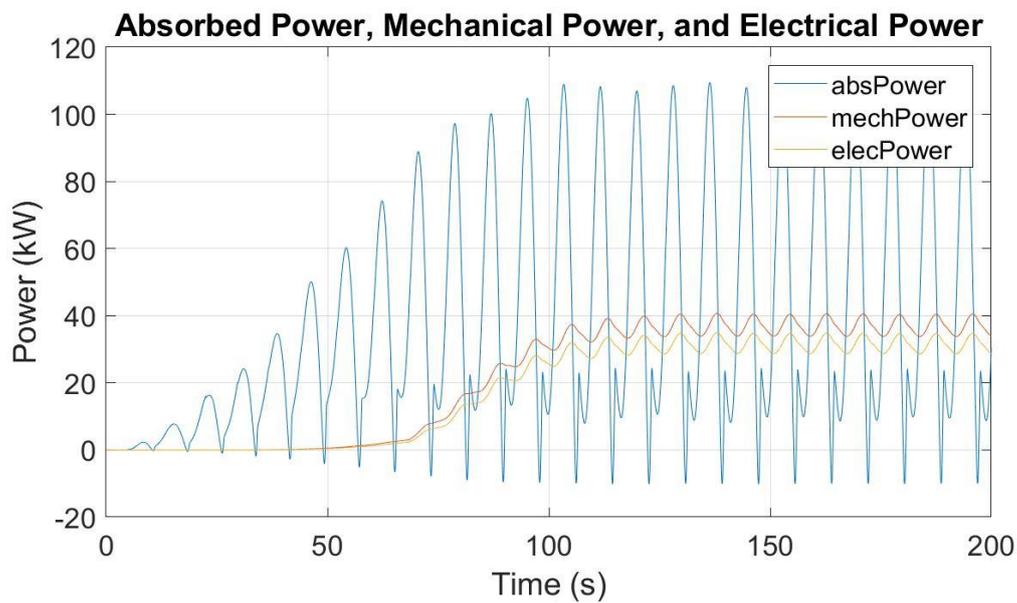
Potencia eléctrica media: 31.6388 kW

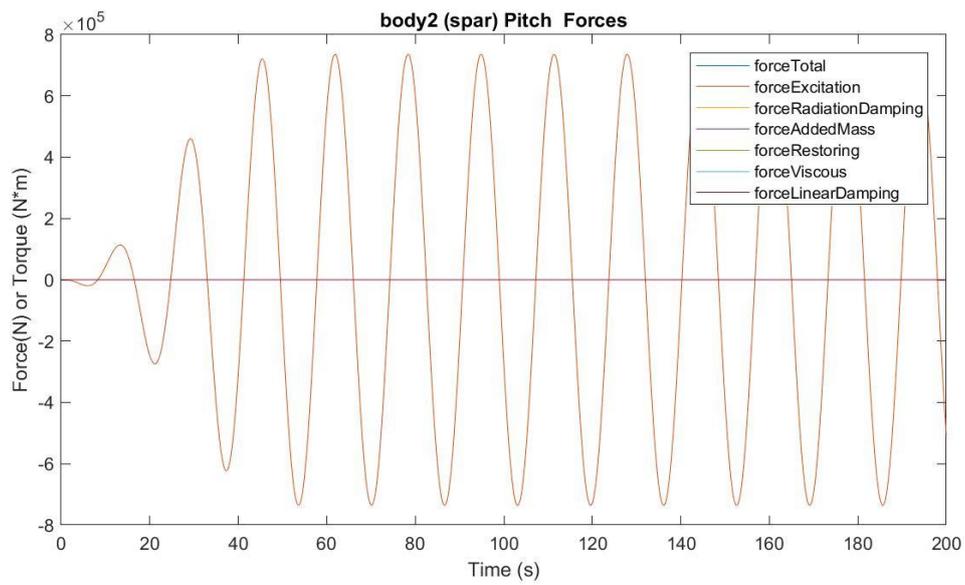
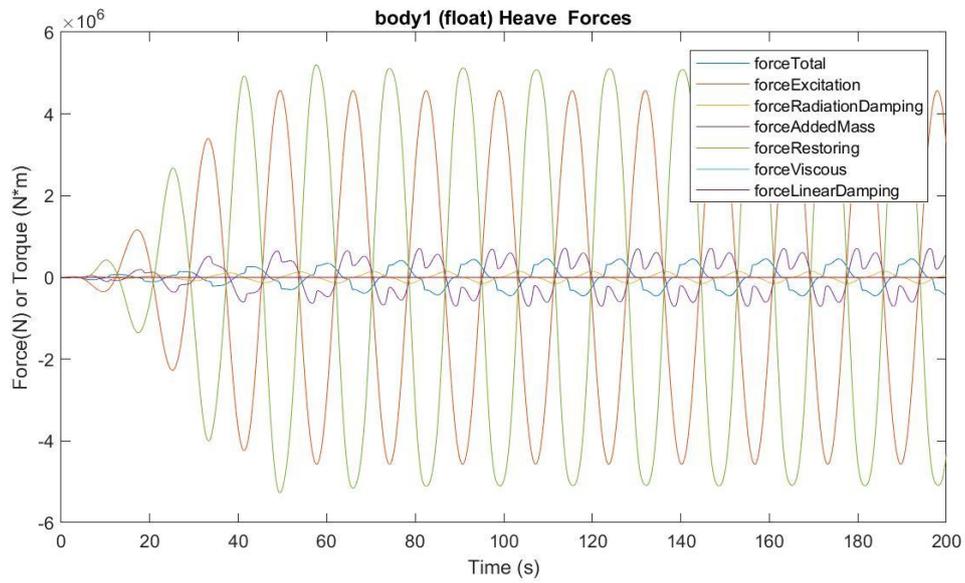
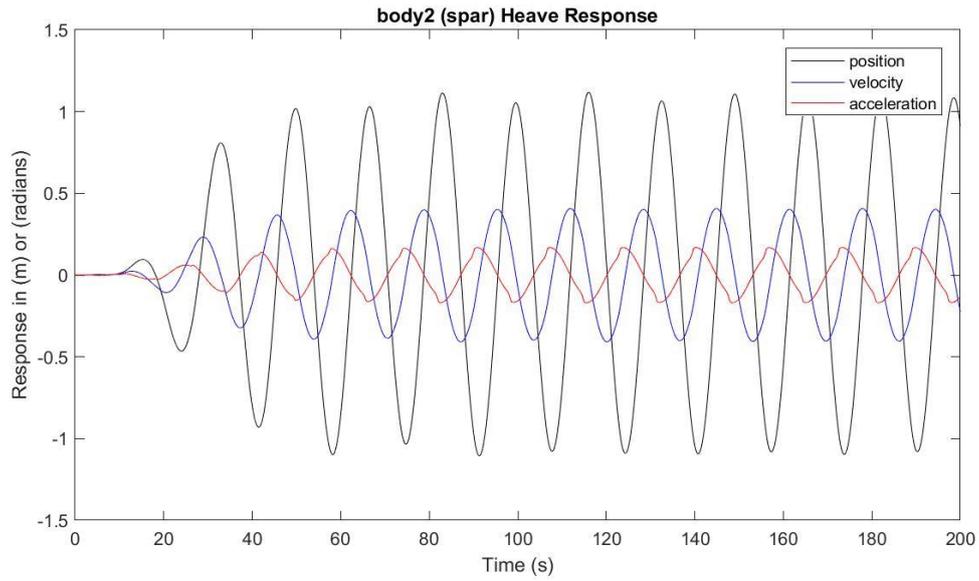
Presión media del acumulador de alta presión: 23.0933 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.9973 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.8827 m, 0.8674 m/s y 0.3469 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.1178 m, 0.4075 m/s y 0.1684 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 8.5 \text{ s}$

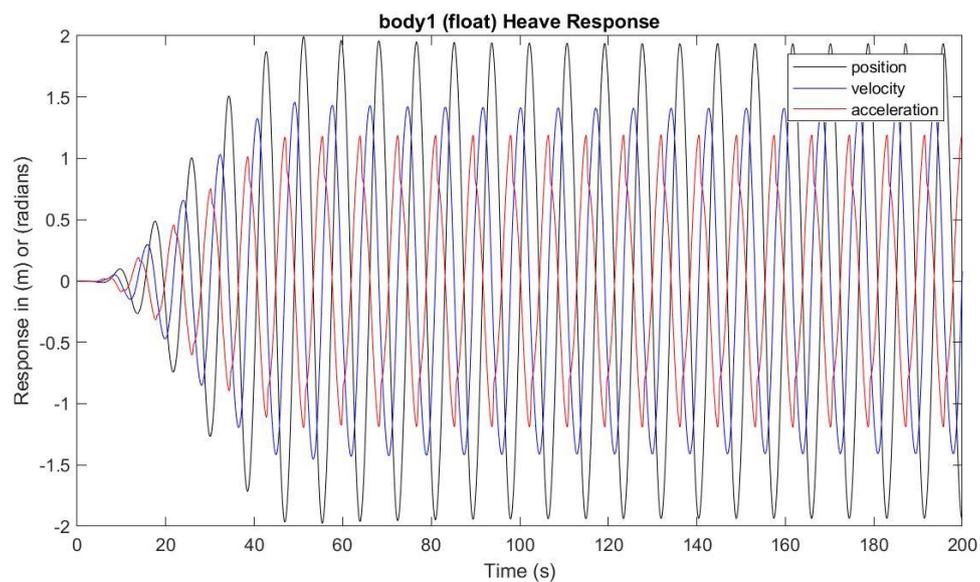
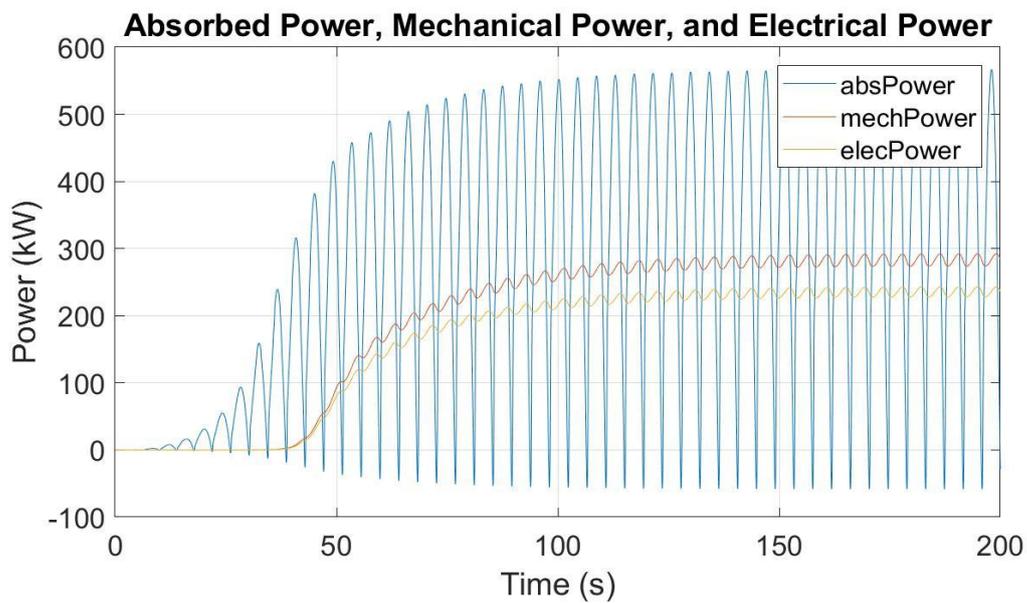
Potencia eléctrica media: 235.4550 kW

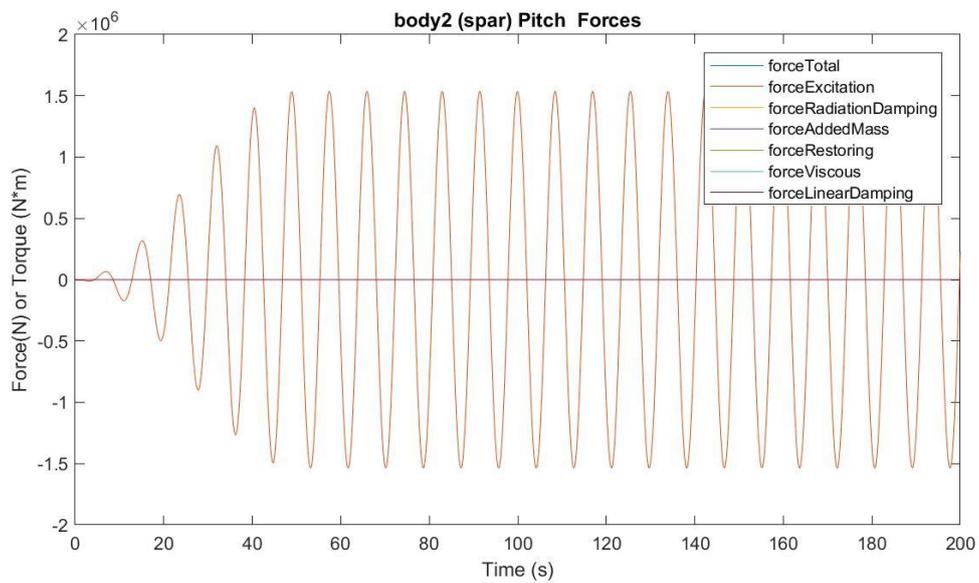
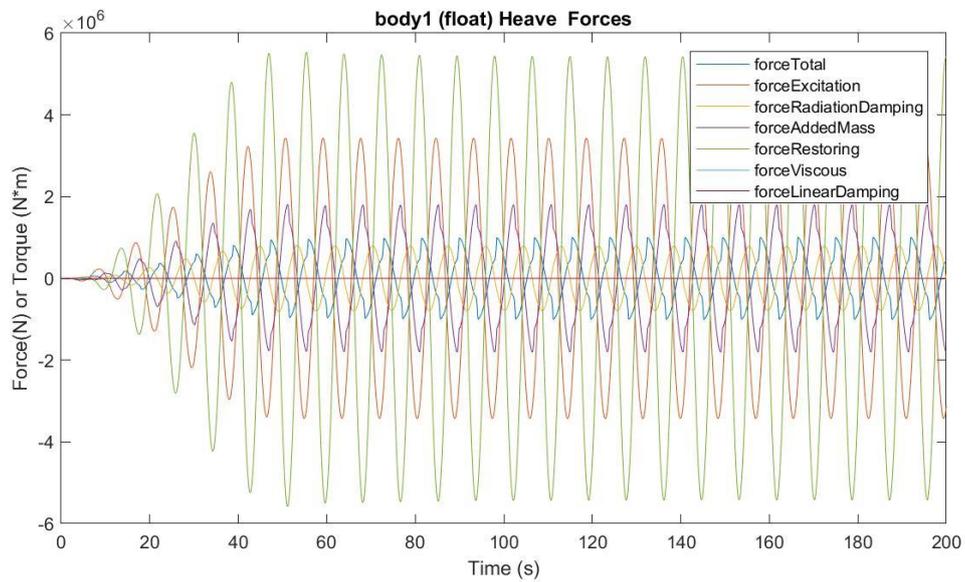
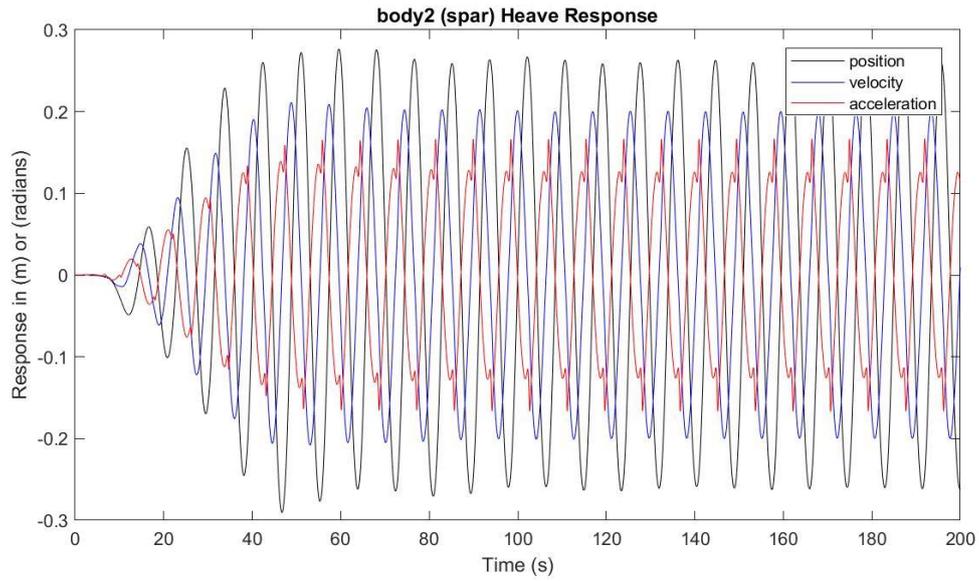
Presión media del acumulador de alta presión: 25.4107 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.0573 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 1.9935 m, 1.4594 m/s y 1.1912 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.2766 m, 0.2111 m/s y 0.1667 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

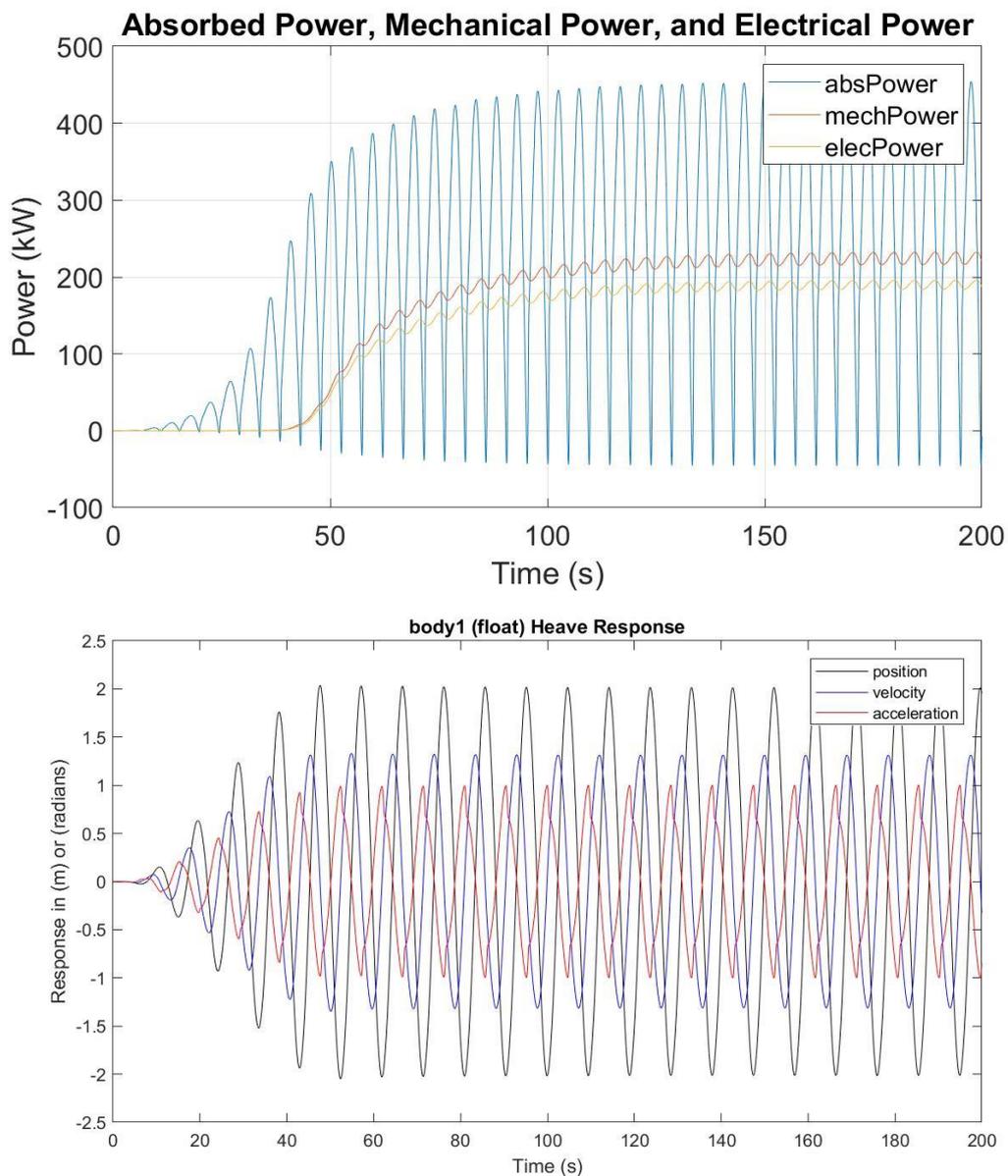
Potencia eléctrica media: 189.8369 kW

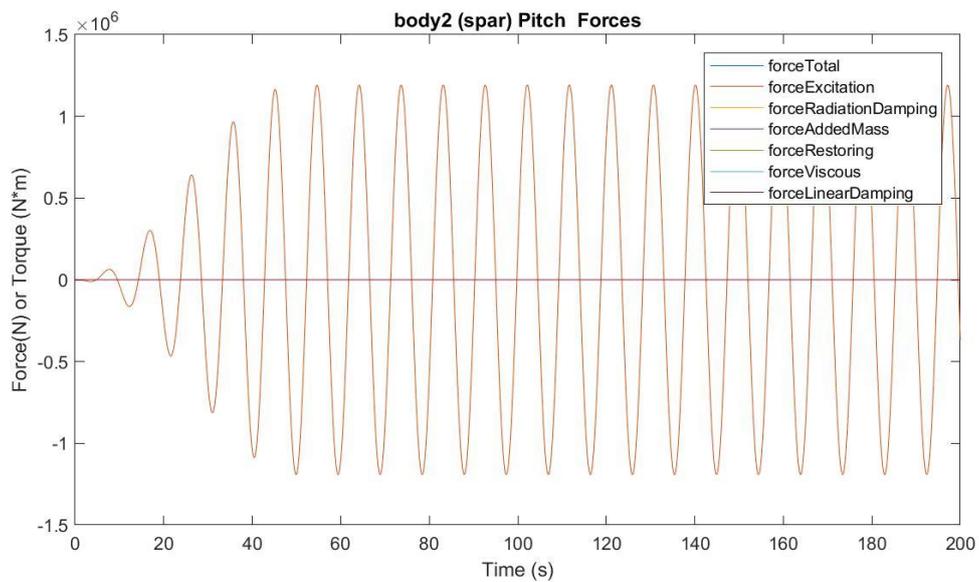
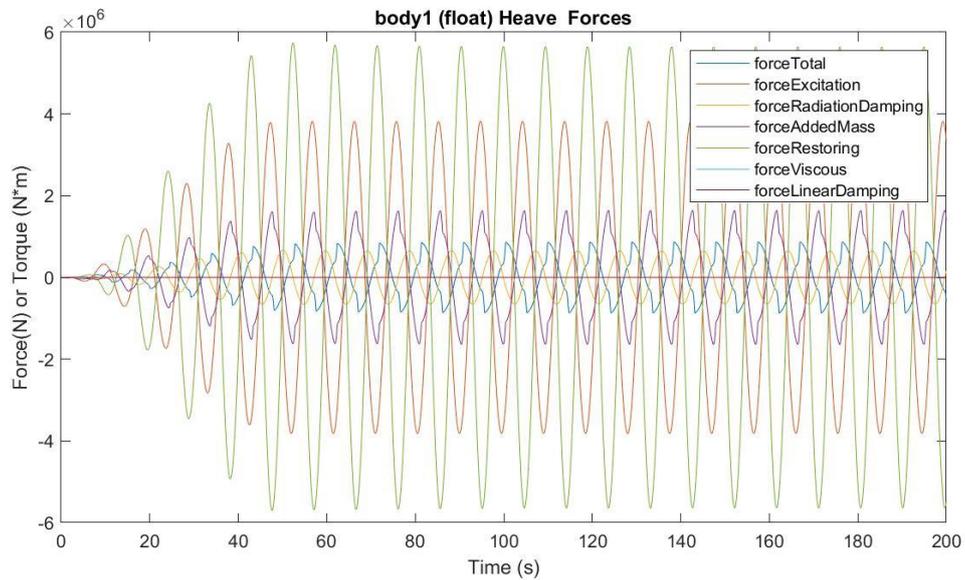
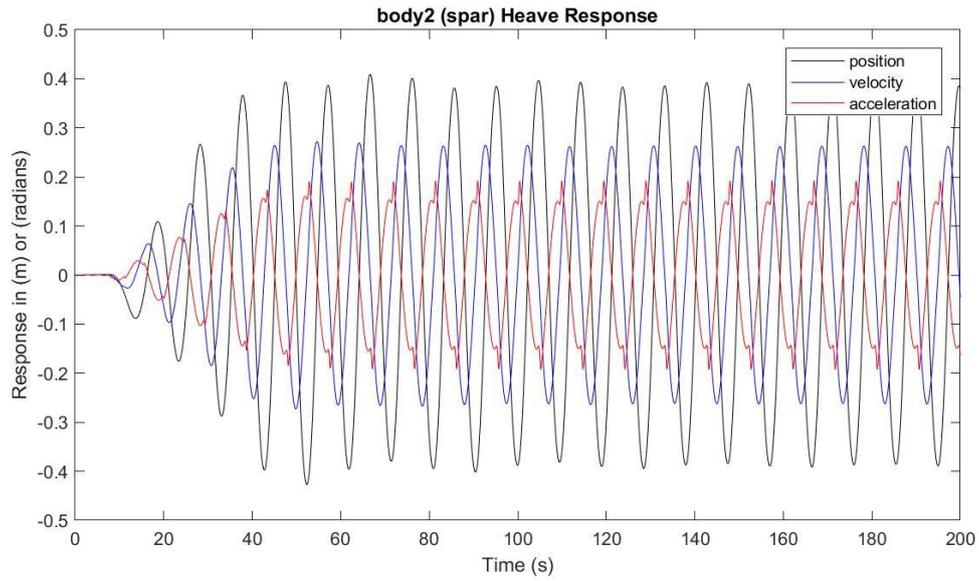
Presión media del acumulador de alta presión: 24.9603 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.5367 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.0368 m, 1.3309 m/s y 1.0010 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4093 m, 0.2721 m/s y 0.1927 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

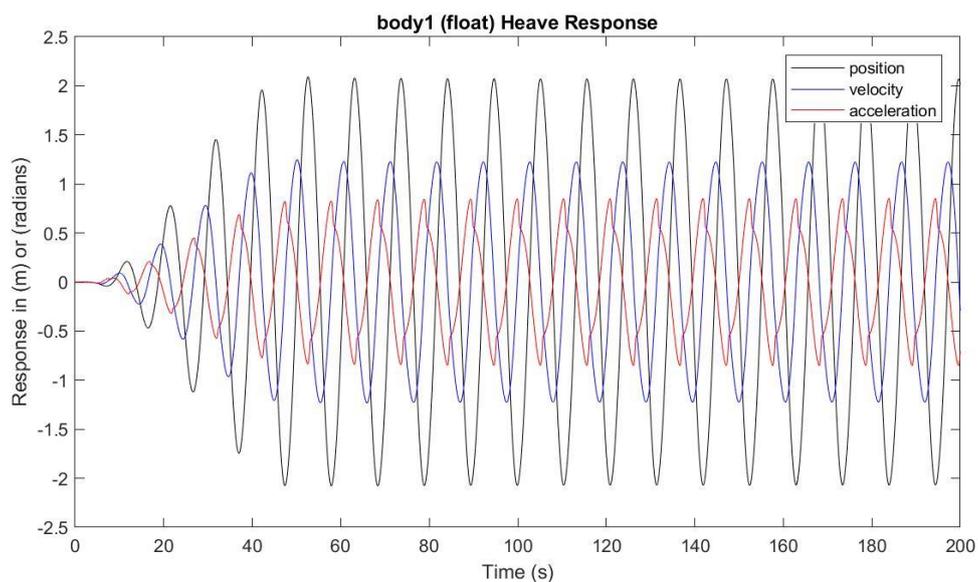
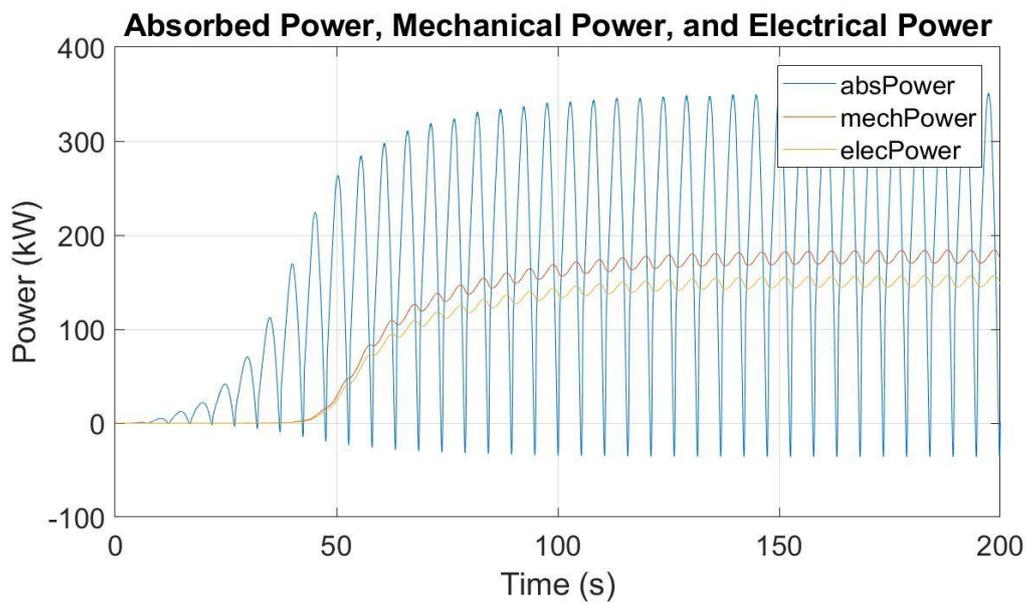
Potencia eléctrica media: 150.6742 kW

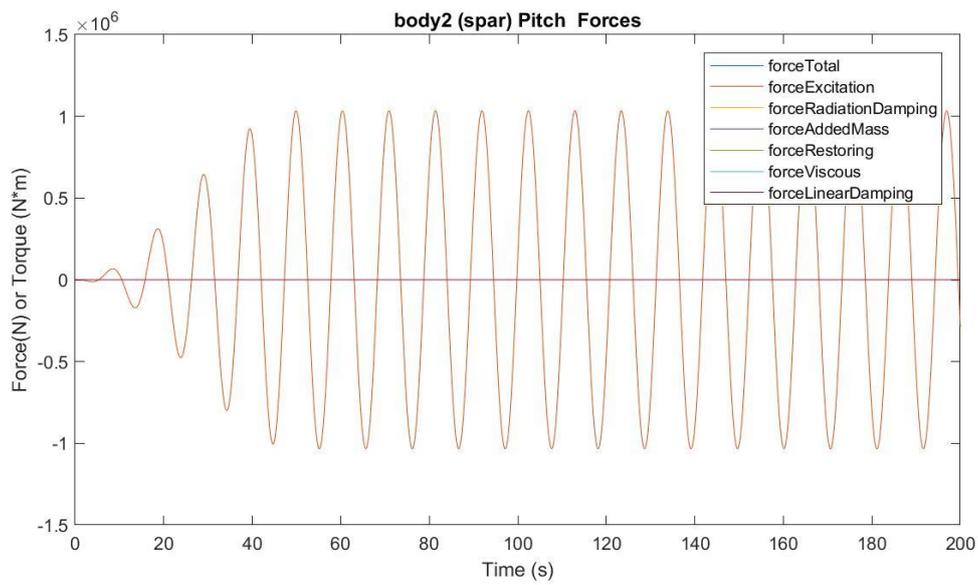
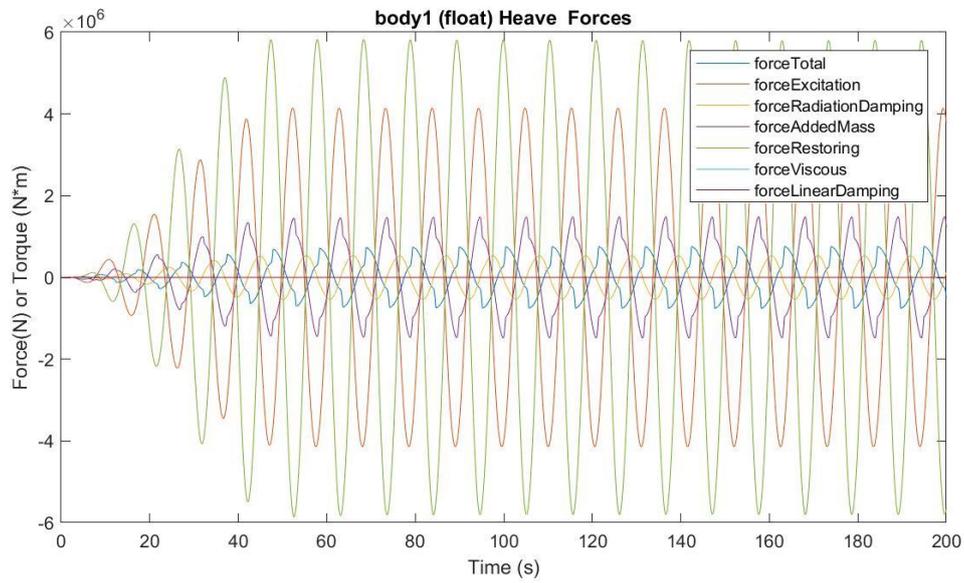
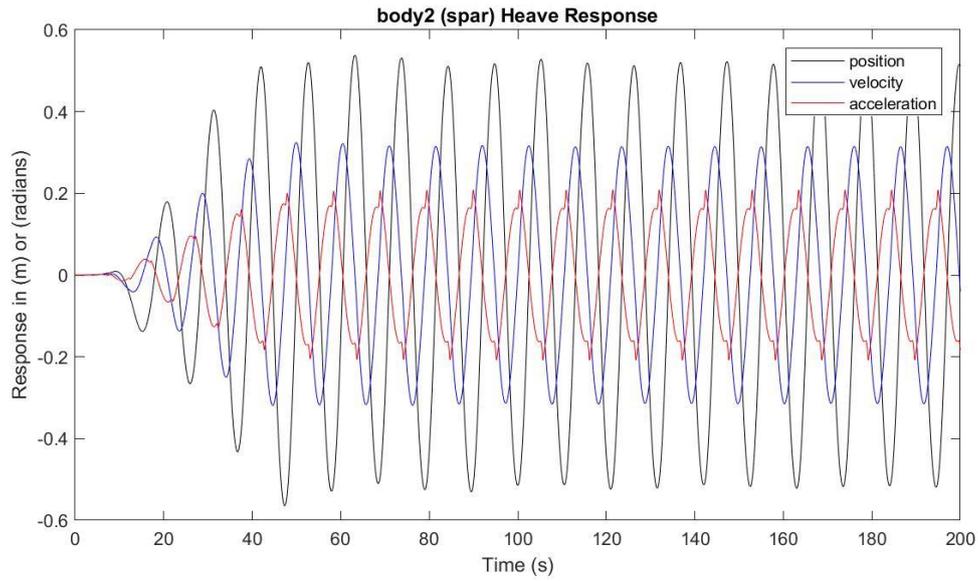
Presión media del acumulador de alta presión: 24.5710 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.9821 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.0920 m, 1.2470 m/s y 0.8414 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5383 m, 0.3245 m/s y 0.2086 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

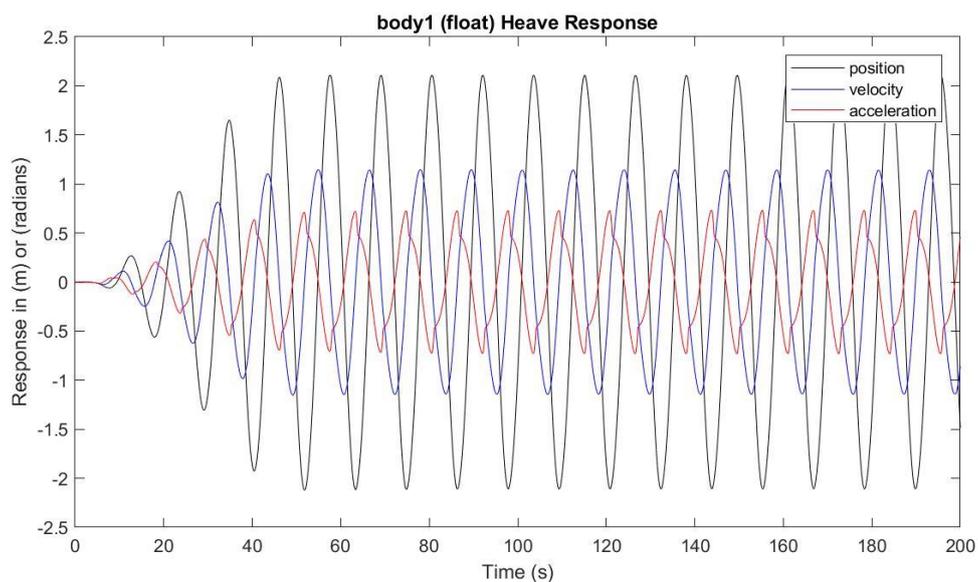
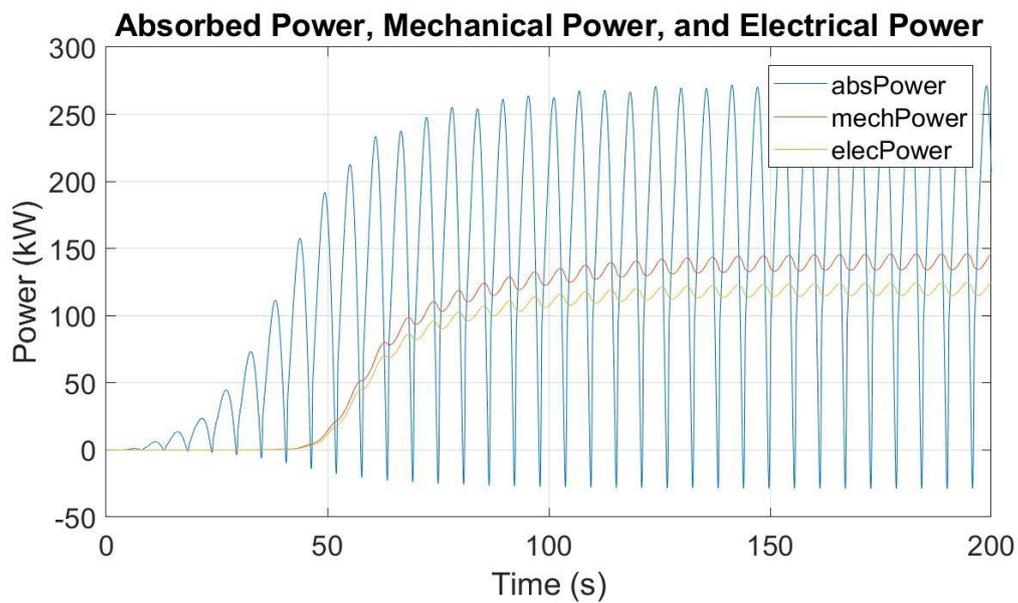
Potencia eléctrica media: 119.3515 kW

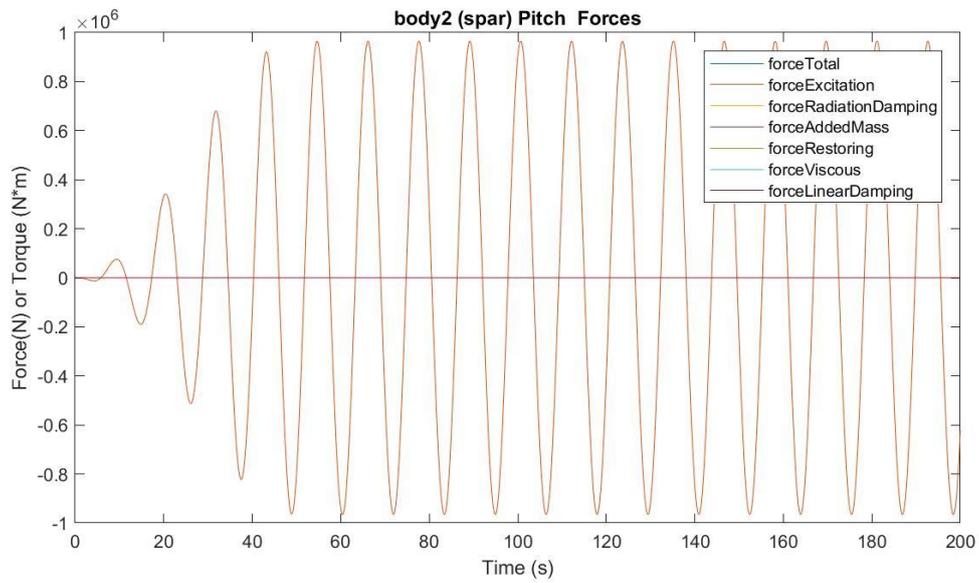
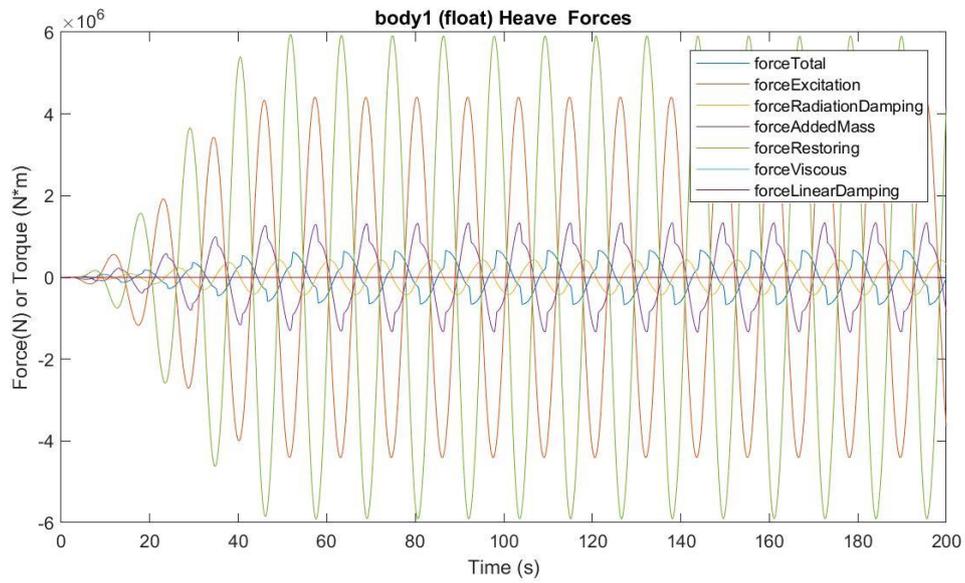
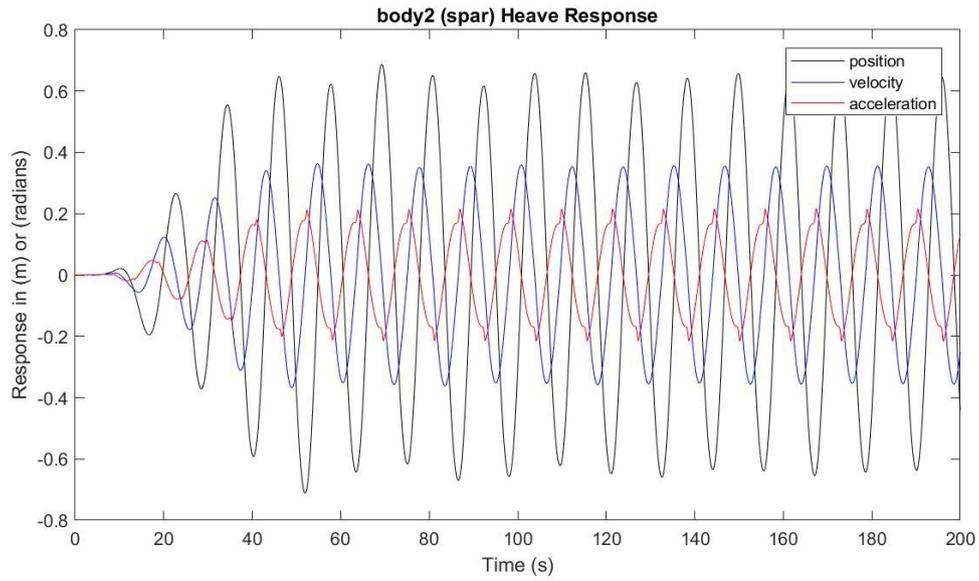
Presión media del acumulador de alta presión: 24.2395 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.7377 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.1435 m, 1.1460 m/s y 0.7322 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.6866 m, 0.3634 m/s y 0.2166 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

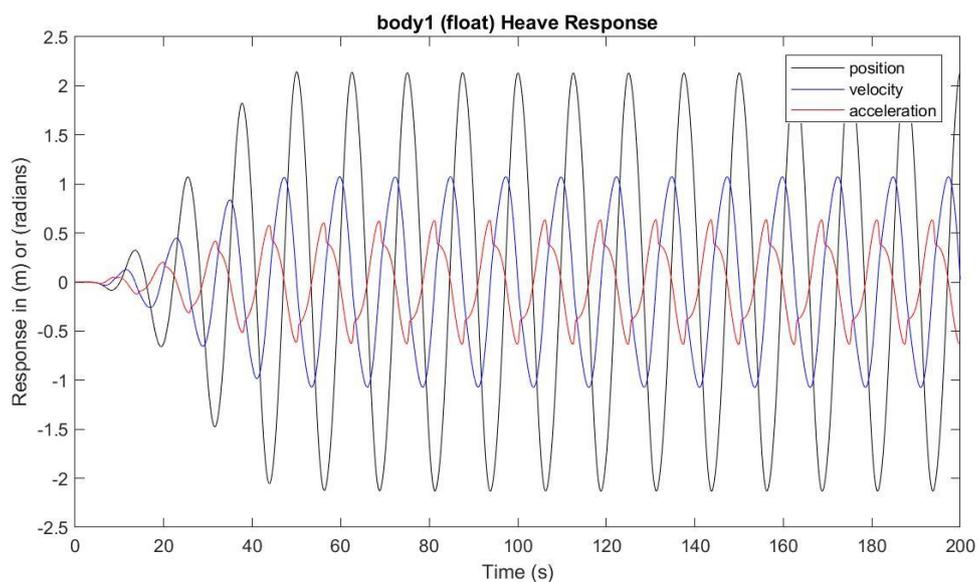
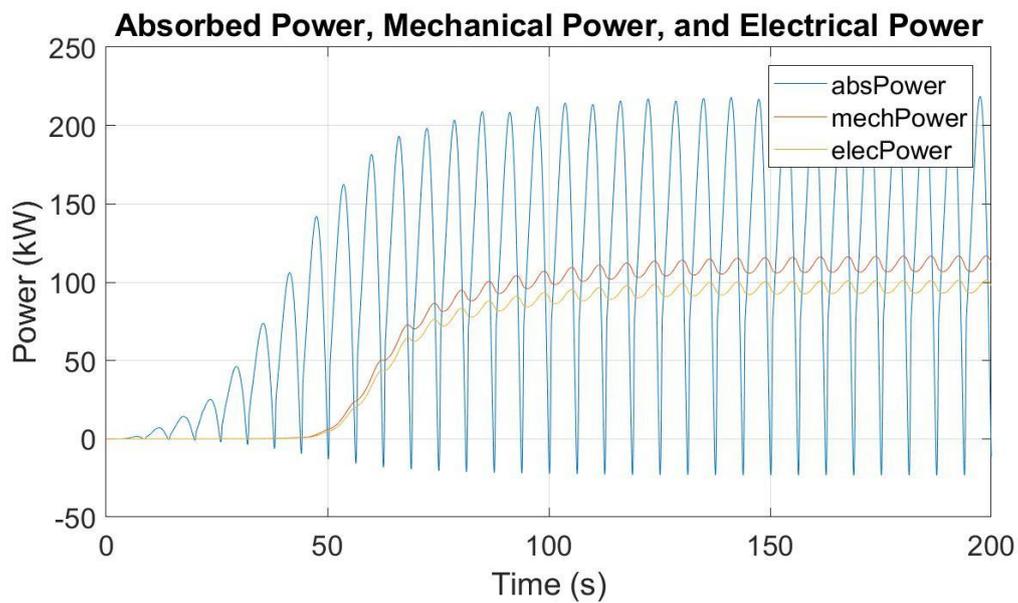
Potencia eléctrica media: 96.8645 kW

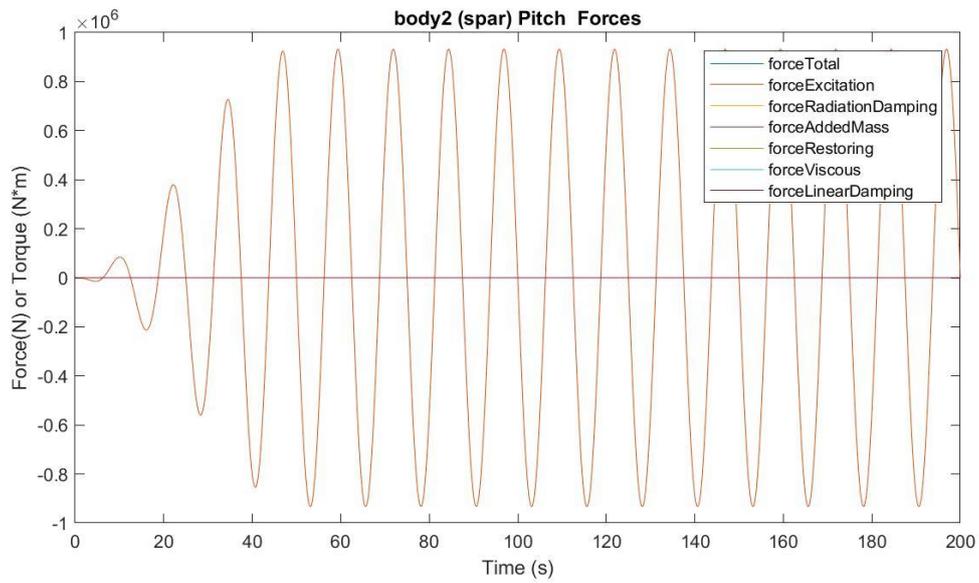
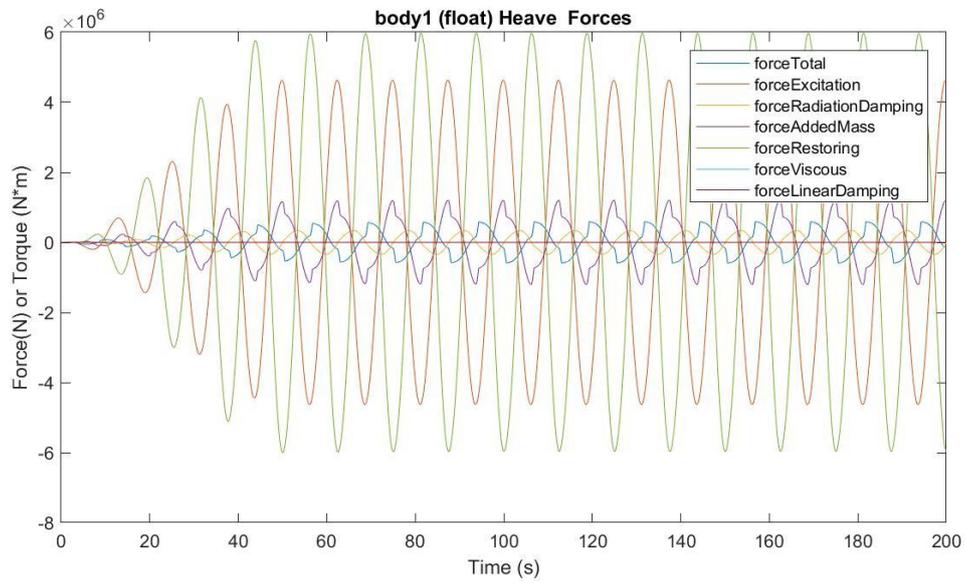
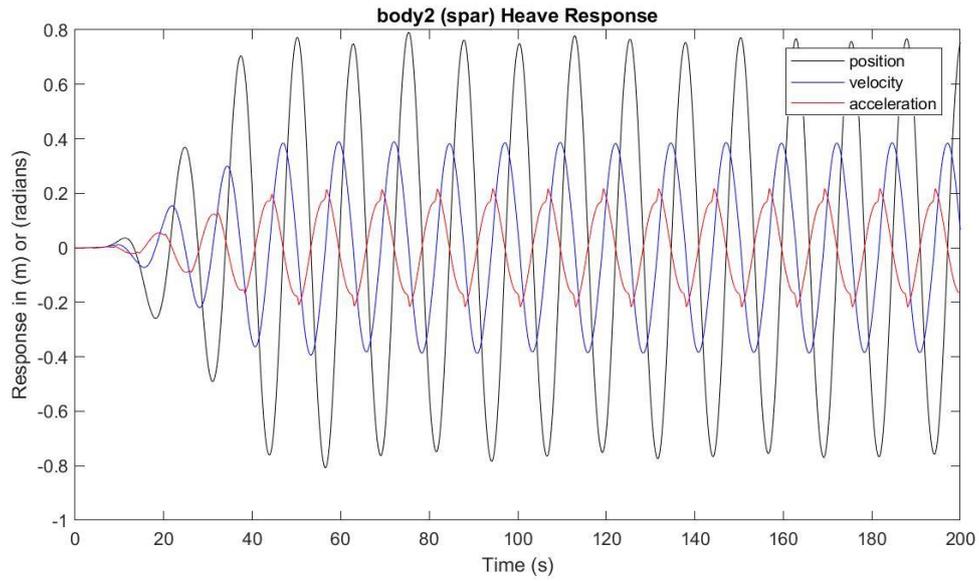
Presión media del acumulador de alta presión: 23.9681 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.7377 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.1435 m, 1.0744 m/s y 0.6360 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7906 m, 0.3893 m/s y 0.2177 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

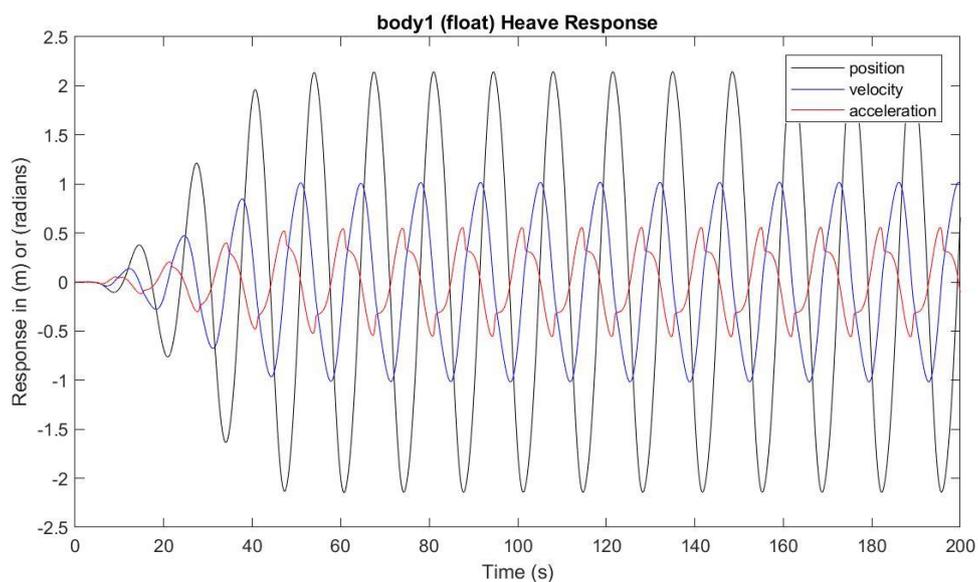
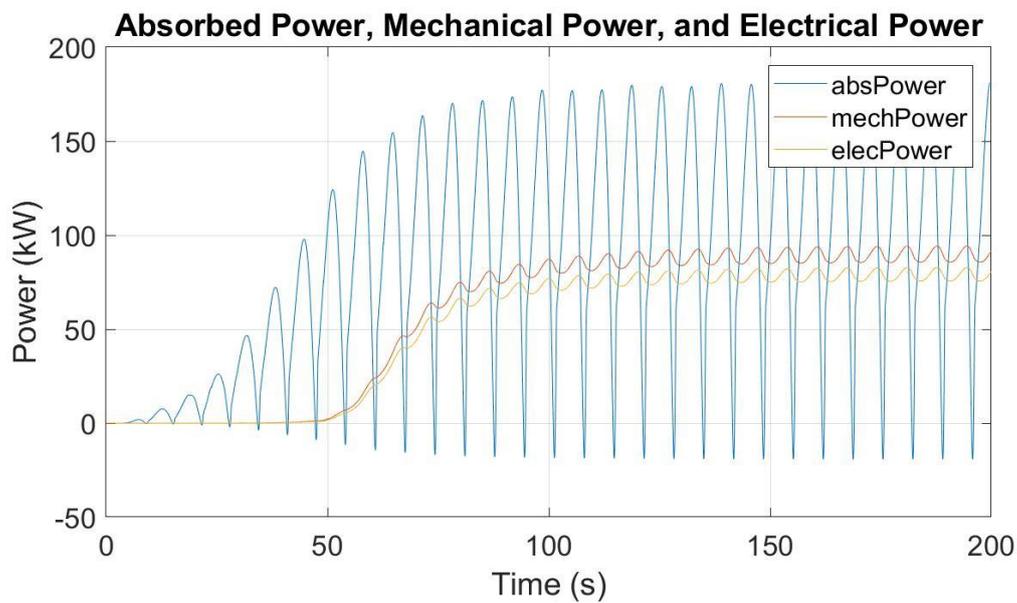
Potencia eléctrica media: 78.6864 kW

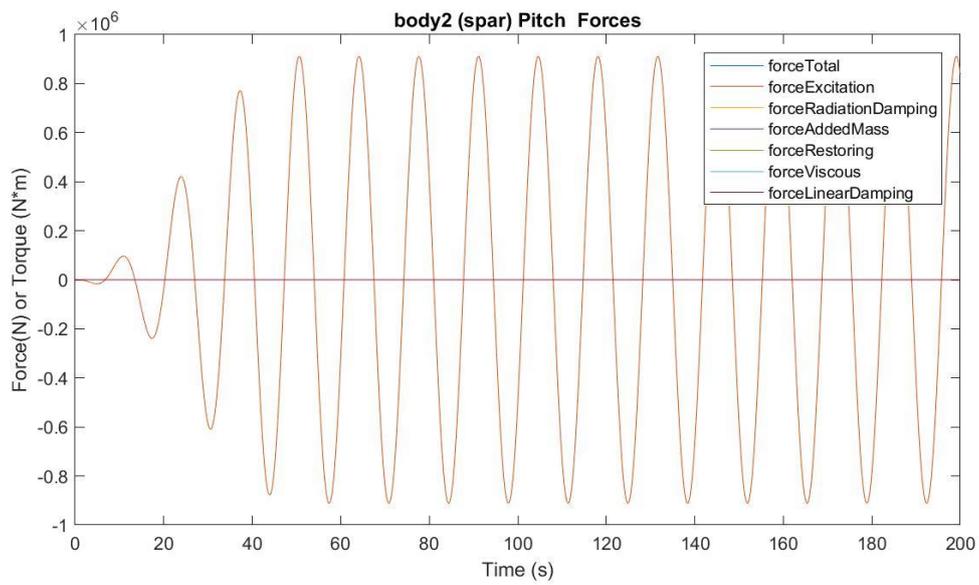
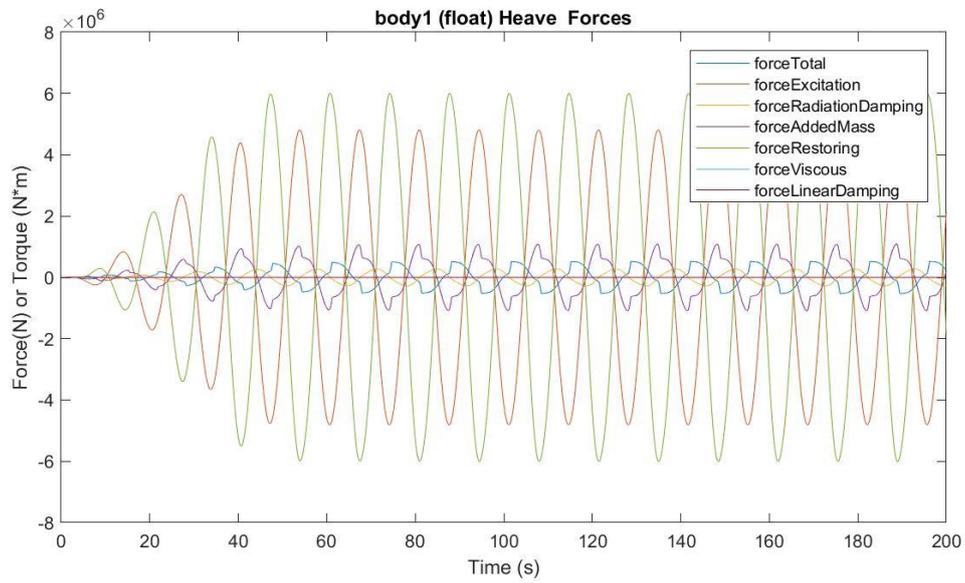
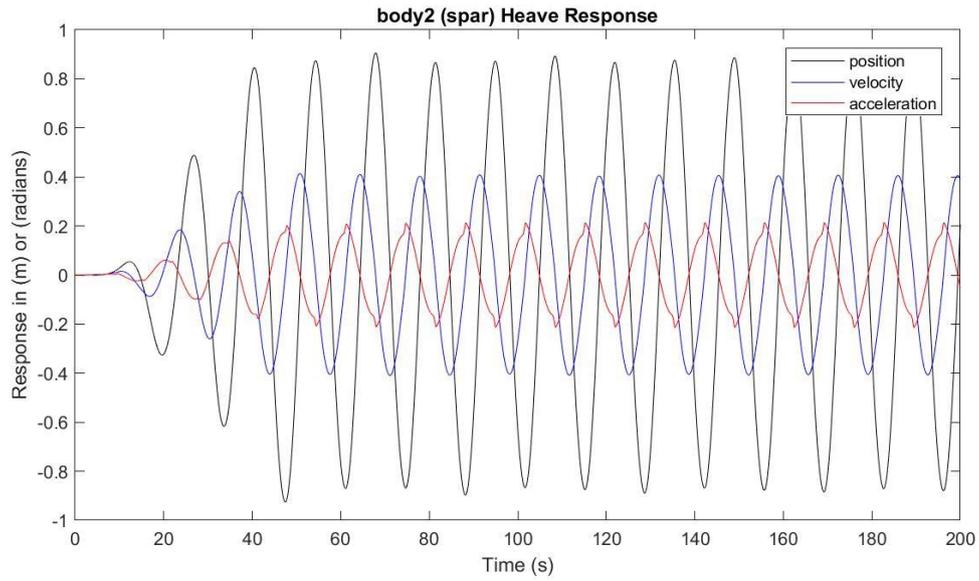
Presión media del acumulador de alta presión: 23.7380 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.0484 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.1442 m, 1.0179 m/s y 0.5582 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9057 m, 0.4133 m/s y 0.2146 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

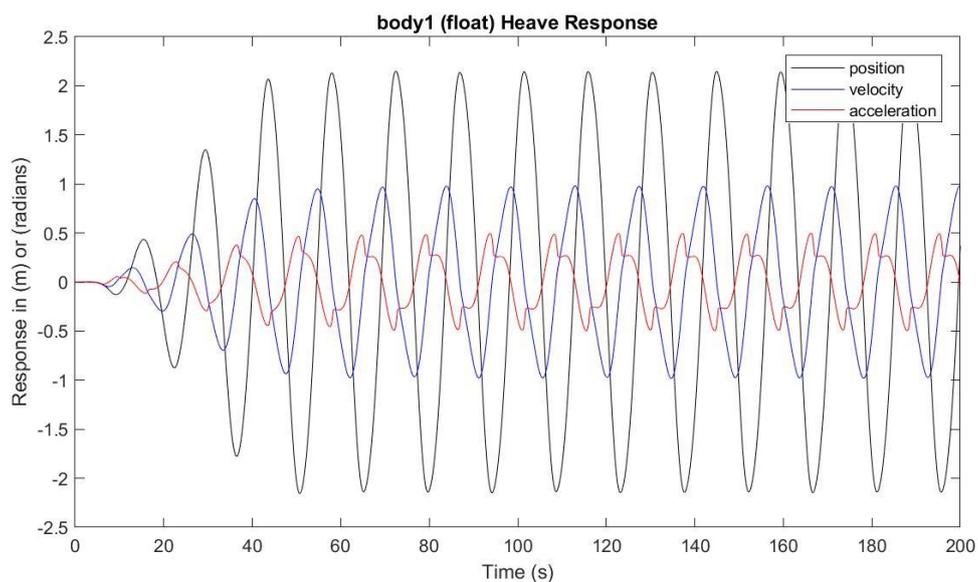
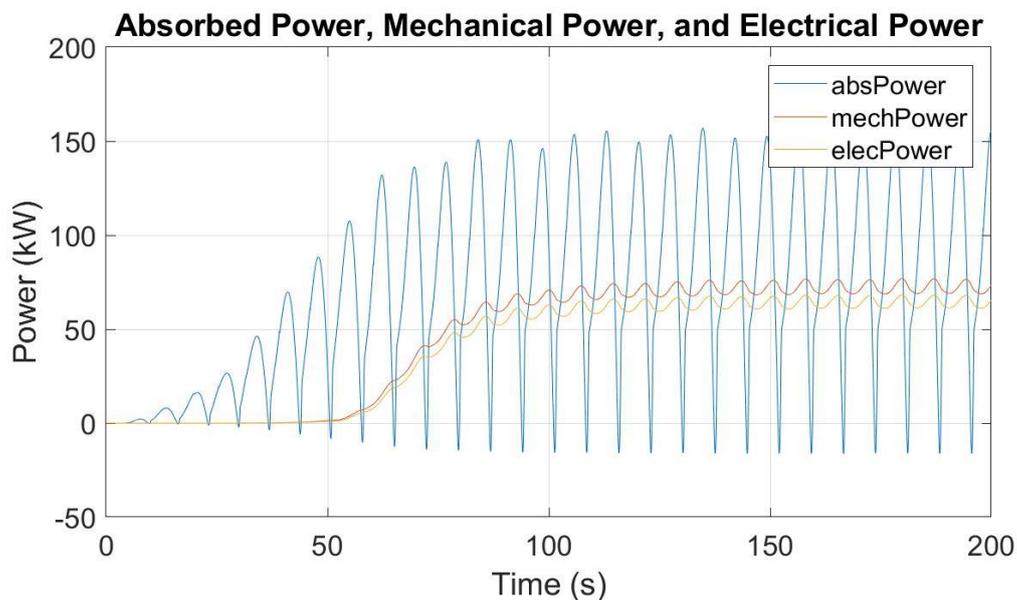
Potencia eléctrica media: 64.0275 kW

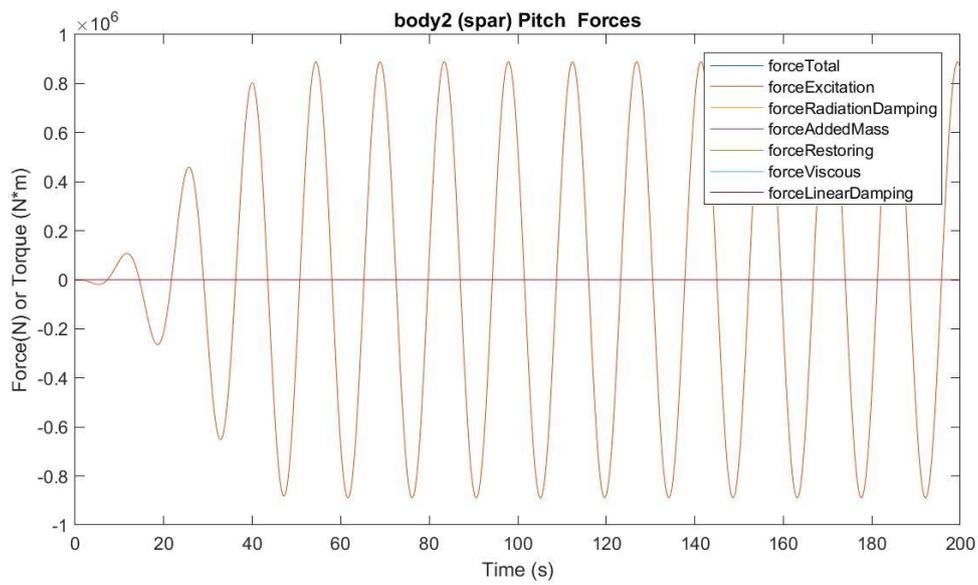
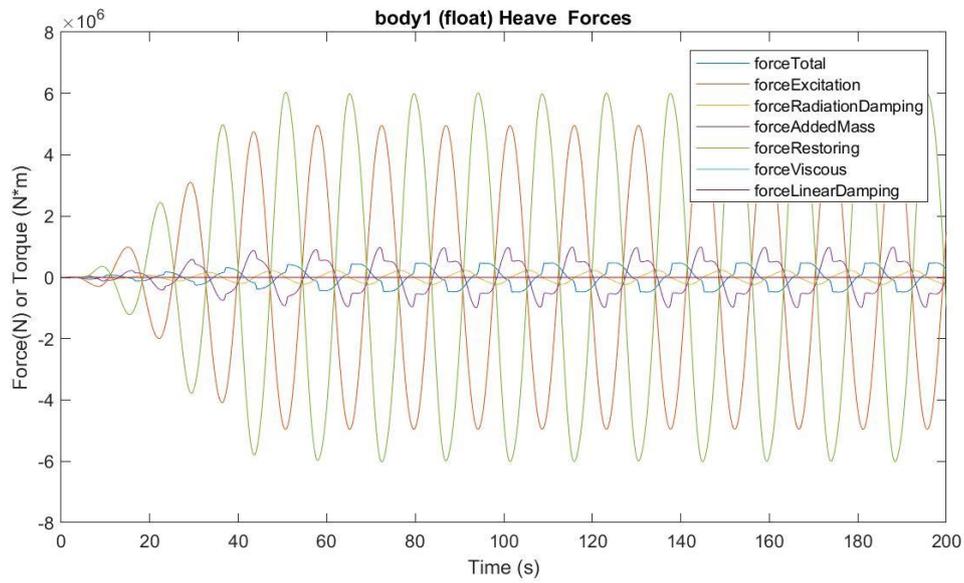
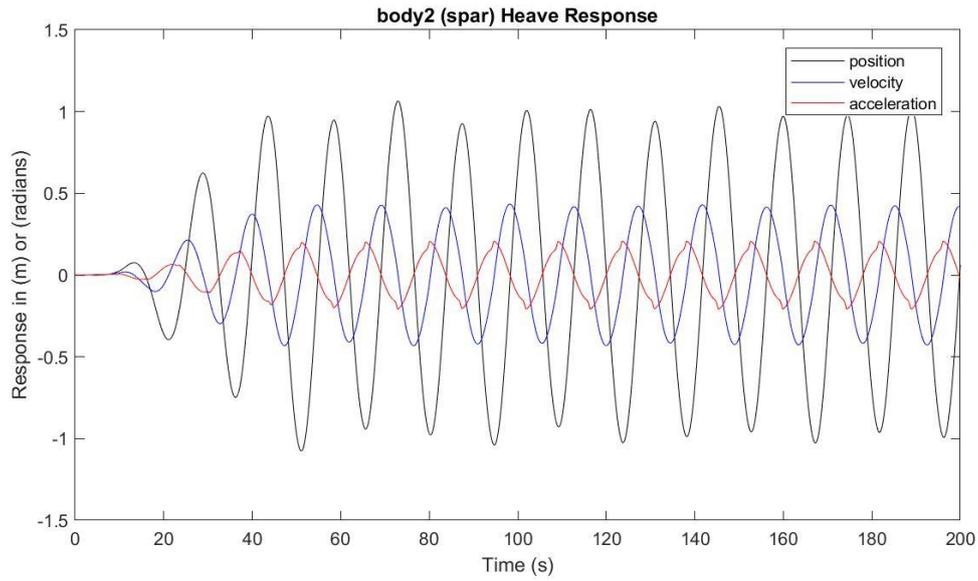
Presión media del acumulador de alta presión: 23.5442 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.3208 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.1508 m, 0.9815 m/s y 0.4979 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.0647 m, 0.4333 m/s y 0.2094 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

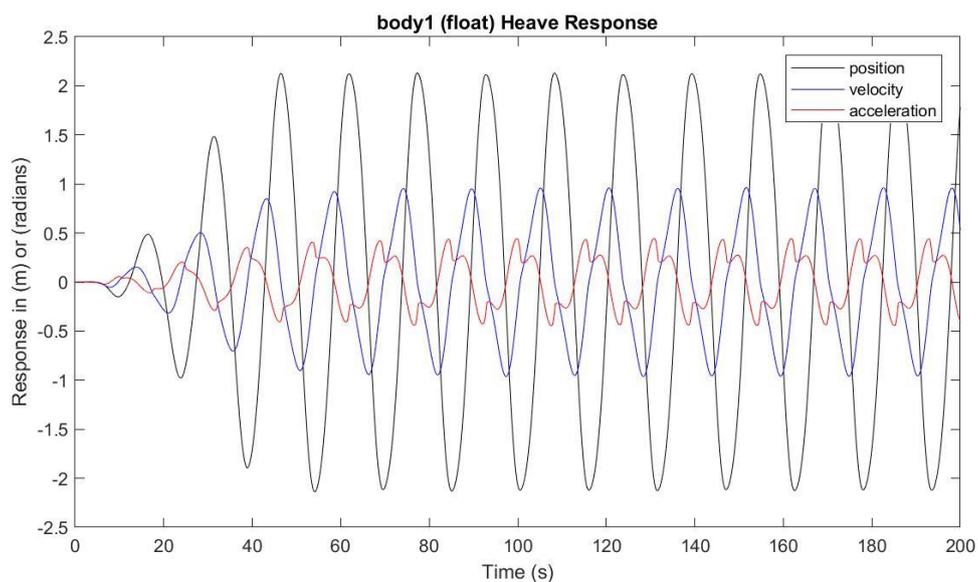
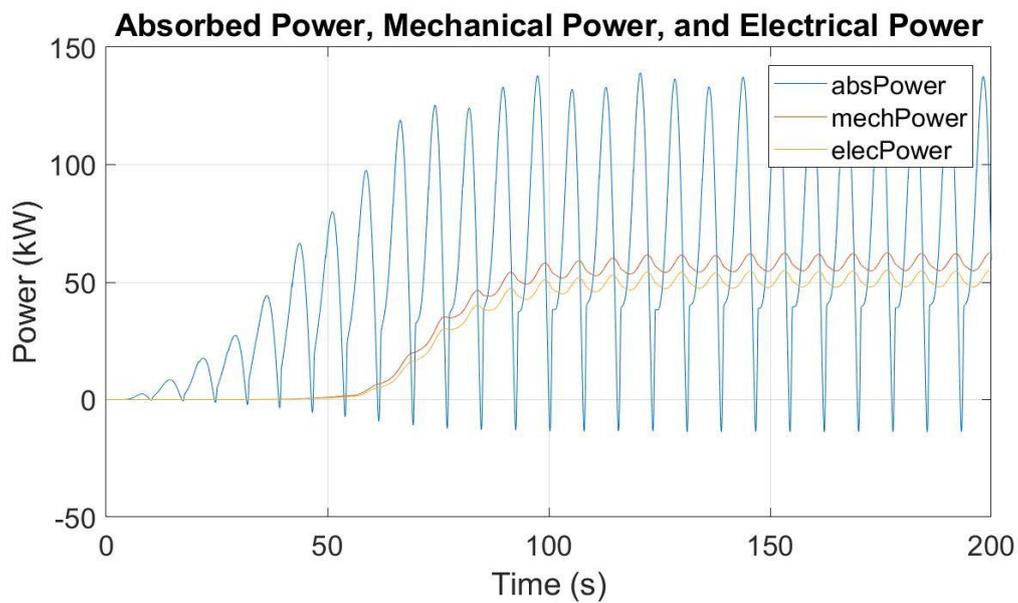
Potencia eléctrica media: 51.0644 kW

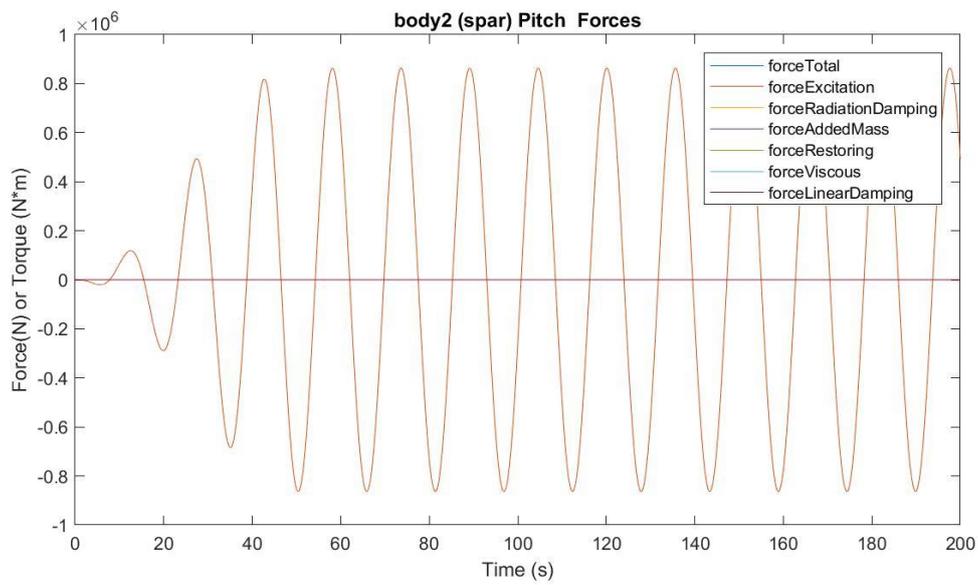
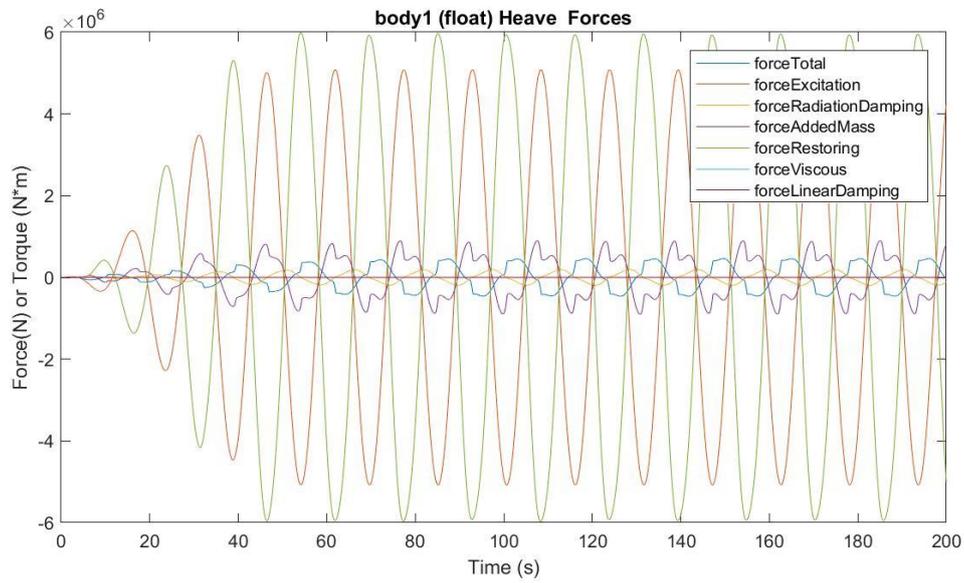
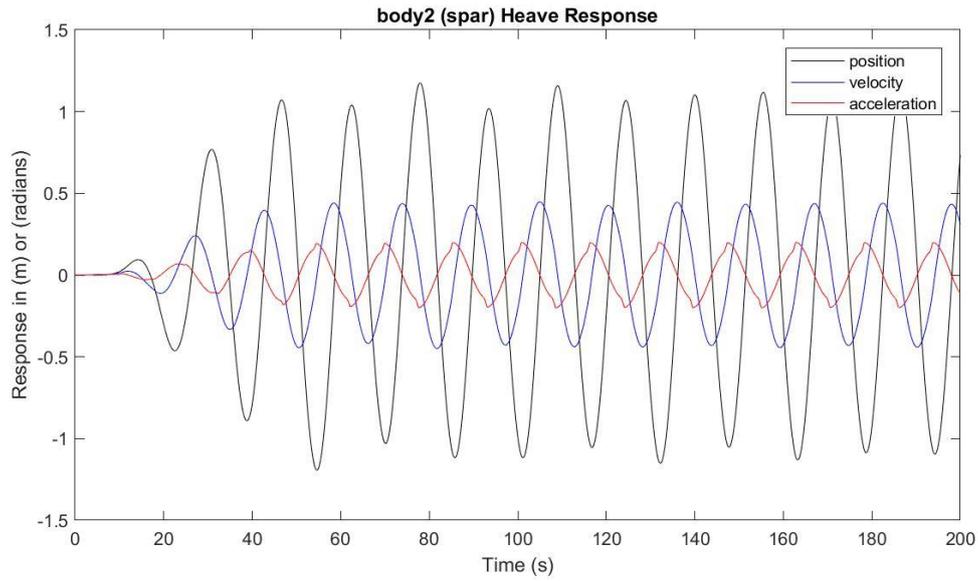
Presión media del acumulador de alta presión: 23.3780 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.5633 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.1313 m, 0.9635 m/s y 0.4456 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.1754 m, 0.4480 m/s y 0.2009 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

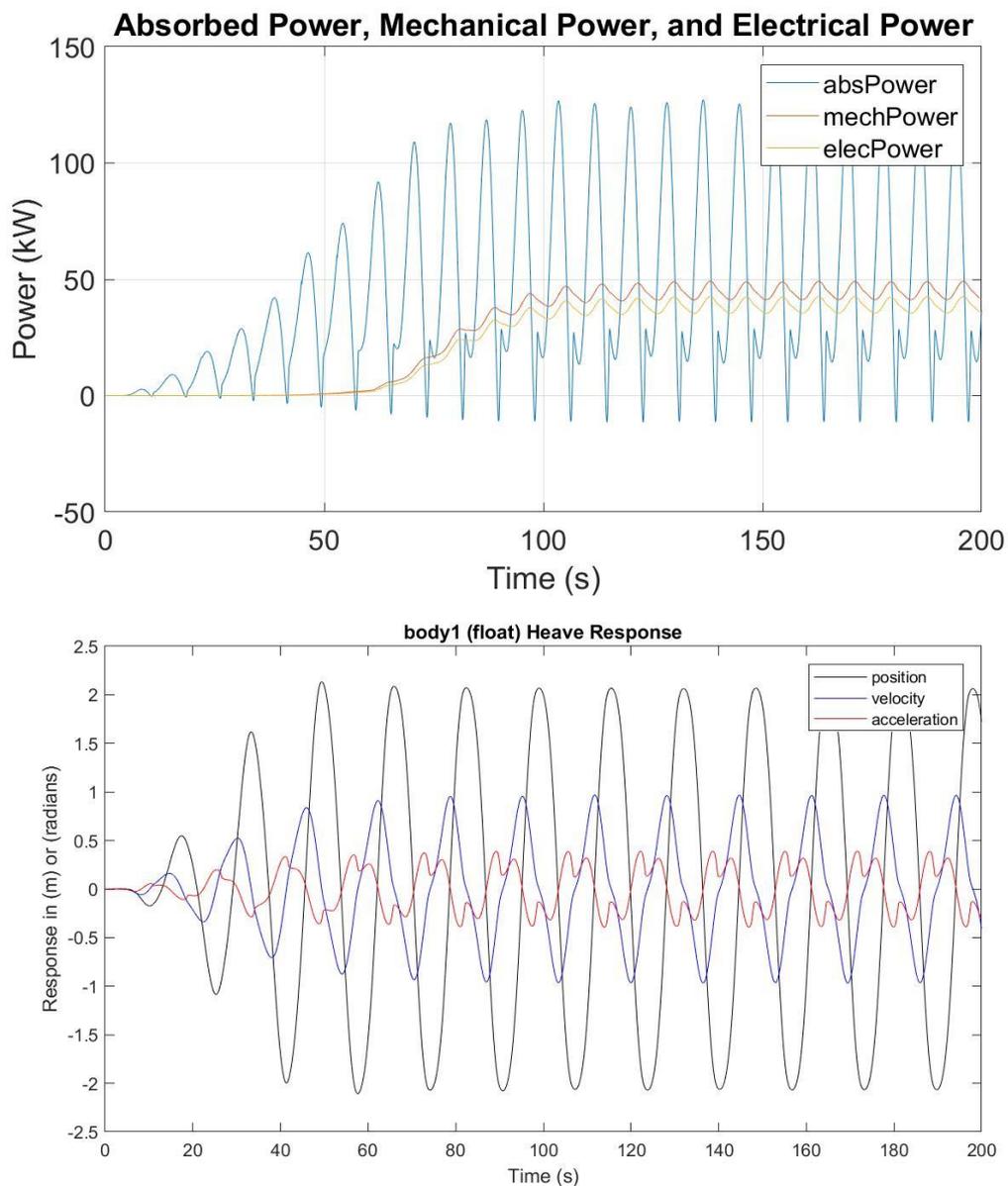
Potencia eléctrica media: 38.8138 kW

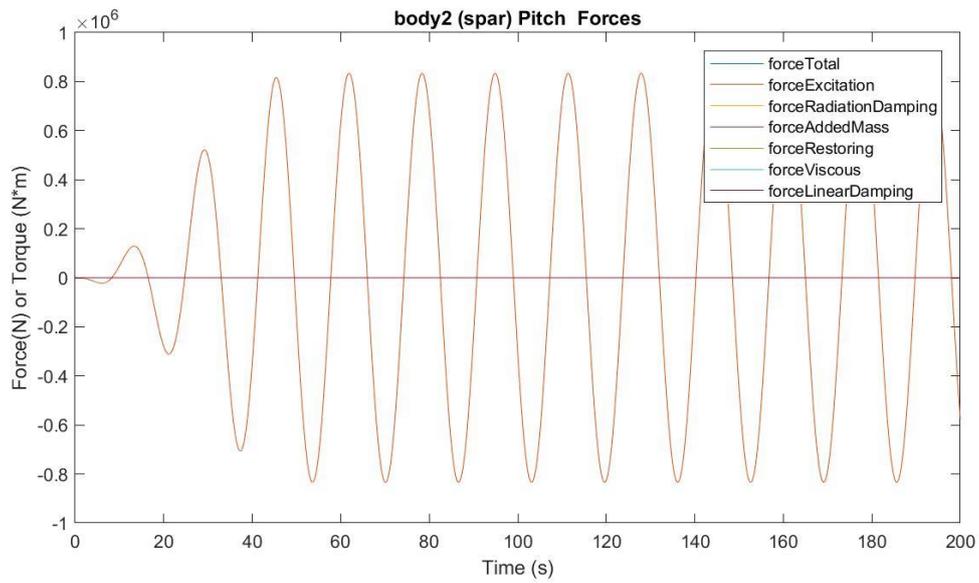
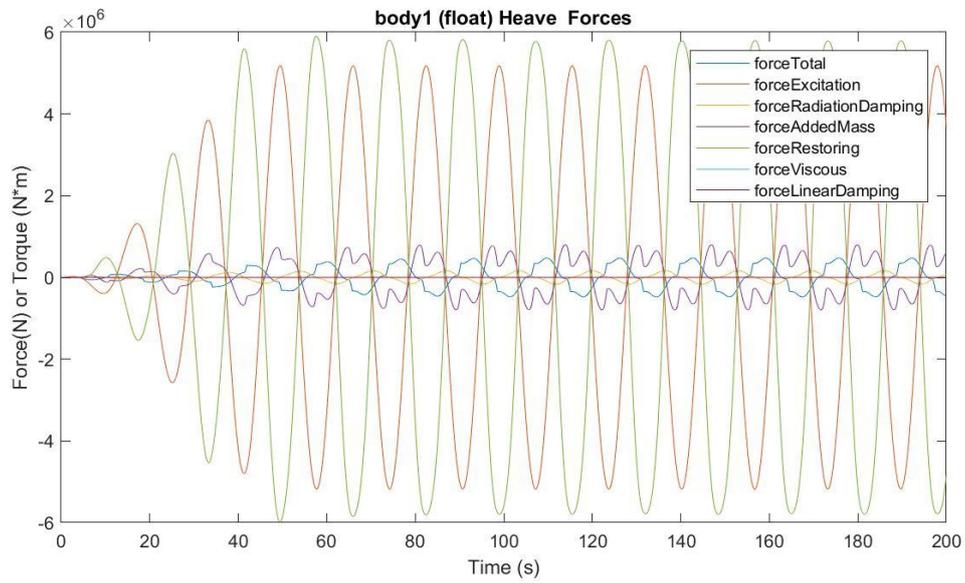
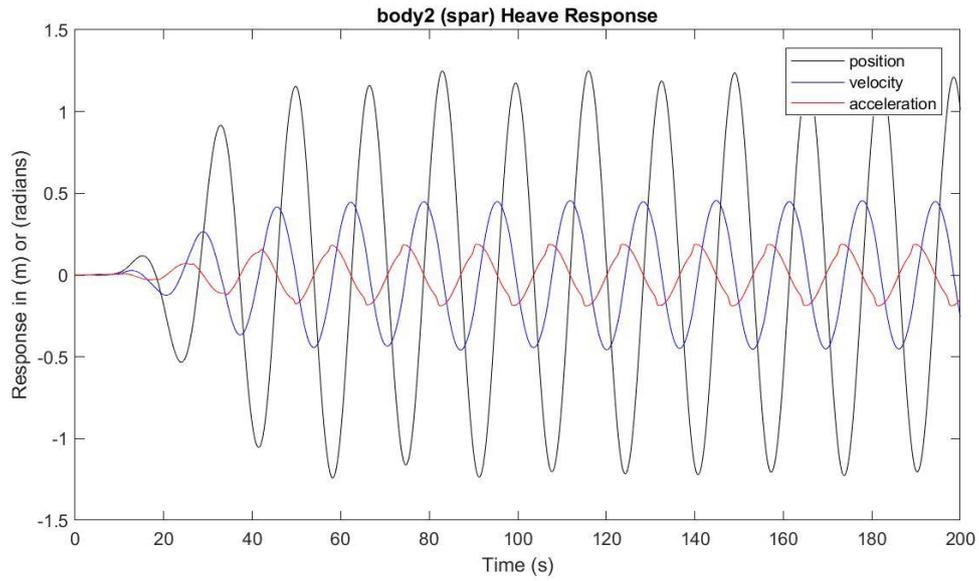
Presión media del acumulador de alta presión: 23.2048 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.8239 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.1358 m, 0.9690 m/s y 0.3898 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.2488 m, 0.4558 m/s y 0.1885 m/s²





$H_s = 4.25 \text{ m}$

$T_e = 17.5 \text{ s}$

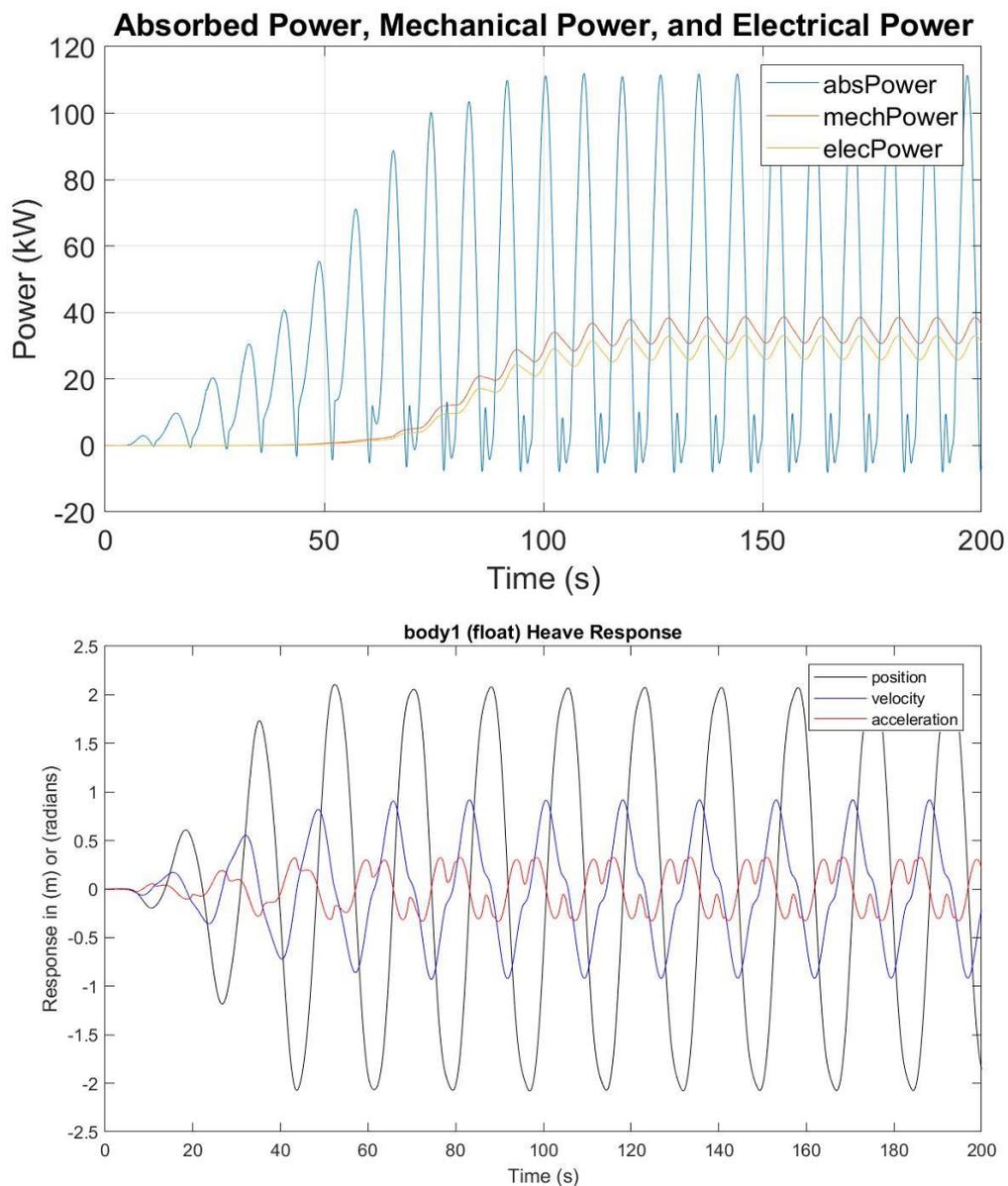
Potencia eléctrica media: 29.4720 kW

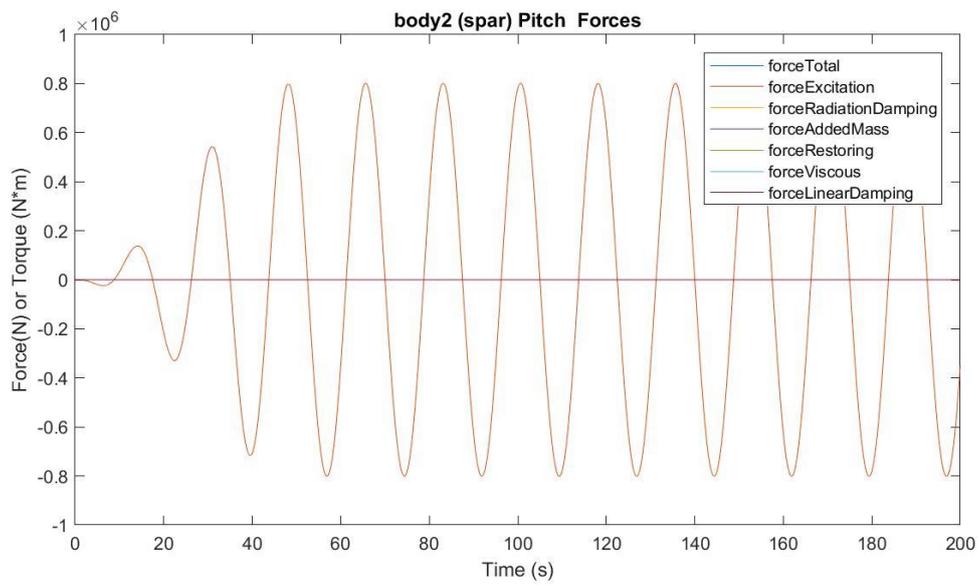
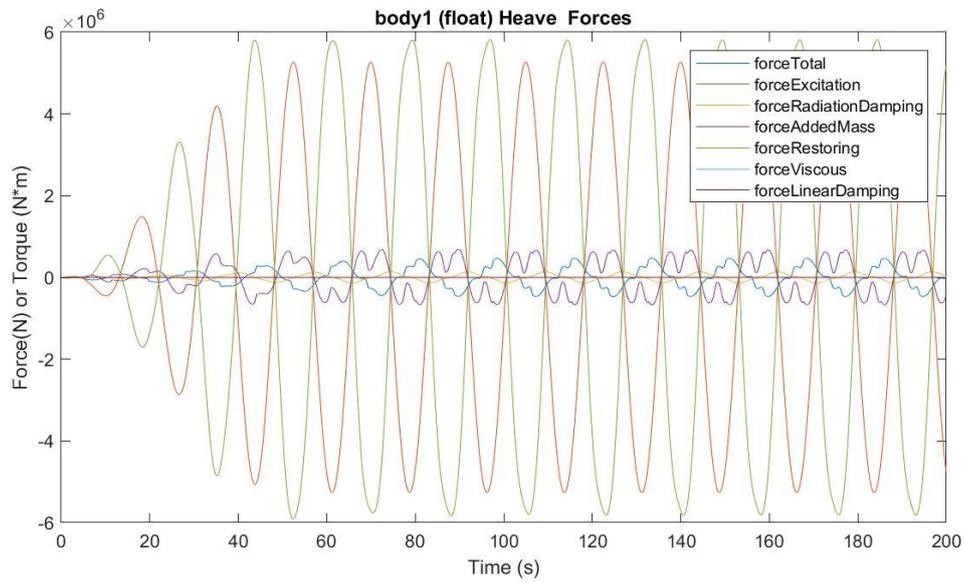
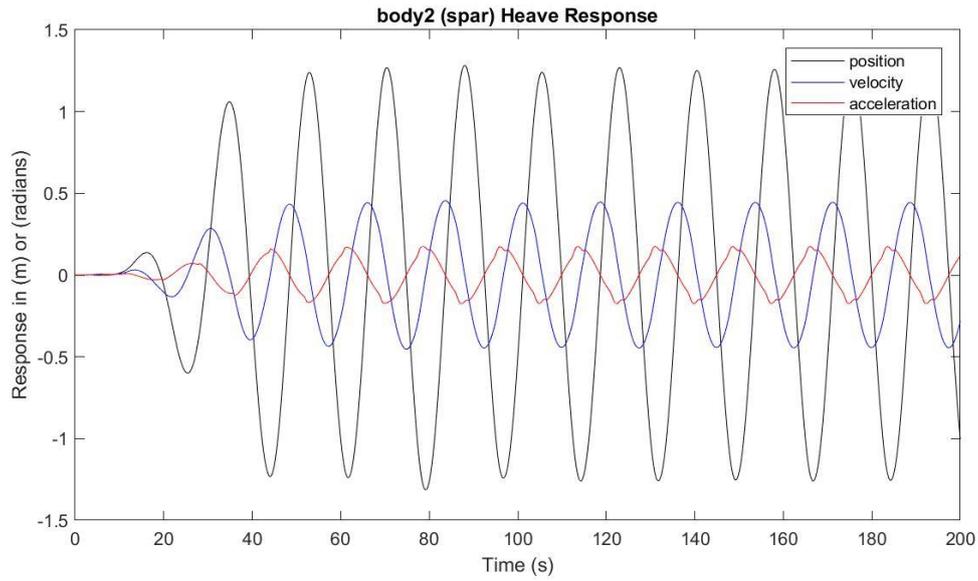
Presión media del acumulador de alta presión: 23.0584 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 18.0520 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.1068 m, 0.9183 m/s y 0.3262 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.2823 m, 0.4553 m/s y 0.1742 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

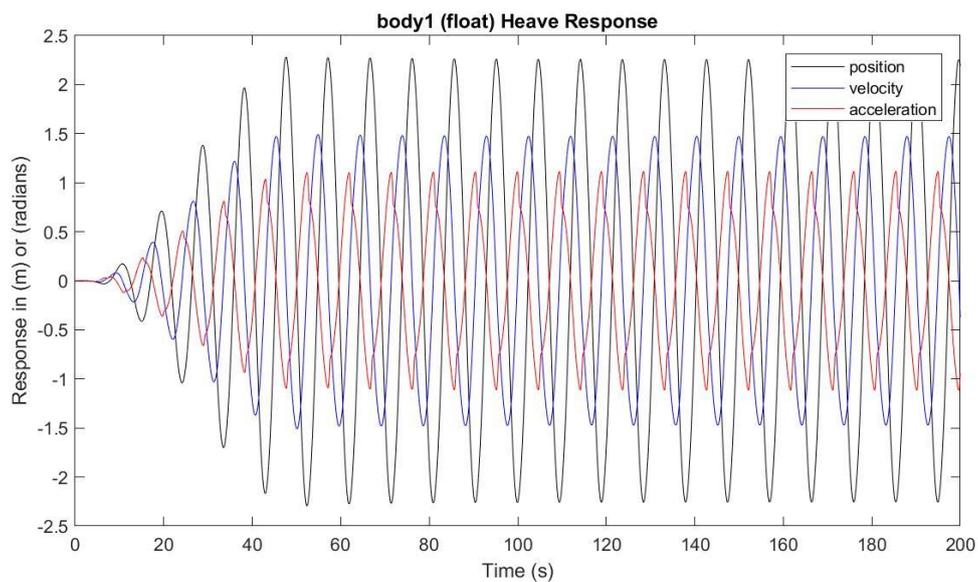
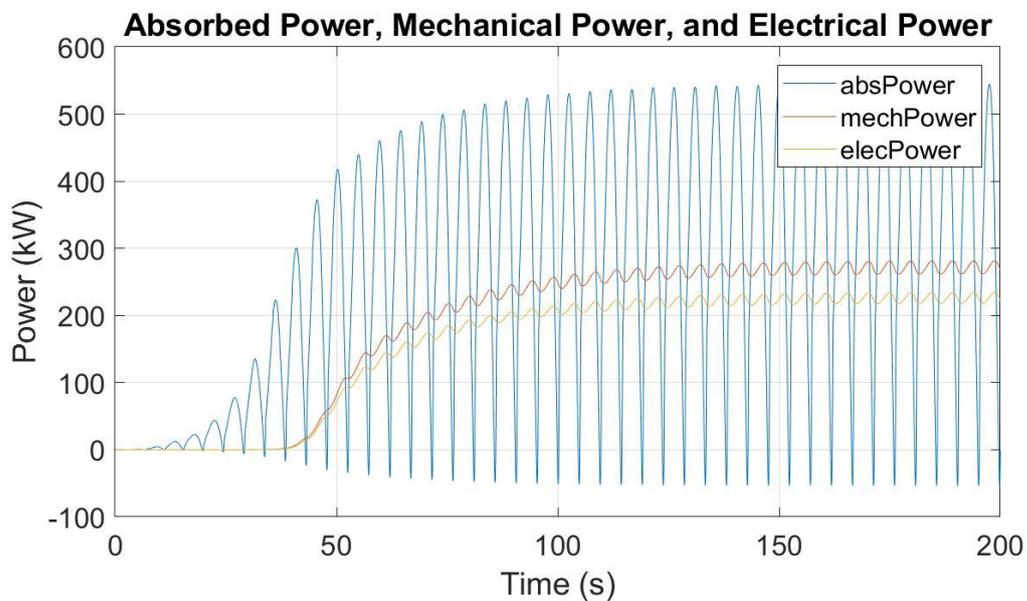
Potencia eléctrica media: 225.9043 kW

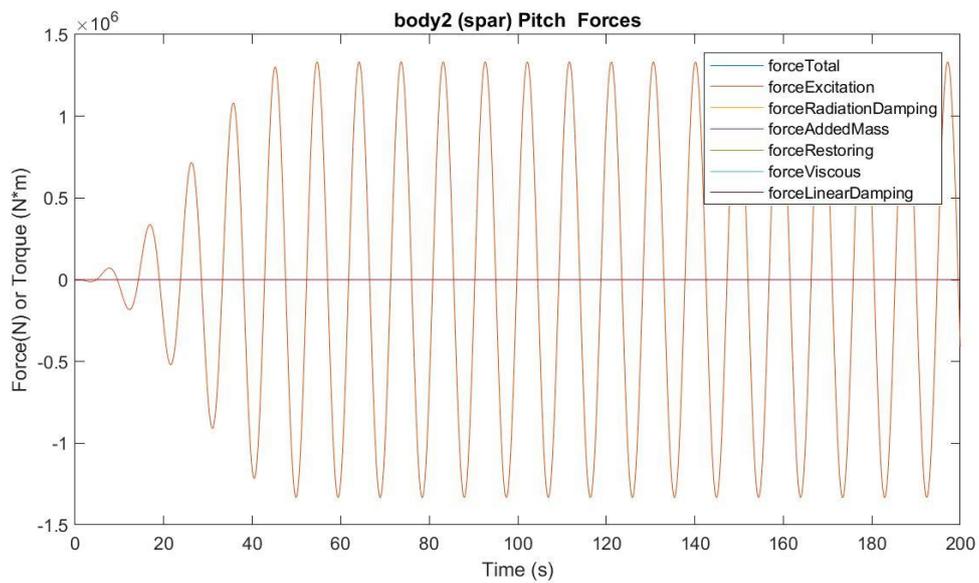
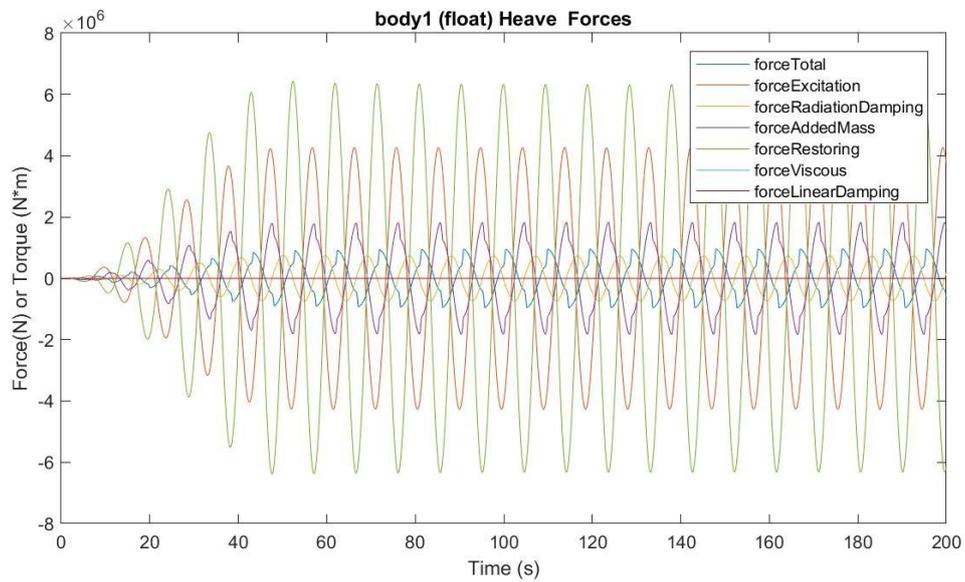
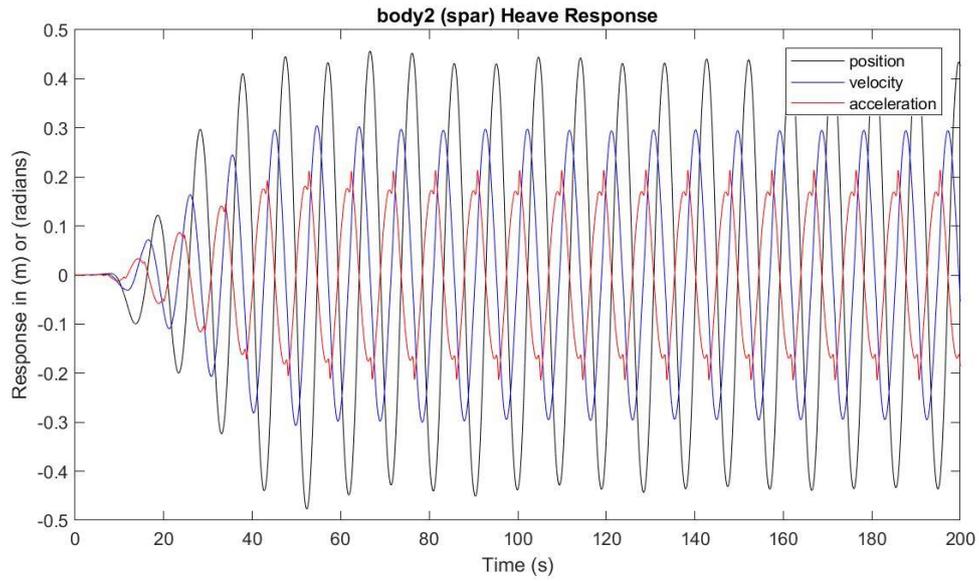
Presión media del acumulador de alta presión: 25.3548 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.1464 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.2809 m, 1.4917 m/s y 1.1164 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.4563 m, 0.3044 m/s y 0.2144 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

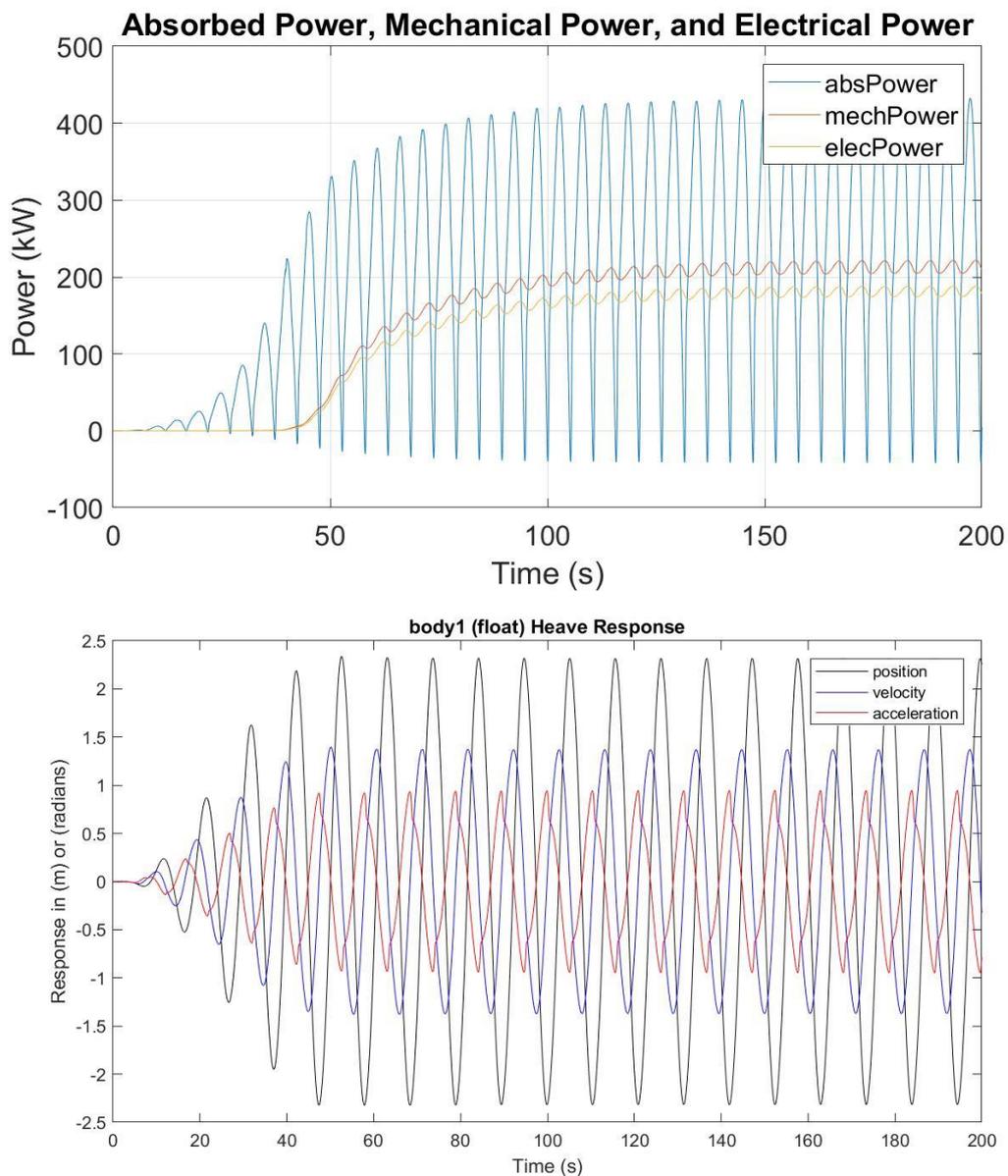
Potencia eléctrica media: 181.1635 kW

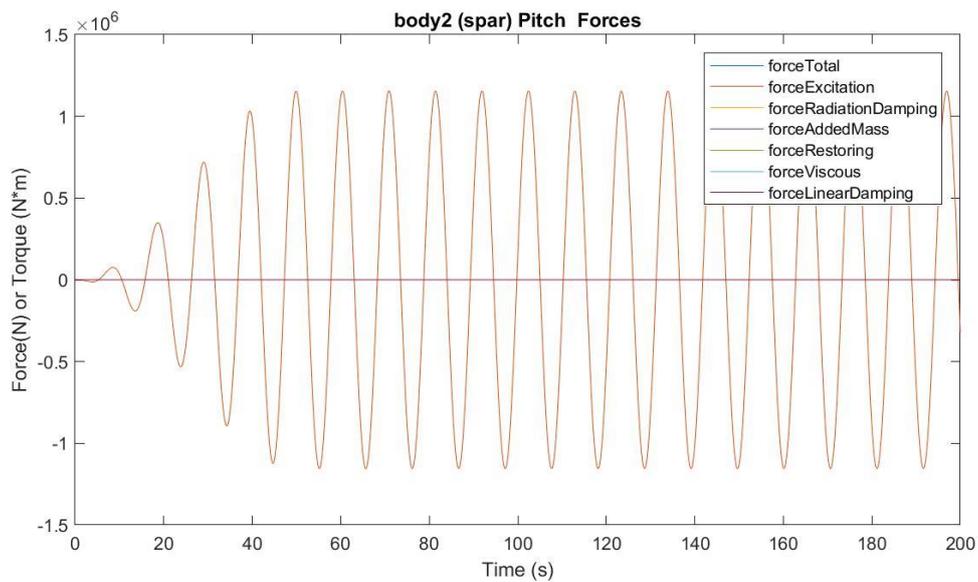
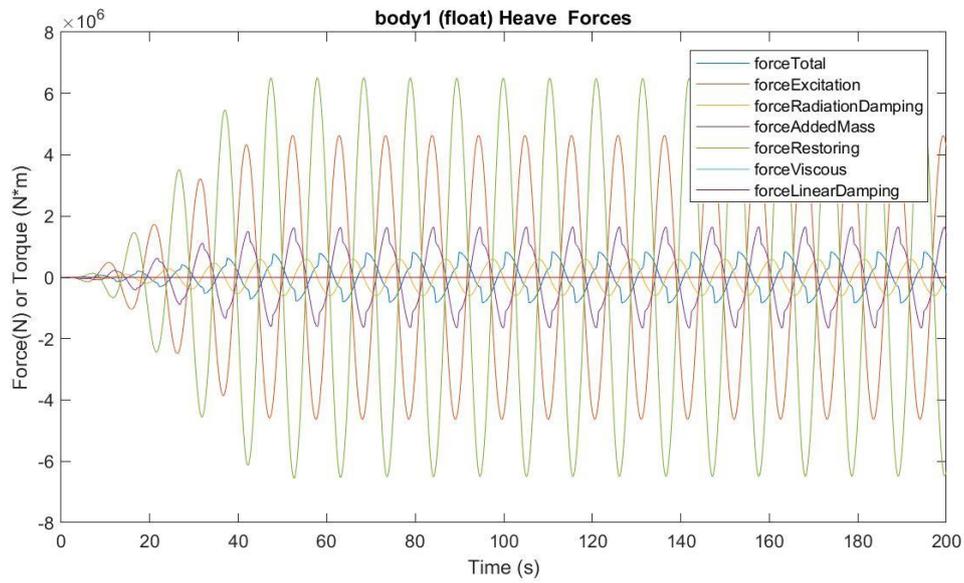
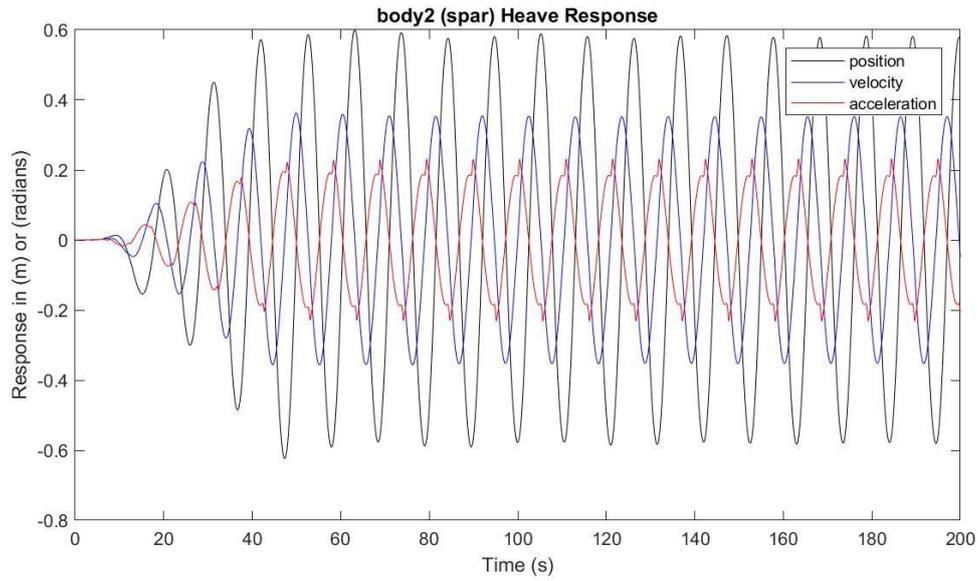
Presión media del acumulador de alta presión: 24.8707 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.6368 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.3399 m, 1.3959 m/s y 0.9468 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5995 m, 0.3625 m/s y 0.2318 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

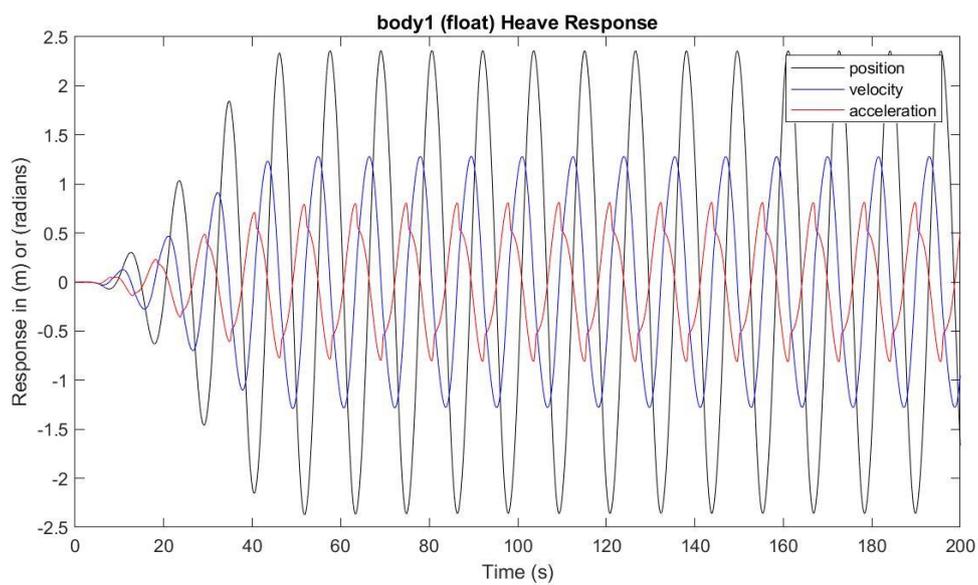
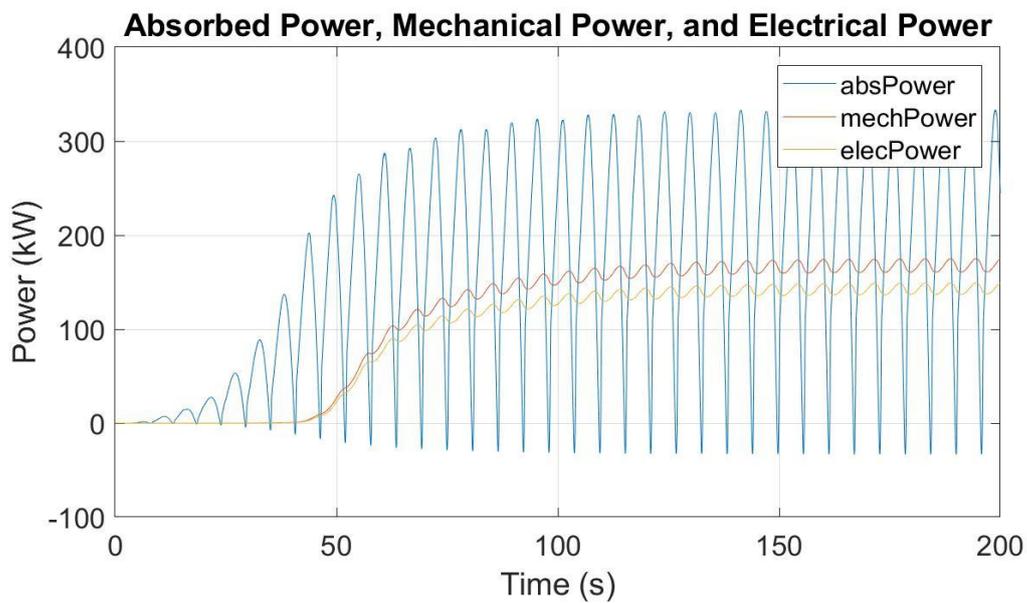
Potencia eléctrica media: 142.5013 kW

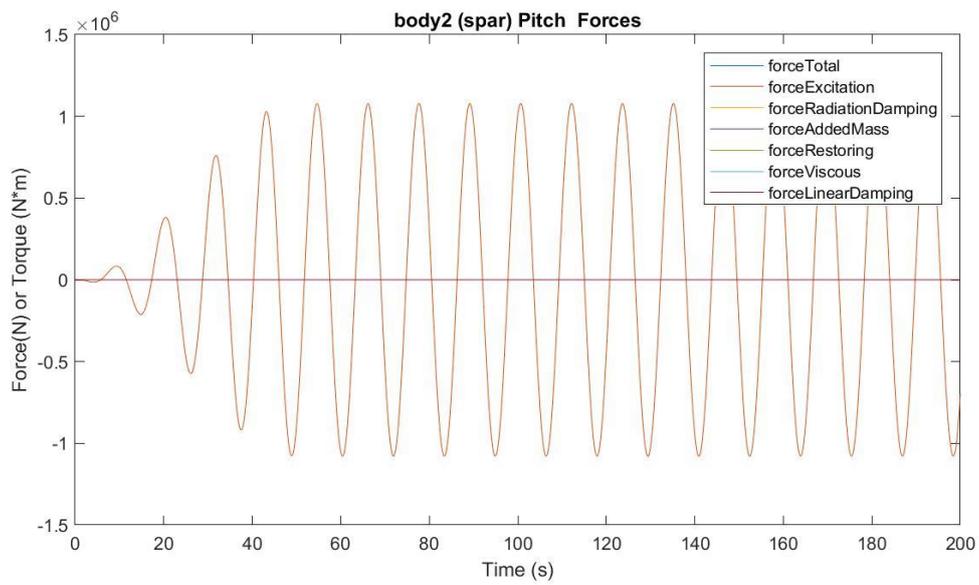
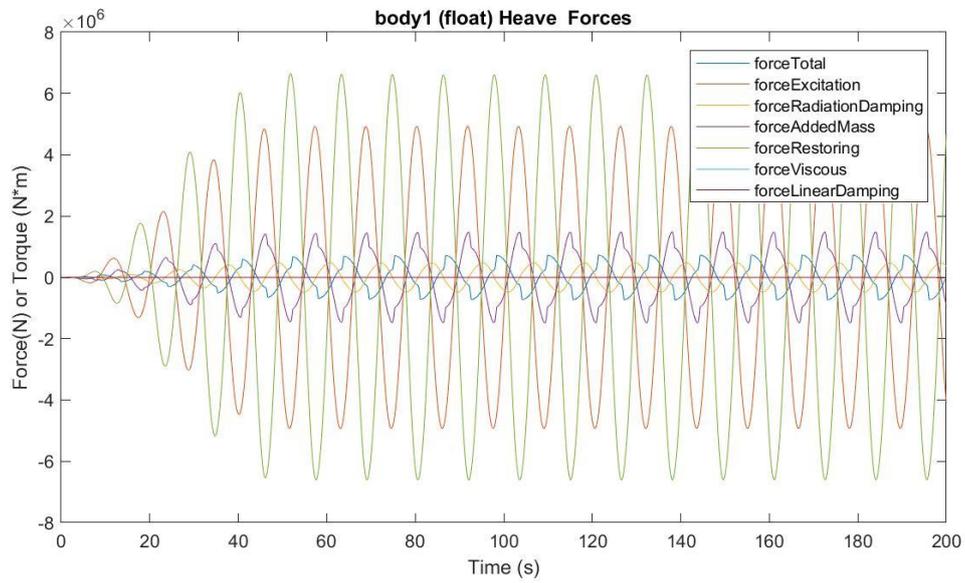
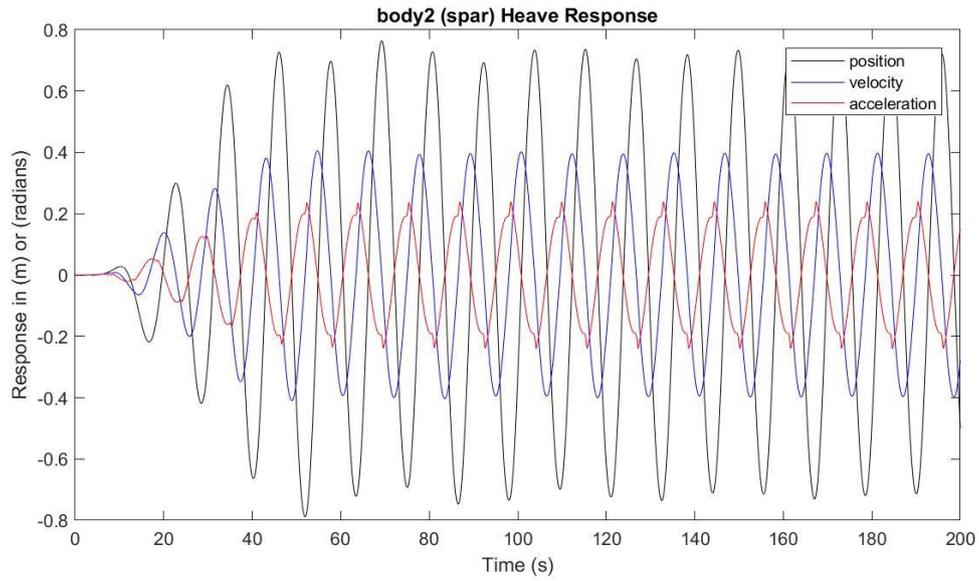
Presión media del acumulador de alta presión: 24.4876 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.0816 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.3594 m, 1.2812 m/s y 0.8128 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7639 m, 0.4053 m/s y 0.2402 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

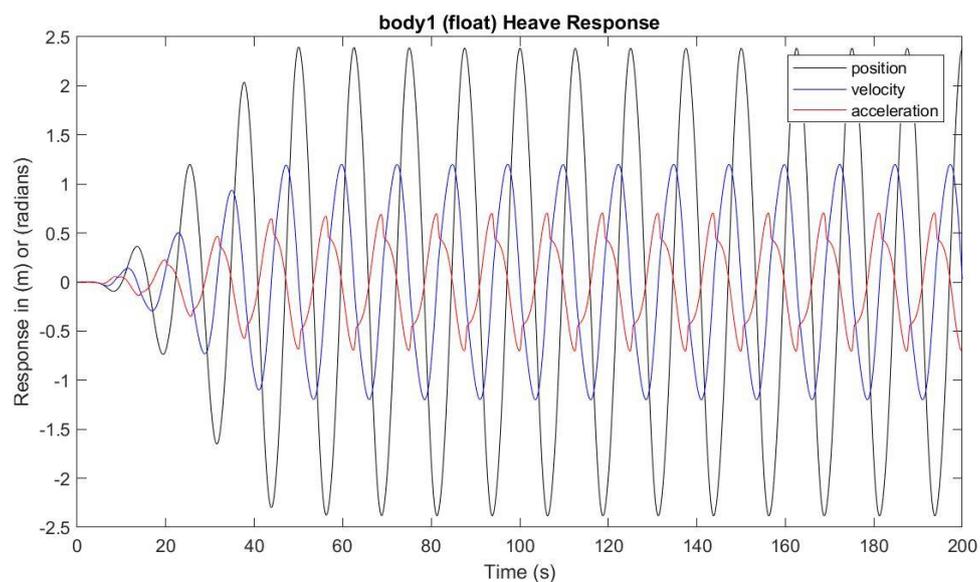
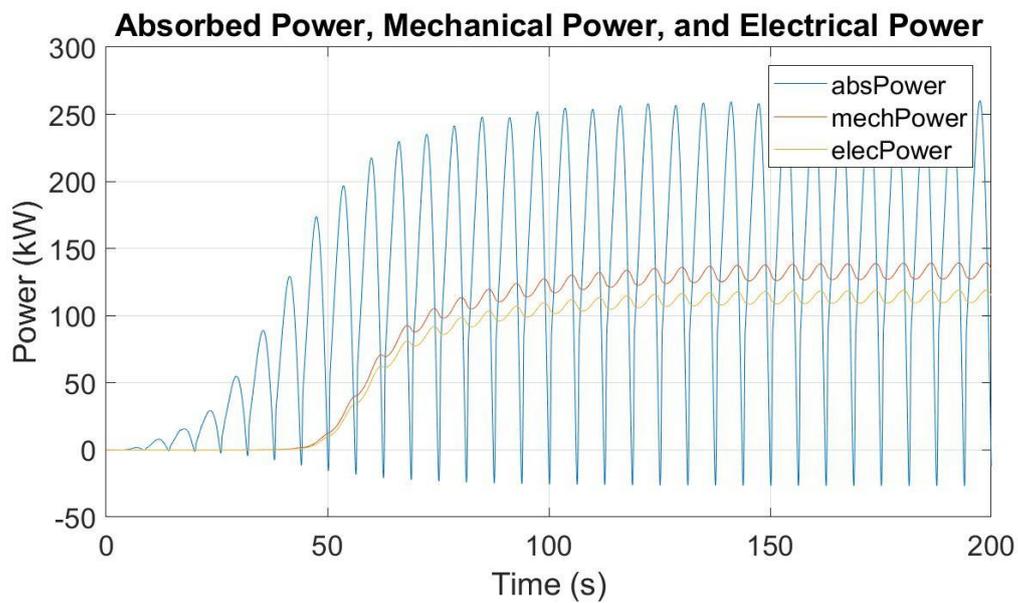
Potencia eléctrica media: 114.0442 kW

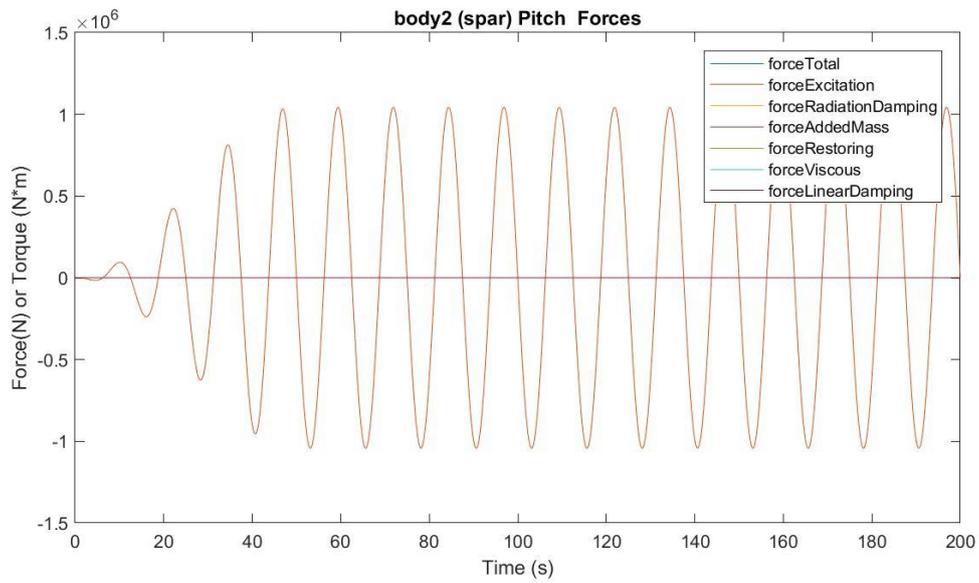
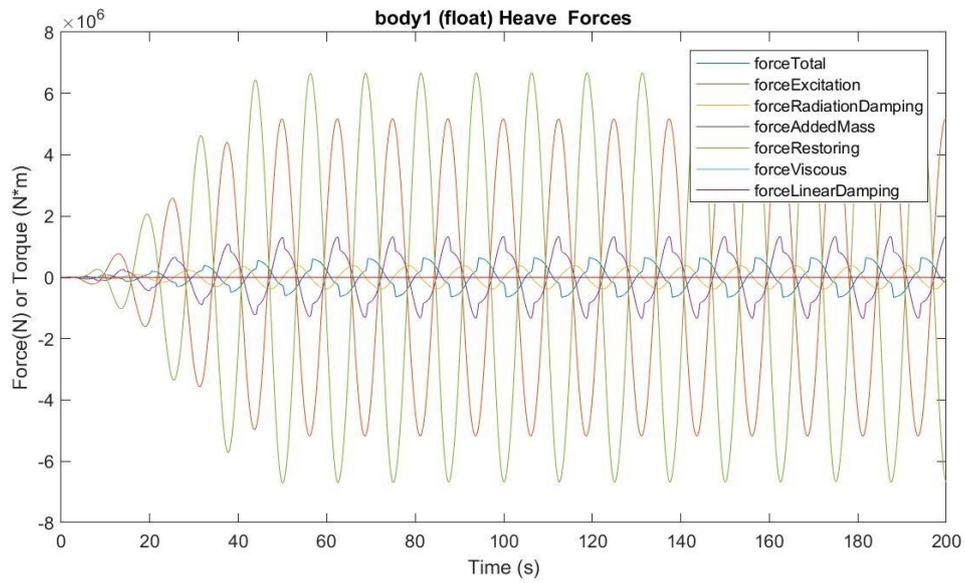
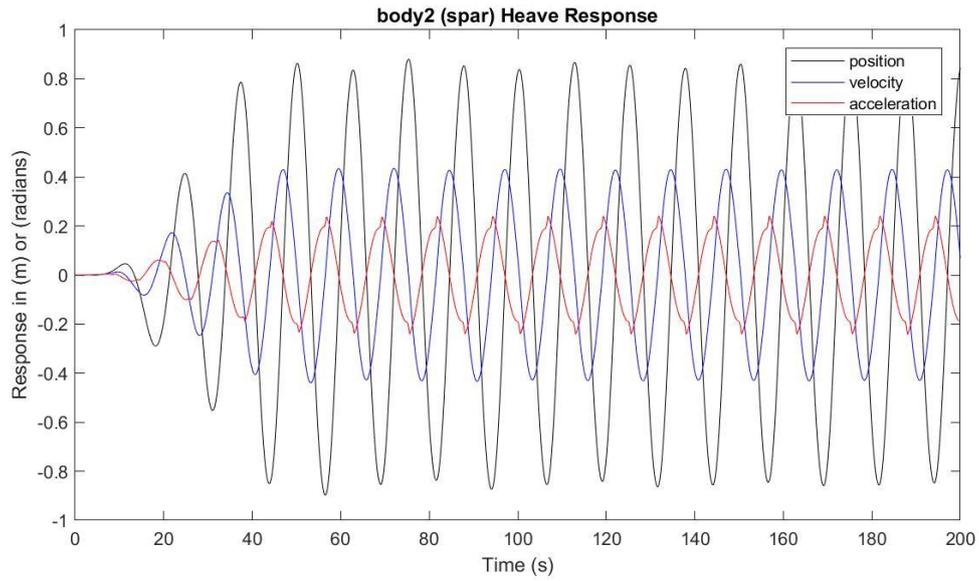
Presión media del acumulador de alta presión: 24.1767 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.4671 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.3966 m, 1.2003 m/s y 0.7054 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.8808 m, 0.4349 m/s y 0.2414 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

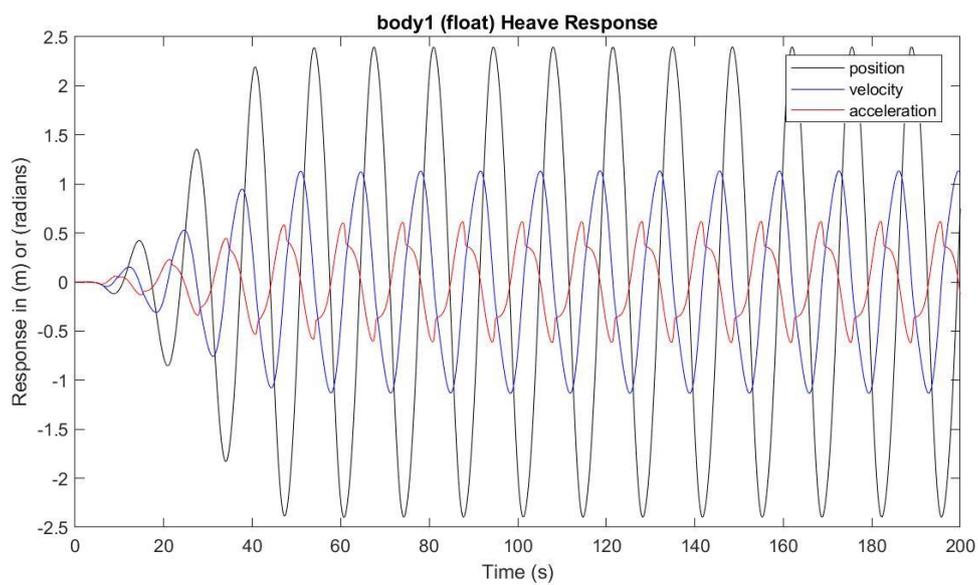
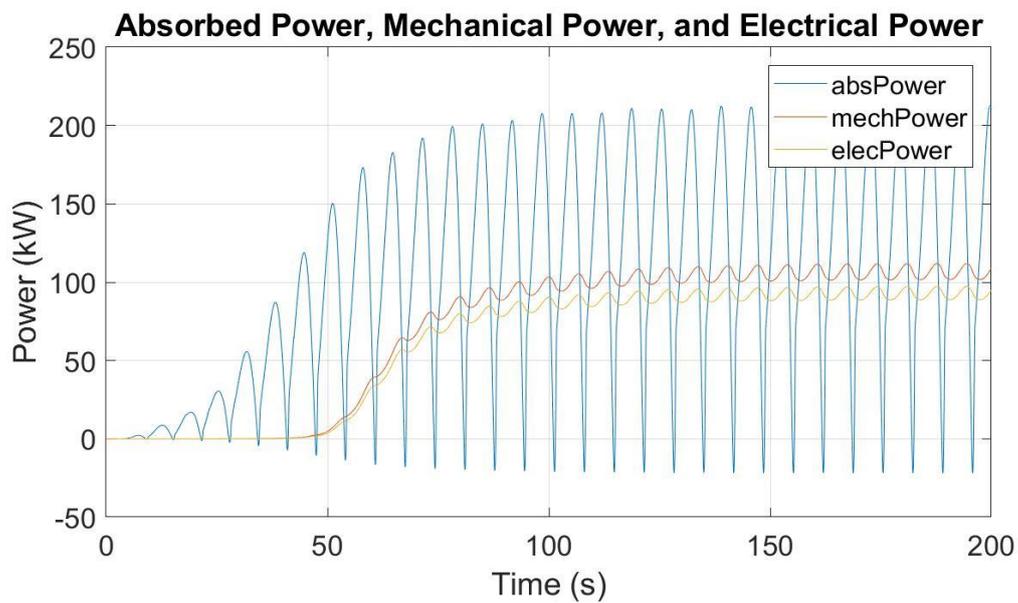
Potencia eléctrica media: 92.5052 kW

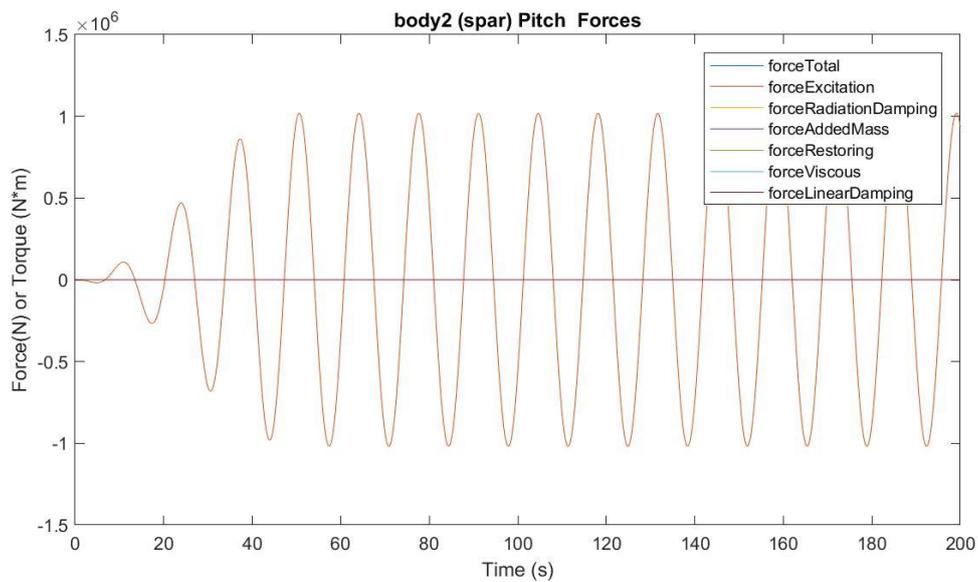
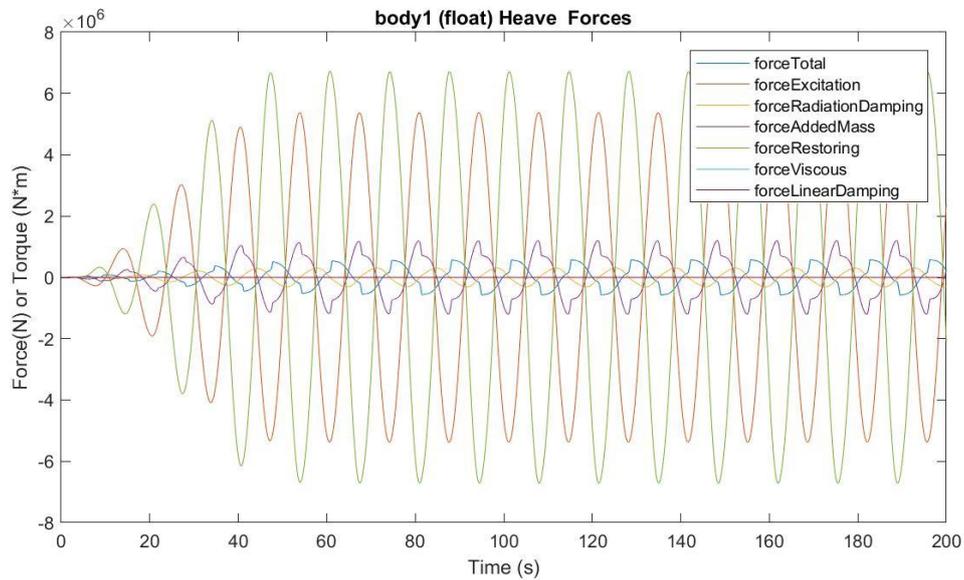
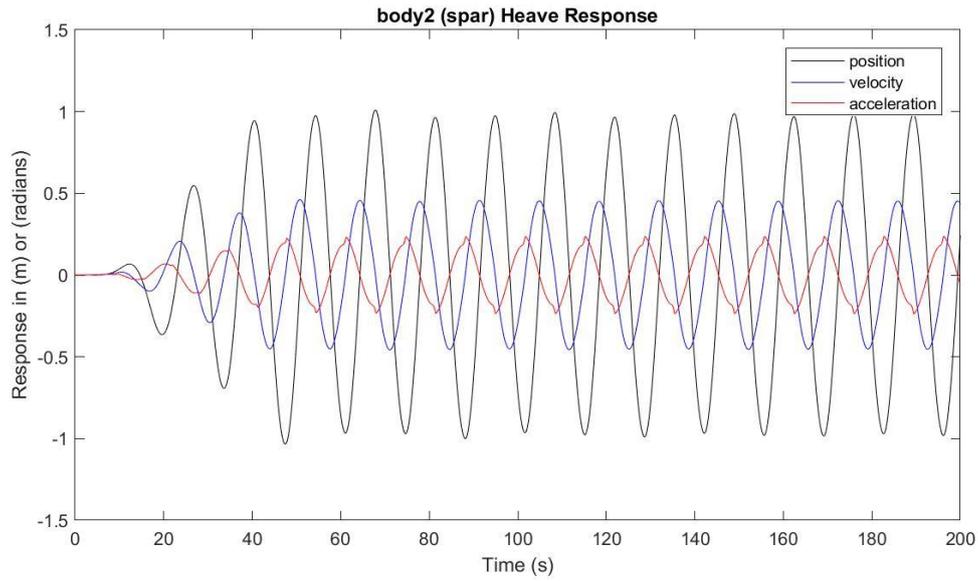
Presión media del acumulador de alta presión: 23.9138 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.8095 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.2974 m, 1.1344 m/s y 0.6183 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.0097 m, 0.4616 m/s y 0.2377 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

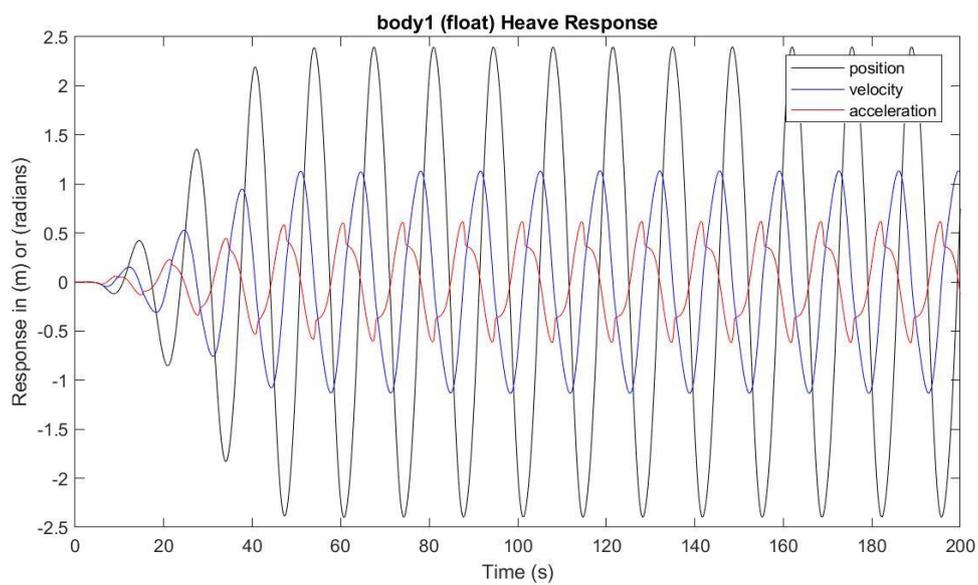
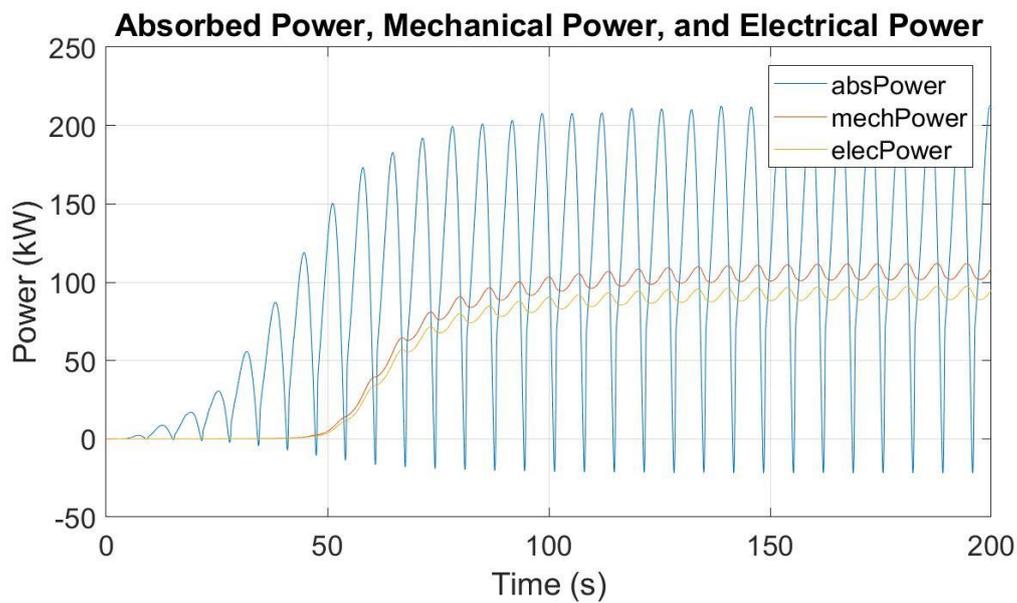
Potencia eléctrica media: 75.3162 kW

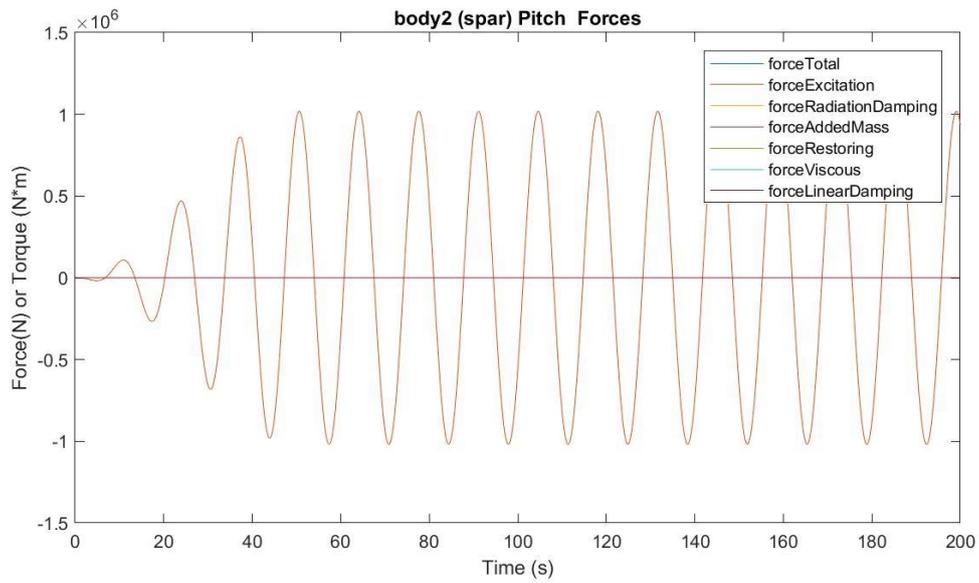
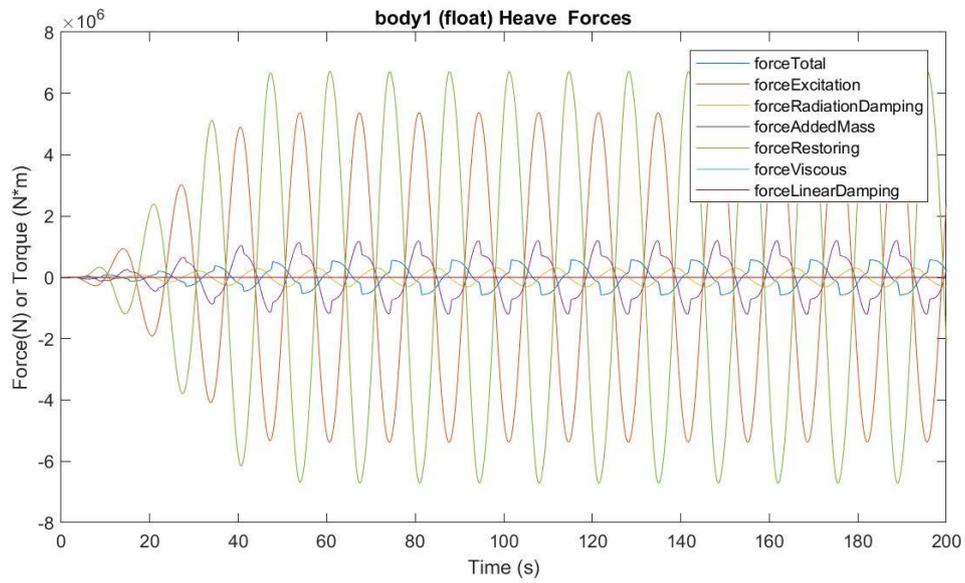
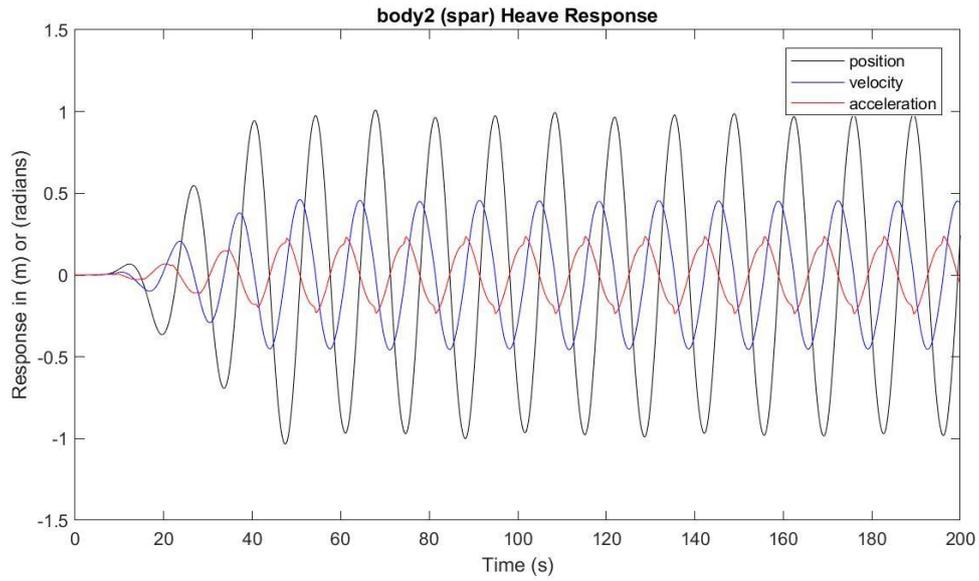
Presión media del acumulador de alta presión: 23.6937 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.1093 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.4055 m, 1.0905 m/s y 0.5505 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.1828 m, 0.4827 m/s y 0.2317 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

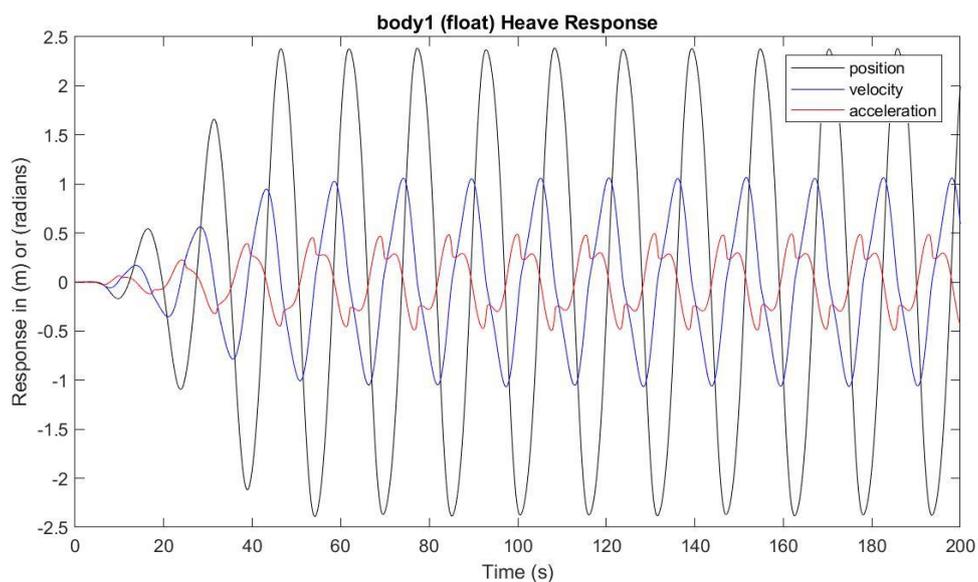
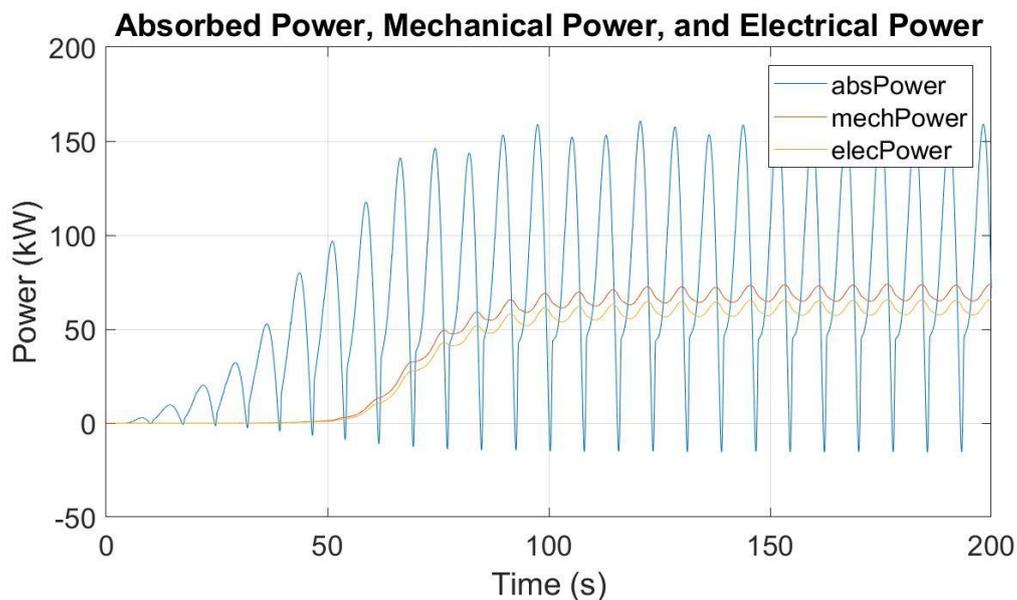
Potencia eléctrica media: 61.1220 kW

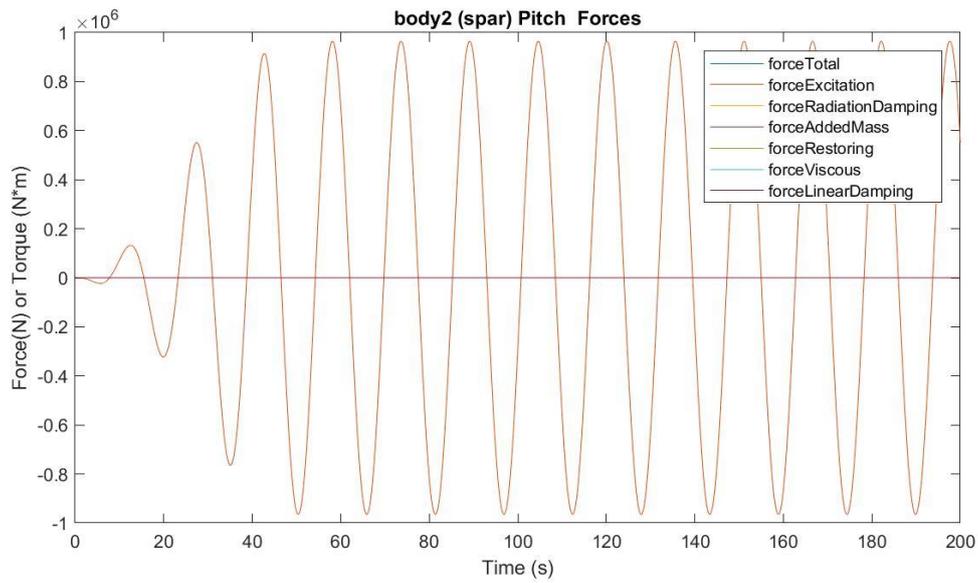
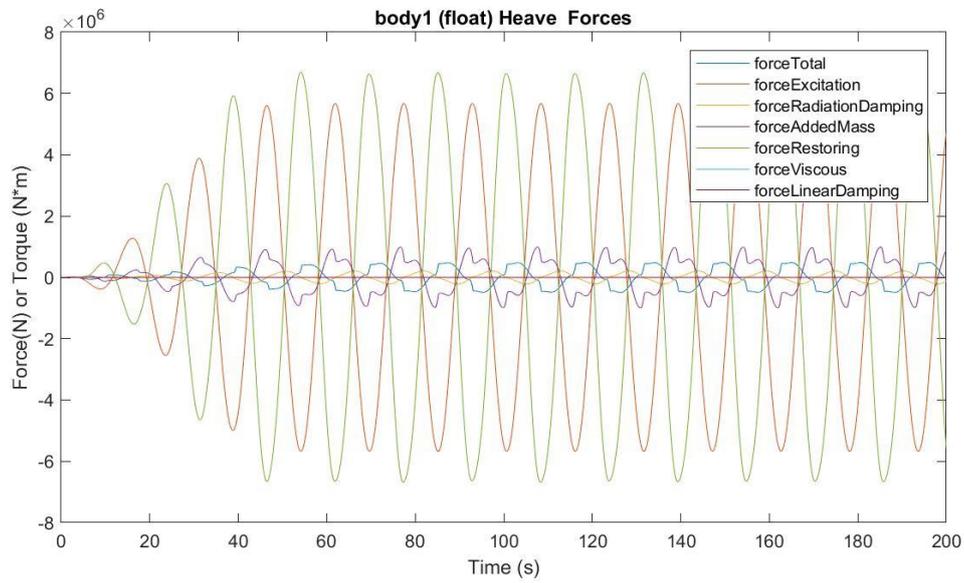
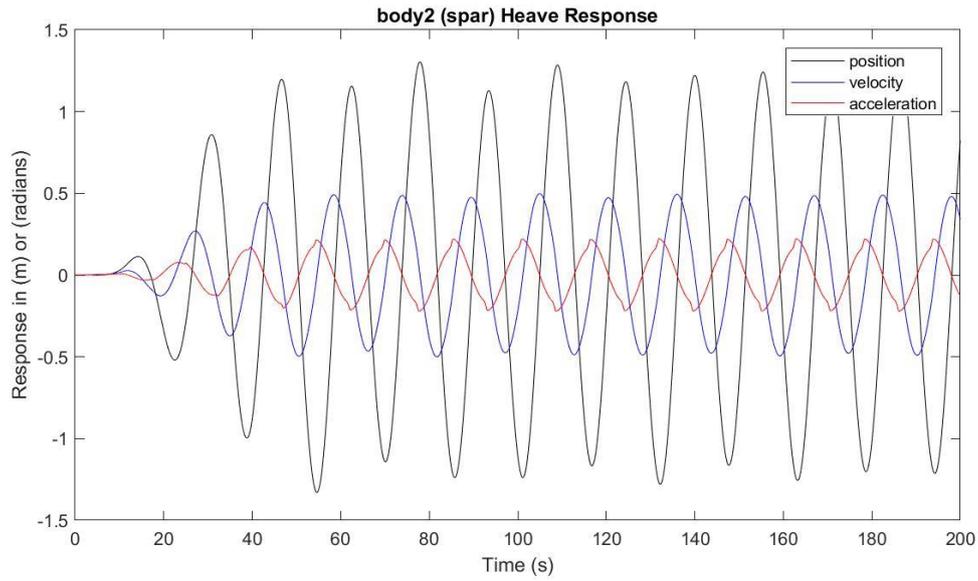
Presión media del acumulador de alta presión: 23.5071 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.3742 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.3864 m, 1.0671 m/s y 0.4931 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.3037 m, 0.4980 m/s y 0.2224 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

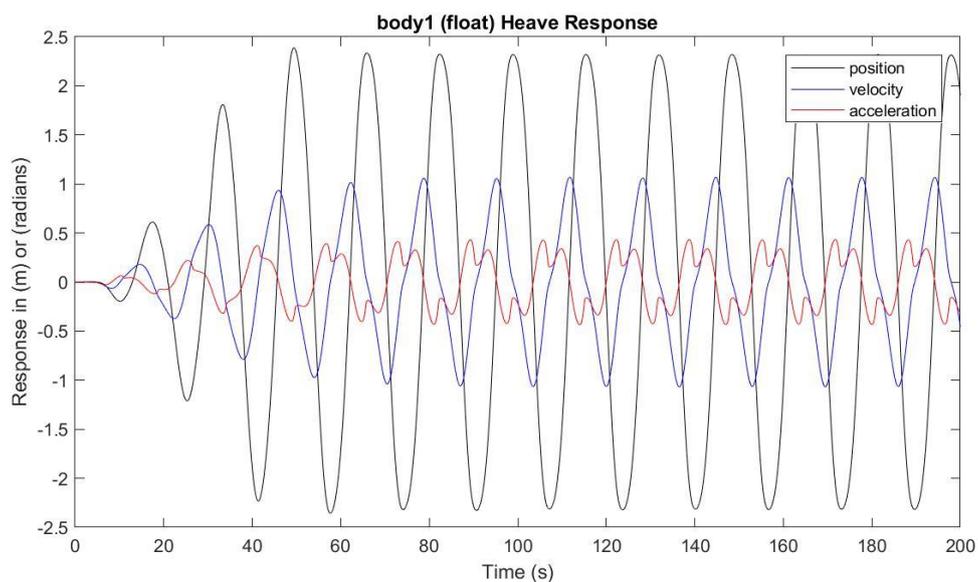
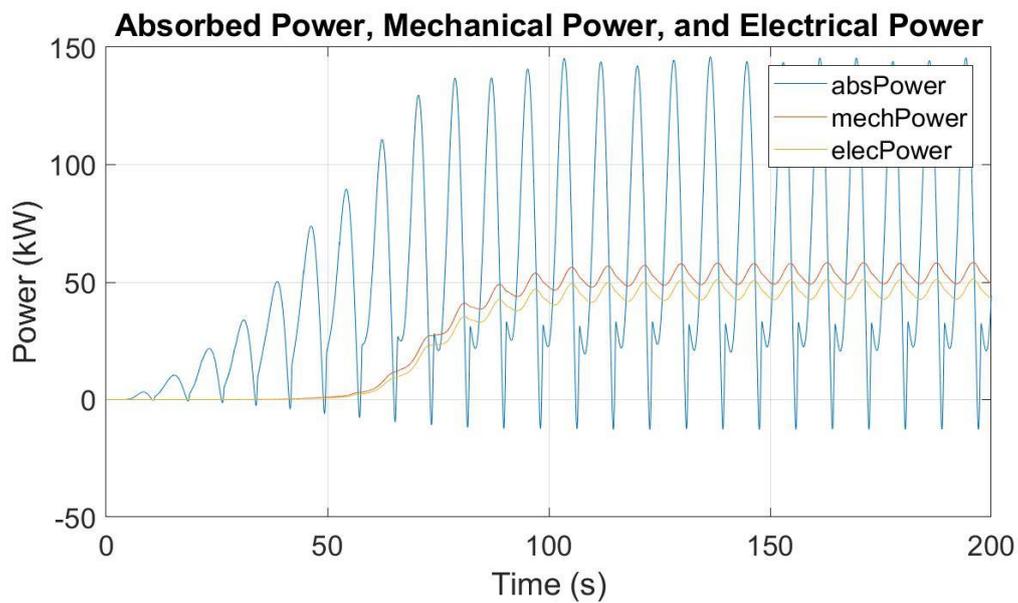
Potencia eléctrica media: 46.6596 kW

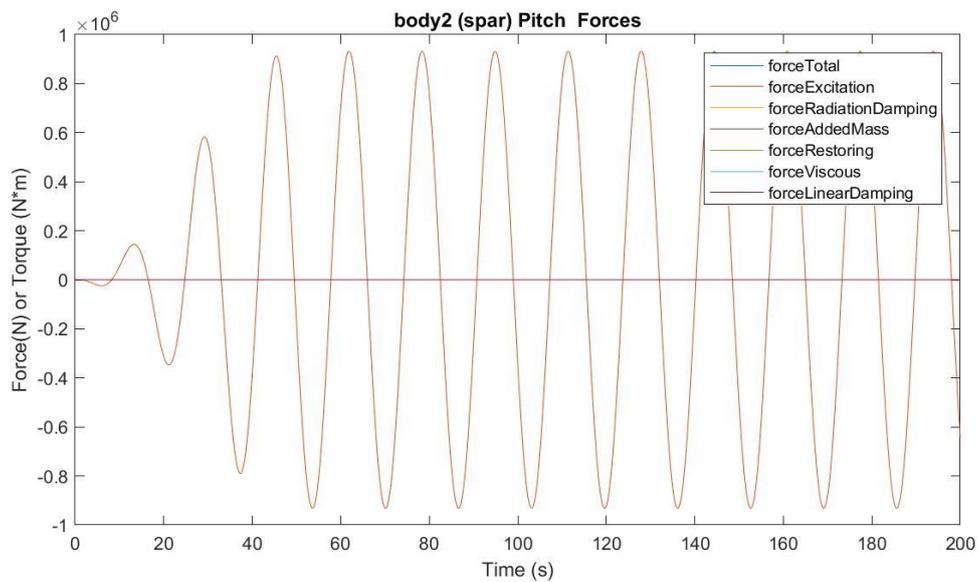
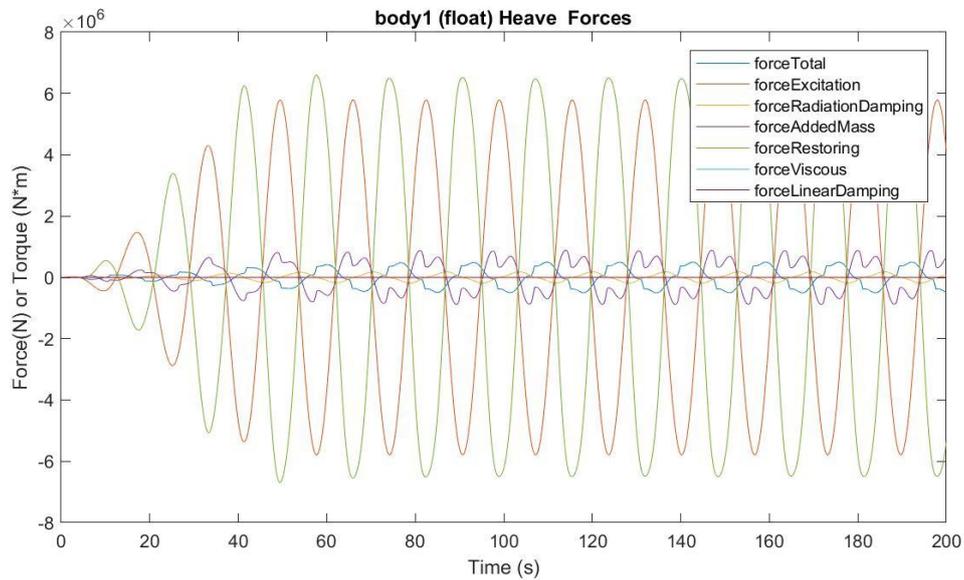
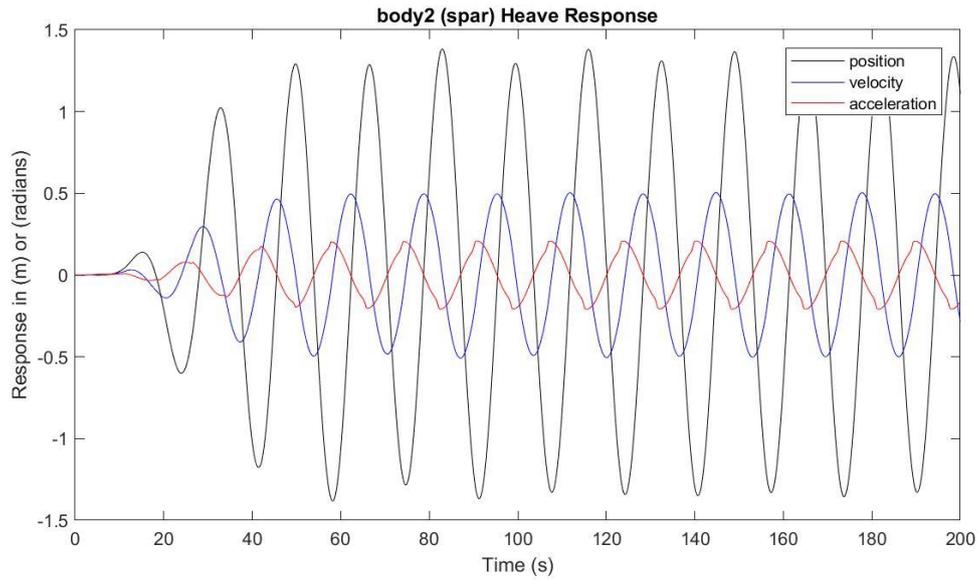
Presión media del acumulador de alta presión: 23.3176 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.6526 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.3882 m, 1.0695 m/s y 0.4321 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.3822 m, 0.5045 m/s y 0.2085 m/s²





$H_s = 4.75 \text{ m}$

$T_e = 17.5 \text{ s}$

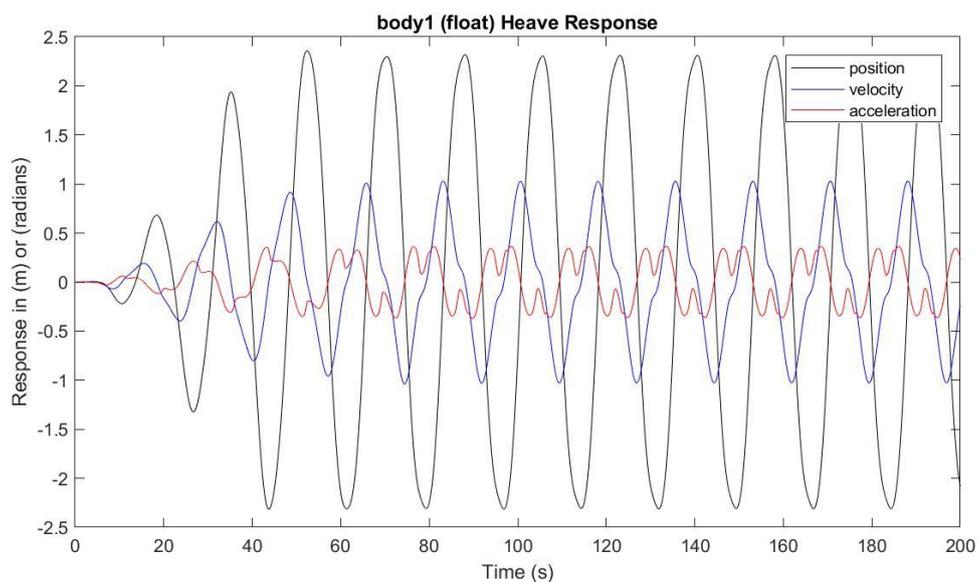
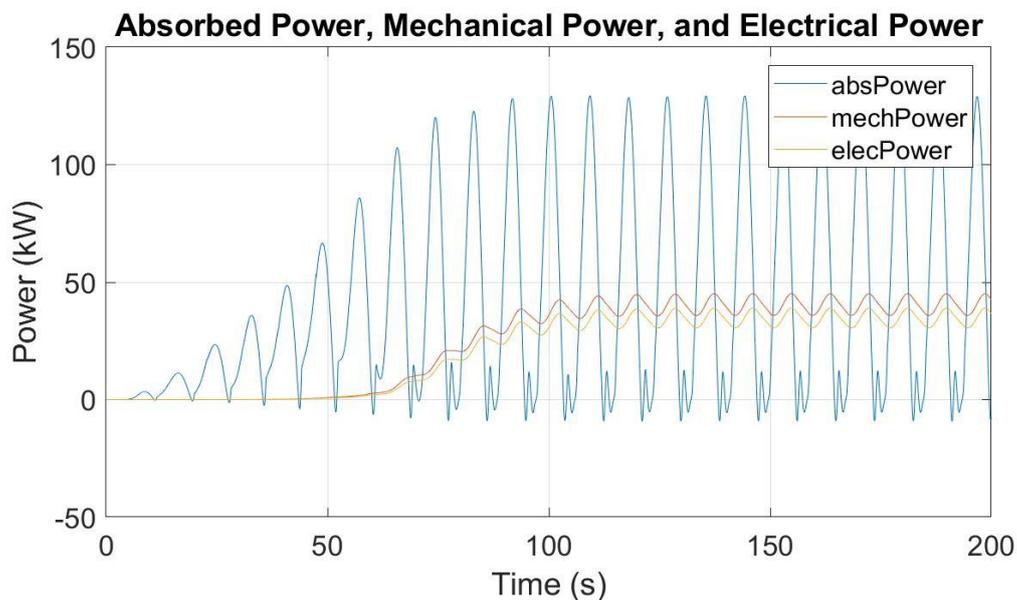
Potencia eléctrica media: 34.7557 kW

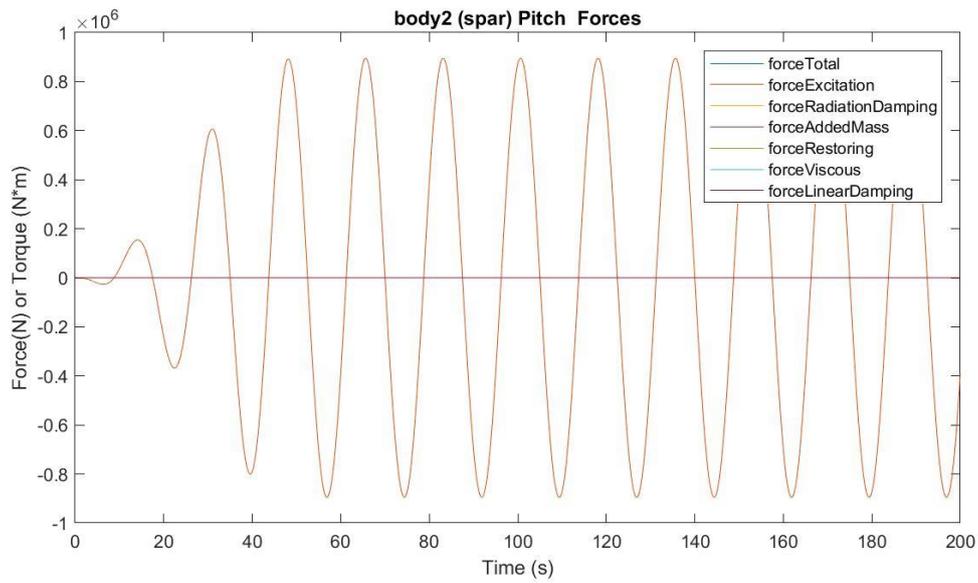
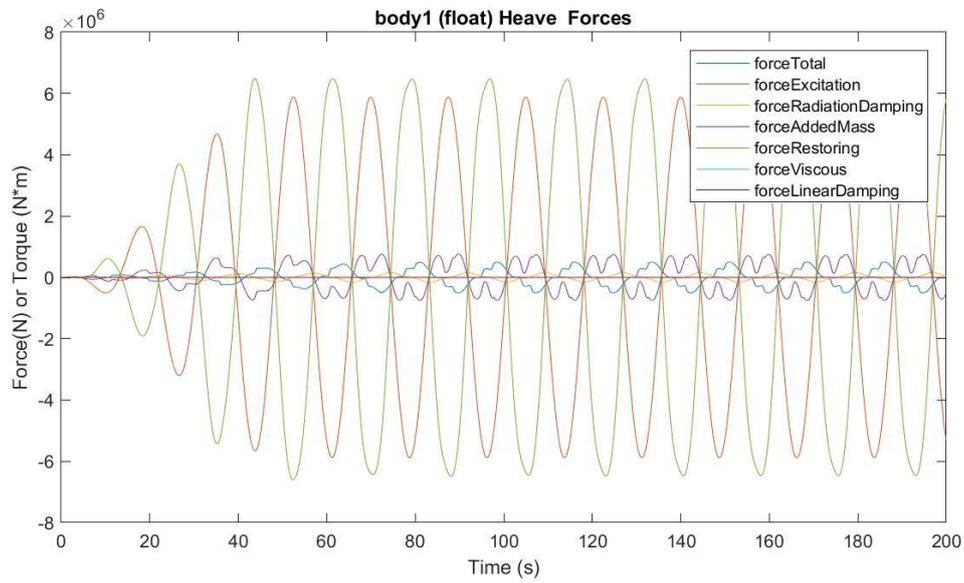
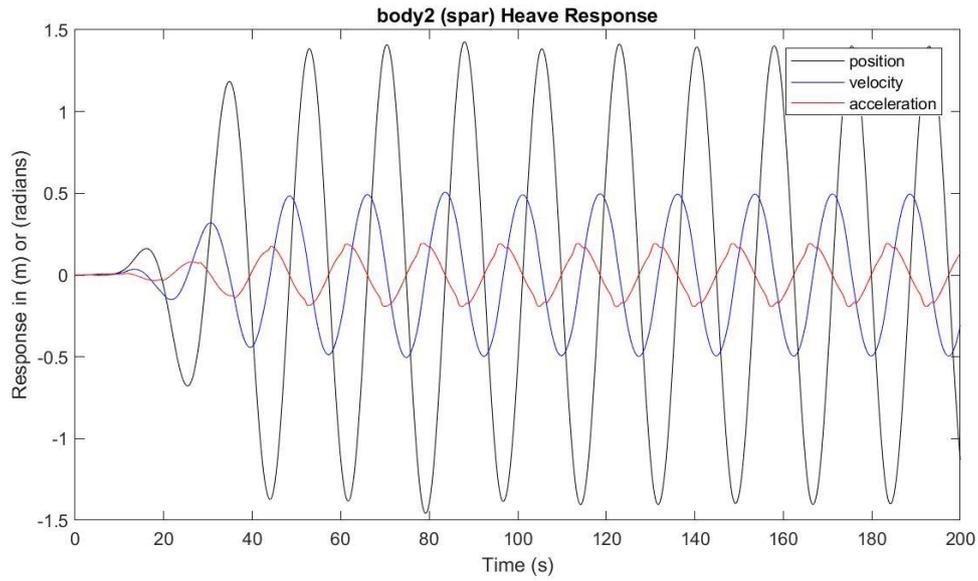
Presión media del acumulador de alta presión: 23.1420 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.1420 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.3568 m, 1.0292 m/s y 0.3653 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.4267 m, 0.5062 m/s y 0.1936 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 9.5 \text{ s}$

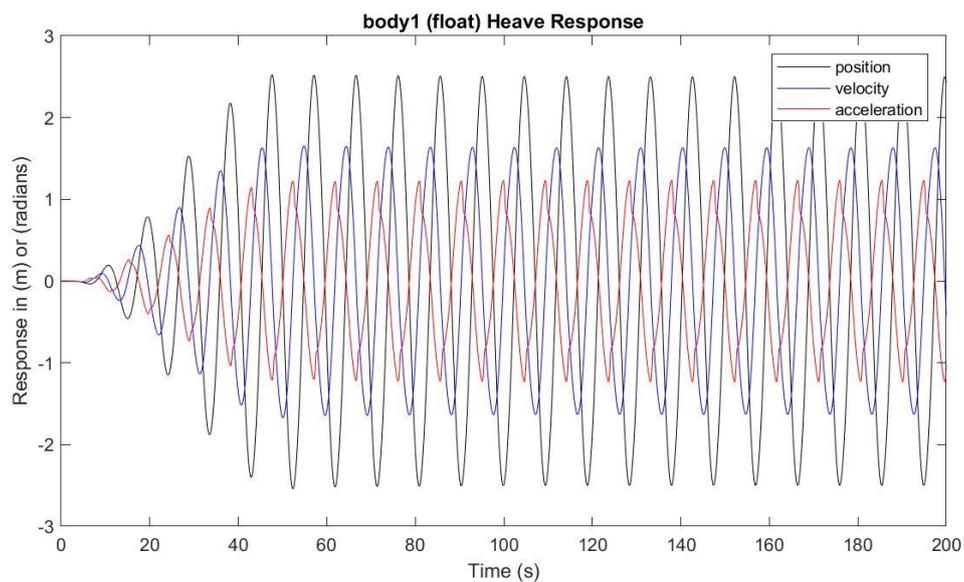
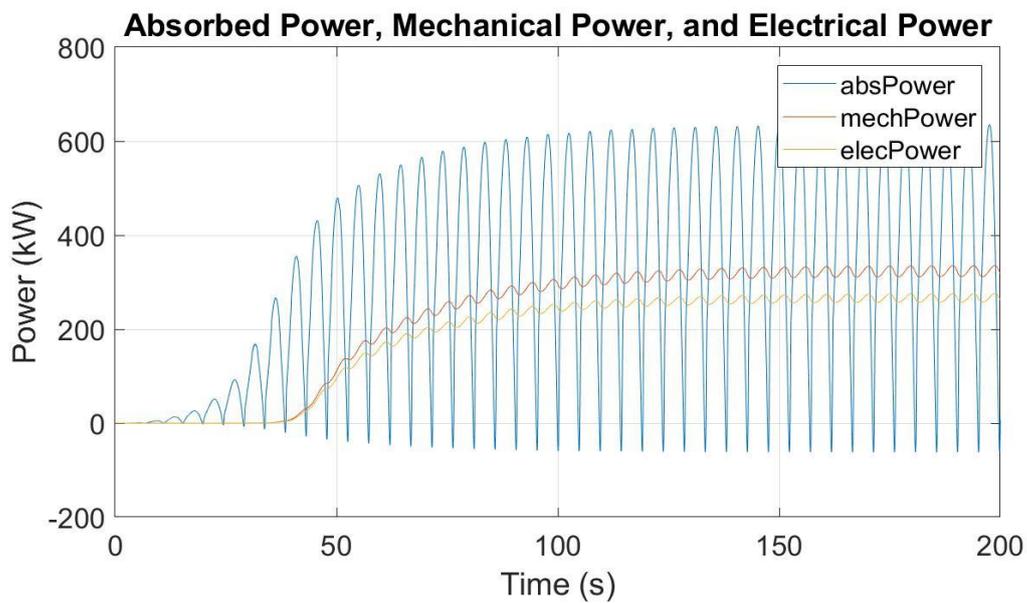
Potencia eléctrica media: 266.0394 kW

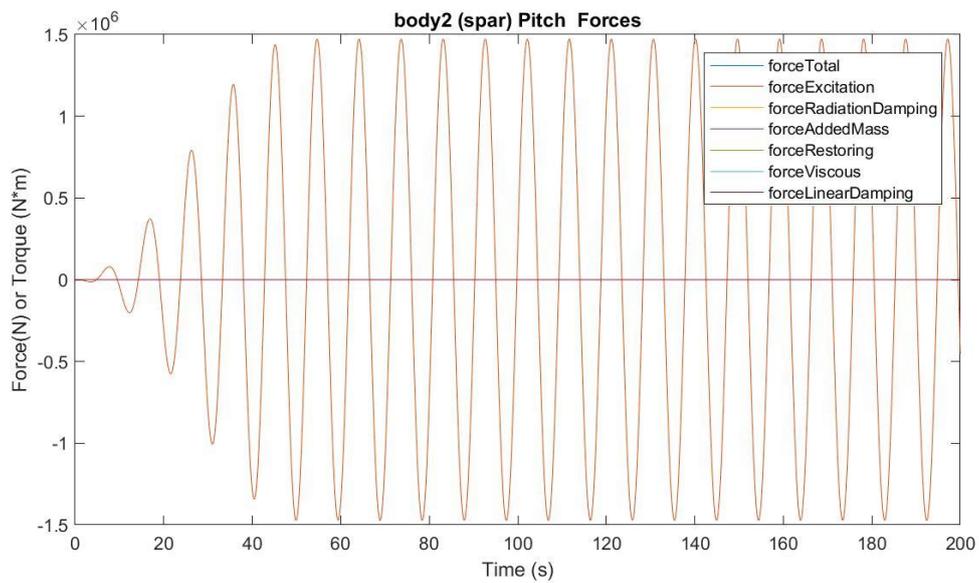
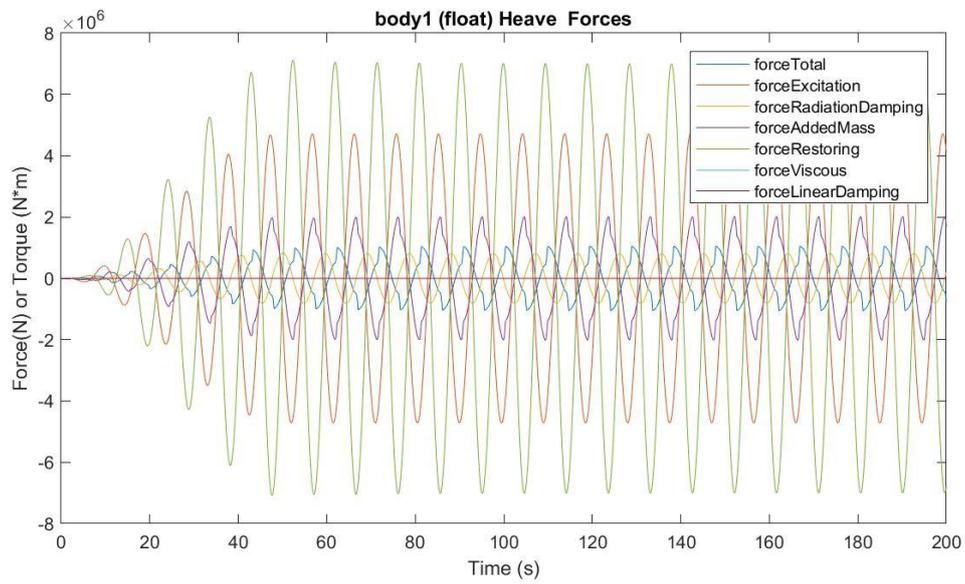
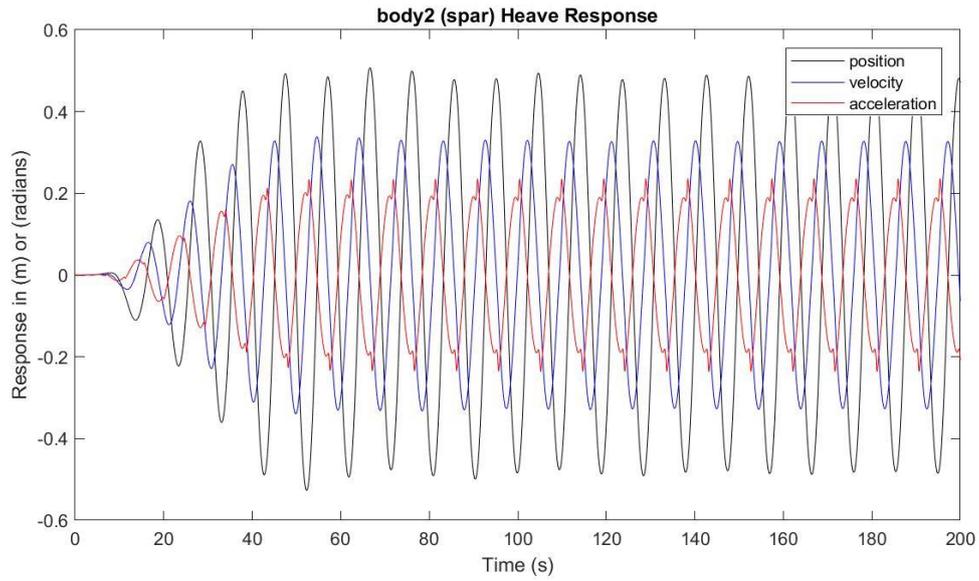
Presión media del acumulador de alta presión: 25.7021 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 14.7673 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.5258 m, 1.6531 m/s y 1.2323 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.5073 m, 0.3381 m/s y 0.2361 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

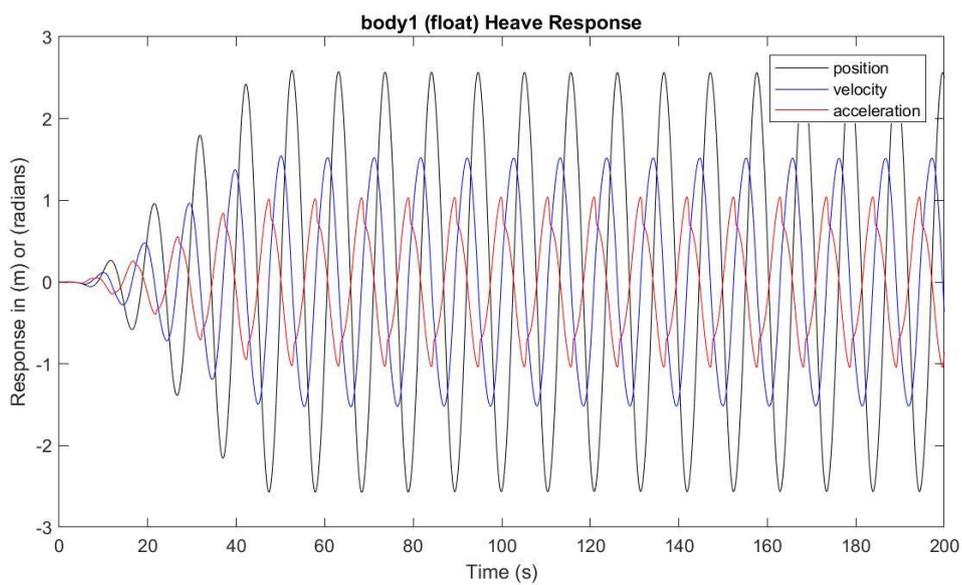
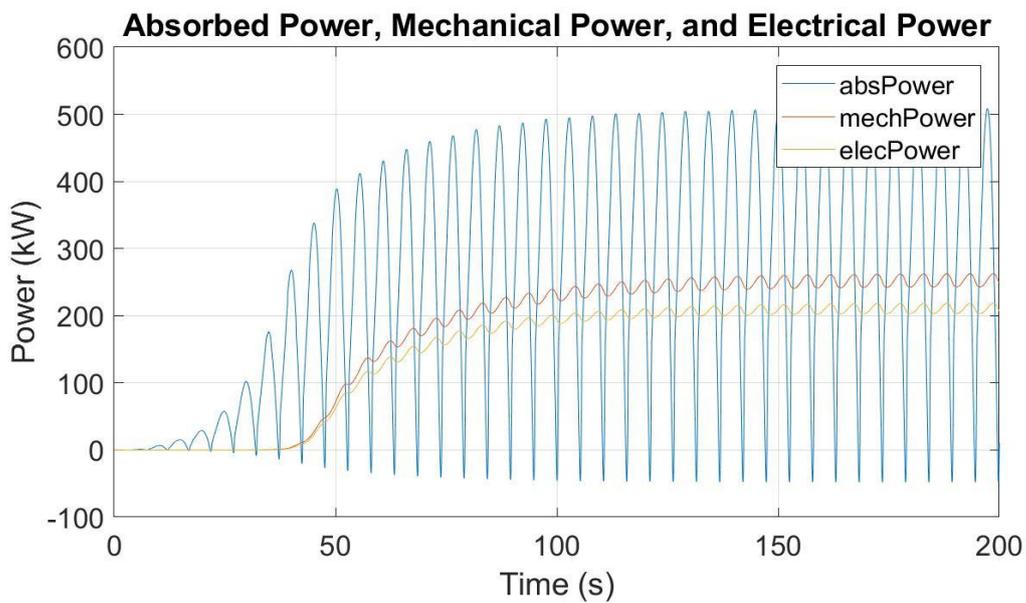
Potencia eléctrica media: 210.3870 kW

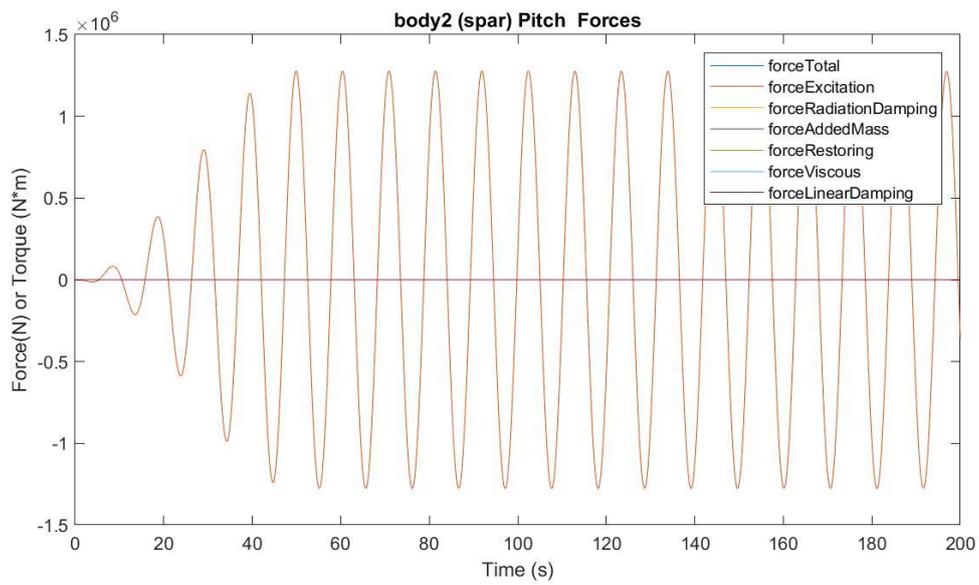
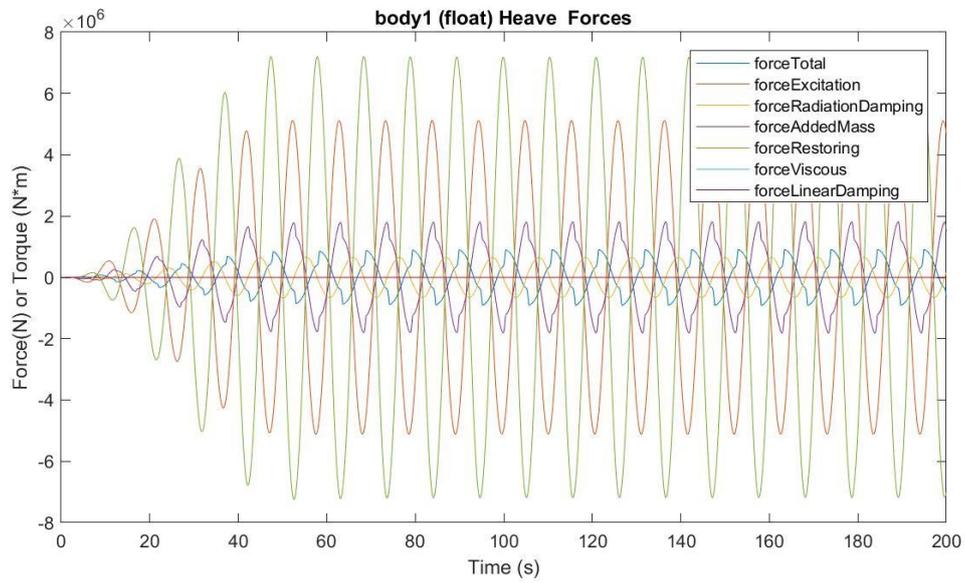
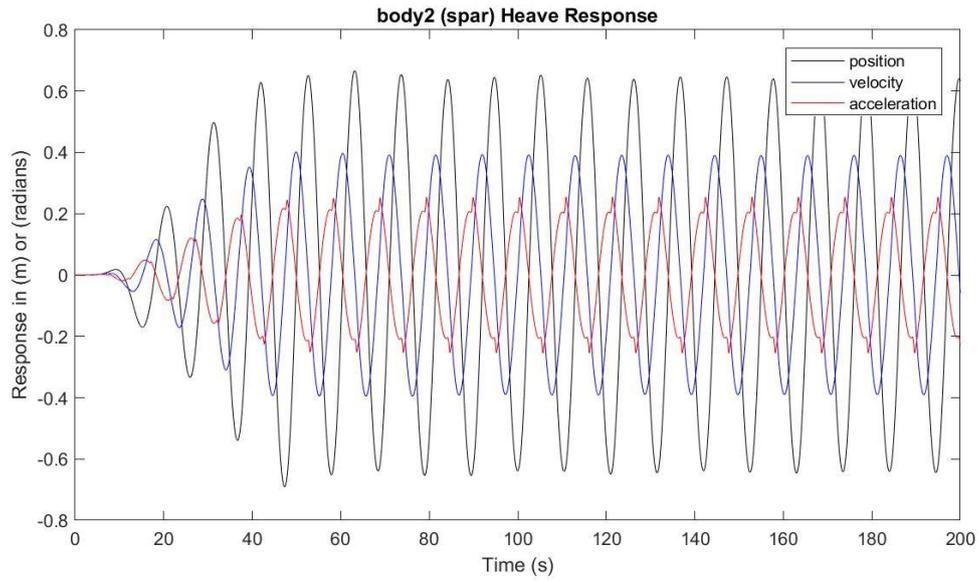
Presión media del acumulador de alta presión: 25.1802 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.2985 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.5893 m, 1.5449 m/s y 1.0433 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.6667 m, 0.4018 m/s y 0.2552 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

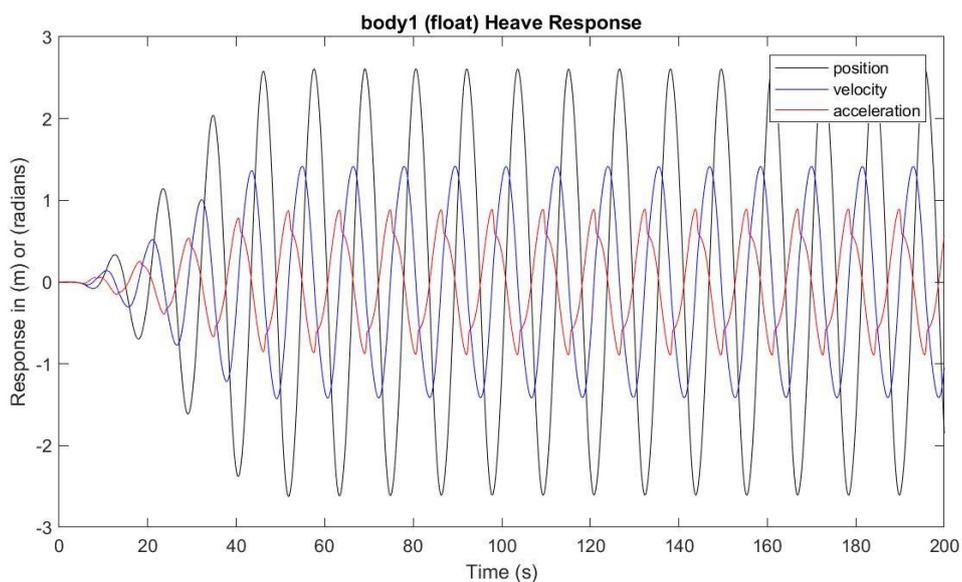
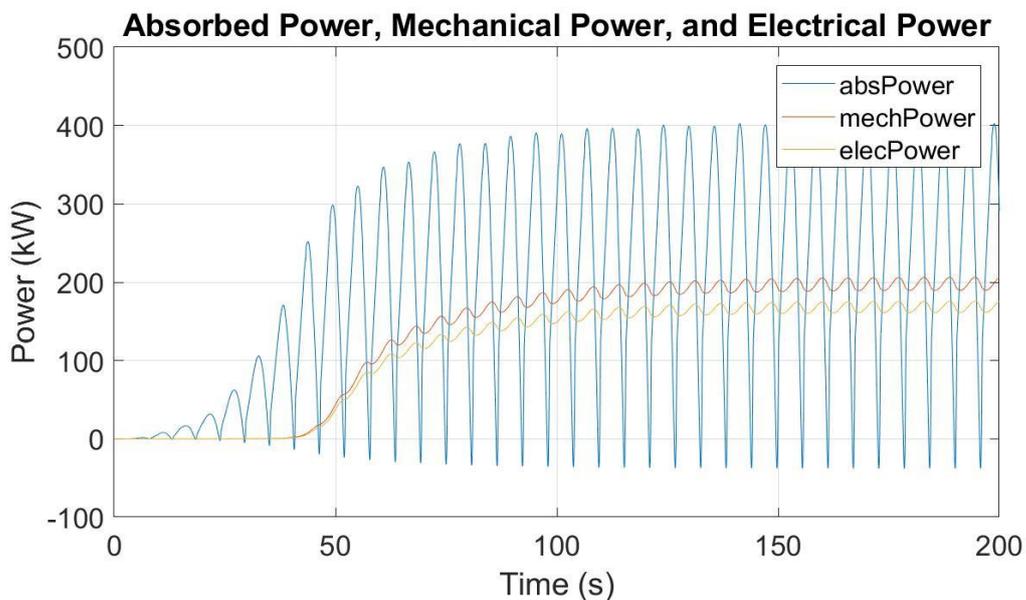
Potencia eléctrica media: 167.9481 kW

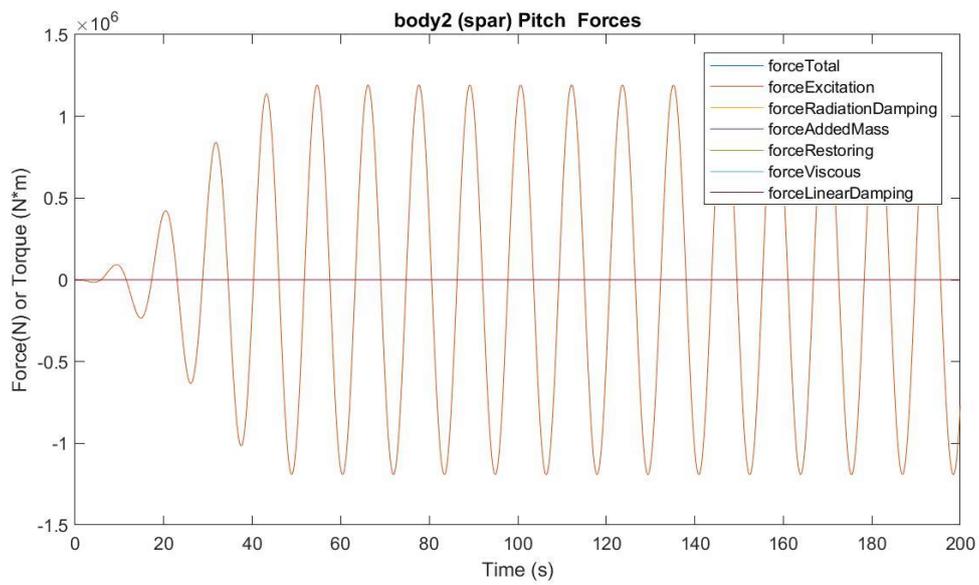
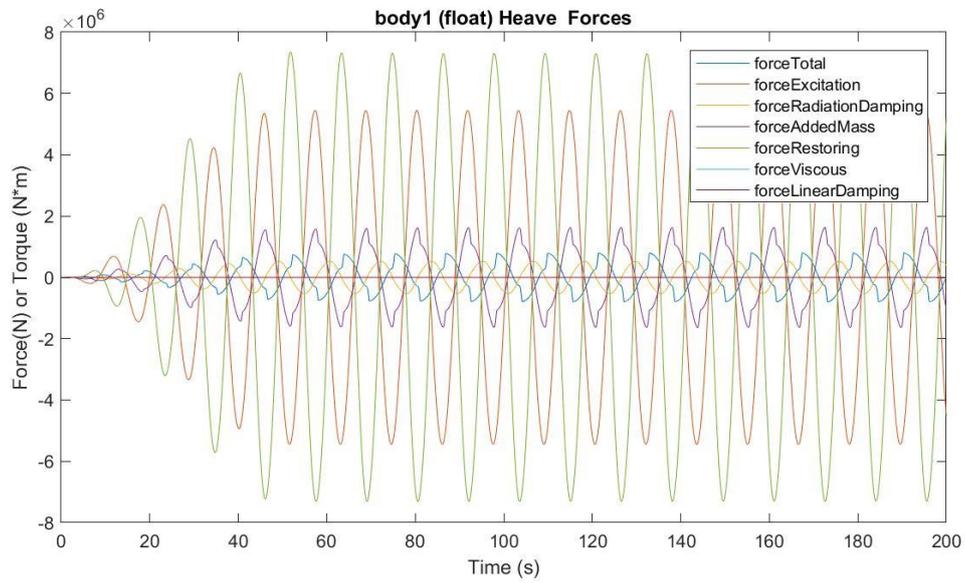
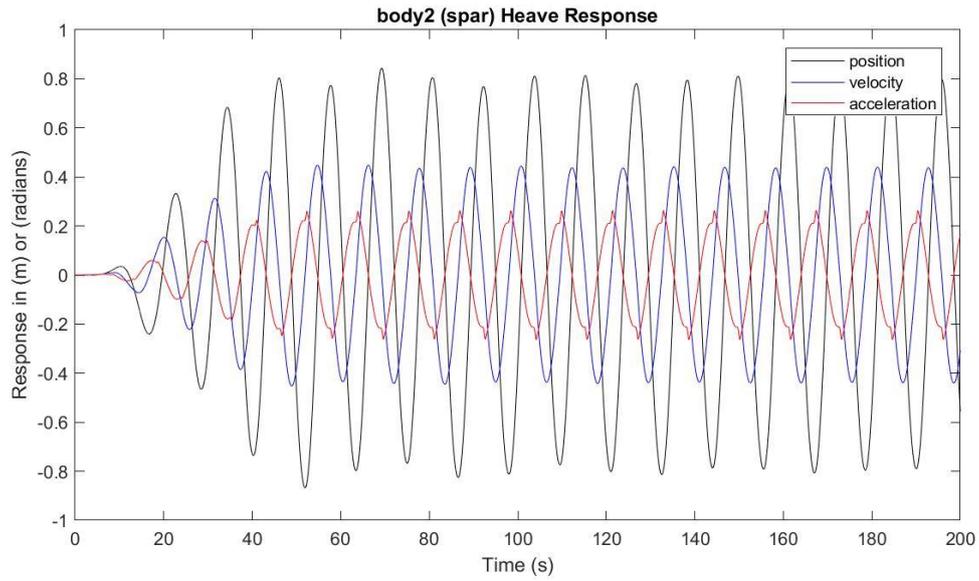
Presión media del acumulador de alta presión: 24.7420 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.7827 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.6088 m, 1.4167 m/s y 0.8932 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.8433 m, 0.4478 m/s y 0.2641 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

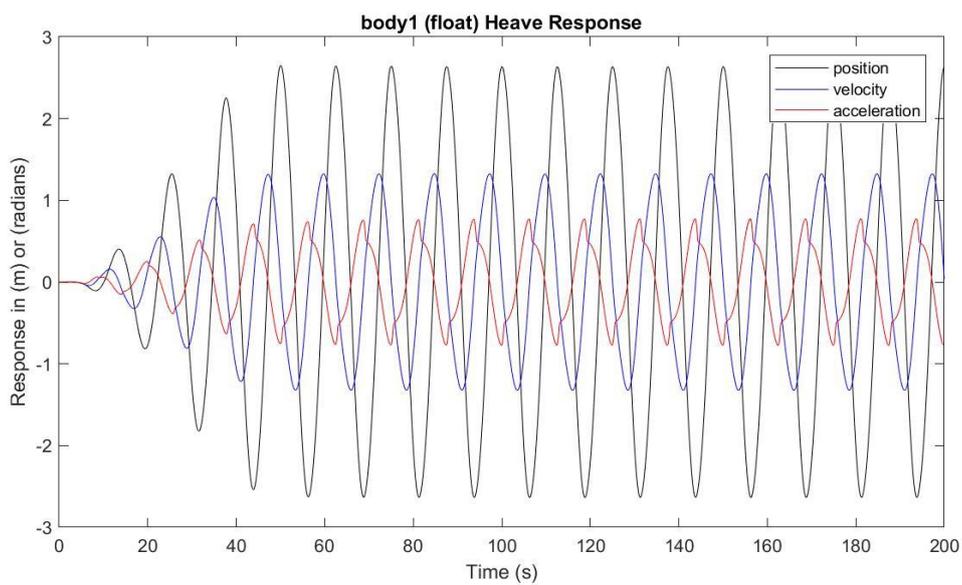
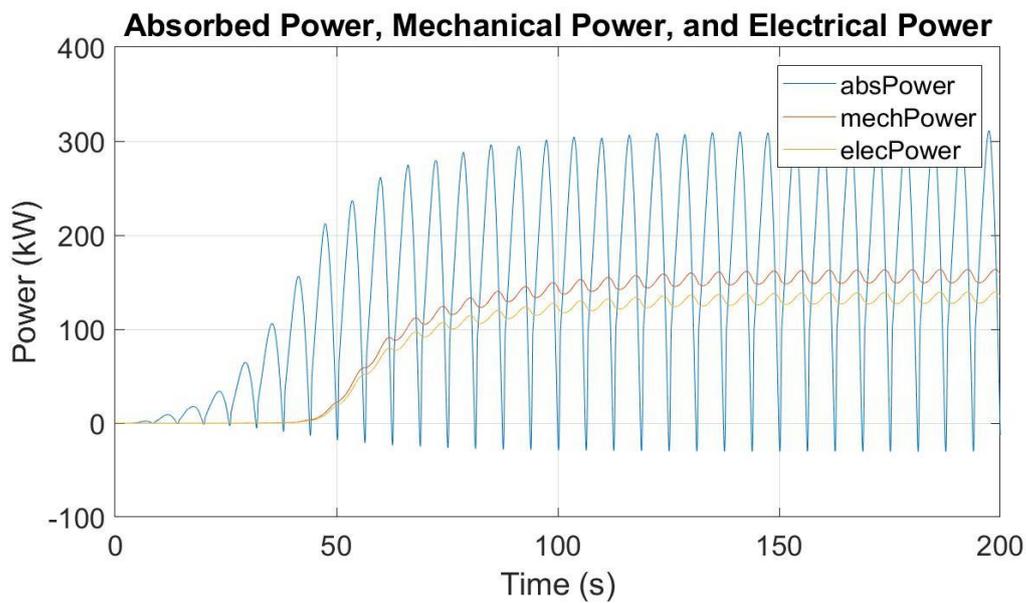
Potencia eléctrica media: 133.0436 kW

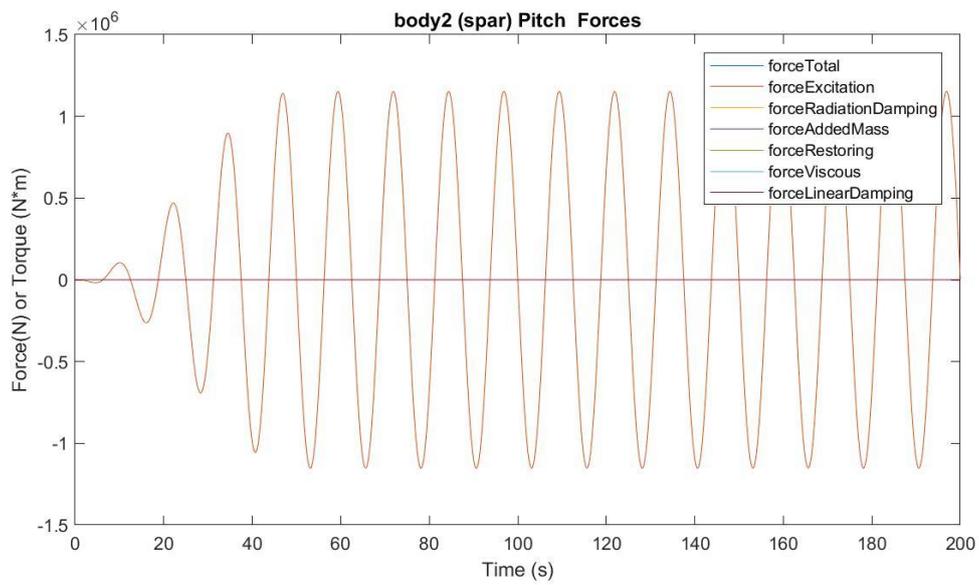
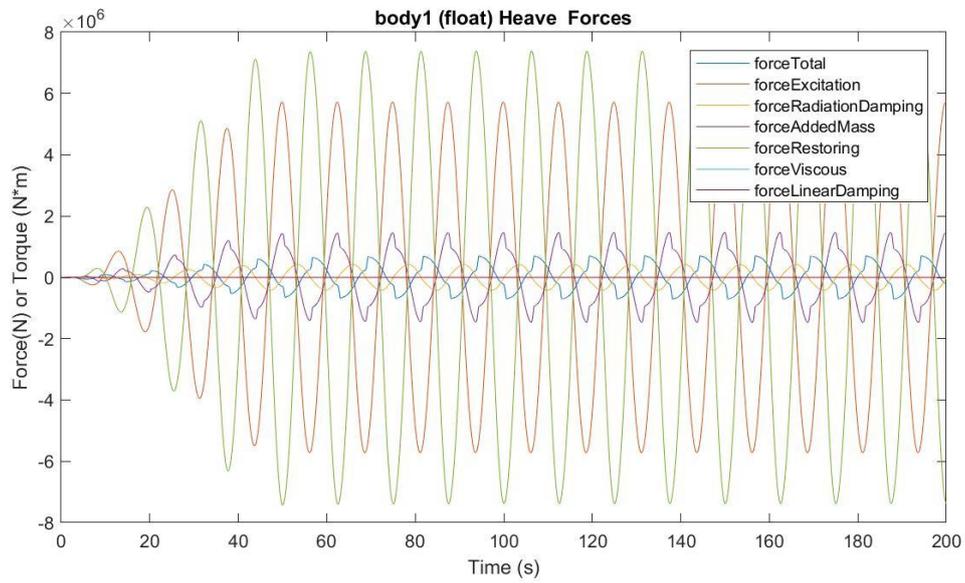
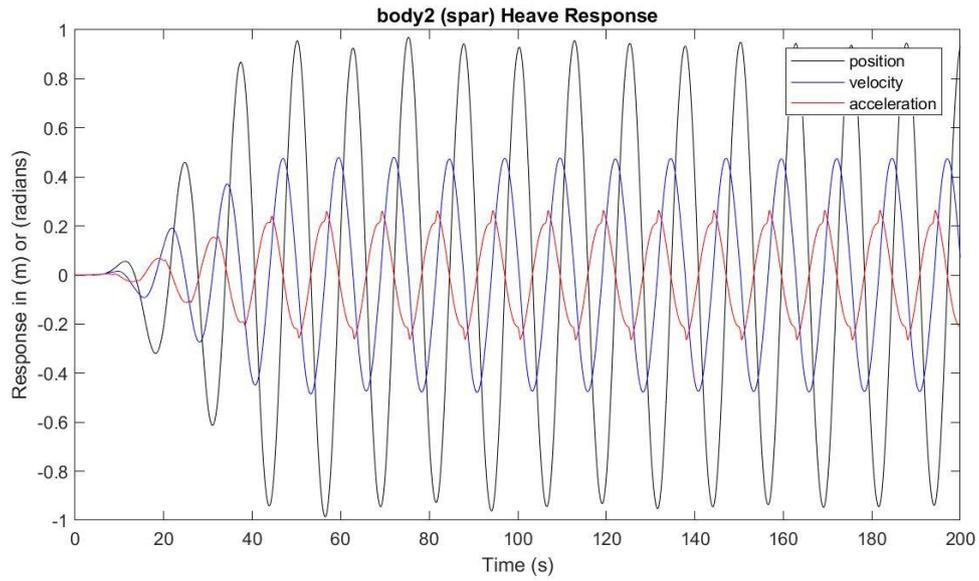
Presión media del acumulador de alta presión: 24.3893 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.2015 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.6496 m, 1.3259 m/s y 0.7742 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9699 m, 0.4803 m/s y 0.2651 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

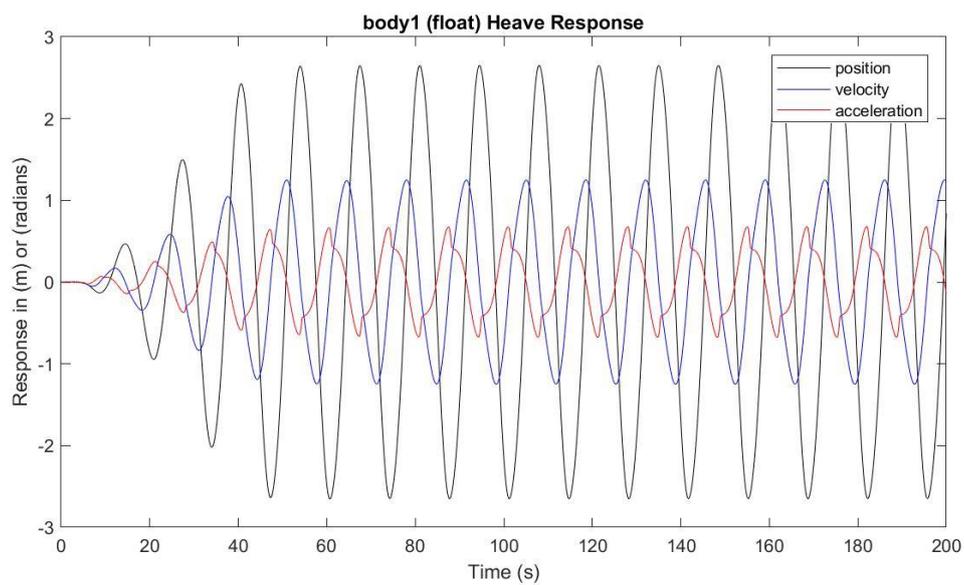
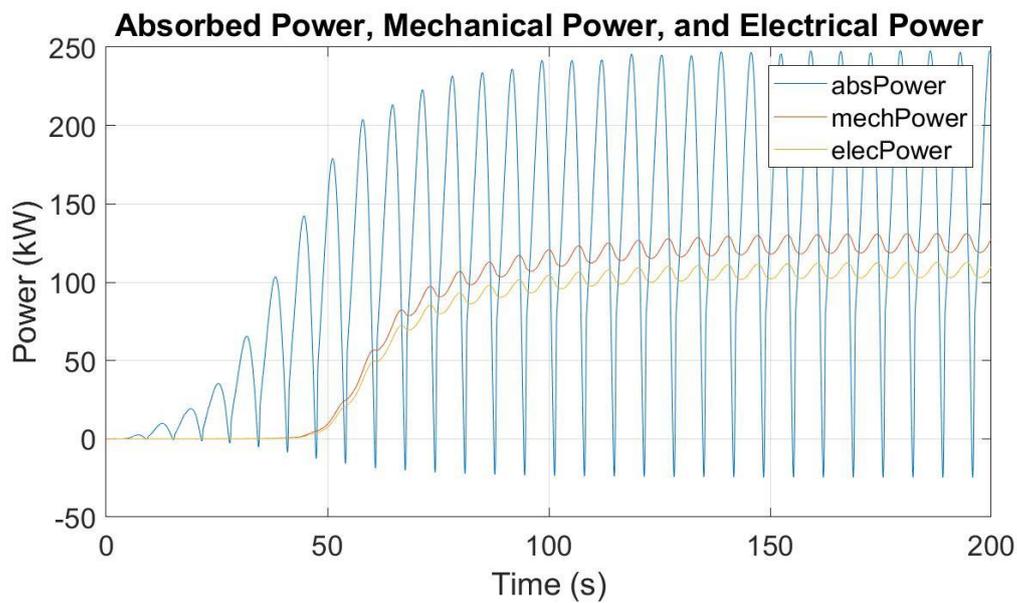
Potencia eléctrica media: 107.0932 kW

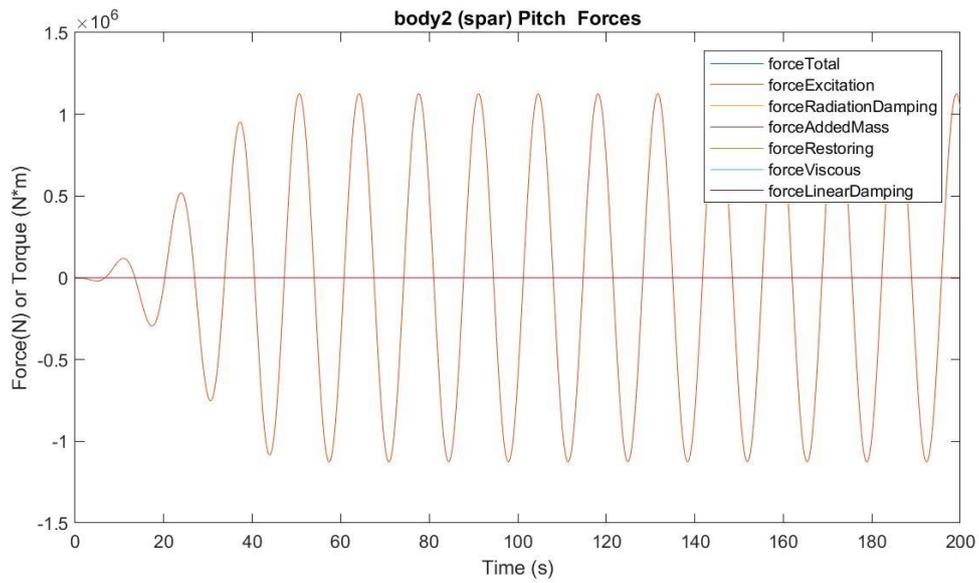
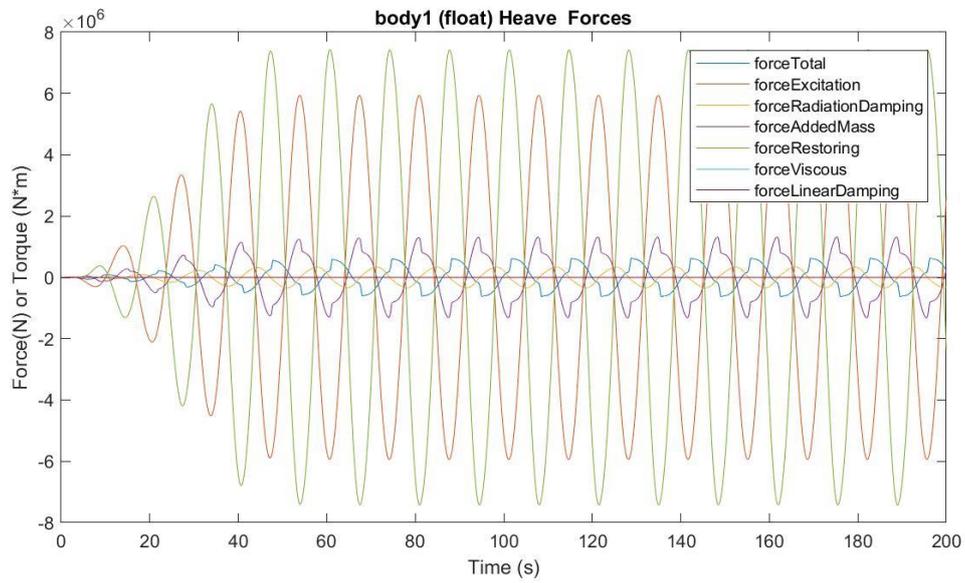
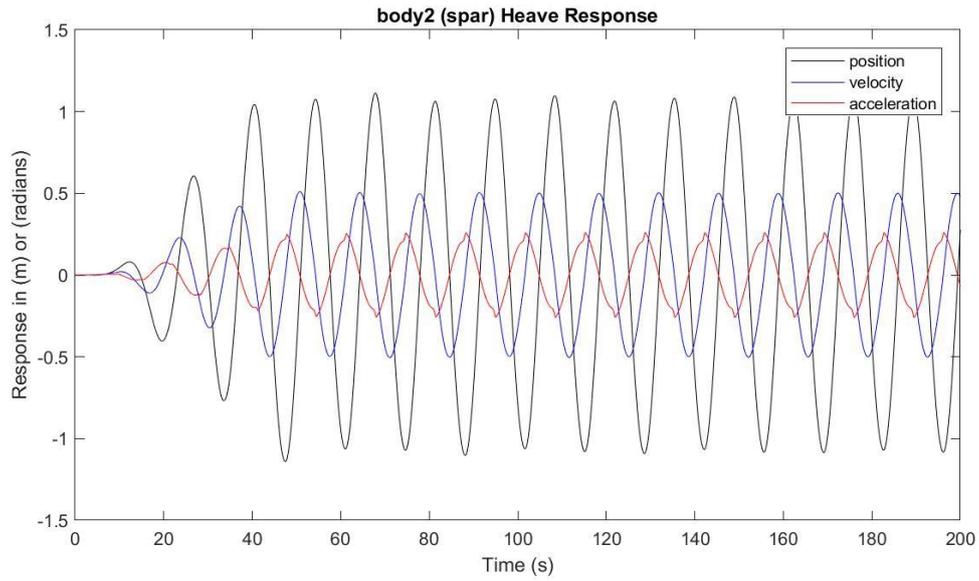
Presión media del acumulador de alta presión: 24.0929 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.5741 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.6505 m, 1.2511 m/s y 0.6781 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.1138 m, 0.5098 m/s y 0.2607 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

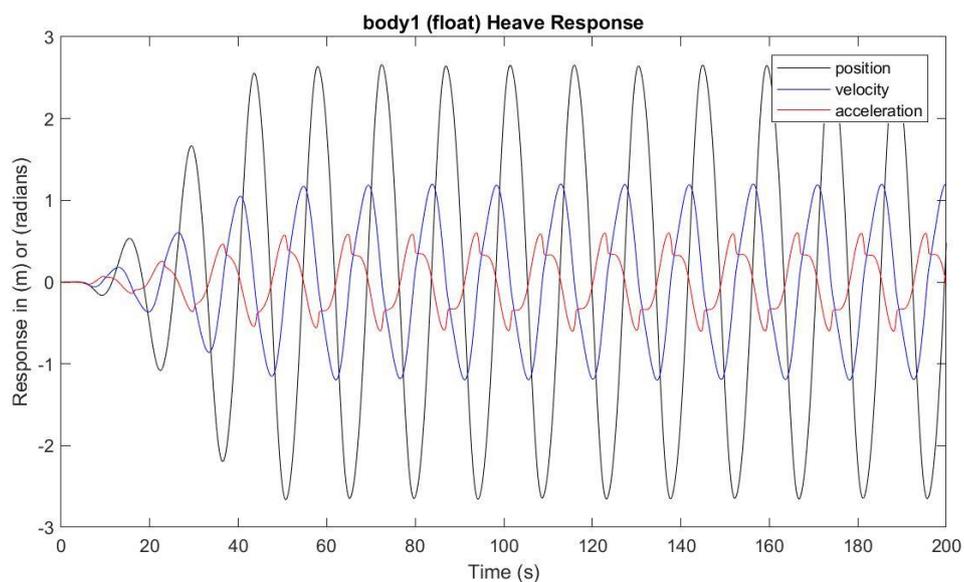
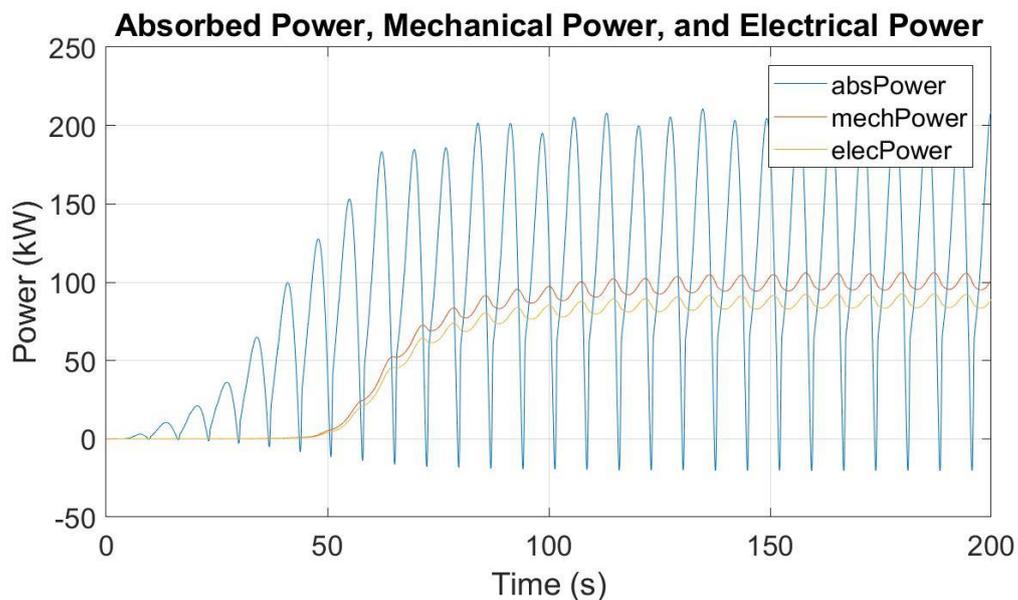
Potencia eléctrica media: 87.1231 kW

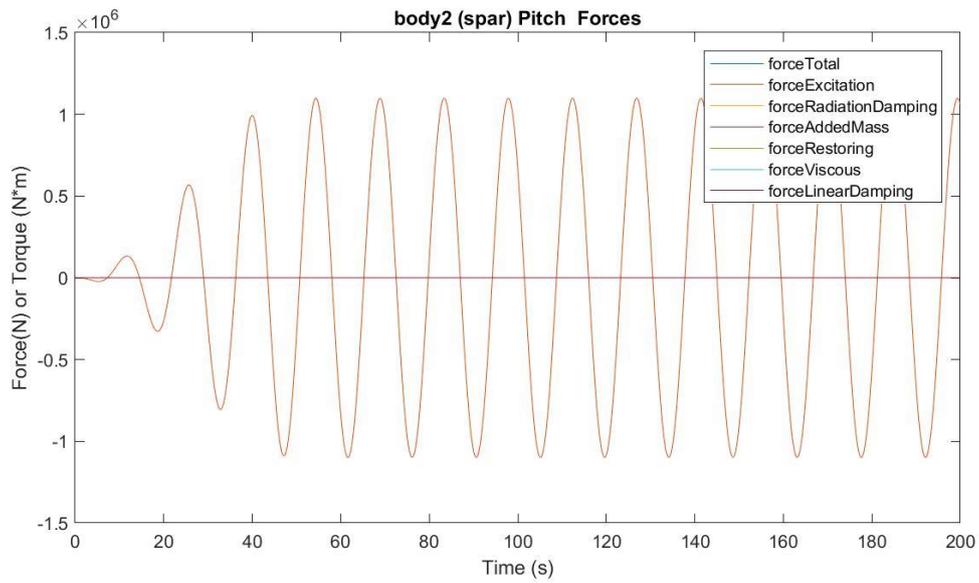
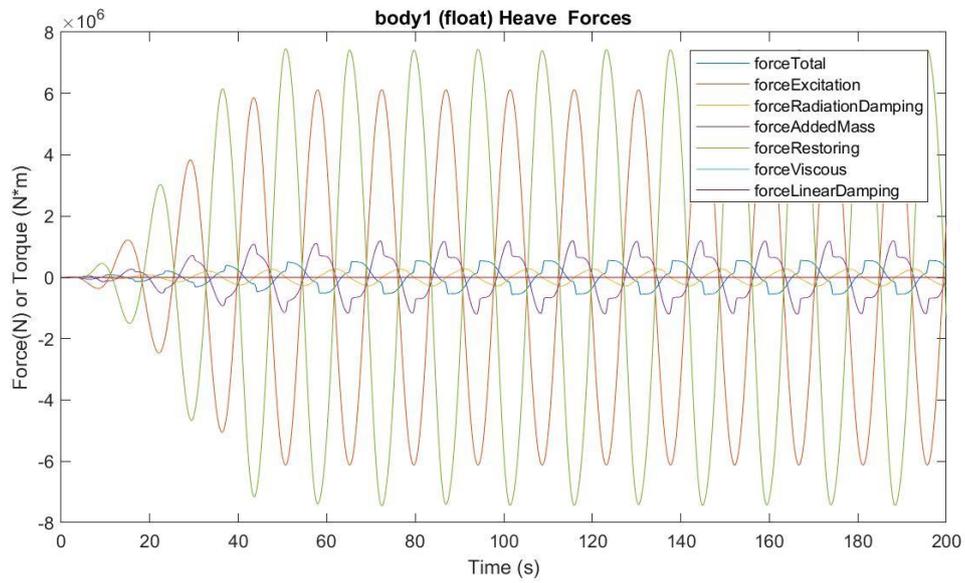
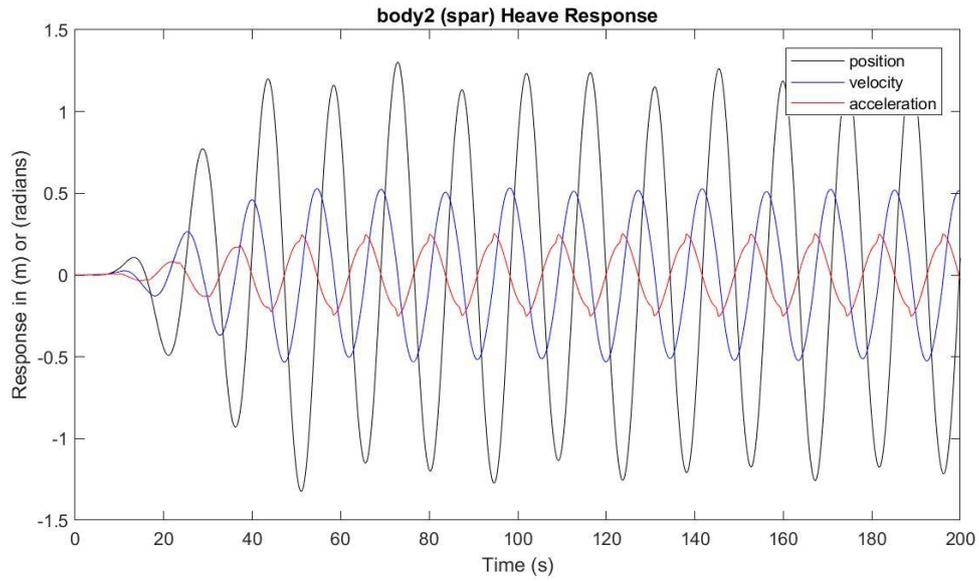
Presión media del acumulador de alta presión: 23.8458 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.9003 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.6599 m, 1.1992 m/s y 0.6026 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.3023 m, 0.5322 m/s y 0.2539 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

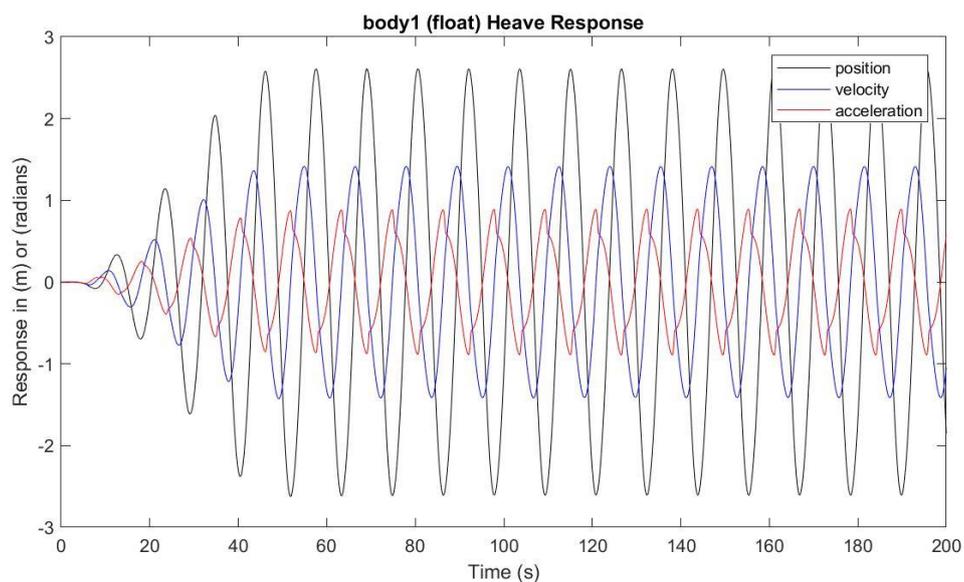
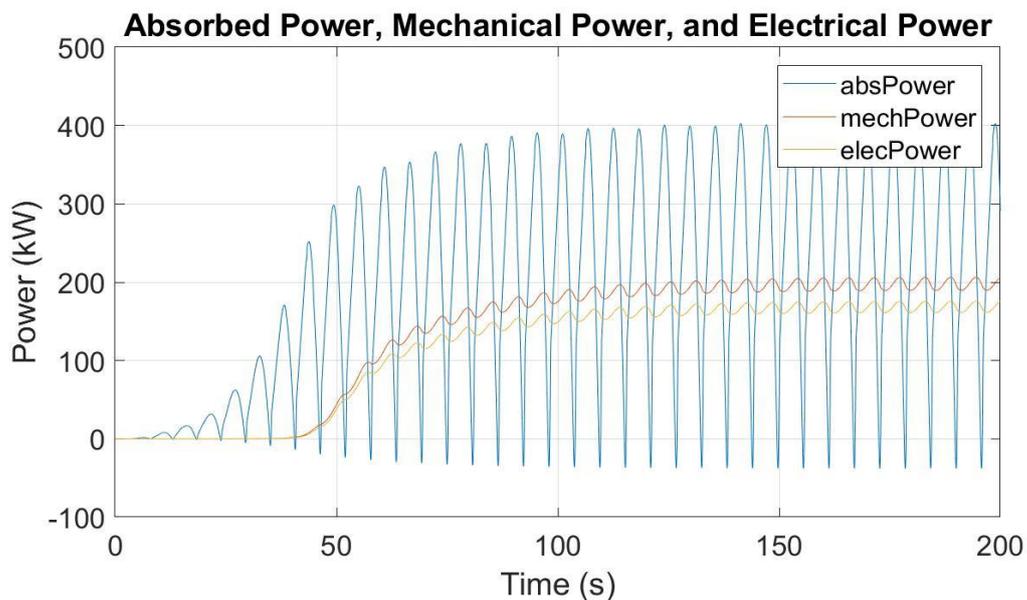
Potencia eléctrica media: 71.1140 kW

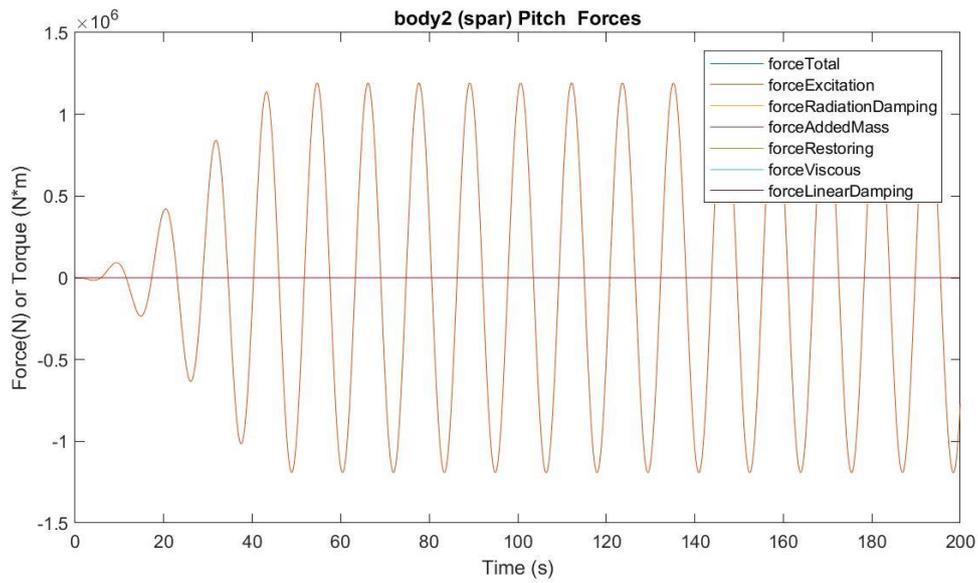
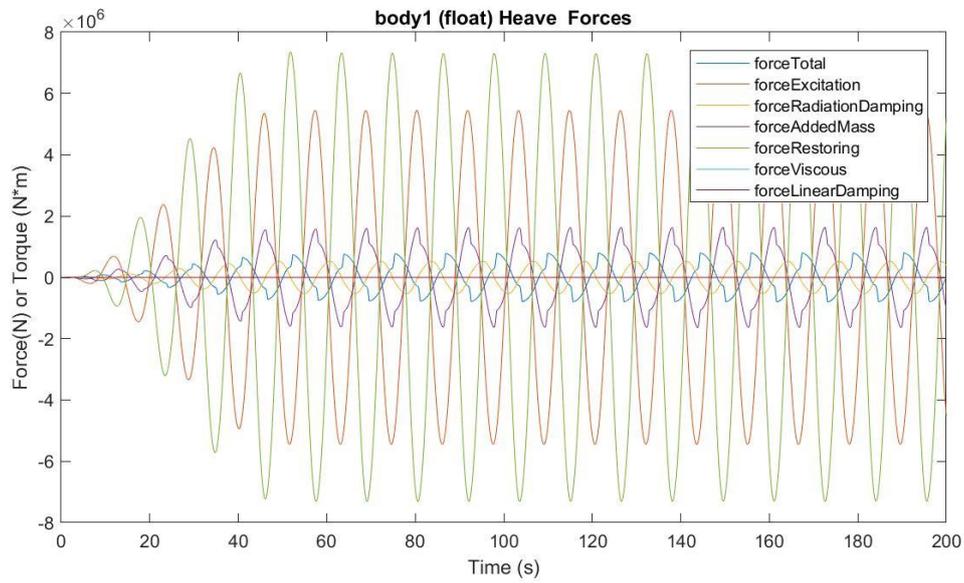
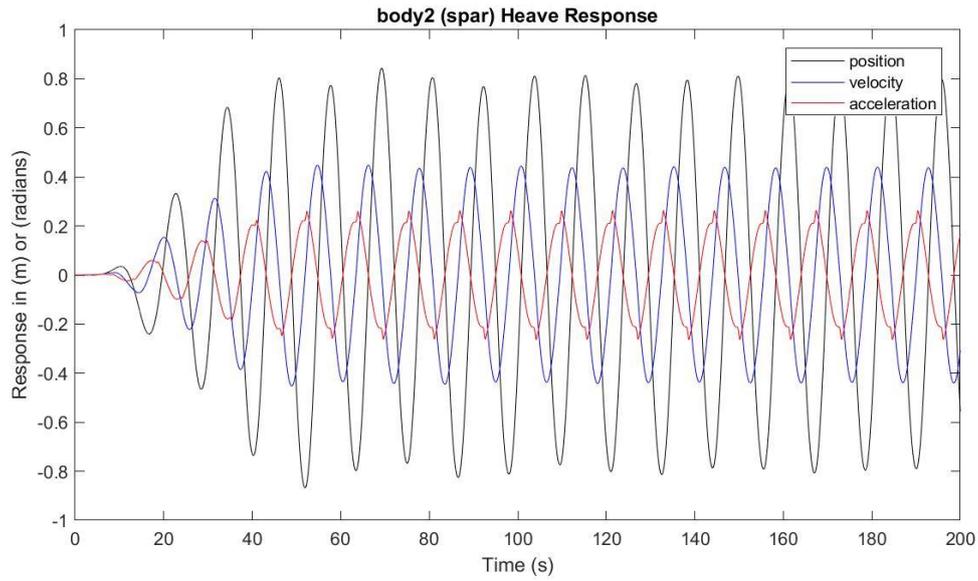
Presión media del acumulador de alta presión: 23.6381 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.1871 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.6412 m, 1.1702 m/s y 0.5396 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.4338m, 0.5481 m/s y 0.2439 m/s²





$H_s = 5.25 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

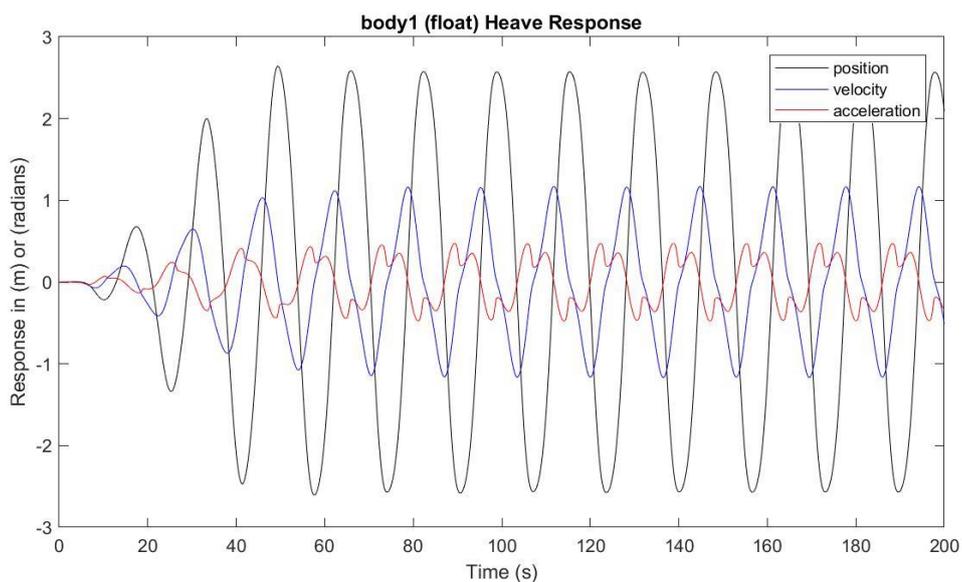
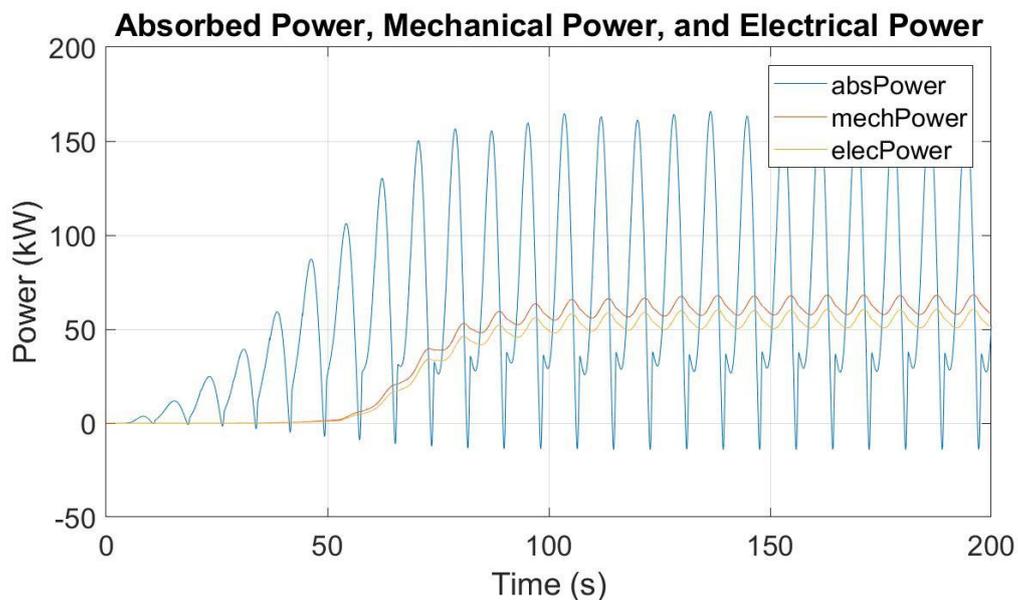
Potencia eléctrica media: 55.2086 kW

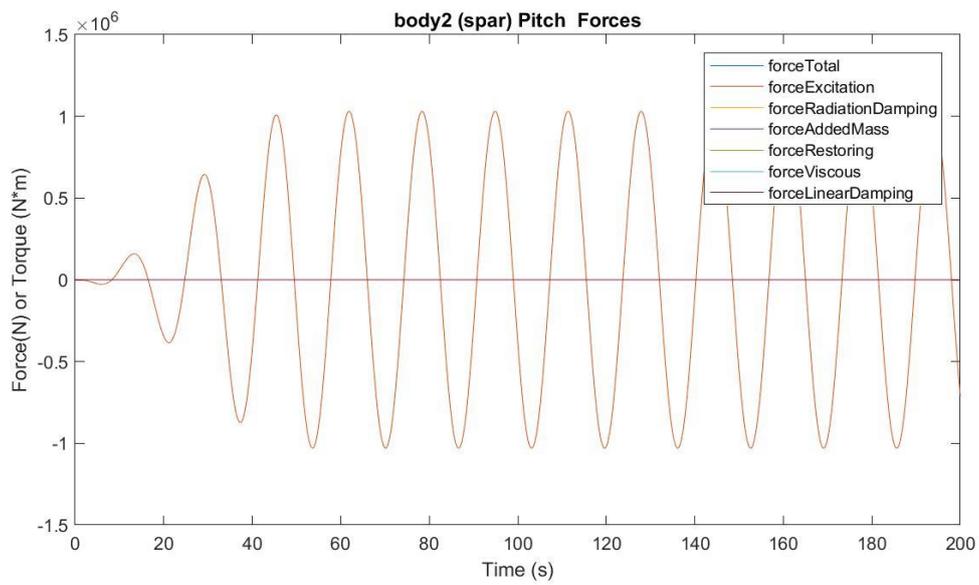
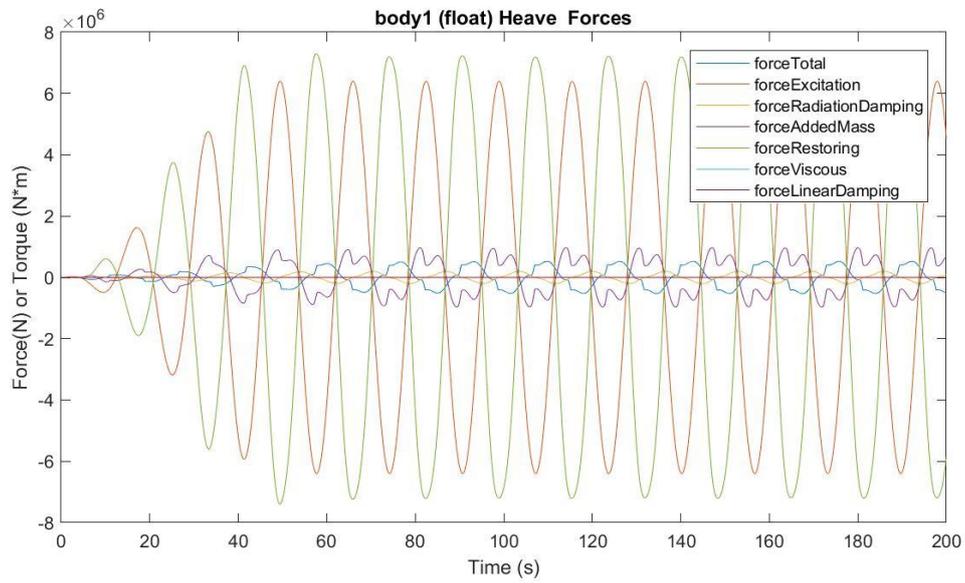
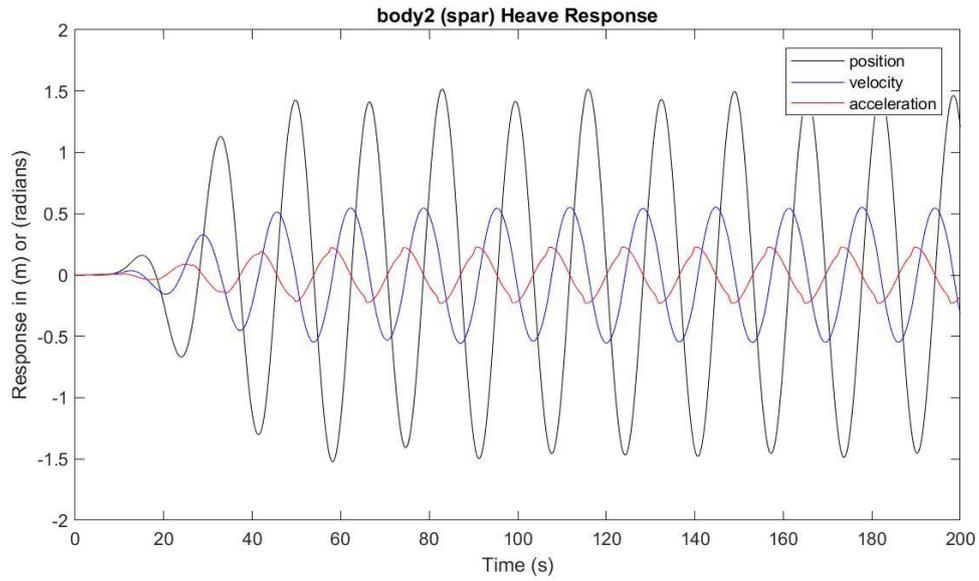
Presión media del acumulador de alta presión: 23.4316 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.4834 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.6406 m, 1.1695 m/s y 0.4740 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.5160 m, 0.5535 m/s y 0.2286 m/s²





$H_s = 5.75 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

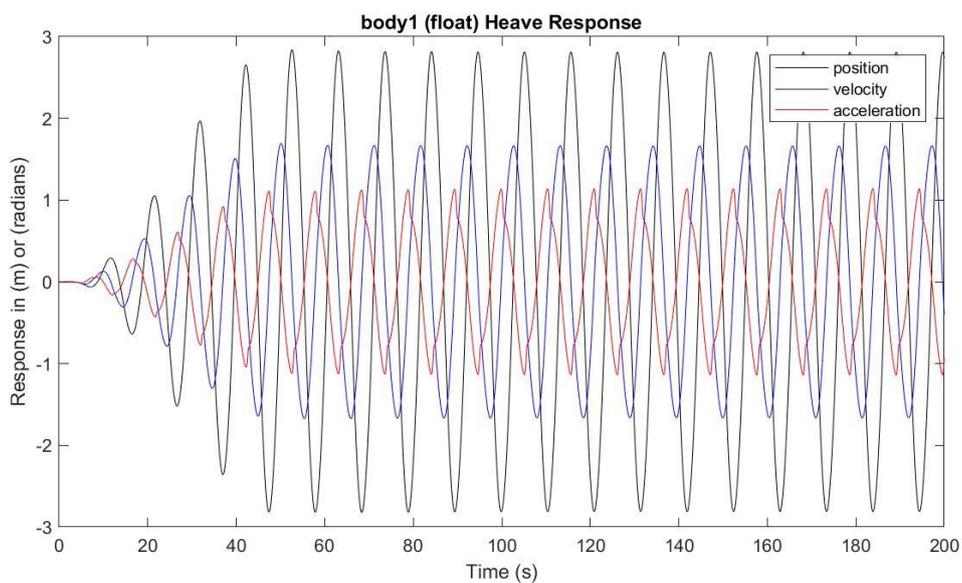
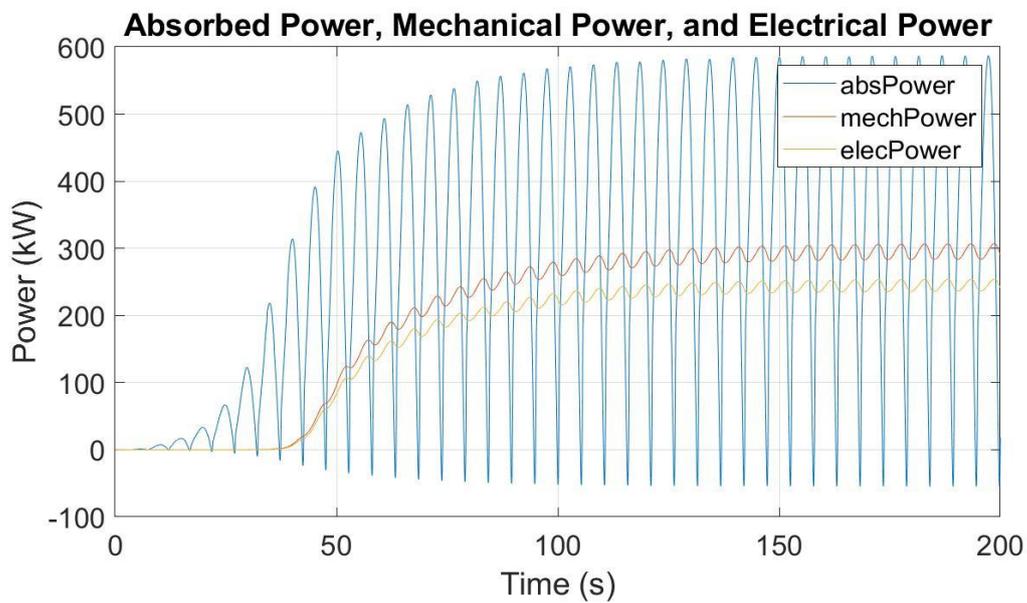
Potencia eléctrica media: 244.7860 kW

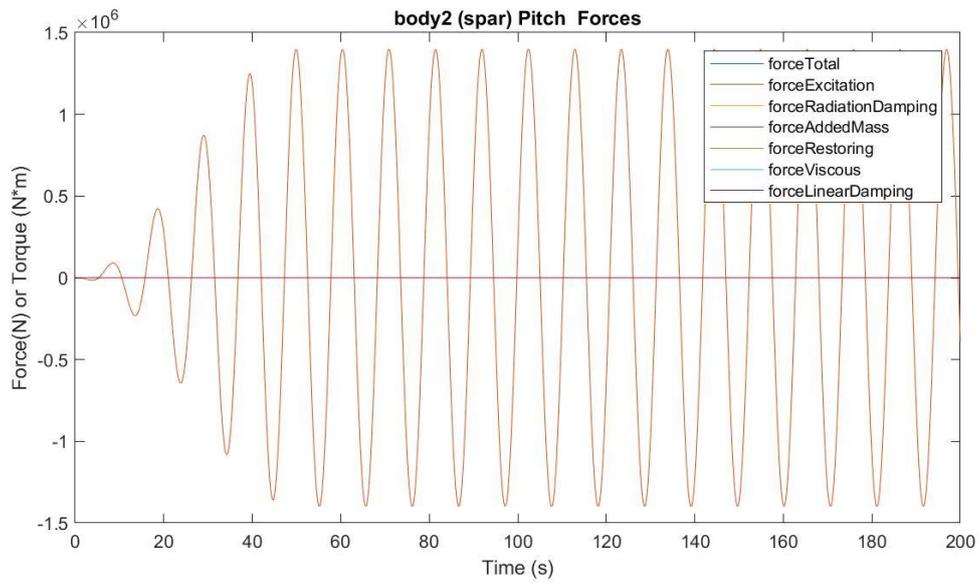
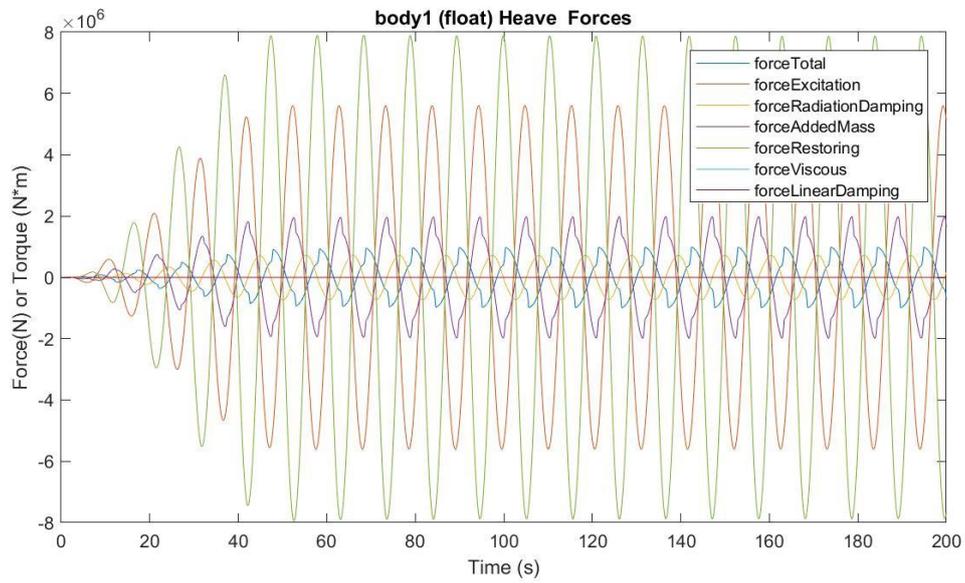
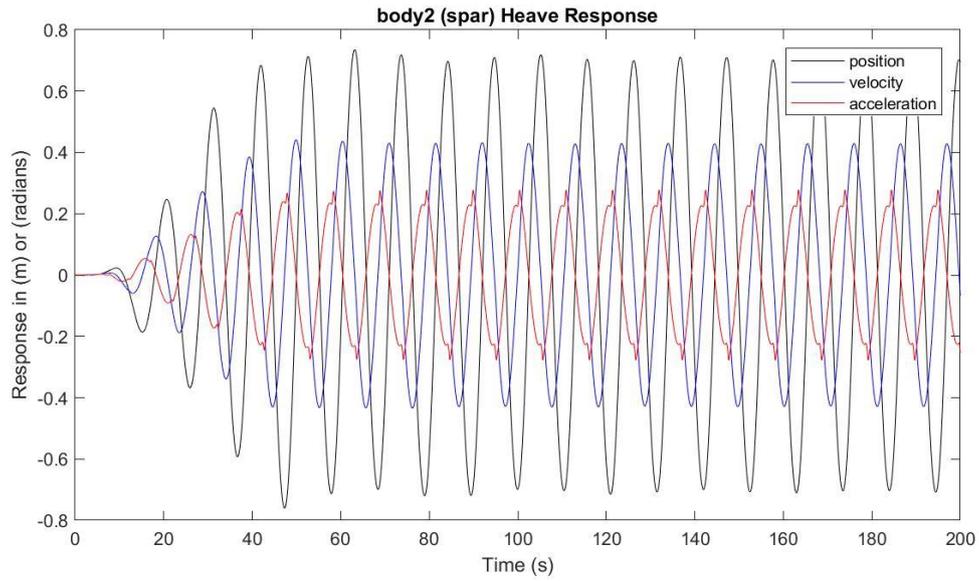
Presión media del acumulador de alta presión: 25.4988 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 14.9689 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.8393 m, 1.6943 m/s y 1.1400 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7353 m, 0.4412 m/s y 0.2785 m/s²





$H_s = 5.75 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

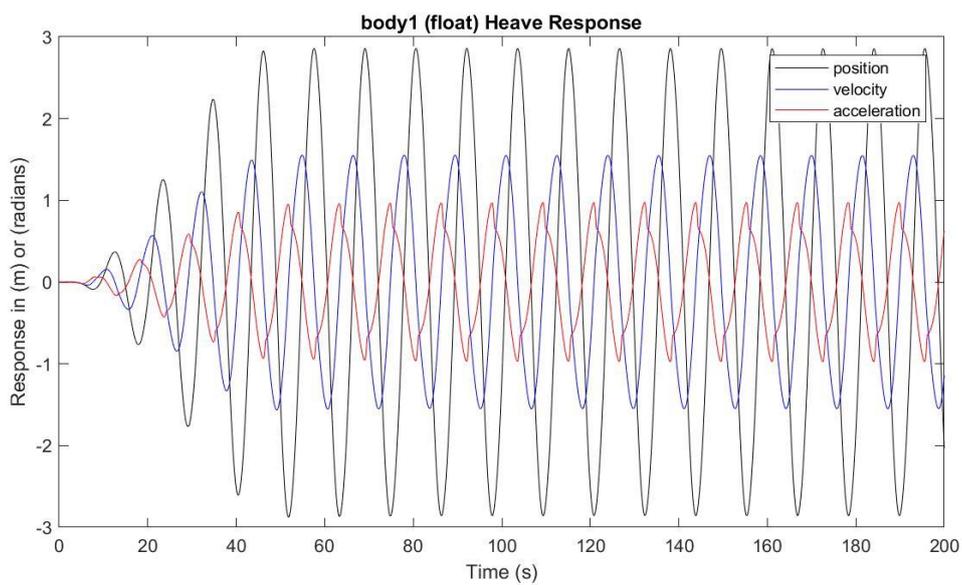
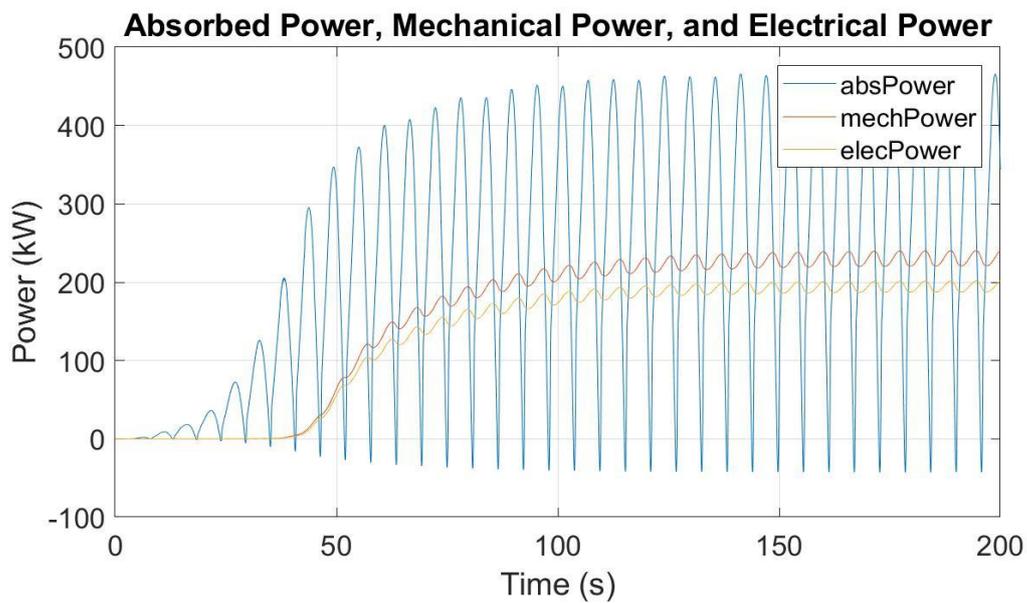
Potencia eléctrica media: 193.8086 kW

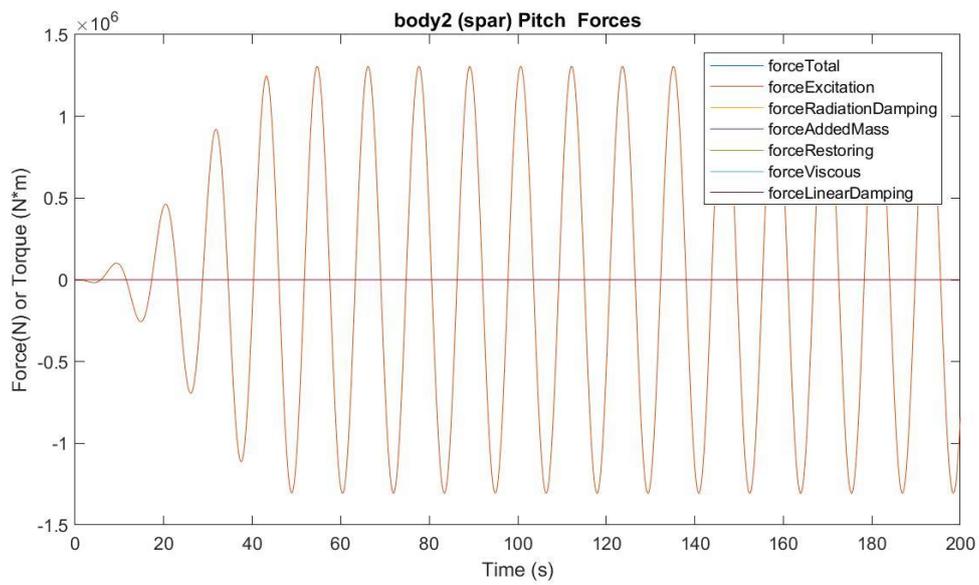
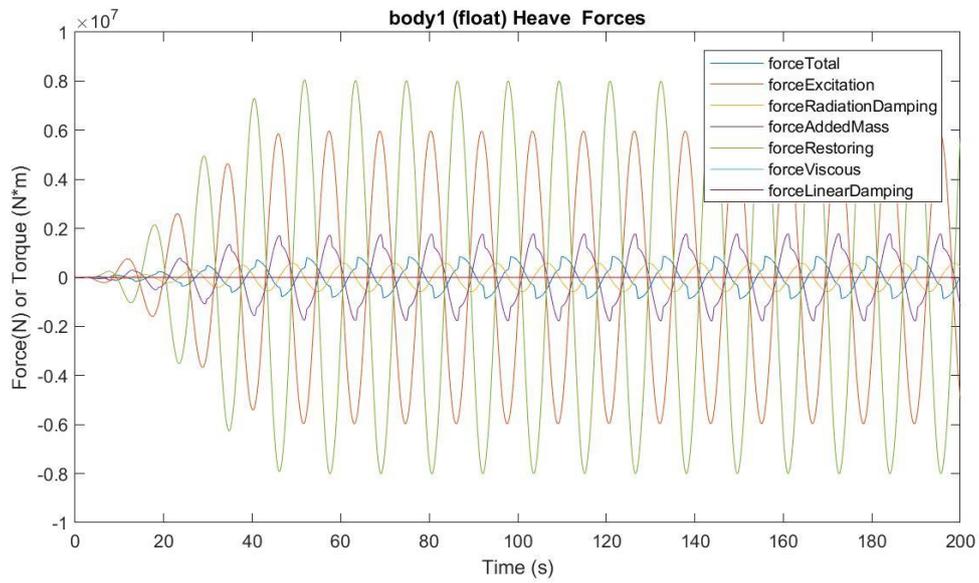
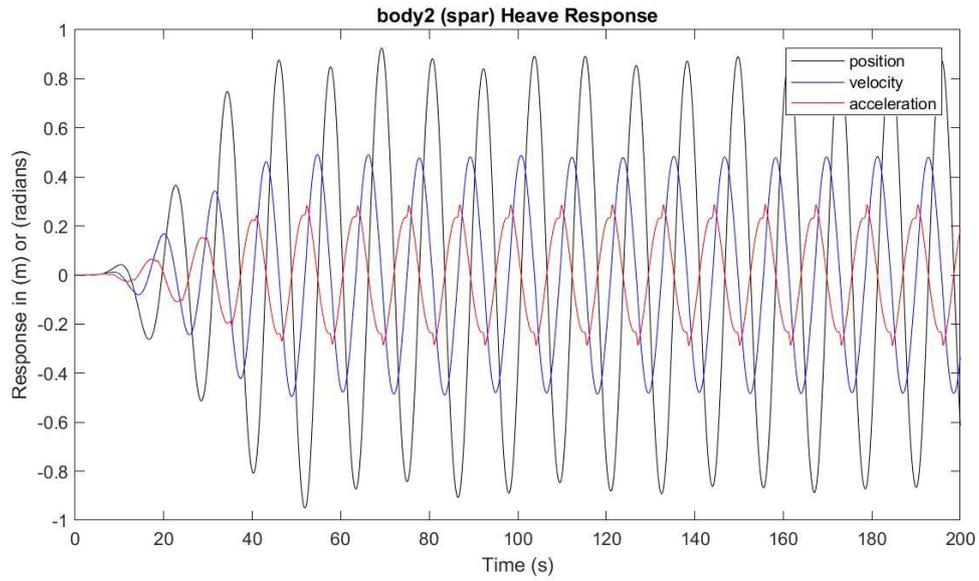
Presión media del acumulador de alta presión: 25.0037 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.4889 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.8592 m, 1.4517 m/s y 0.9747 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.9259 m, 0.4913 m/s y 0.2870 m/s²





$H_s = 5.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

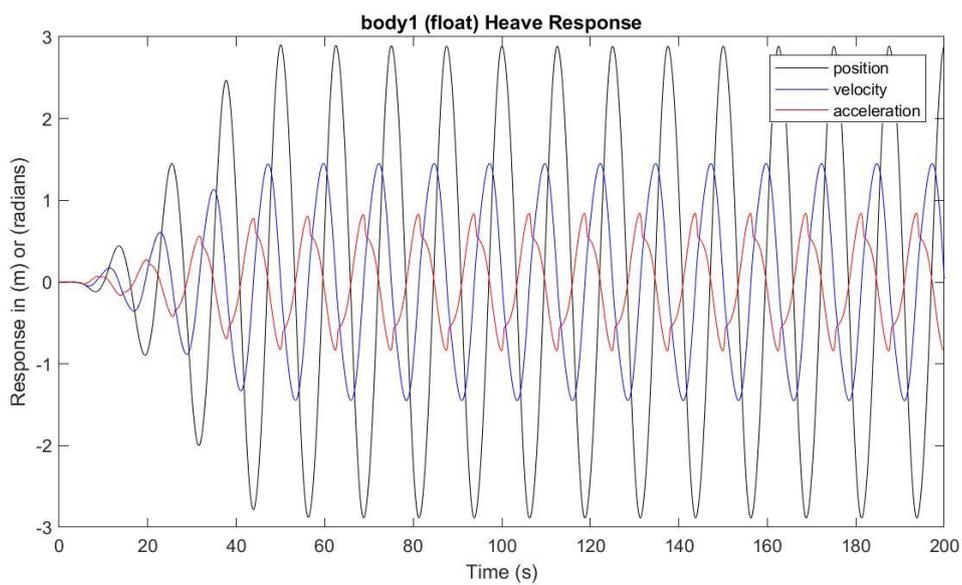
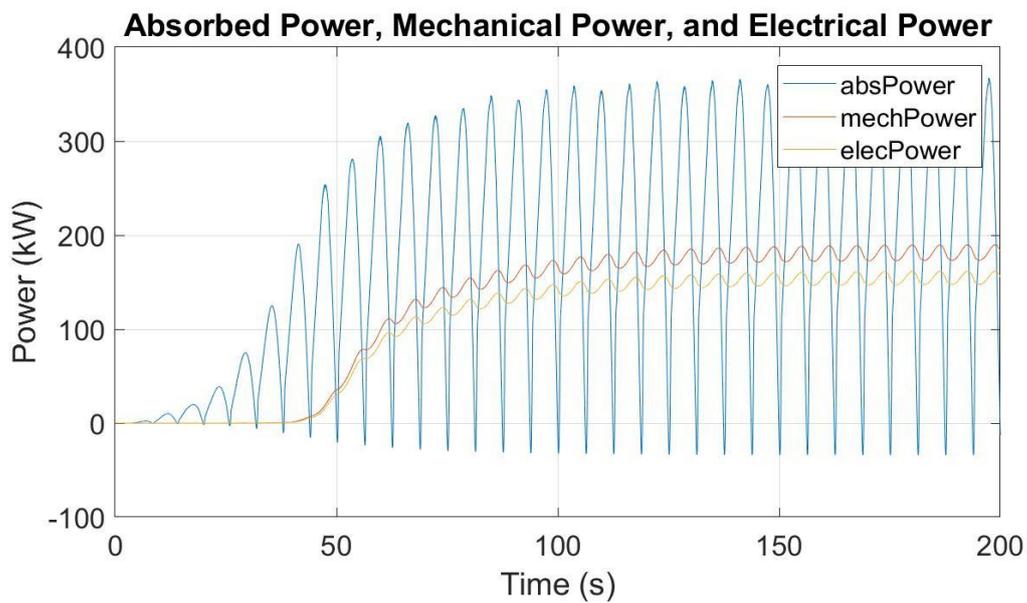
Potencia eléctrica media: 154.1849 kW

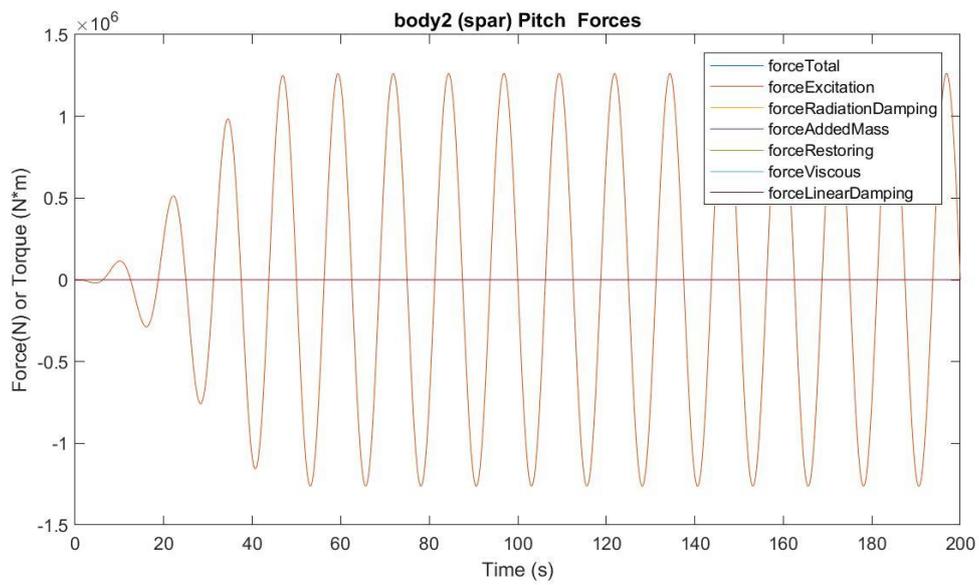
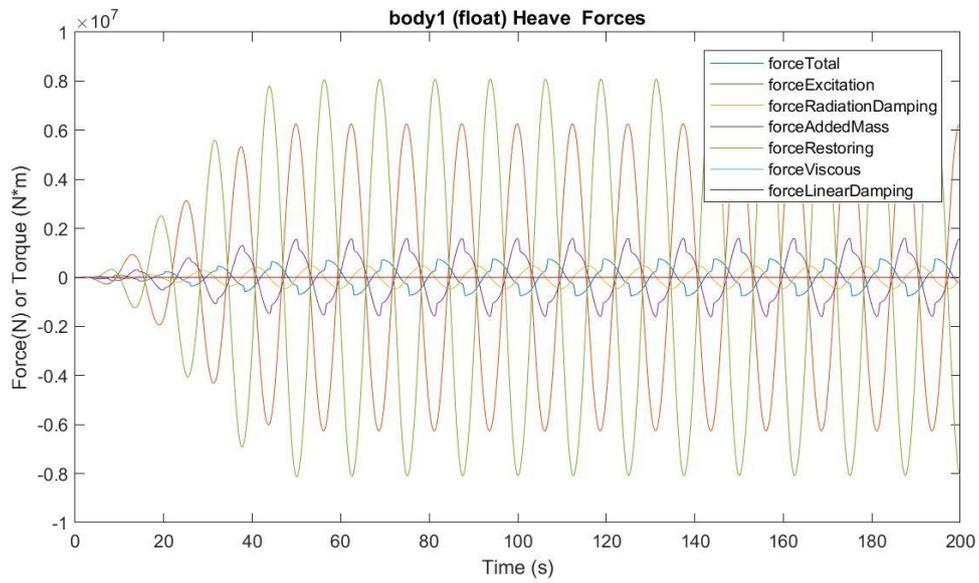
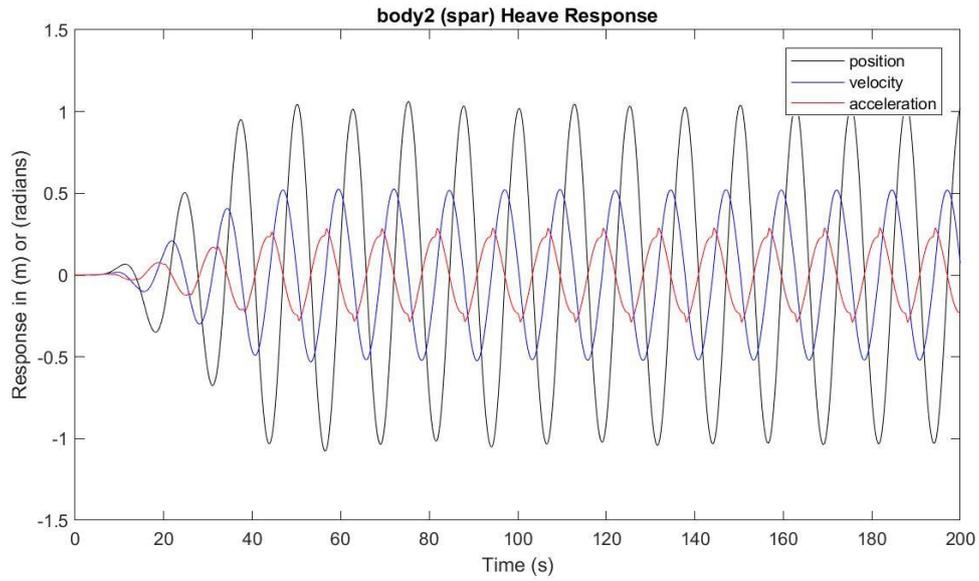
Presión media del acumulador de alta presión: 24.6063 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.9407 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.9025 m, 1.4517 m/s y 0.8427 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.0612 m, 0.5261 m/s y 0.2886 m/s²





$H_s = 5.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

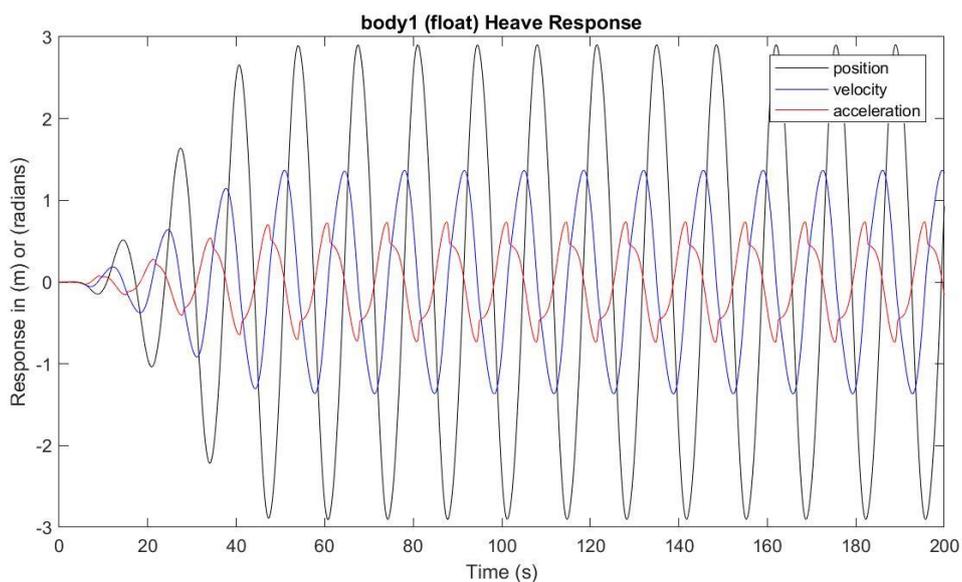
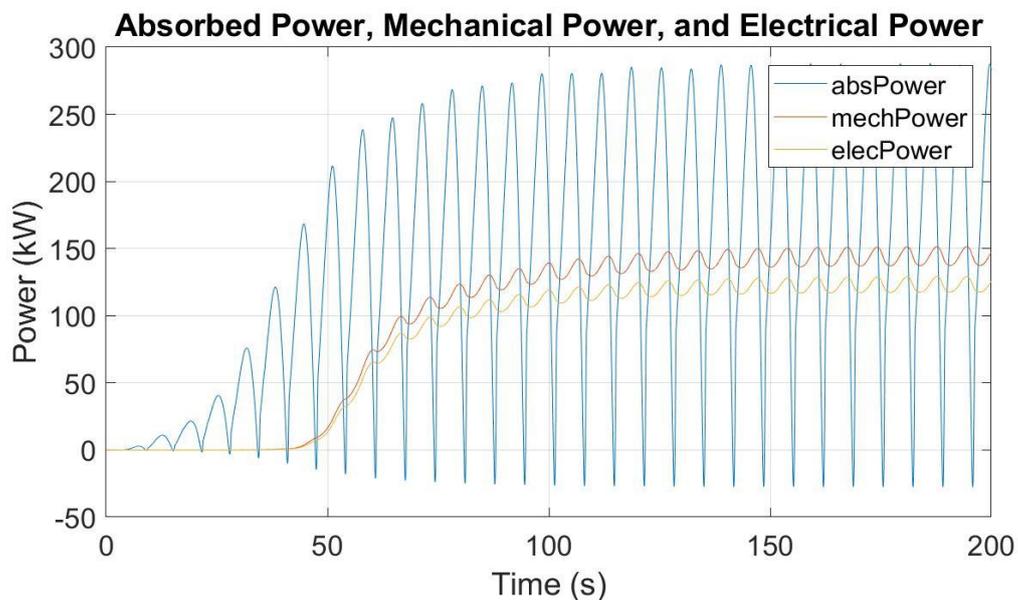
Potencia eléctrica media: 122.5171 kW

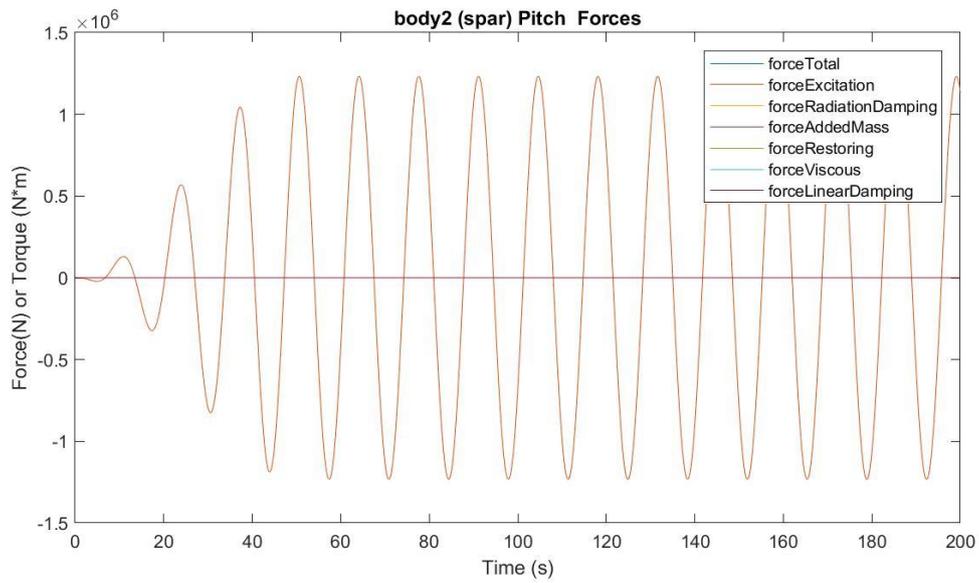
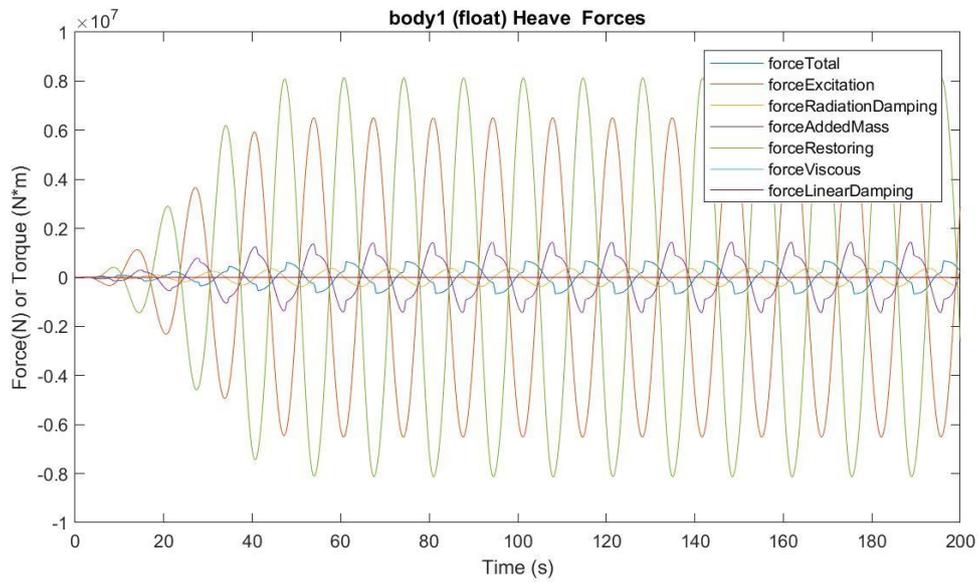
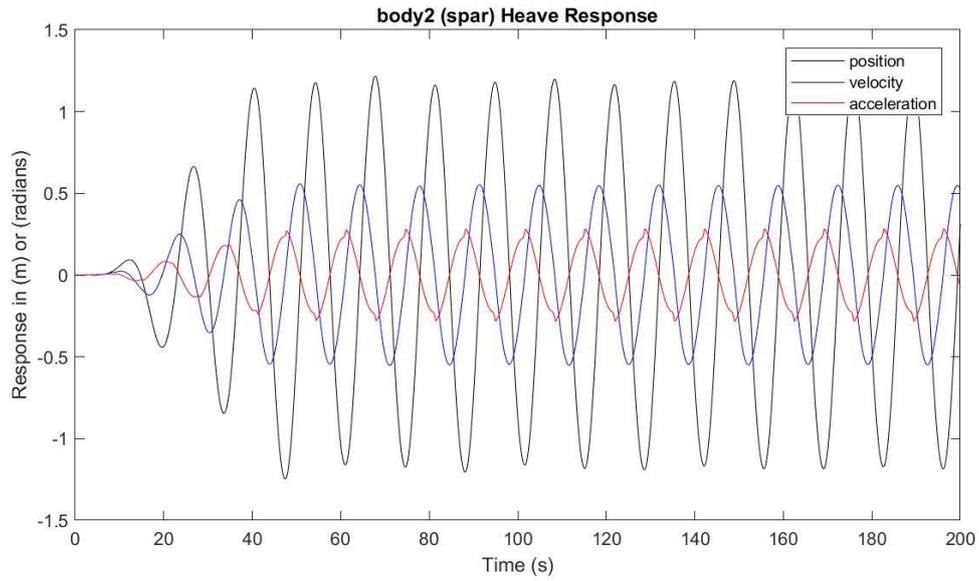
Presión media del acumulador de alta presión: 24.2757 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.3424 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.9032 m, 1.3677 m/s y 0.7375 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.2173 m, 0.5579 m/s y 0.2837 m/s²





$H_s = 5.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

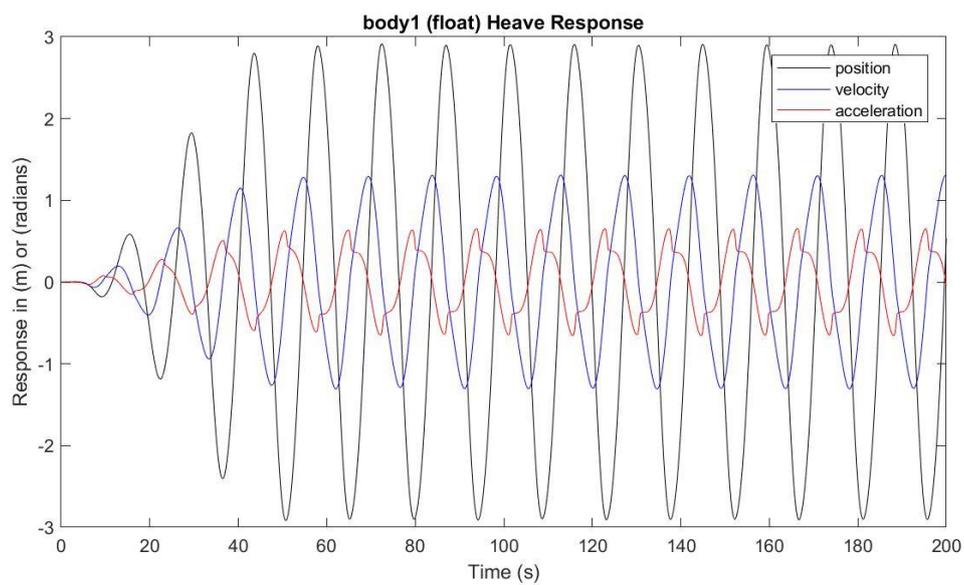
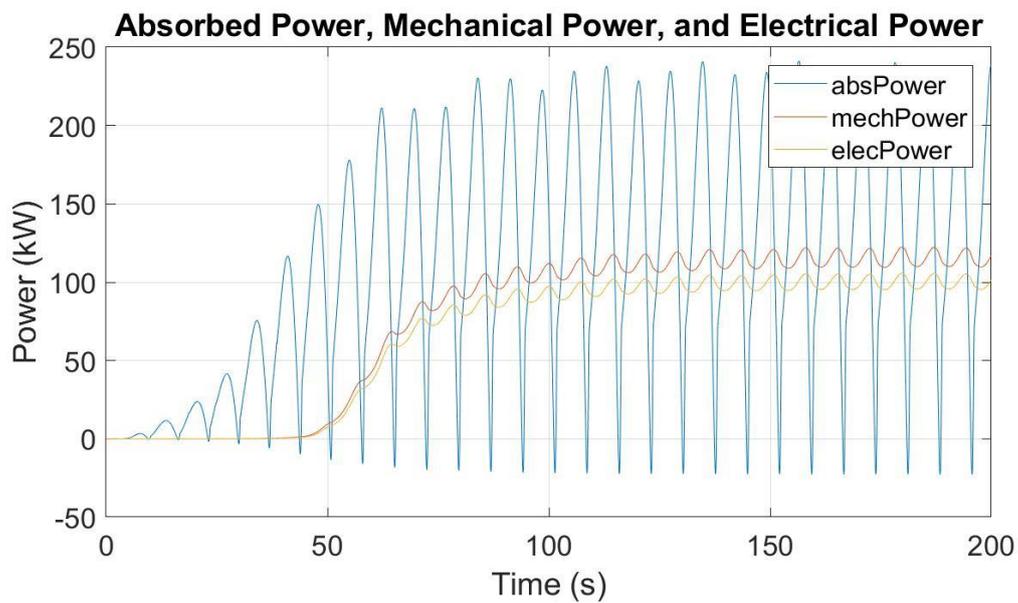
Potencia eléctrica media: 99.5000 kW

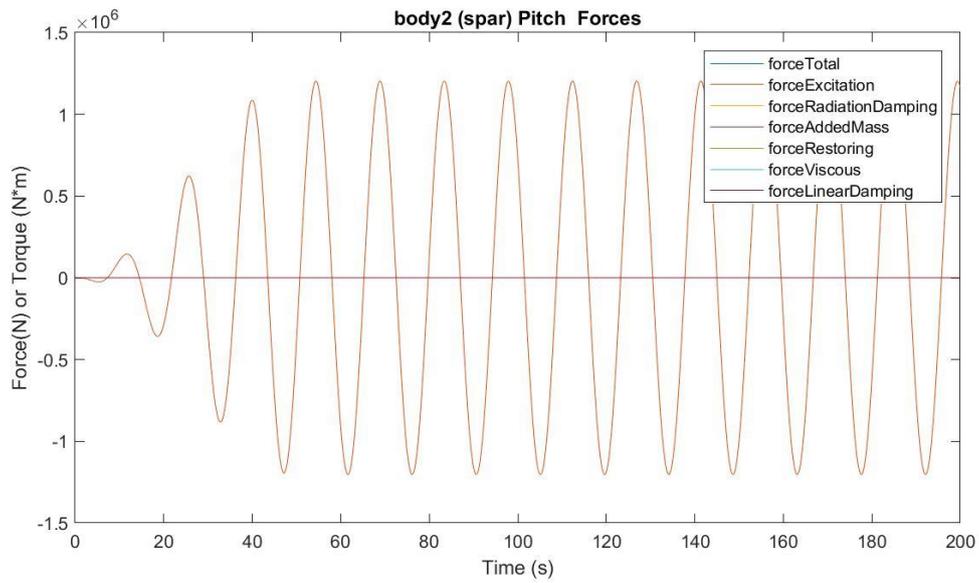
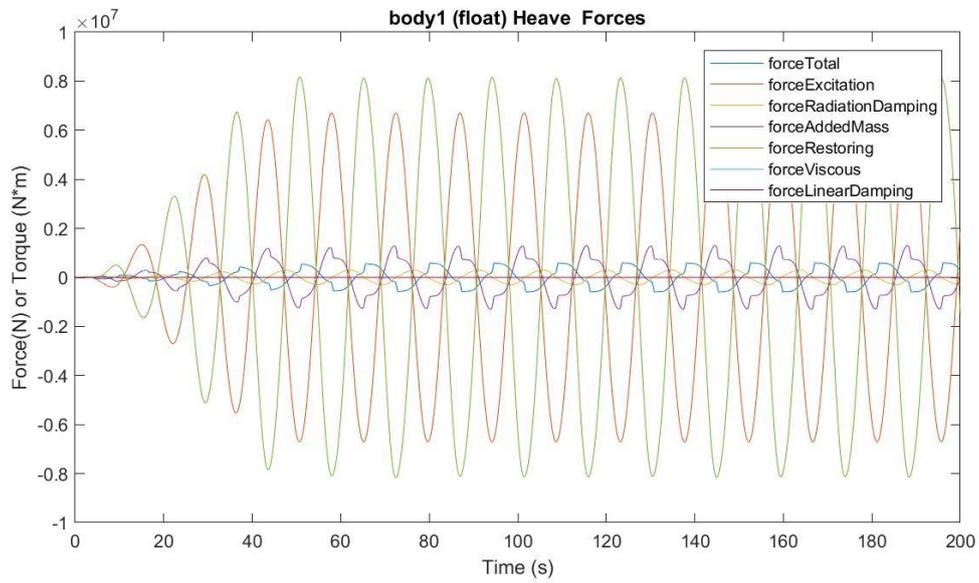
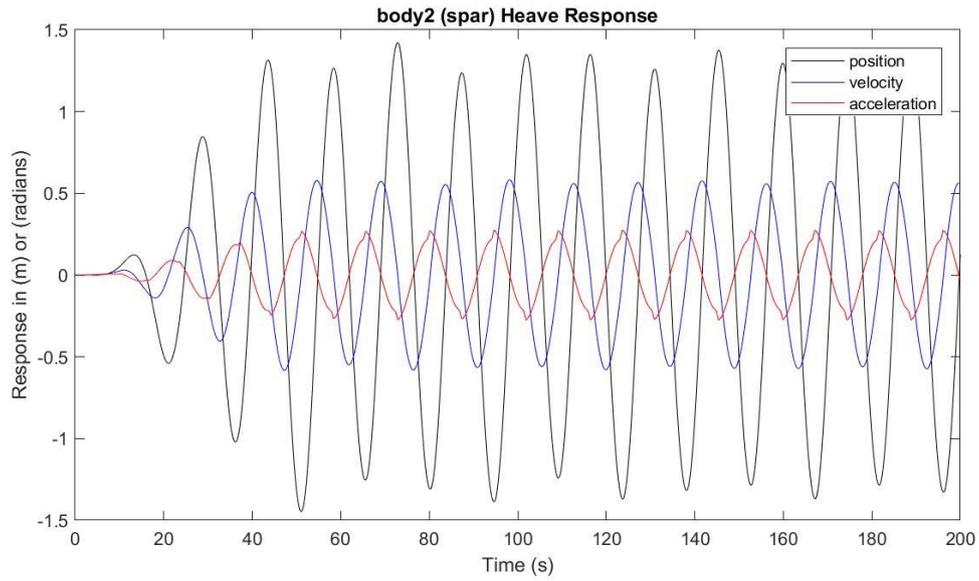
Presión media del acumulador de alta presión: 24.0005 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.6939 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.9138 m, 1.3082 m/s y 0.6545 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.4217 m, 0.5816 m/s y 0.2760 m/s²





$H_s = 5.75 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

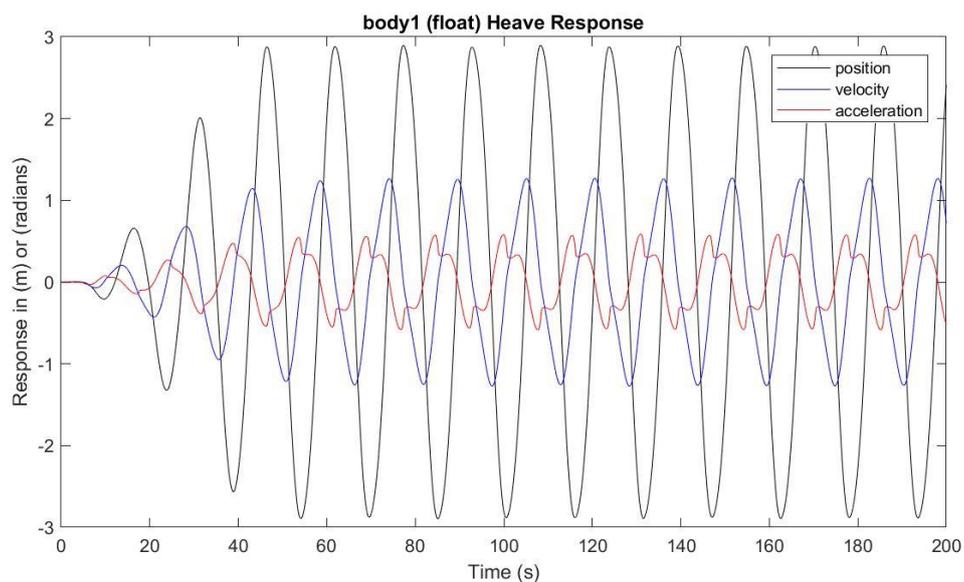
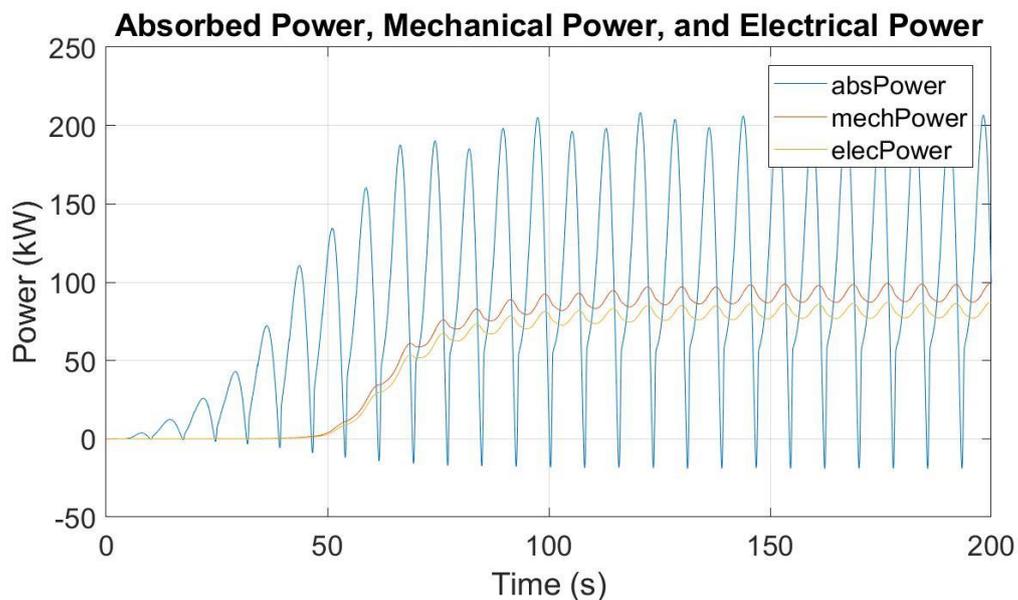
Potencia eléctrica media: 81.2927 kW

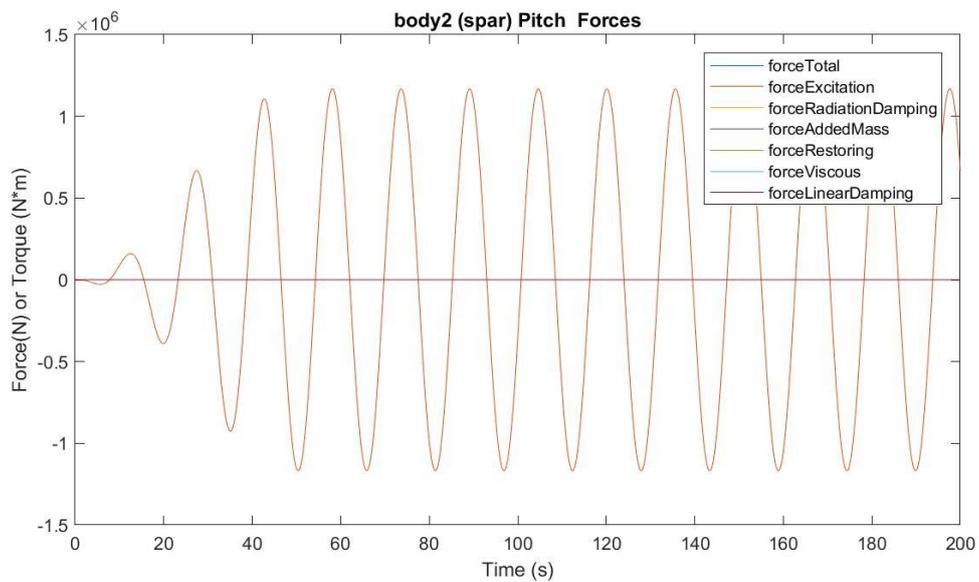
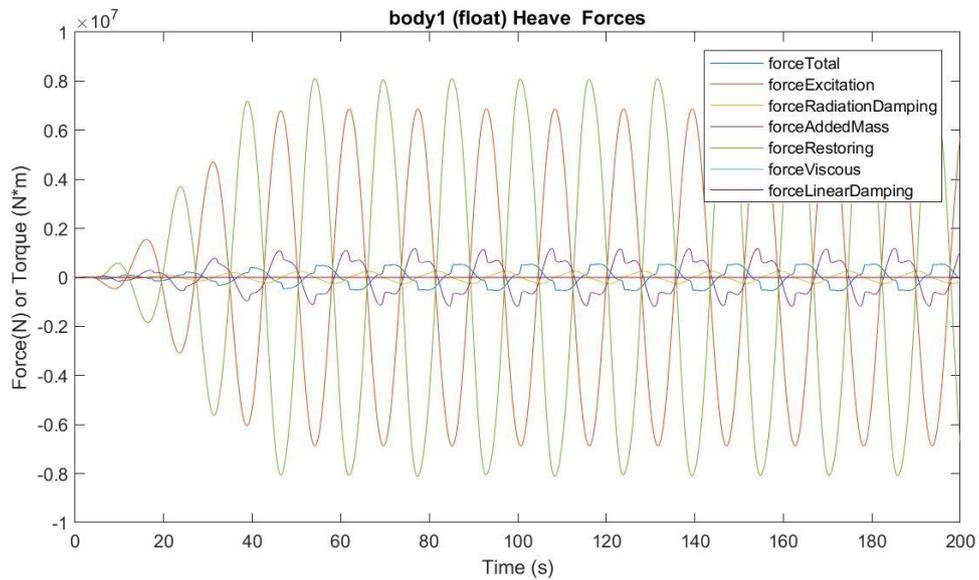
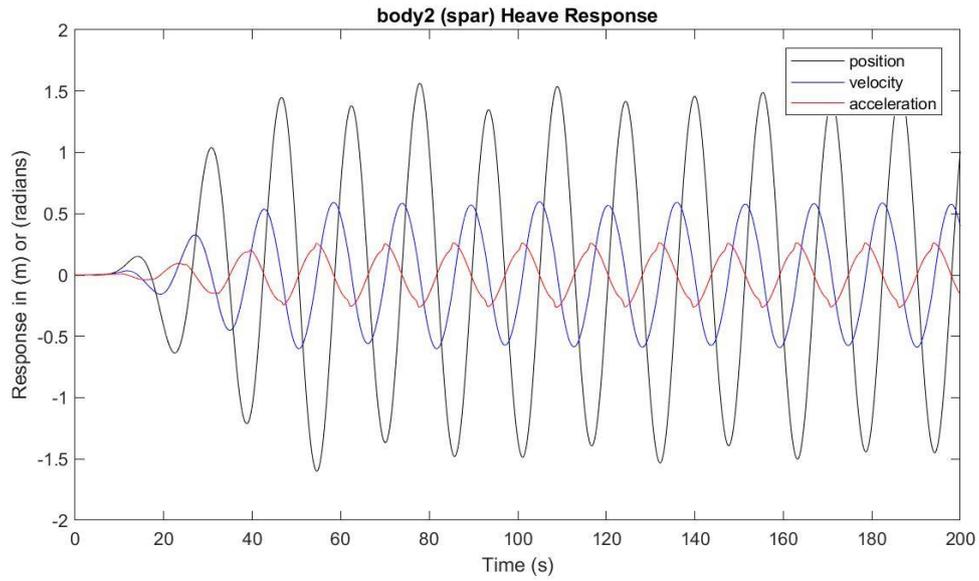
Presión media del acumulador de alta presión: 23.7712 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.0019 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.8958 m, 1.2731 m/s y 0.5858 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.5630 m, 0.5981 m/s y 0.2651 m/s²





$H_s = 5.75 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

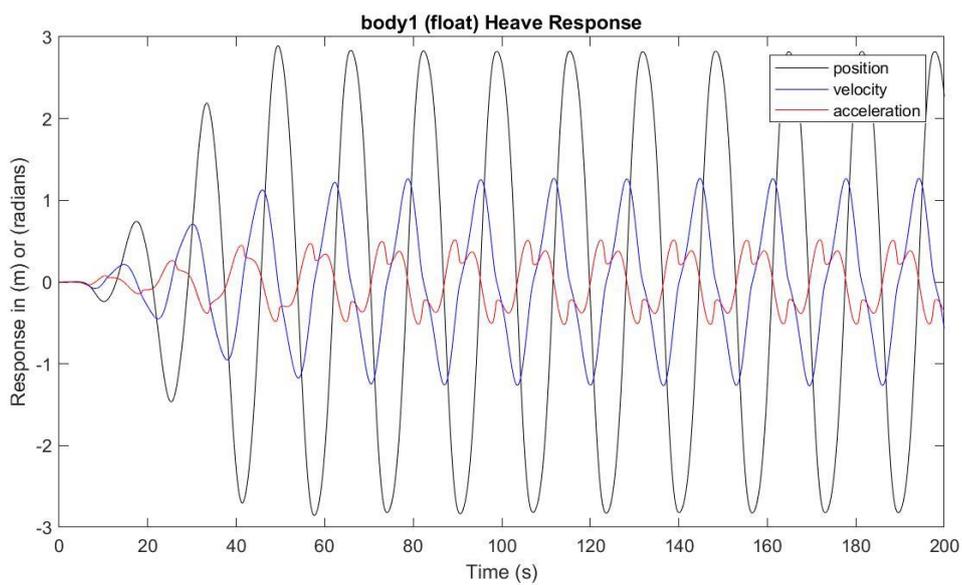
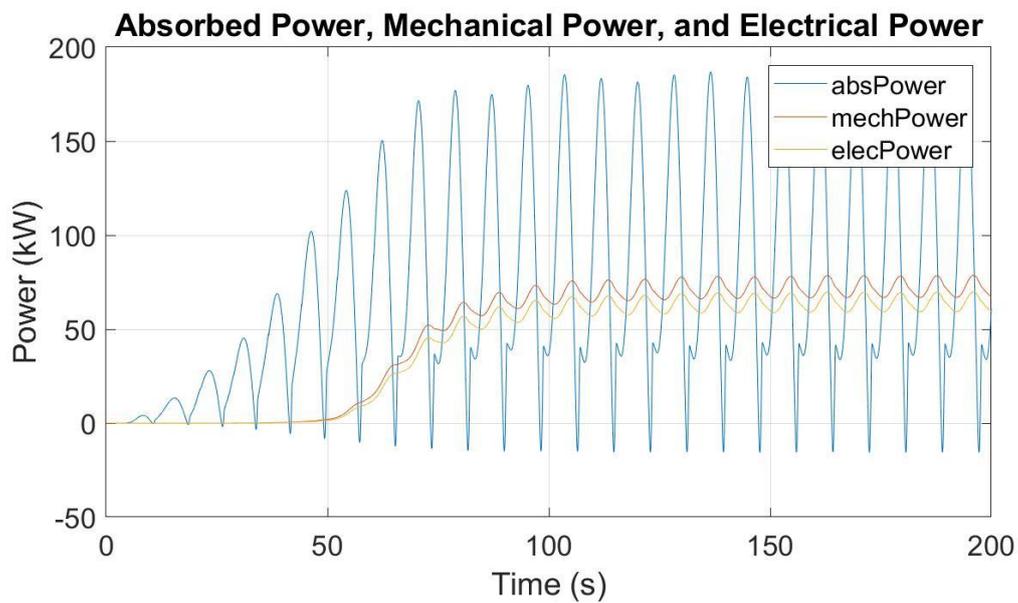
Potencia eléctrica media: 64.2242 kW

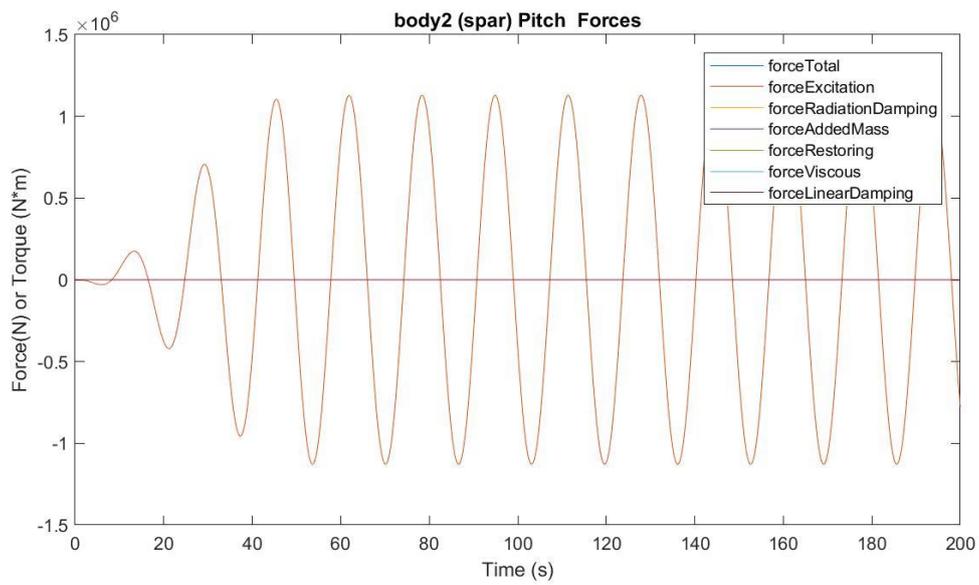
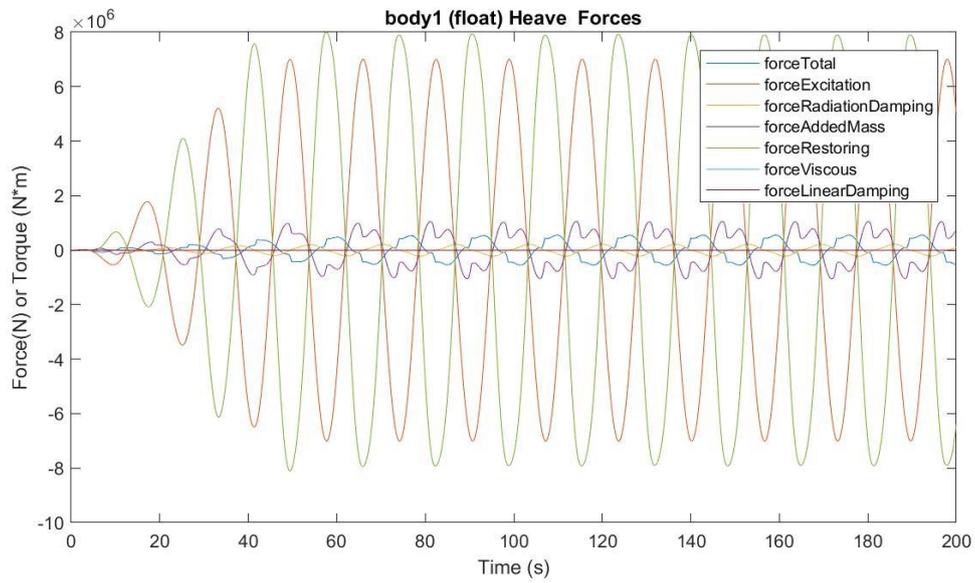
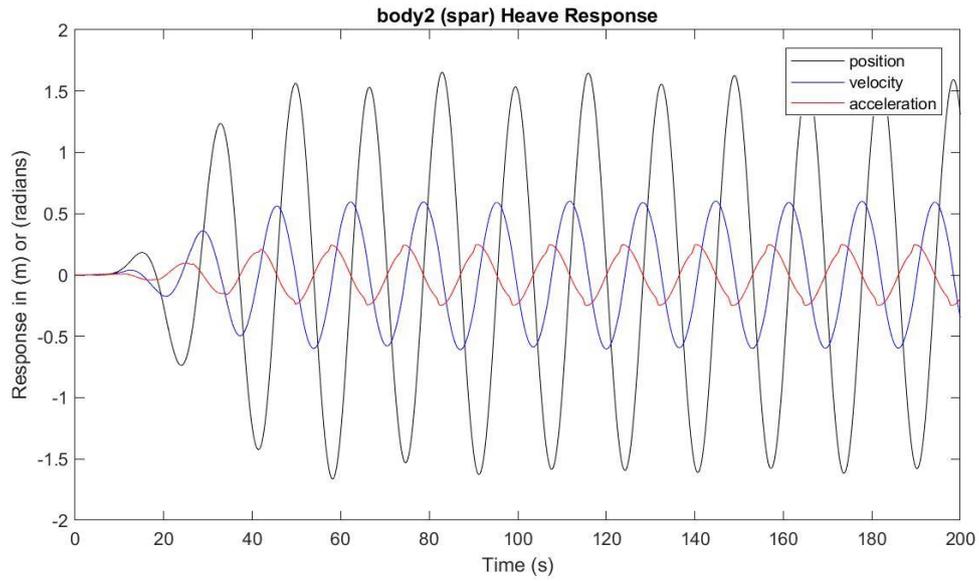
Presión media del acumulador de alta presión: 23.5468 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.3161 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 2.8932 m, 1.2689 m/s y 0.5154 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.6531 m, 0.6028 m/s y 0.2486 m/s²





$H_s = 6.25 \text{ m}$

$T_e = 10.5 \text{ s}$

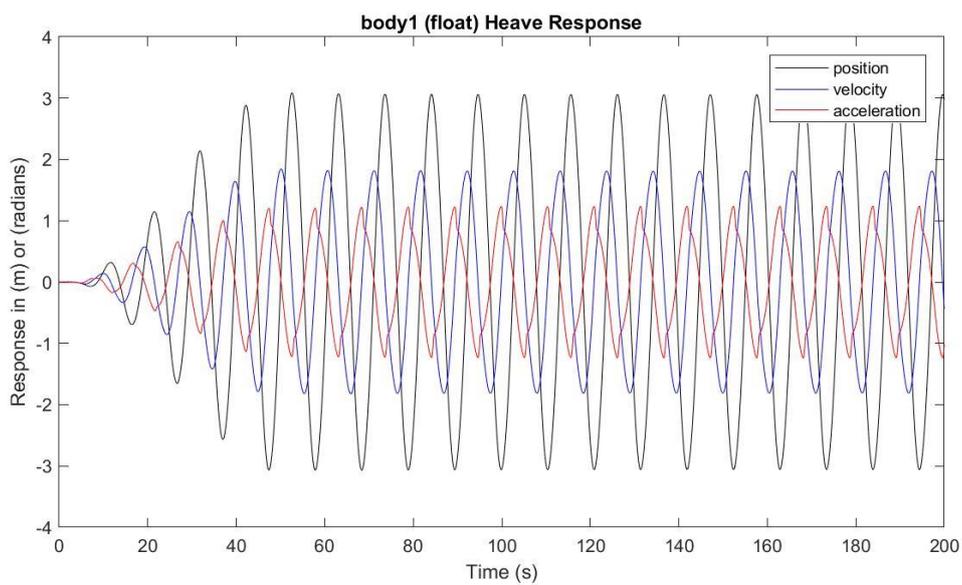
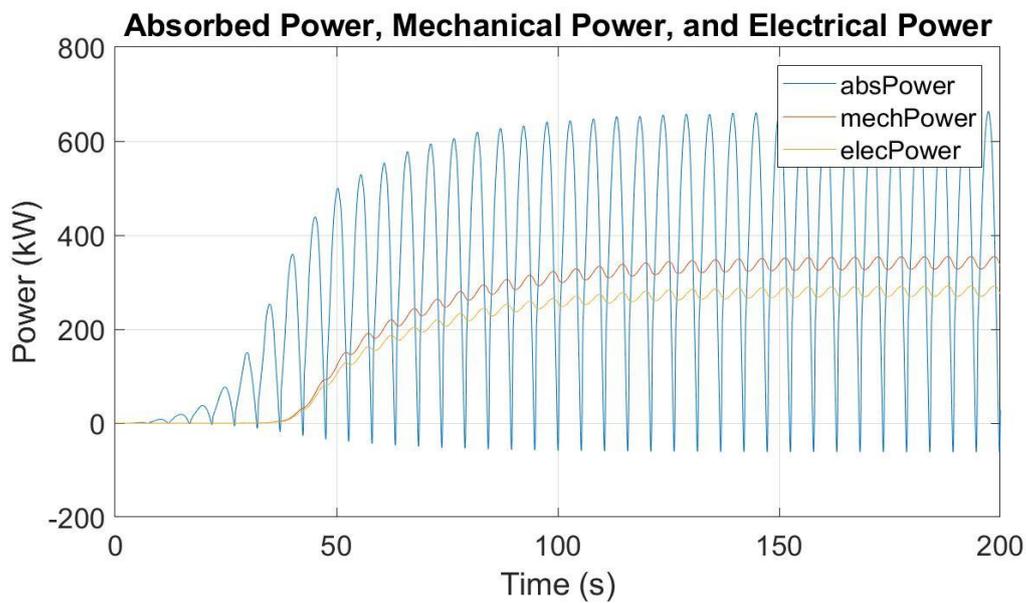
Potencia eléctrica media: 280.2011 kW

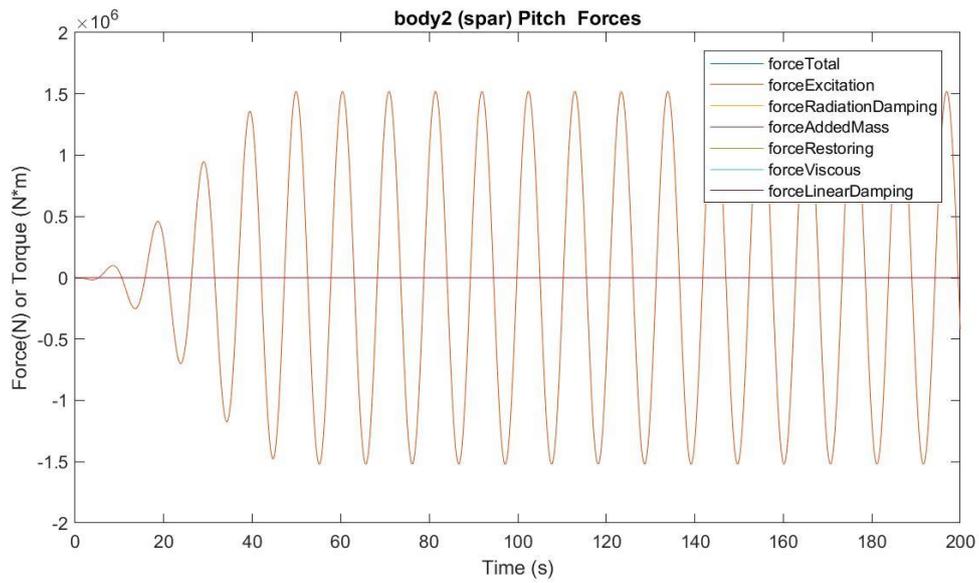
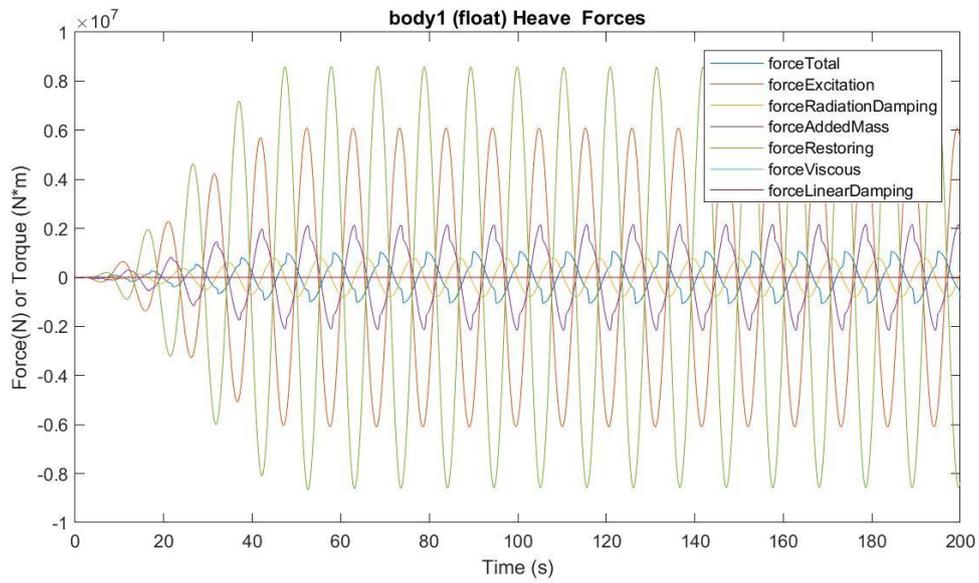
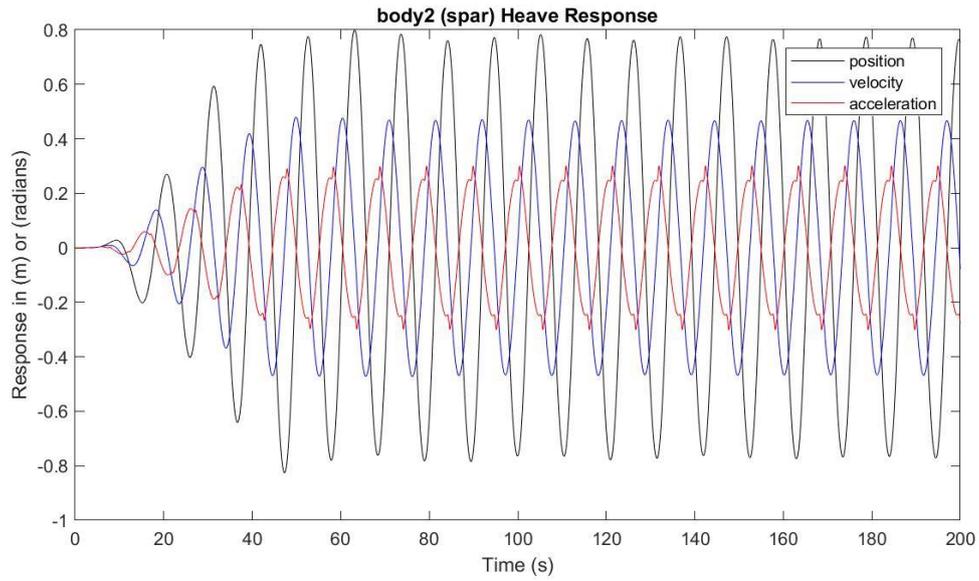
Presión media del acumulador de alta presión: 25.8270 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 14.6476 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.0899 m, 1.8449 m/s y 1.2371 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 0.7988 m, 0.4799 m/s y 0.3018 m/s²





$H_s = 6.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

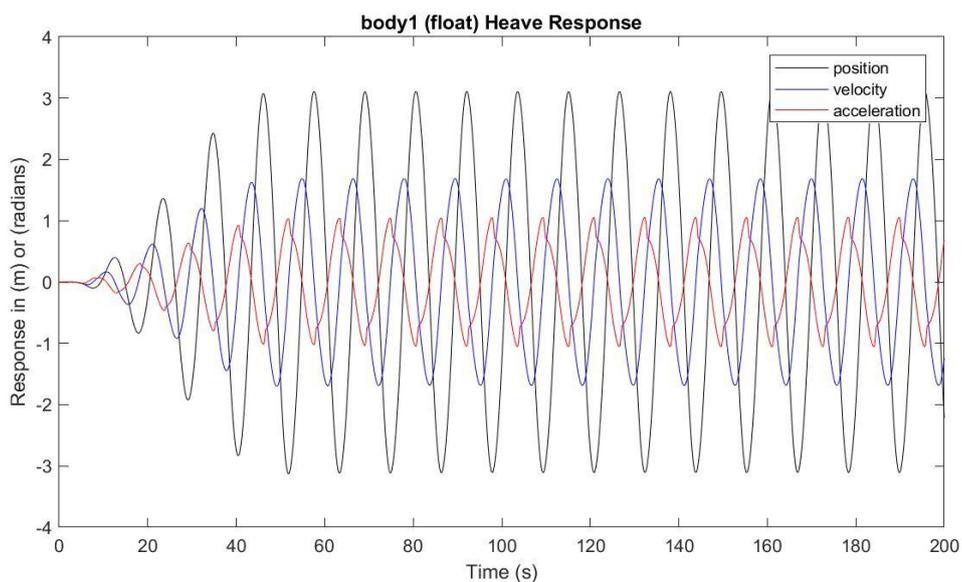
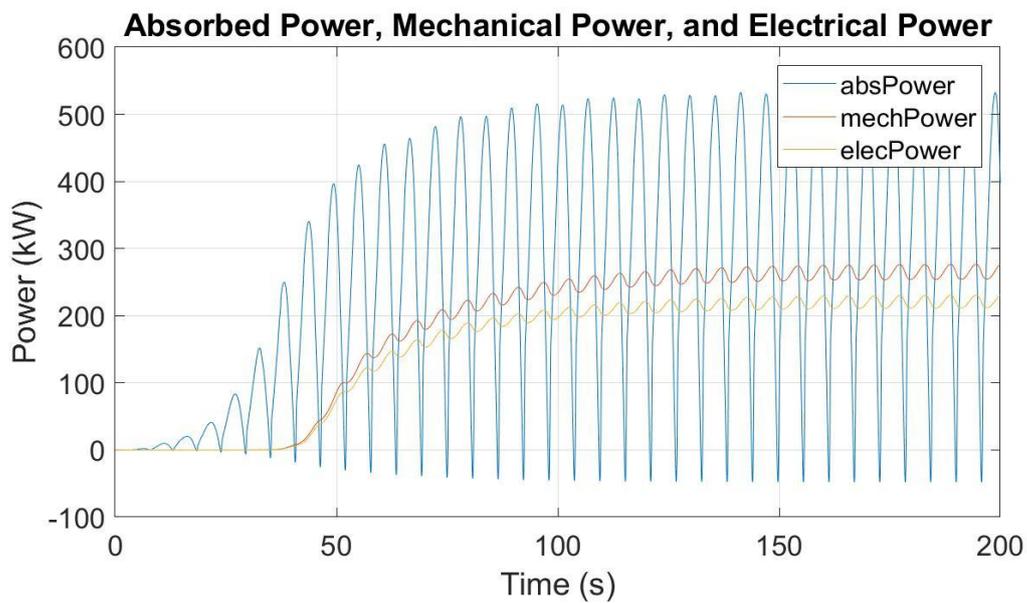
Potencia eléctrica media: 220.0719 kW

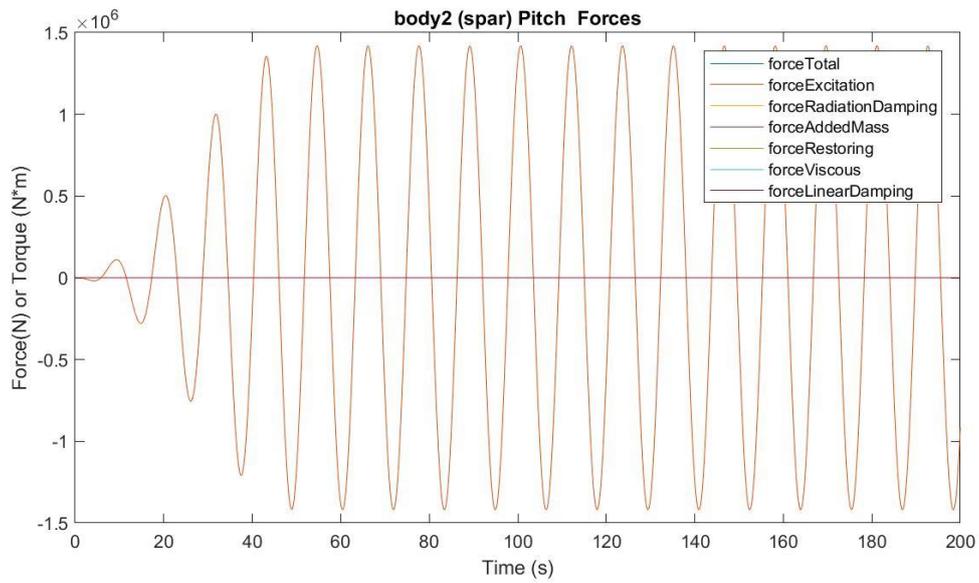
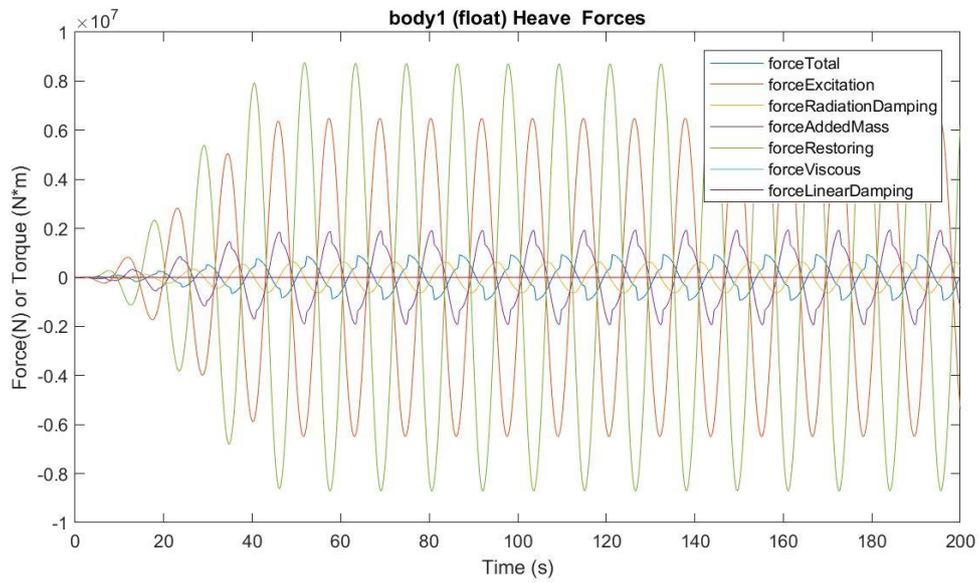
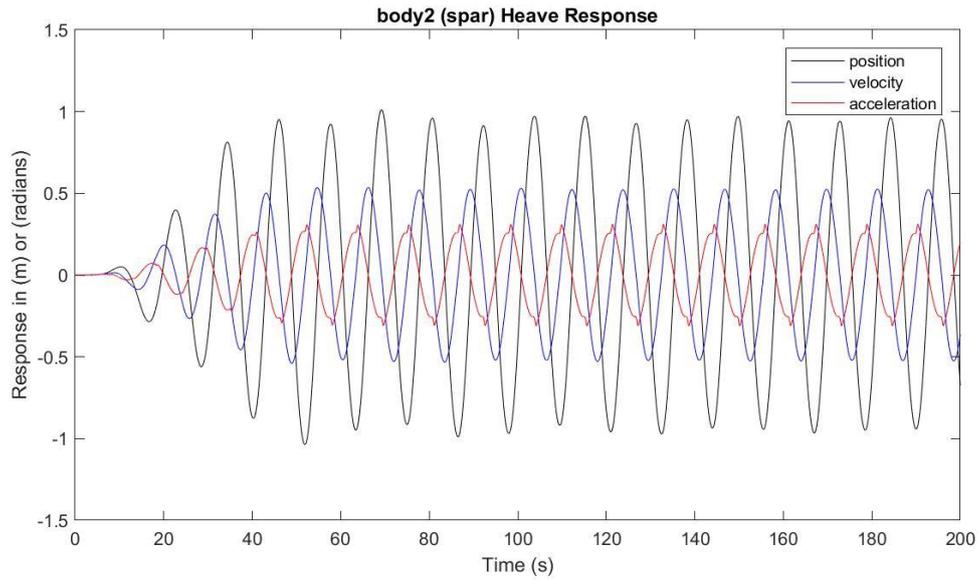
Presión media del acumulador de alta presión: 25.2720 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.2014 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.1101 m, 1.6887 m/s y 1.0564 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.0110 m, 0.5348 m/s y 0.3119 m/s²





$H_s = 6.25 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

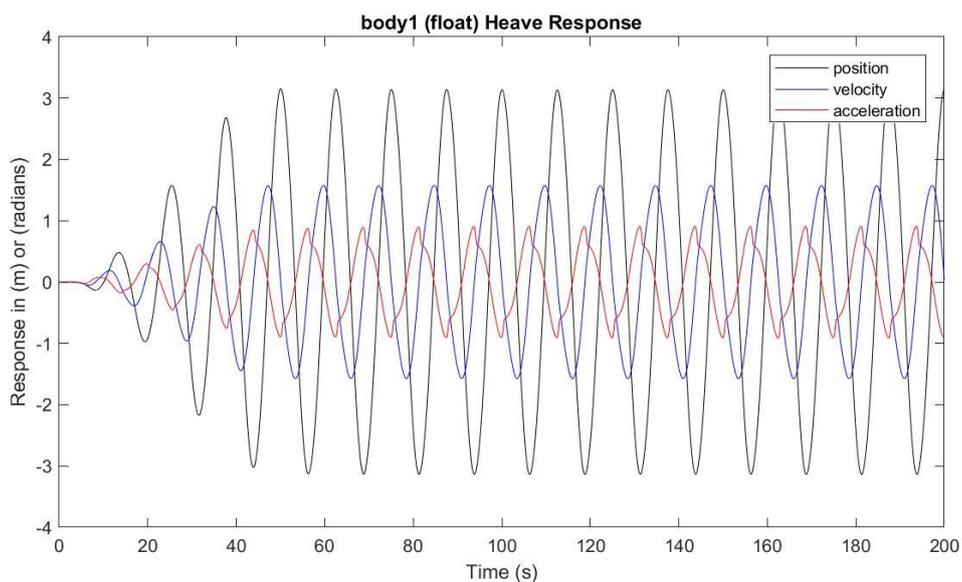
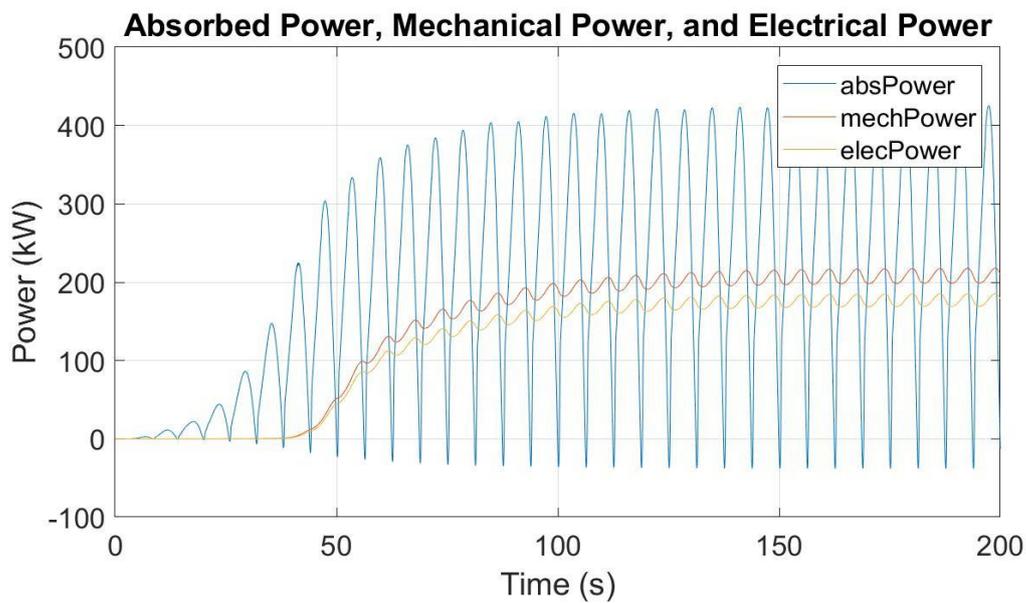
Potencia eléctrica media: 176.8555 kW

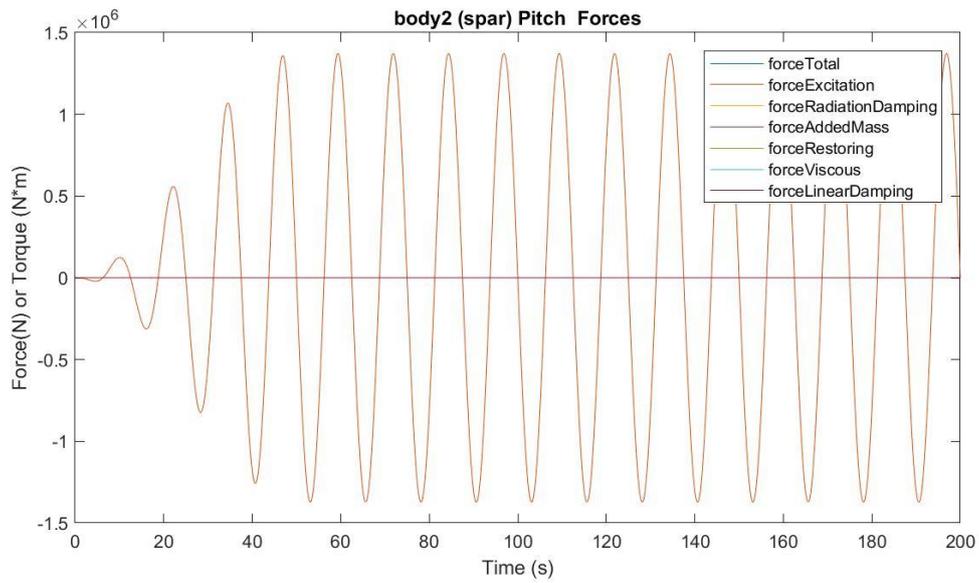
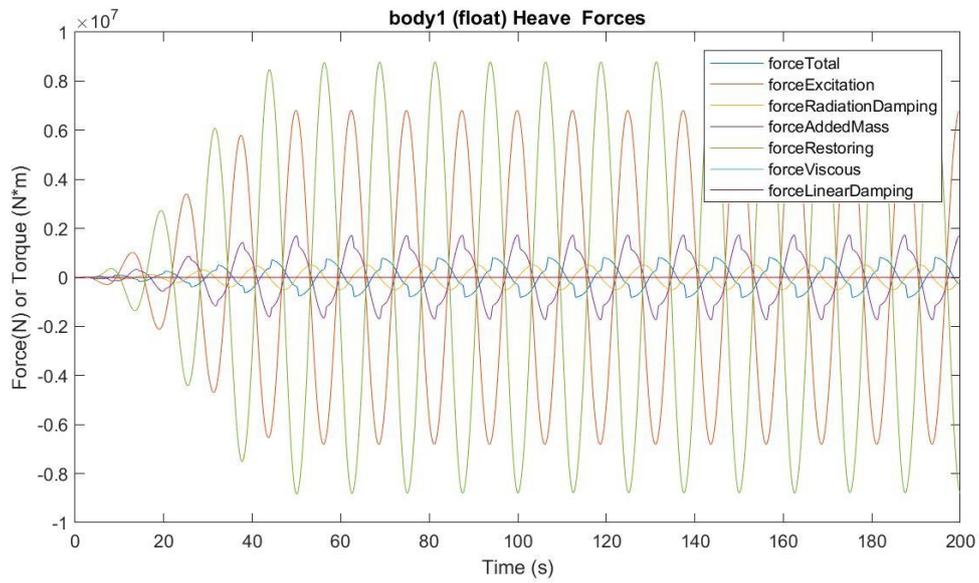
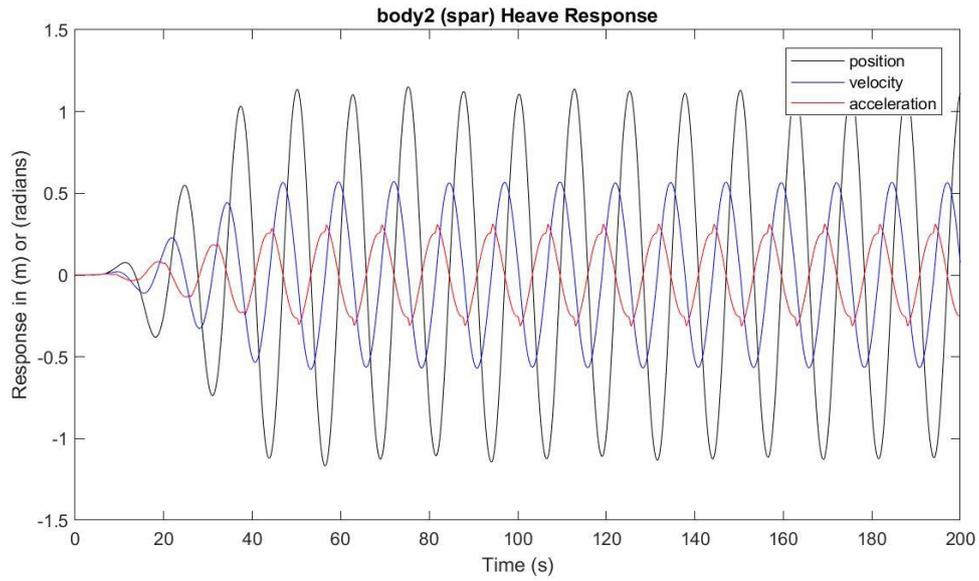
Presión media del acumulador de alta presión: 24.8282 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.6848 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.1549 m, 1.5776 m/s y 0.9115 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.1517 m, 0.5717 m/s y 0.3123 m/s²





$H_s = 6.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

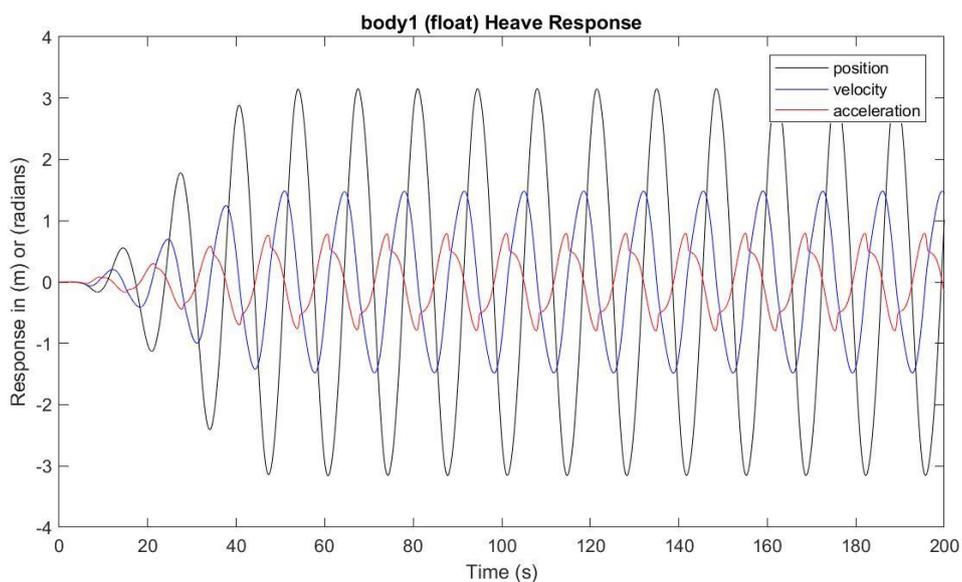
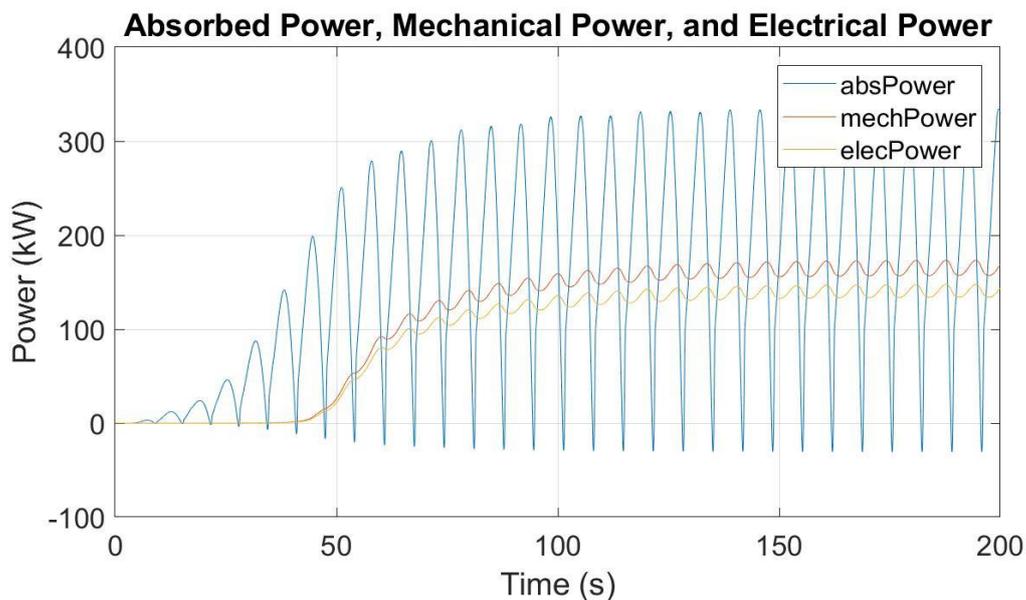
Potencia eléctrica media: 139.8648 kW

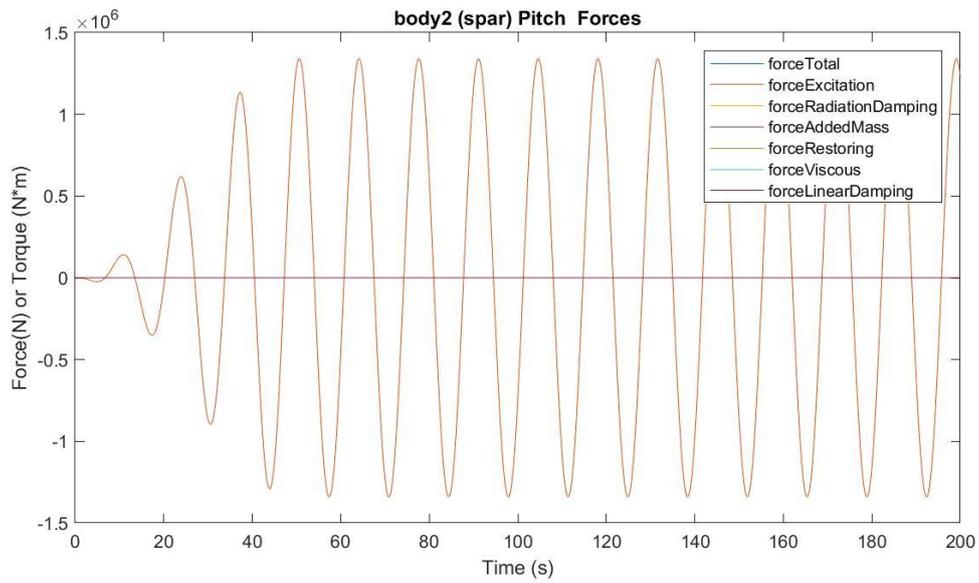
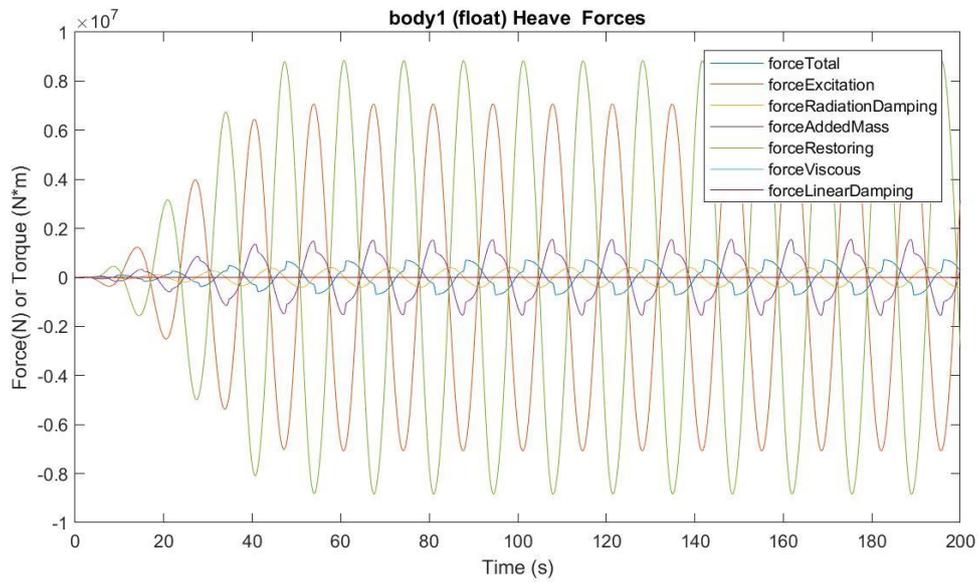
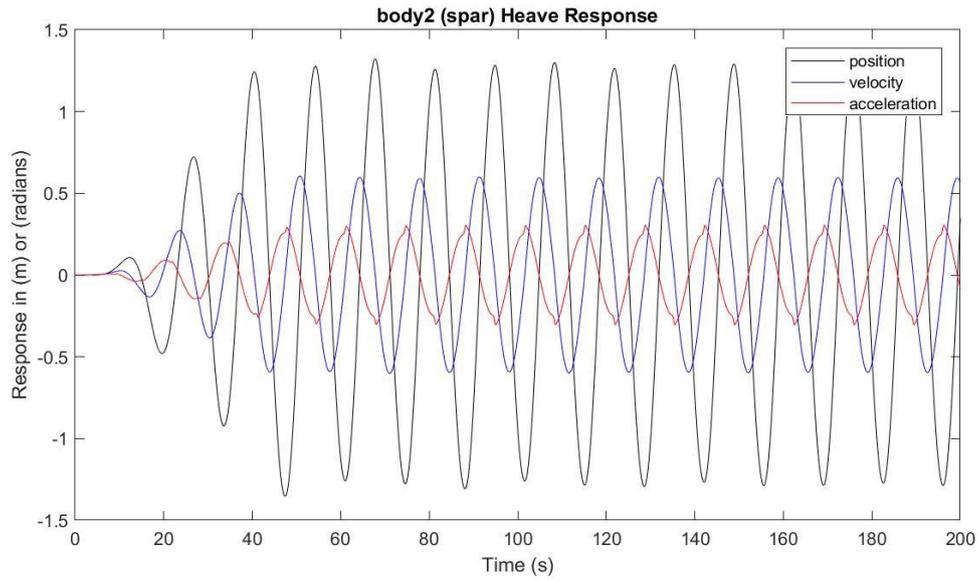
Presión media del acumulador de alta presión: 24.4601 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.1145 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.1553 m, 1.4846 m/s y 0.7962 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.3223 m, 0.6059 m/s y 0.3067 m/s²





$H_s = 6.25 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

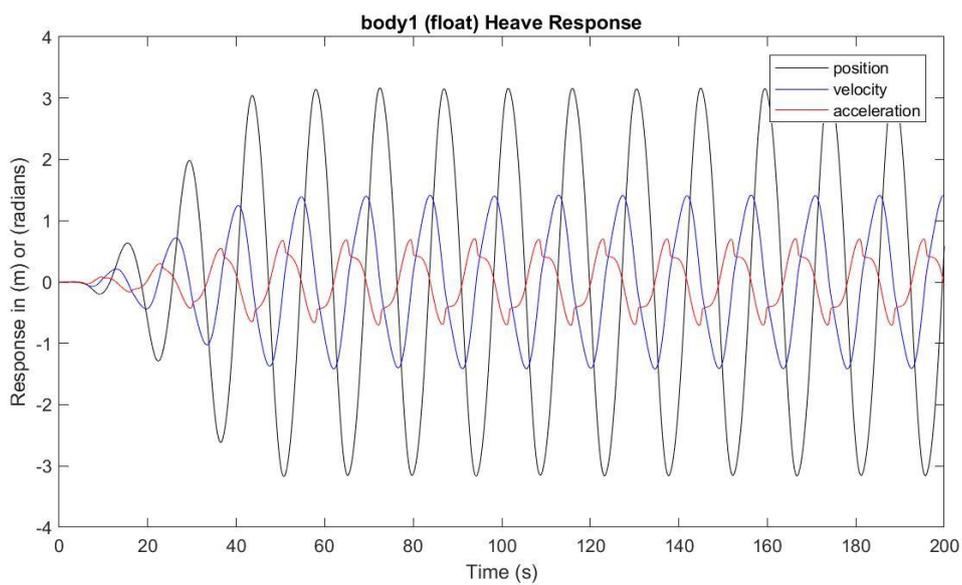
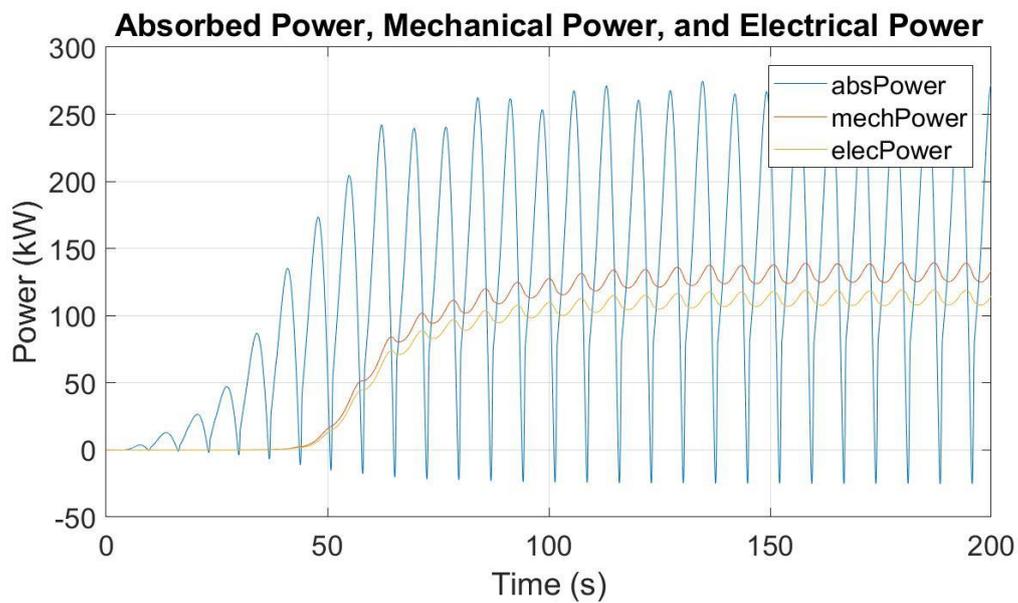
Potencia eléctrica media: 112.4877 kW

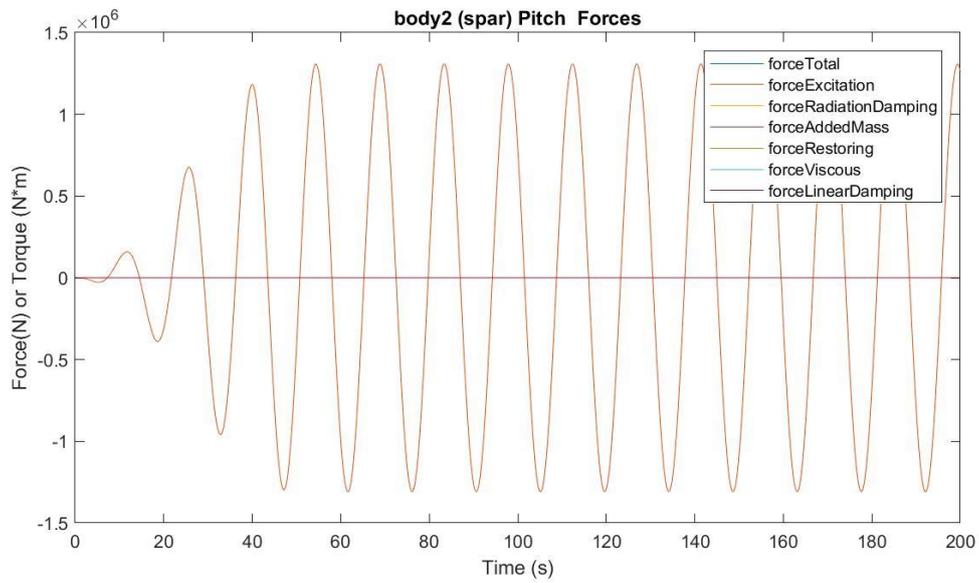
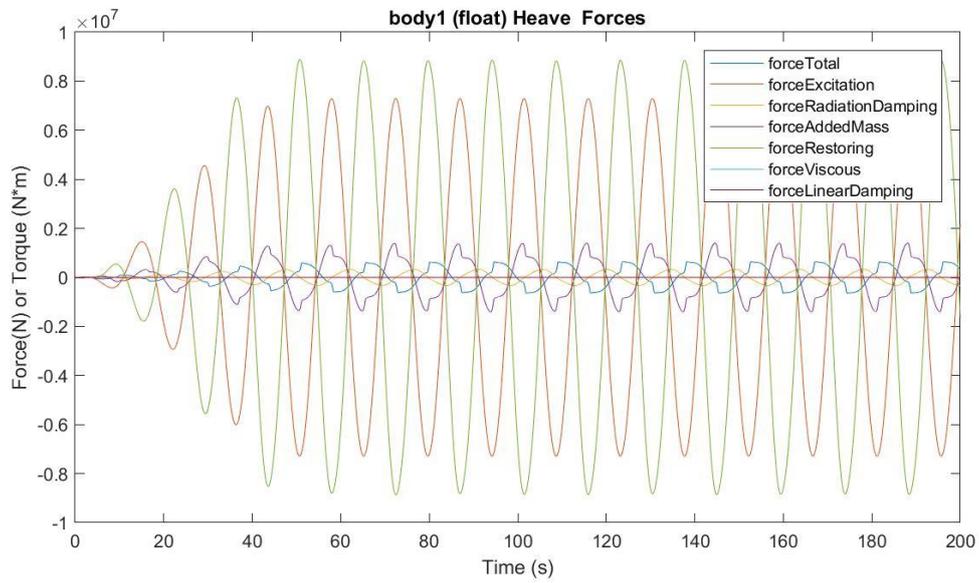
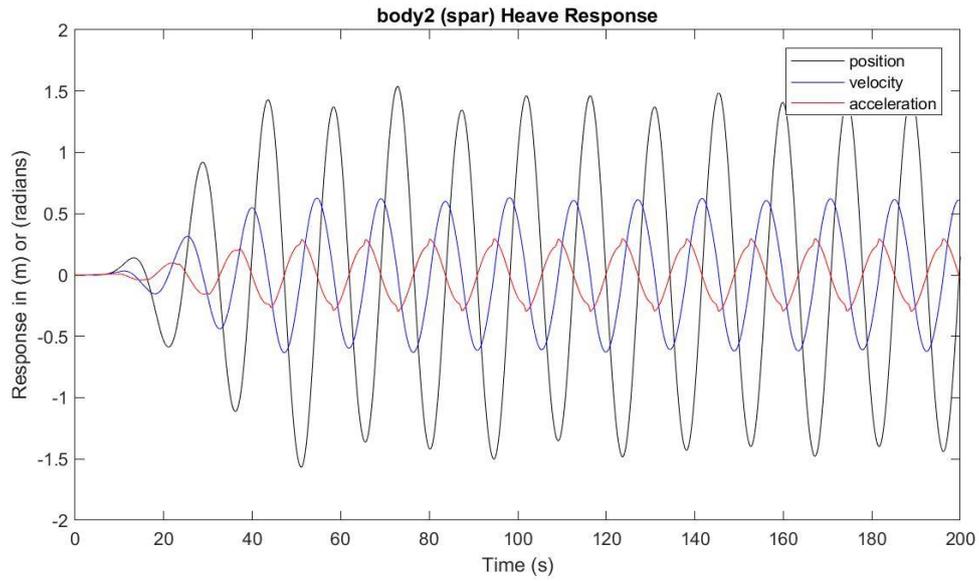
Presión media del acumulador de alta presión: 24.1574 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.4904 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.1673 m, 1.4169 m/s y 0.7059 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.5388 m, 0.6305 m/s y 0.2981 m/s²





$H_s = 6.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

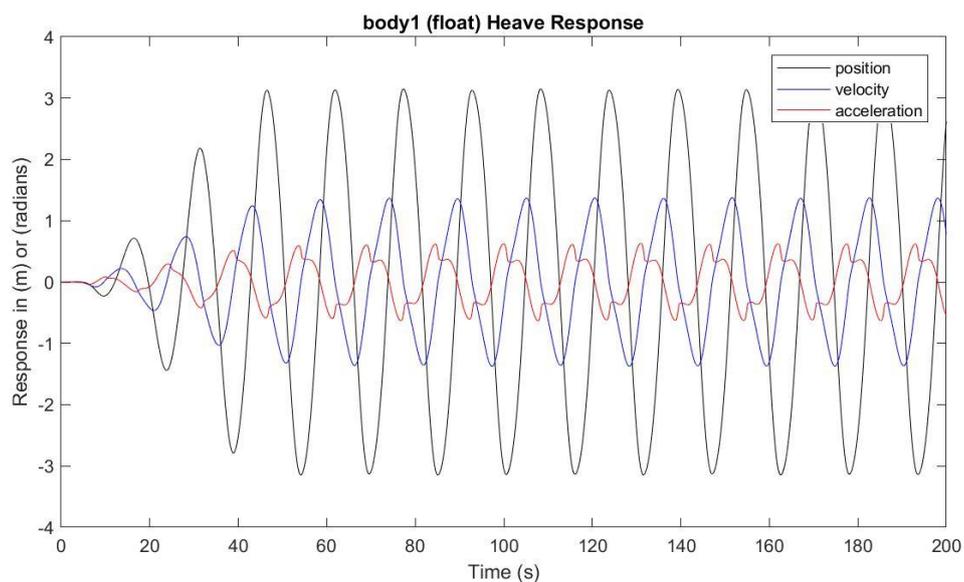
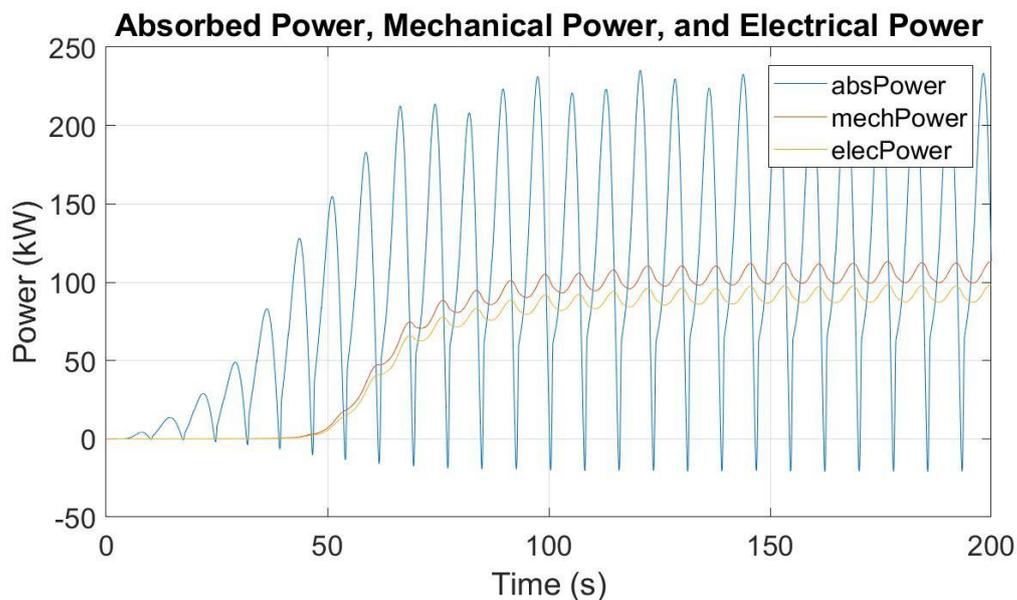
Potencia eléctrica media: 91.9156 kW

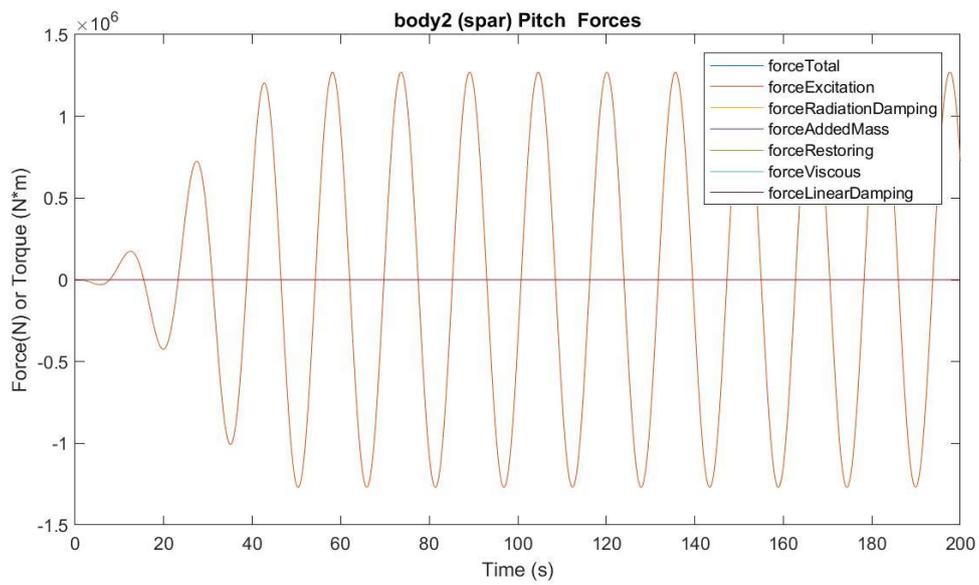
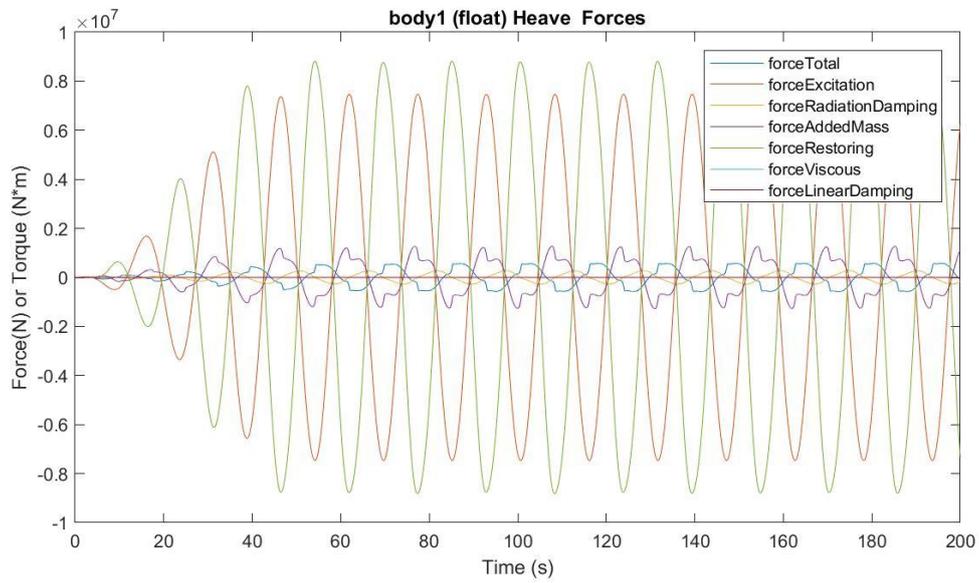
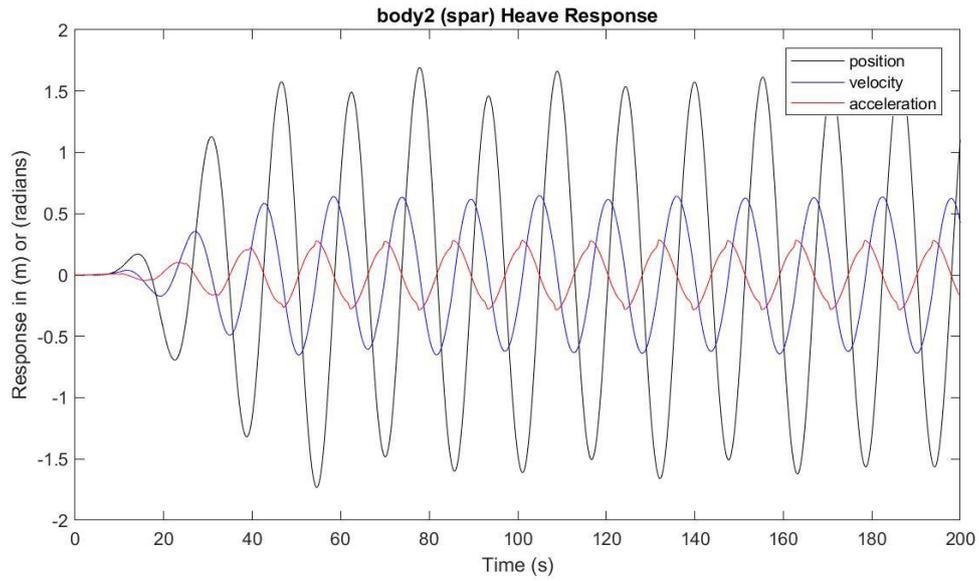
Presión media del acumulador de alta presión: 23.9060 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.8192 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.1503 m, 1.3761 m/s y 0.6318 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.6935 m, 0.6483 m/s y 0.2864 m/s²





$H_s = 6.25 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

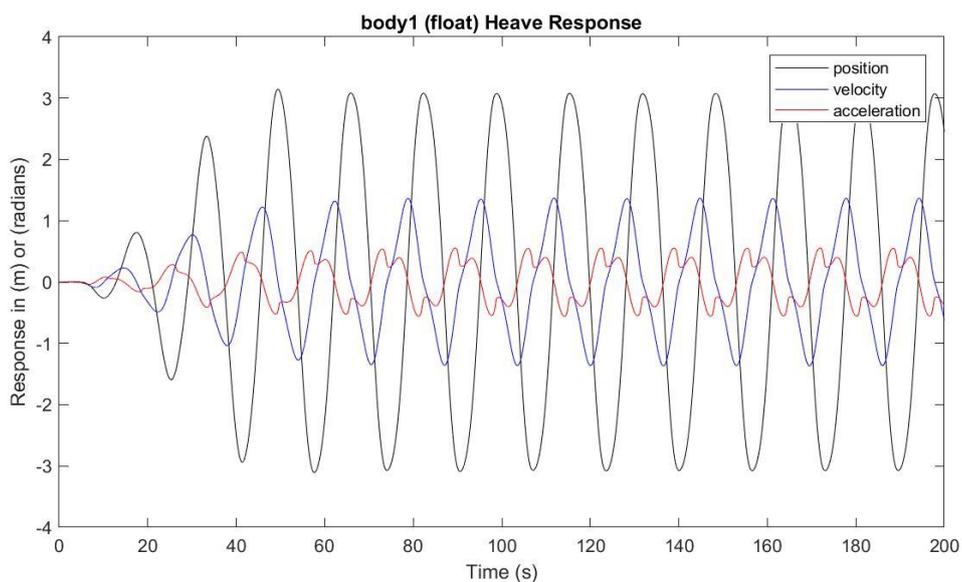
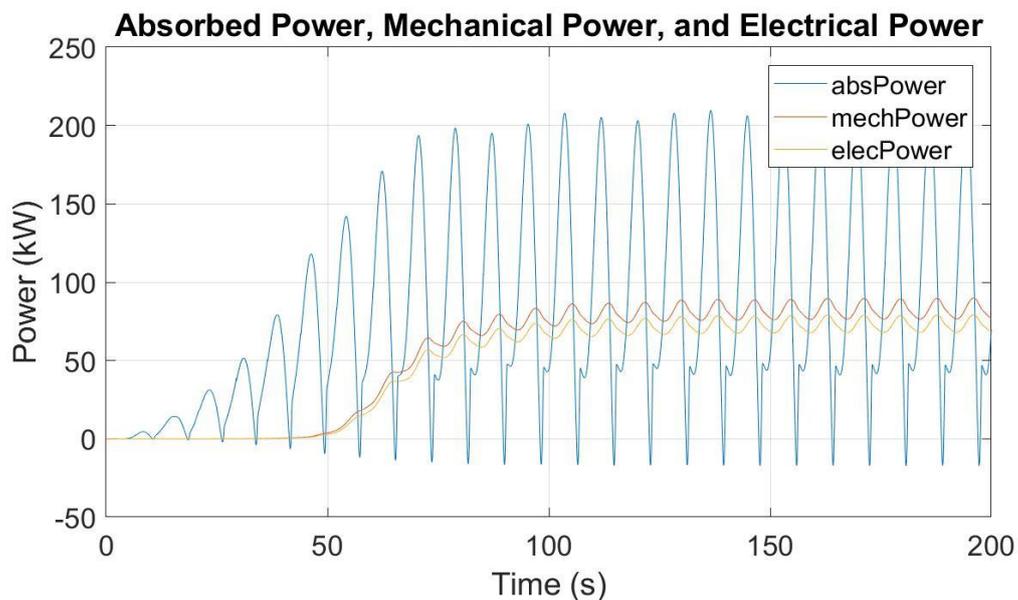
Potencia eléctrica media: 73.0609 kW

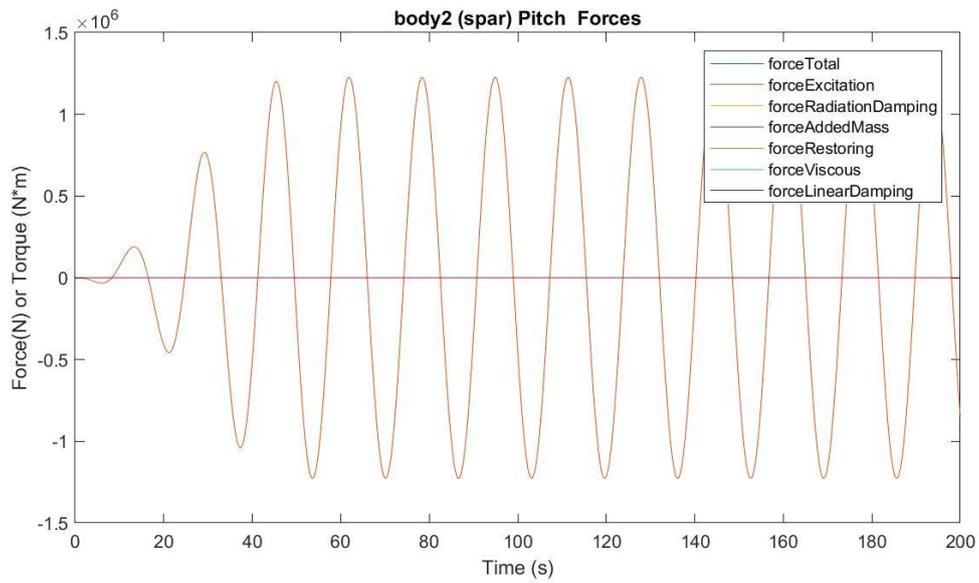
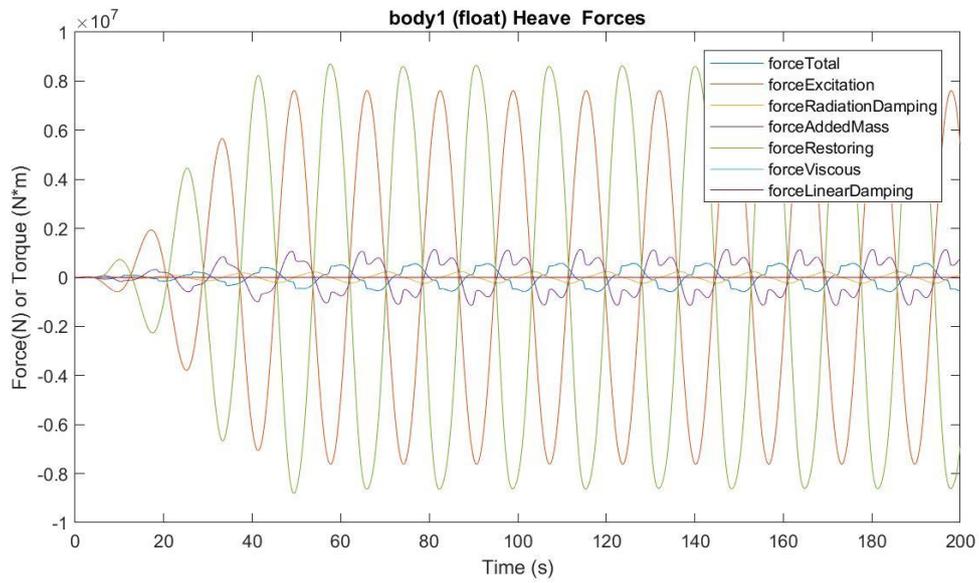
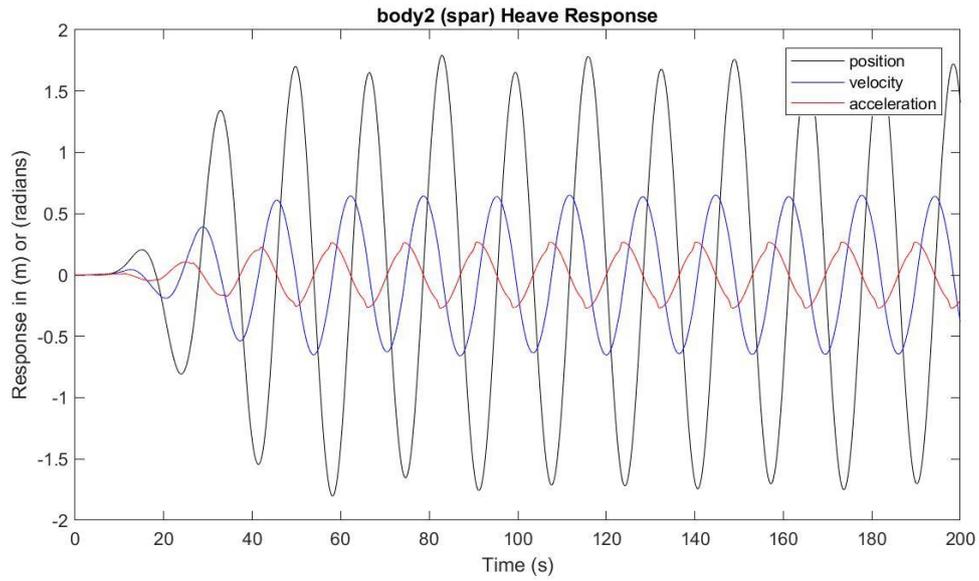
Presión media del acumulador de alta presión: 23.6634 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 17.1506 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.1458 m, 1.3687 m/s y 0.5569 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.7921 m, 0.6526 m/s y 0.2687 m/s²





$H_s = 6.75 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

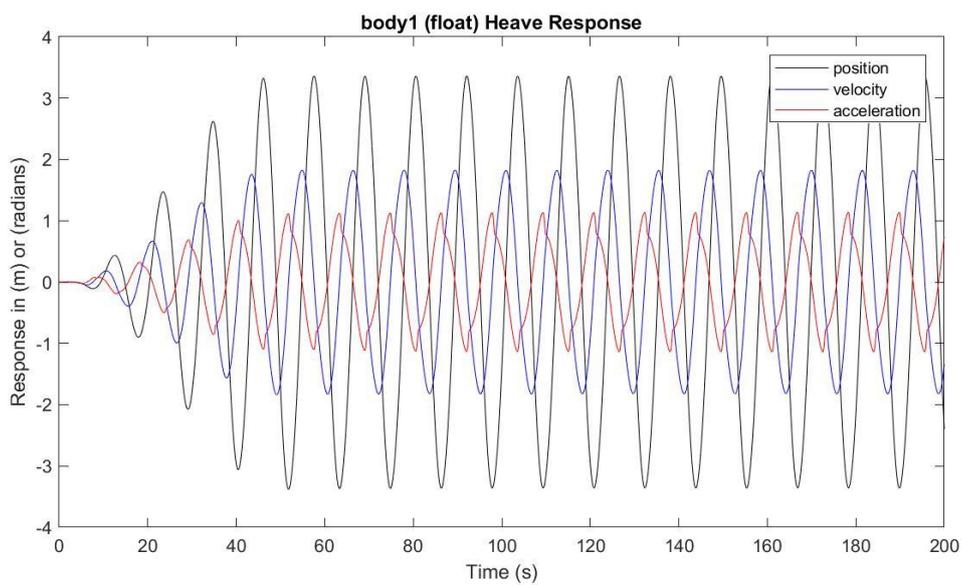
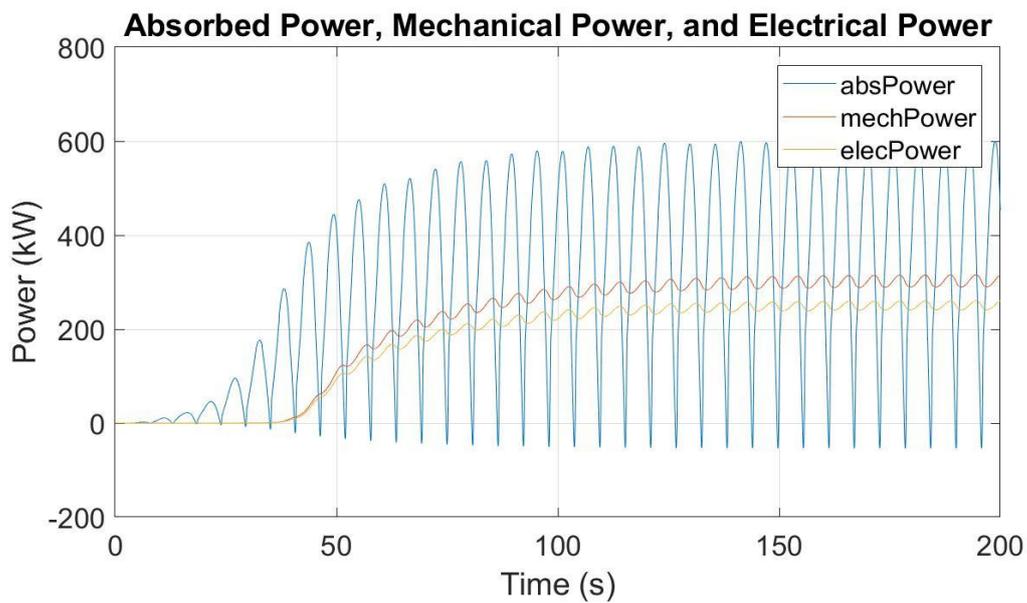
Potencia eléctrica media: 249.7943 kW

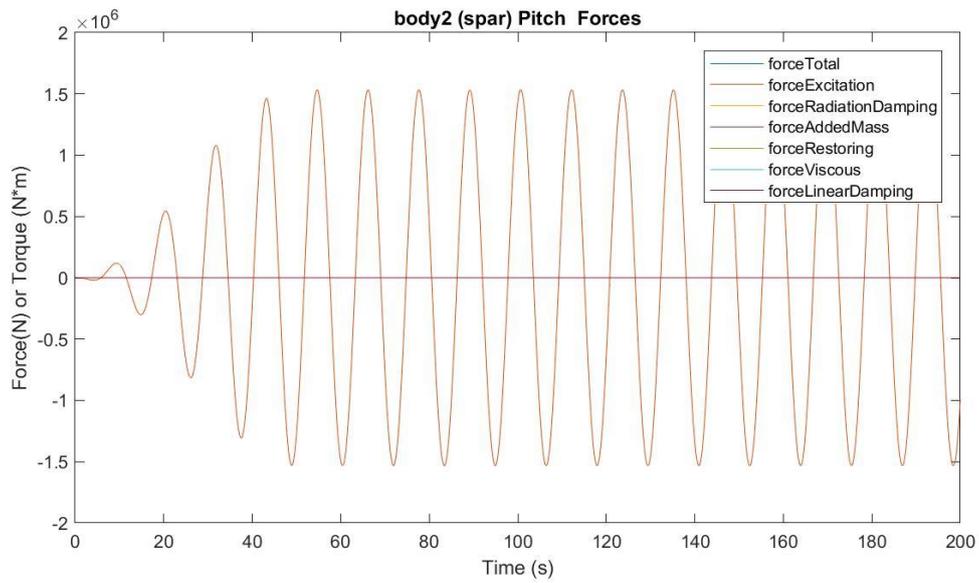
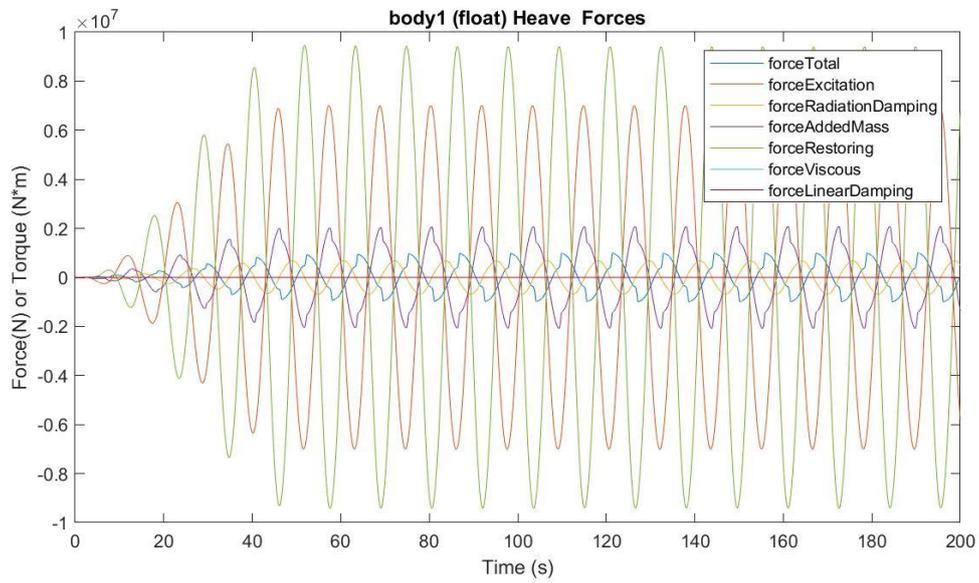
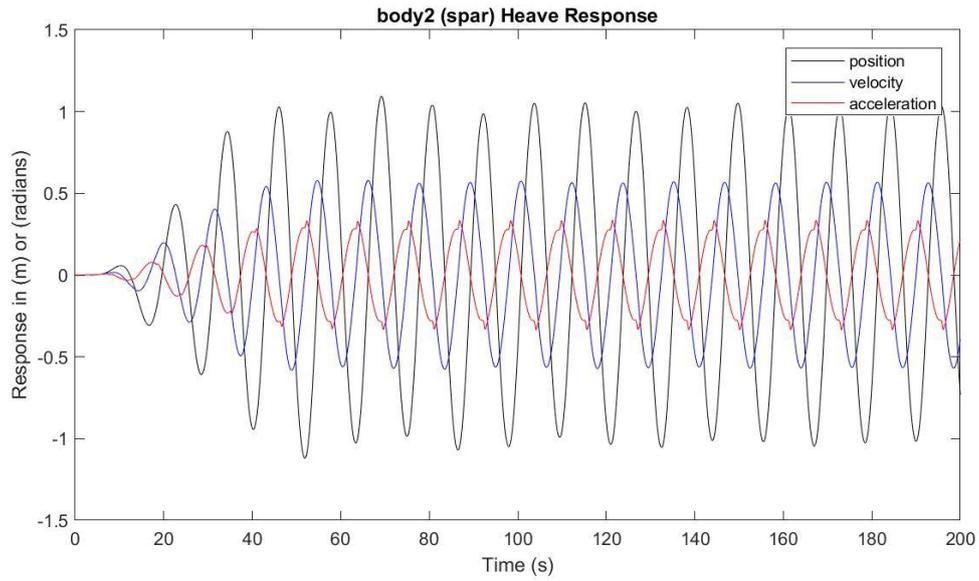
Presión media del acumulador de alta presión: 25.5468 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 14.9204 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.3610 m, 1.8253 m/s y 1.1381 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.0932 m, 0.5786 m/s y 0.3358 m/s²





$H_s = 6.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

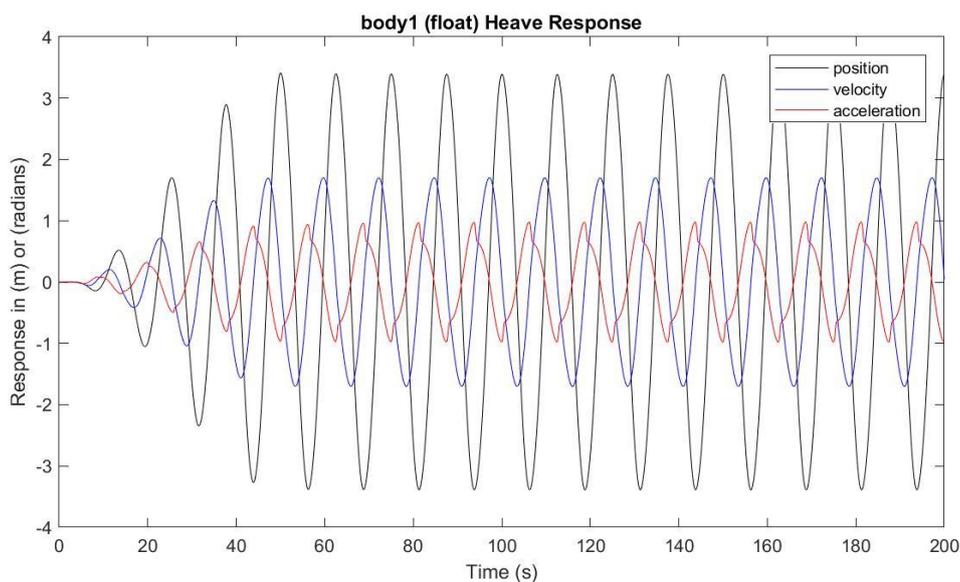
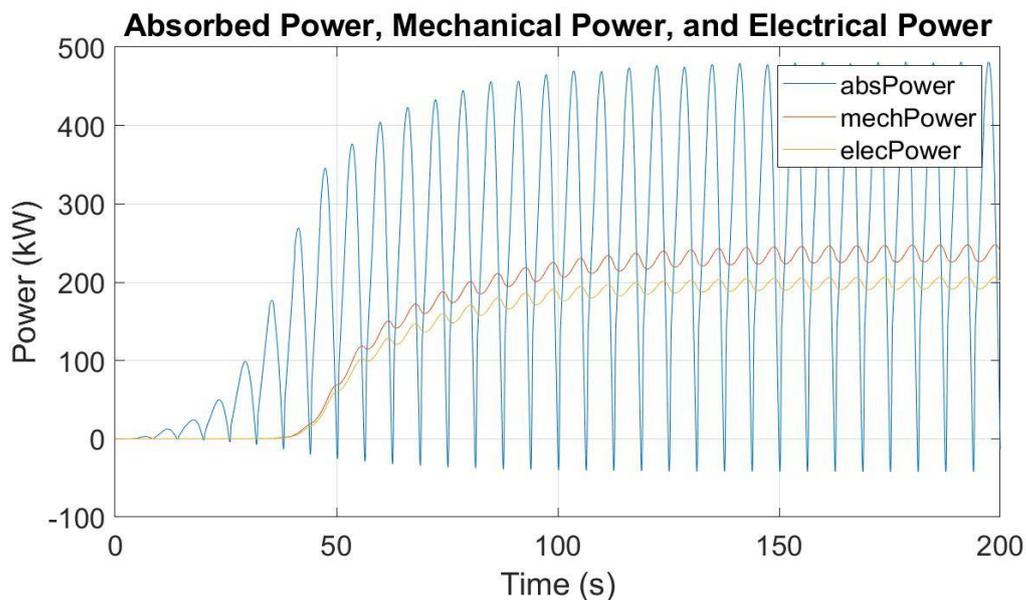
Potencia eléctrica media: 198.5230 kW

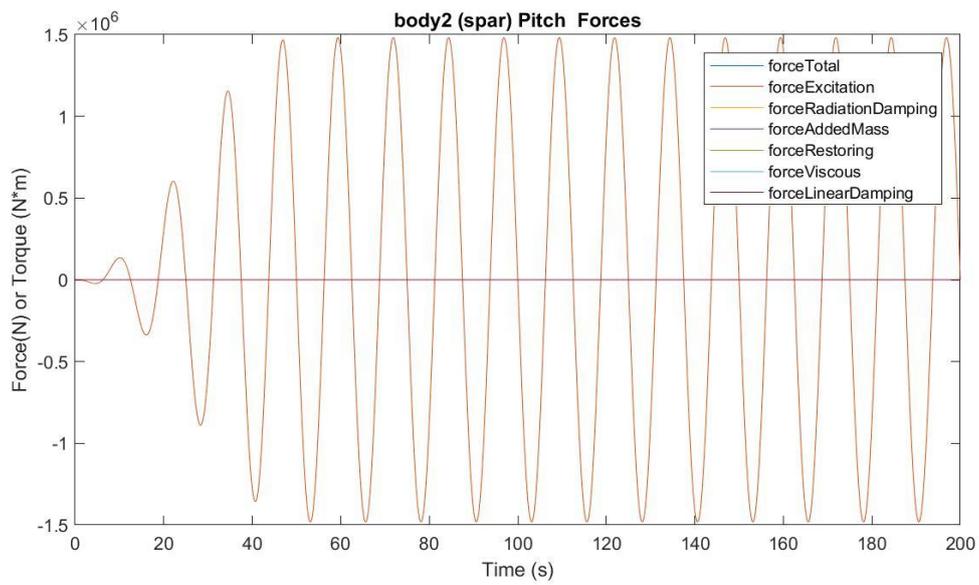
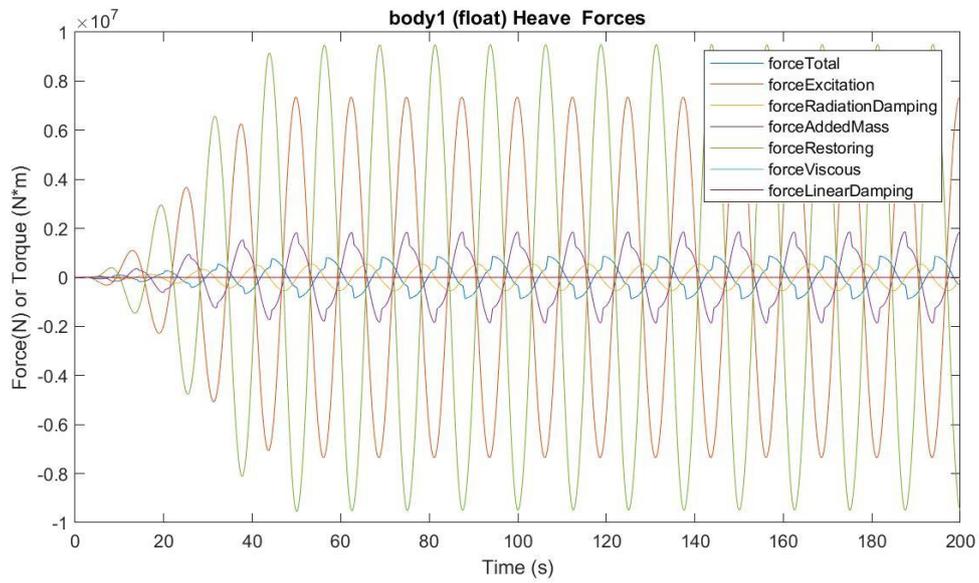
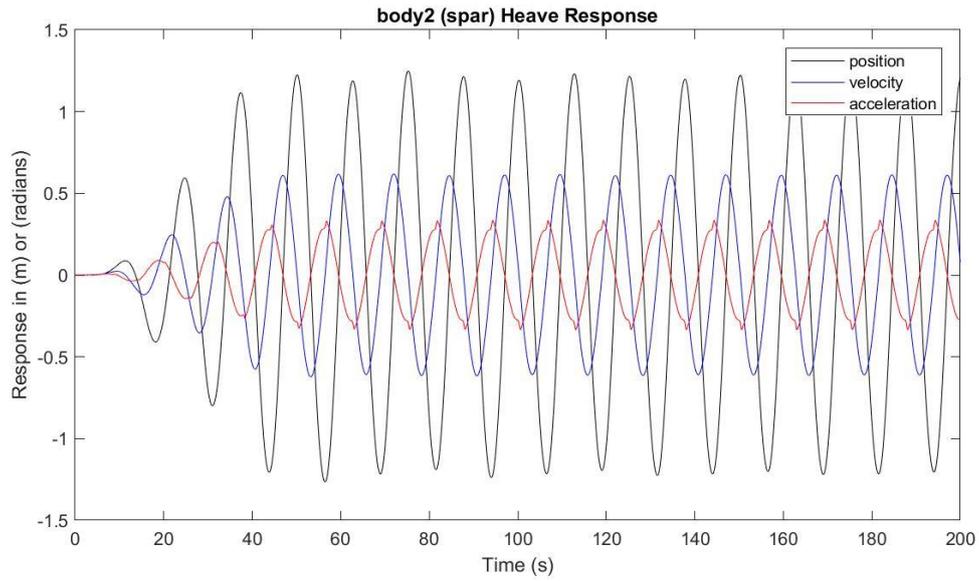
Presión media del acumulador de alta presión: 25.0554 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.4328 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.4091 m, 1.7039 m/s y 0.9812 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.2480 m, 0.6185 m/s y 0.3361 m/s²





$H_s = 6.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

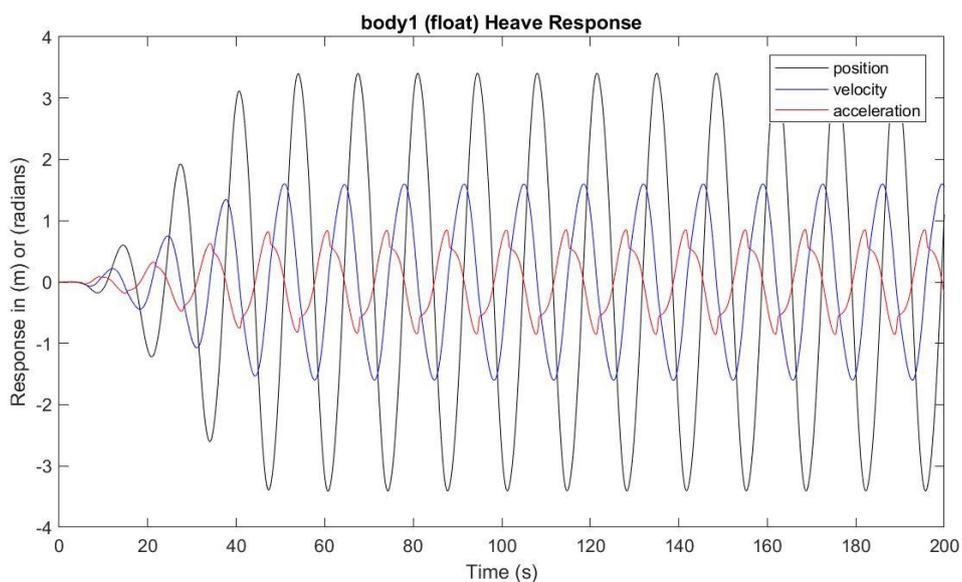
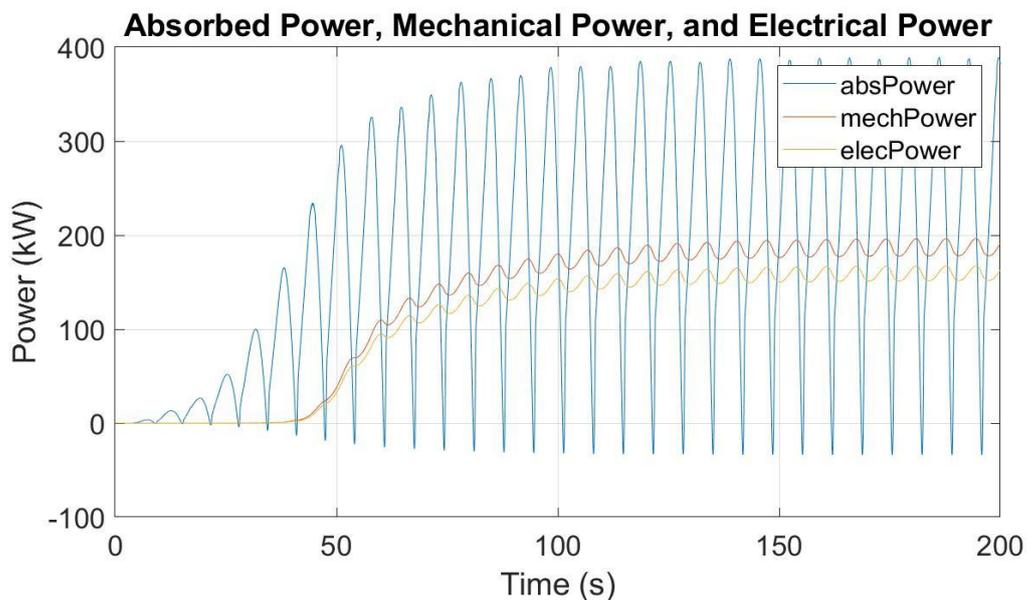
Potencia eléctrica media: 158.4692 kW

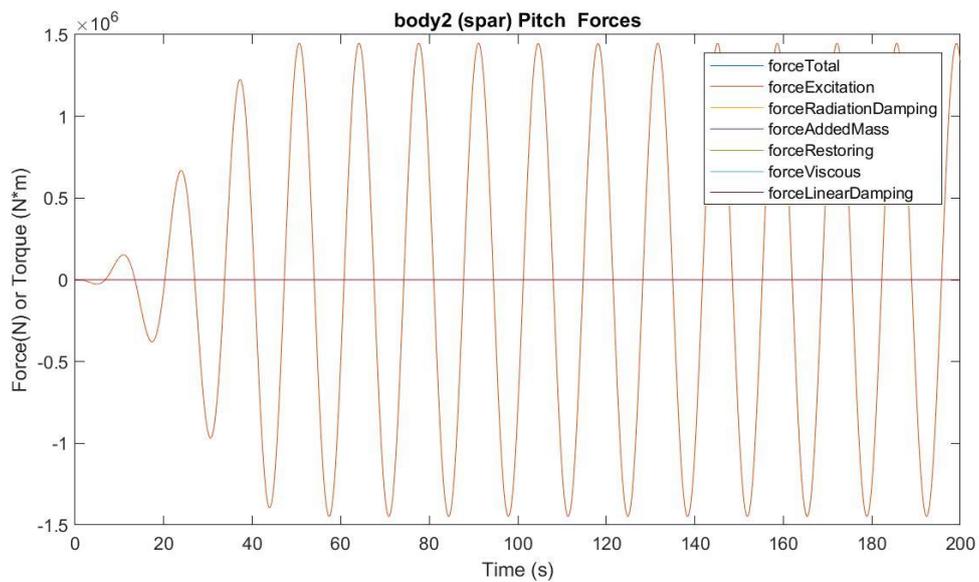
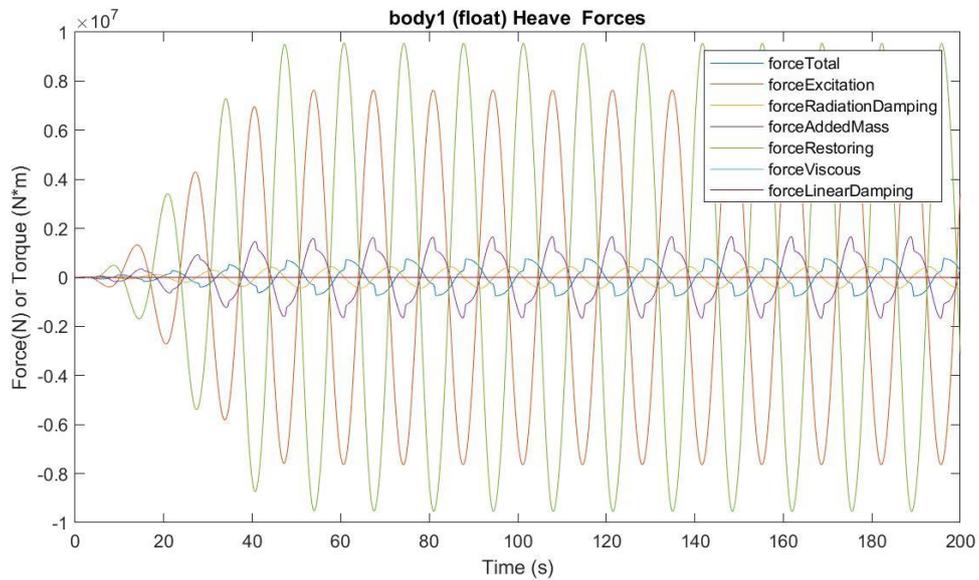
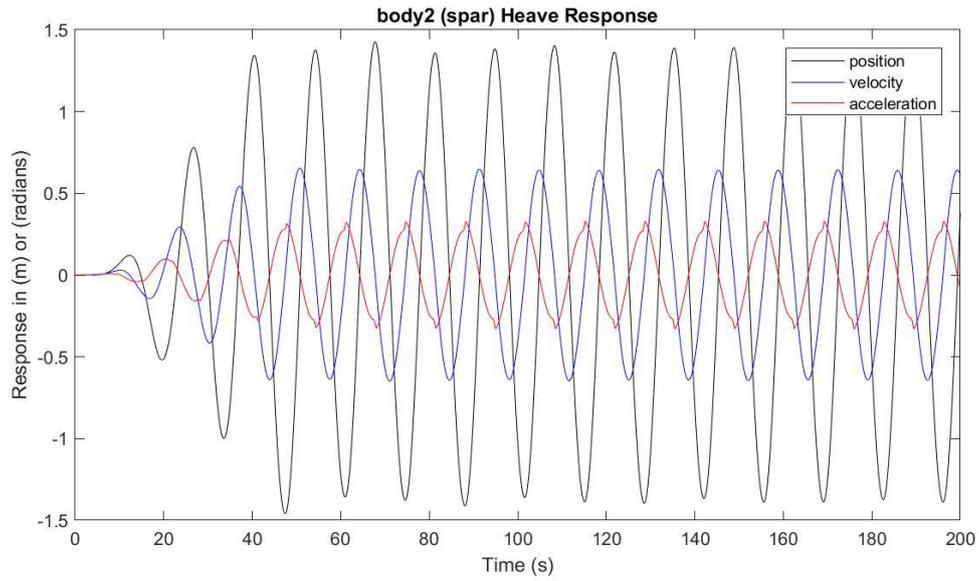
Presión media del acumulador de alta presión: 24.6487 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.8905 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.4072 m, 1.6034 m/s y 0.8547 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.4271 m, 0.6534 m/s y 0.3297 m/s²





$H_s = 6.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

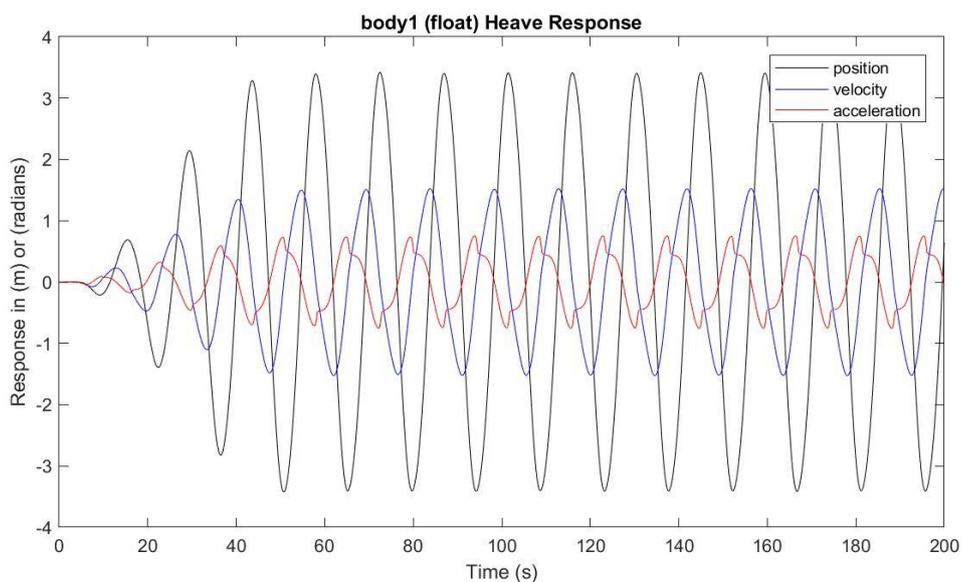
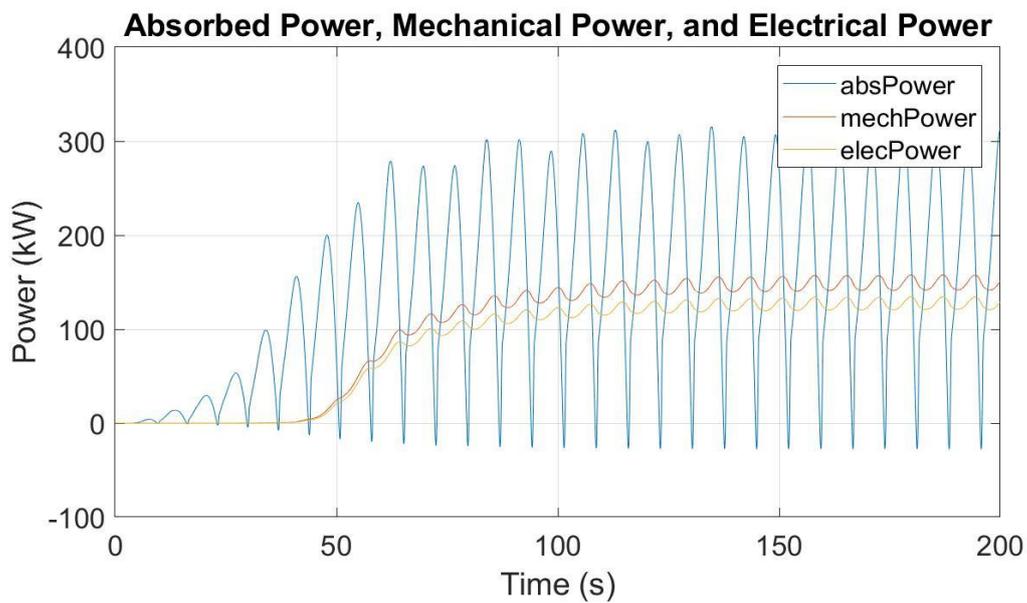
Potencia eléctrica media: 126.2858 kW

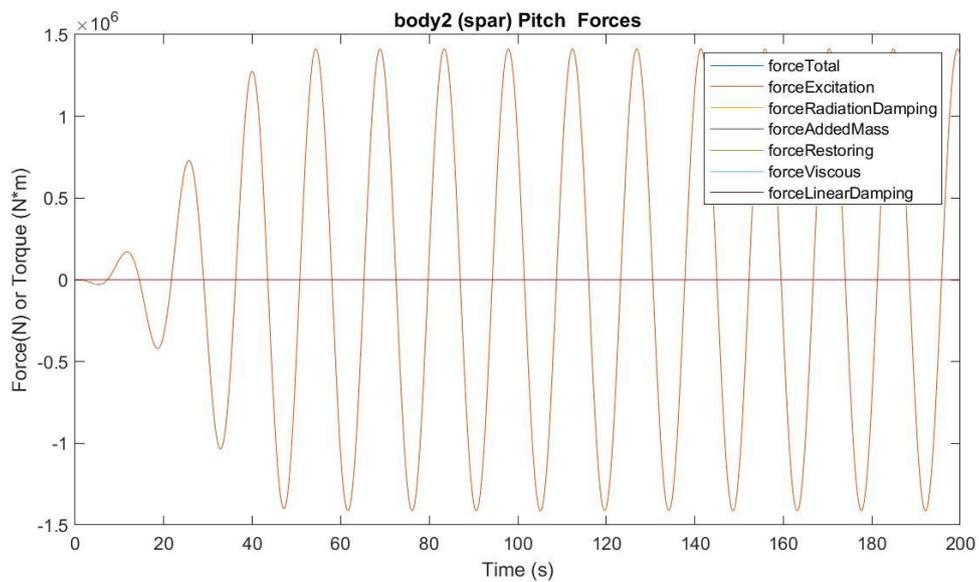
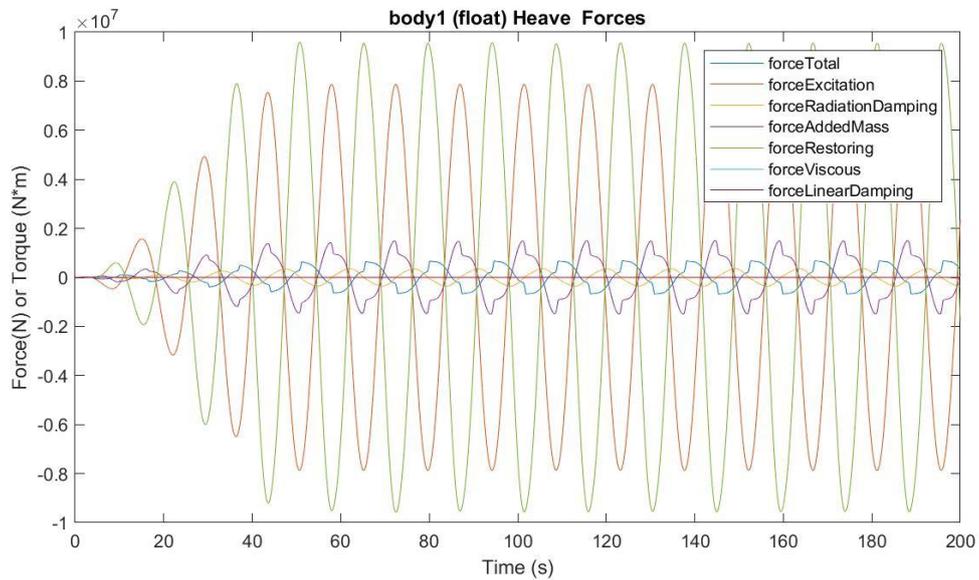
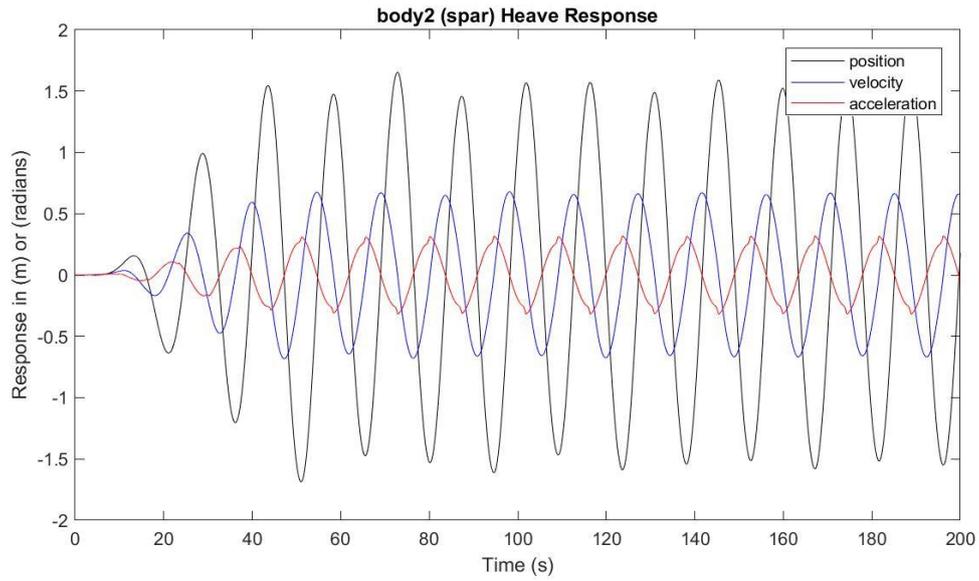
Presión media del acumulador de alta presión: 24.3165 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.2898 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.4197 m, 1.5249 m/s y 0.7557 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.6540 m, 0.6784 m/s y 0.3200 m/s²





$H_s = 6.75 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

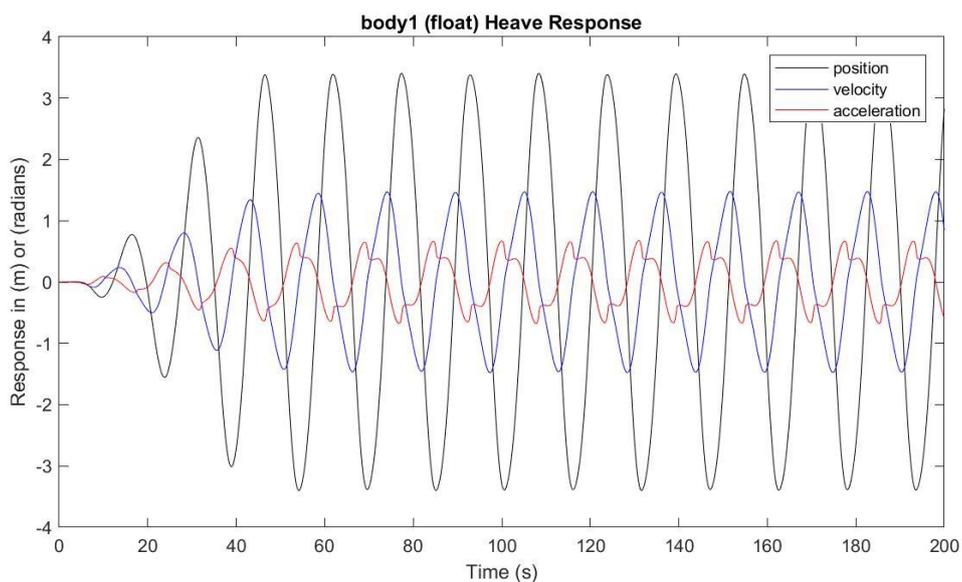
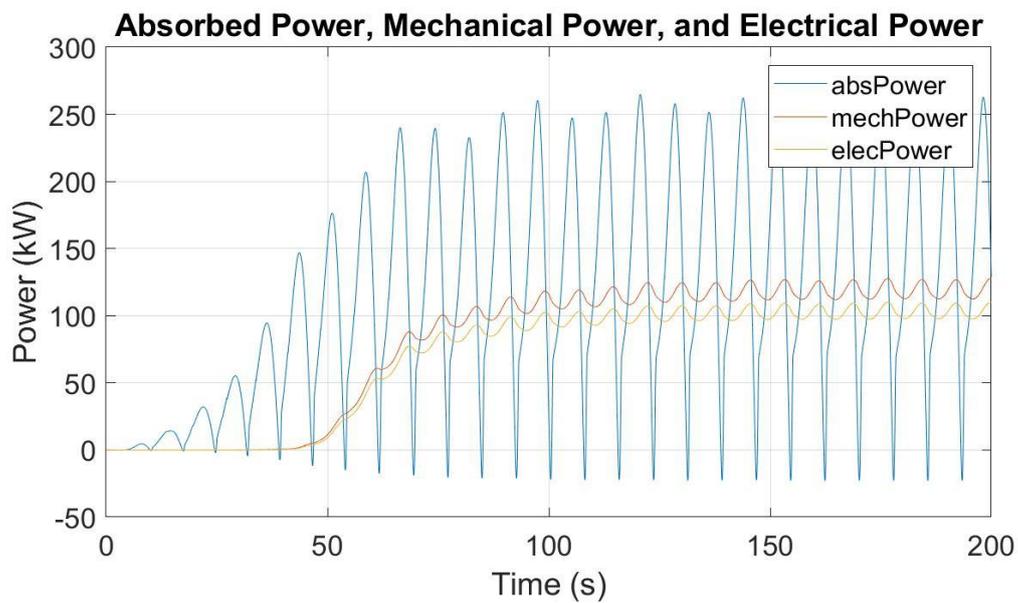
Potencia eléctrica media: 103.0056 kW

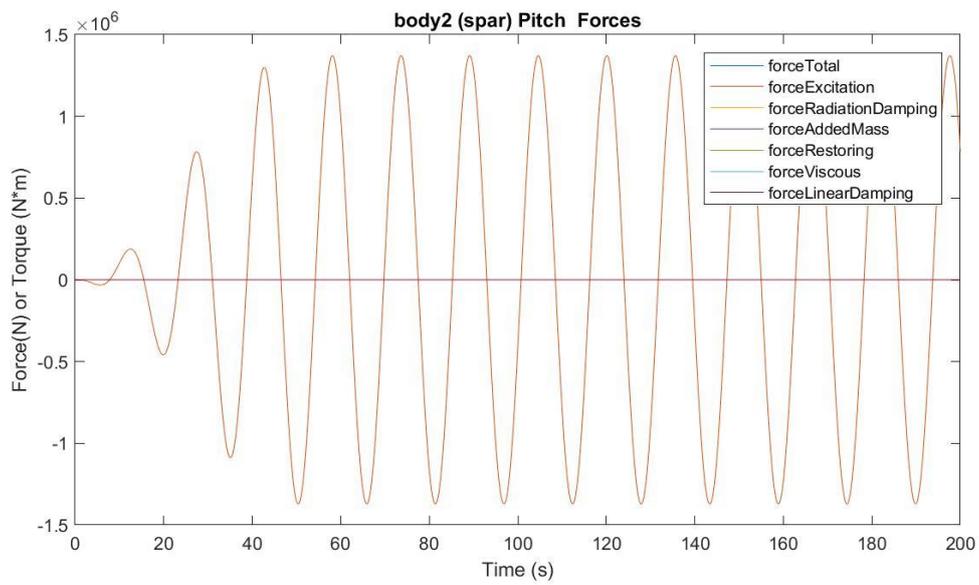
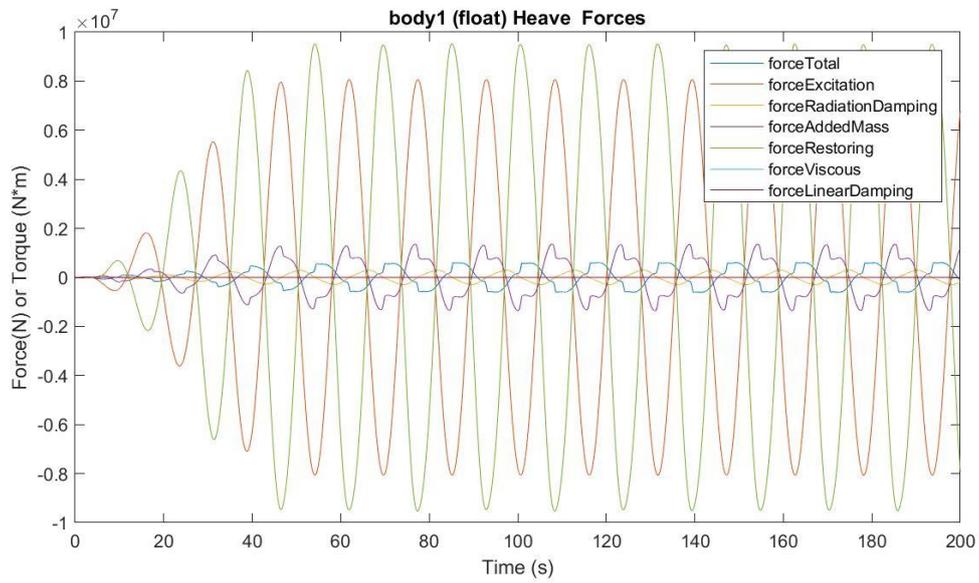
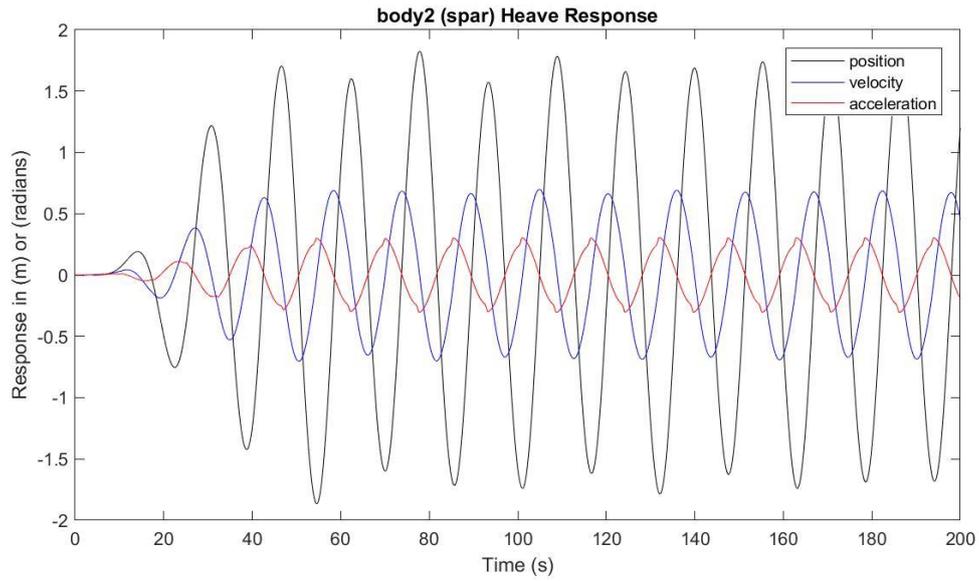
Presión media del acumulador de alta presión: 24.0428 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.6384 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.4044 m, 1.4781 m/s y 0.6767 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.8247 m, 0.6983 m/s y 0.3075 m/s²





$H_s = 6.75 \text{ m}$

$T_e = 16.5 \text{ s}$

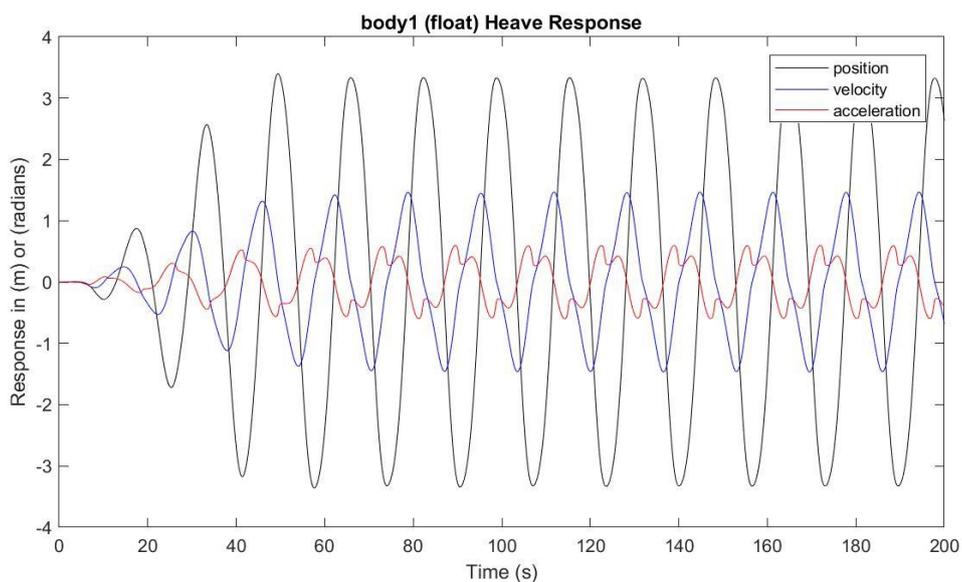
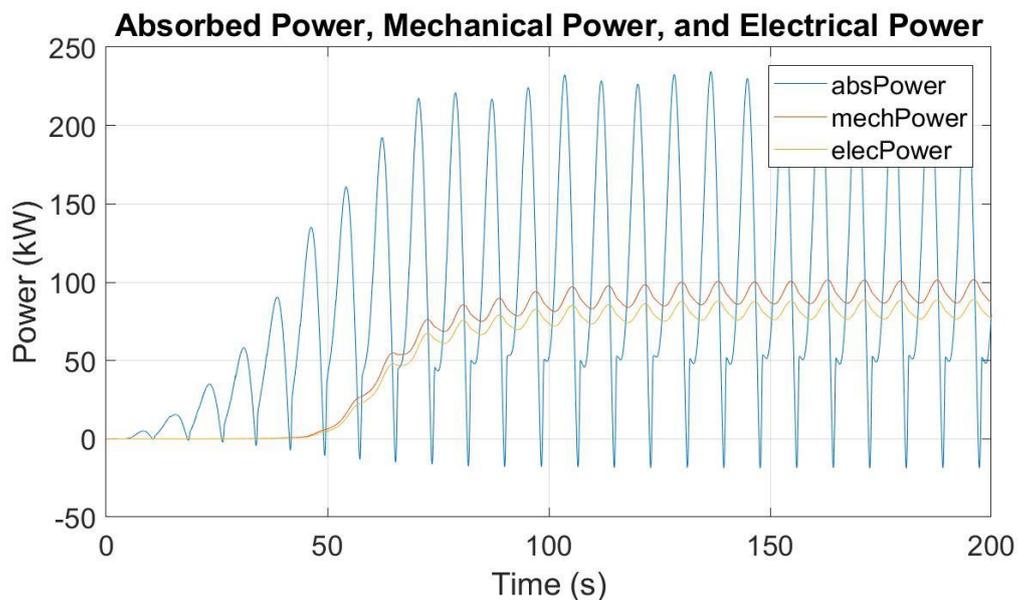
Potencia eléctrica media: 82.1037 kW

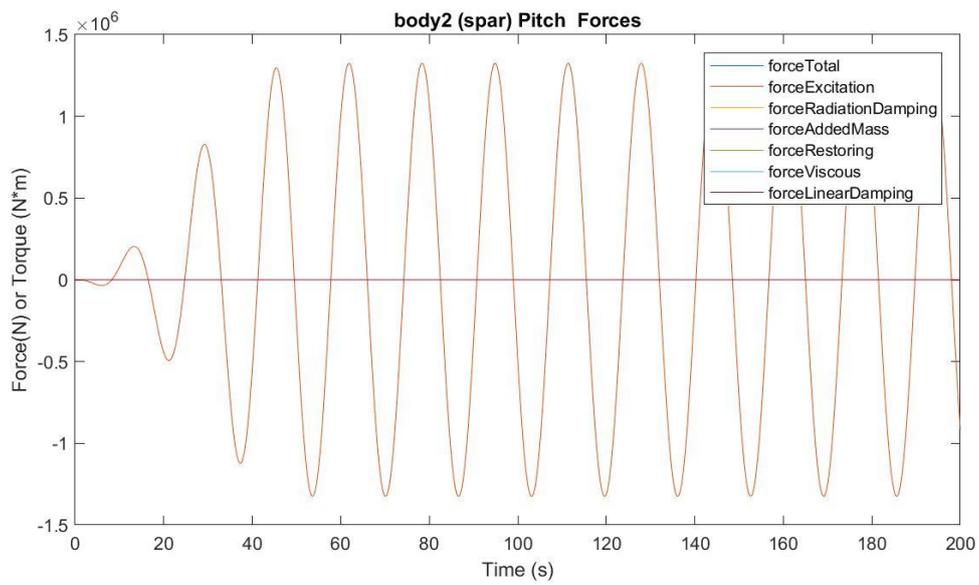
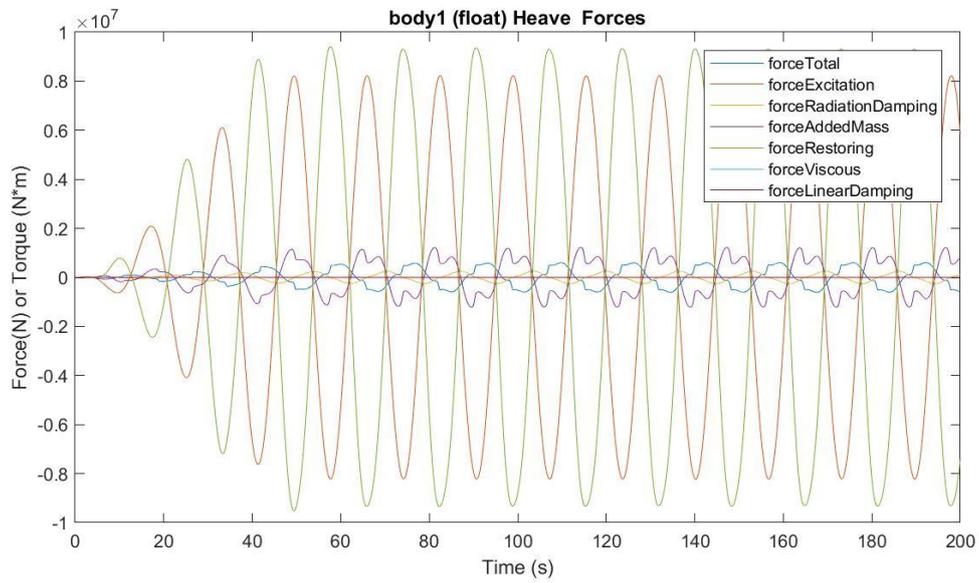
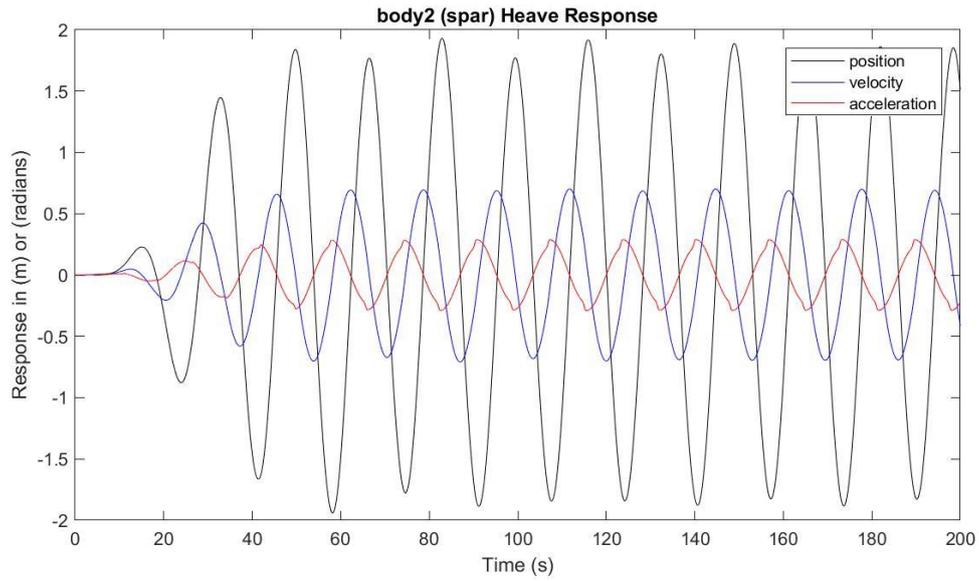
Presión media del acumulador de alta presión: 23.7811 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.9874 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.3990 m, 1.4679 m/s y 0.5975 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.9310 m, 0.7024 m/s y 0.2888 m/s²





$H_s = 7.25 \text{ m}$

$T_e = 11.5 \text{ s}$

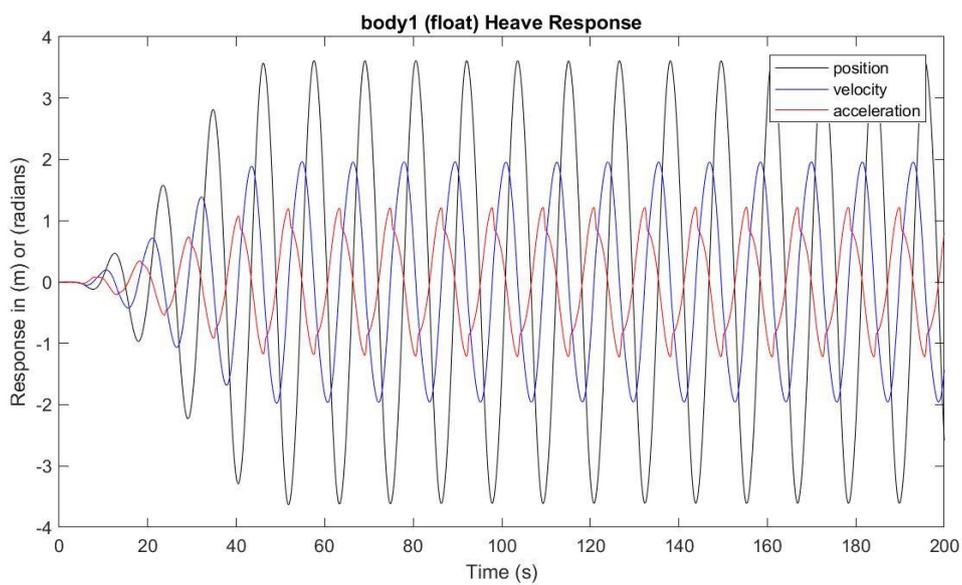
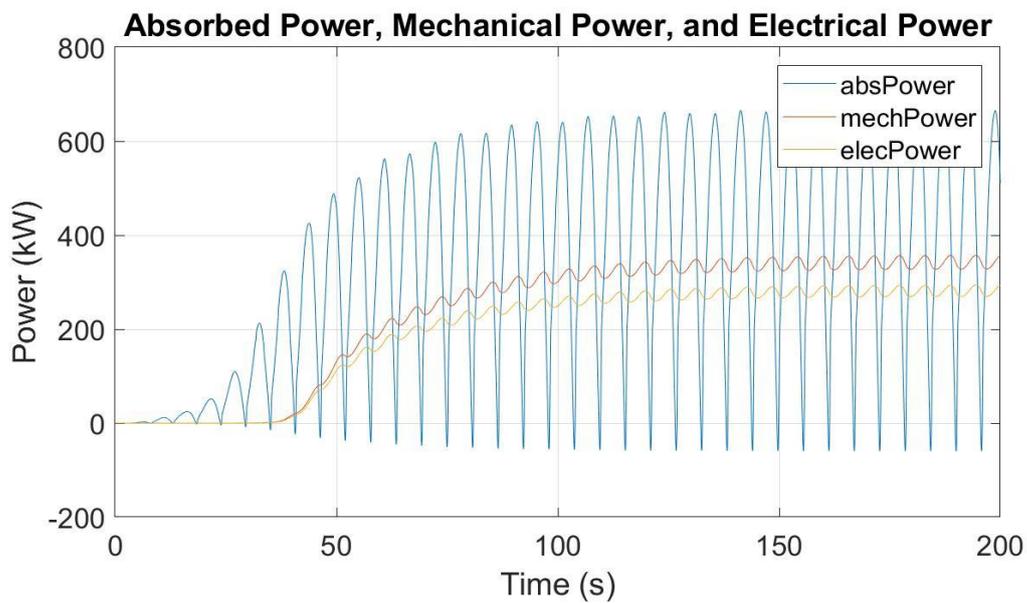
Potencia eléctrica media: 280.4340 kW

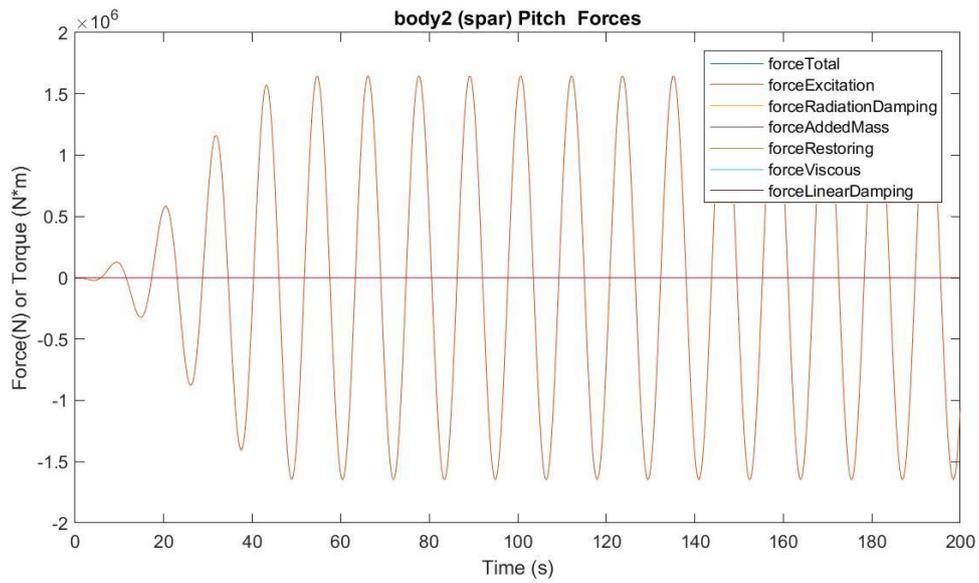
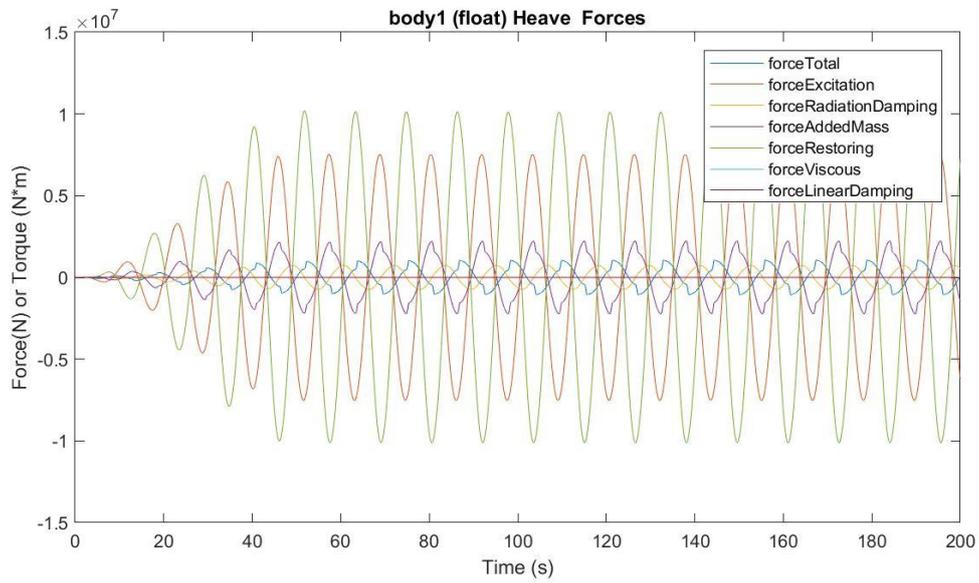
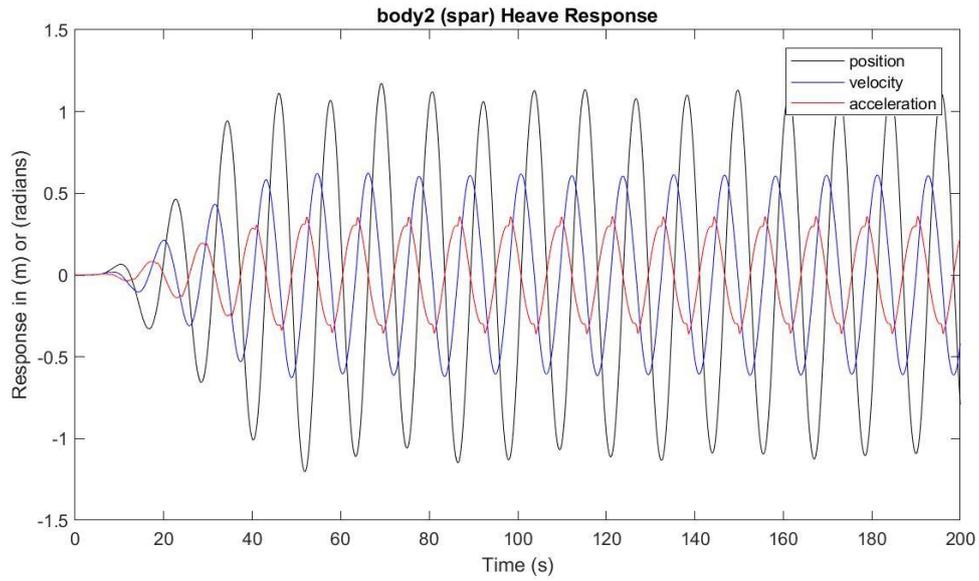
Presión media del acumulador de alta presión: 25.8287 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 14.6456 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.6121 m, 1.9619 m/s y 1.2203 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.1732 m, 0.6228 m/s y 0.3599 m/s²





$H_s = 7.25 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

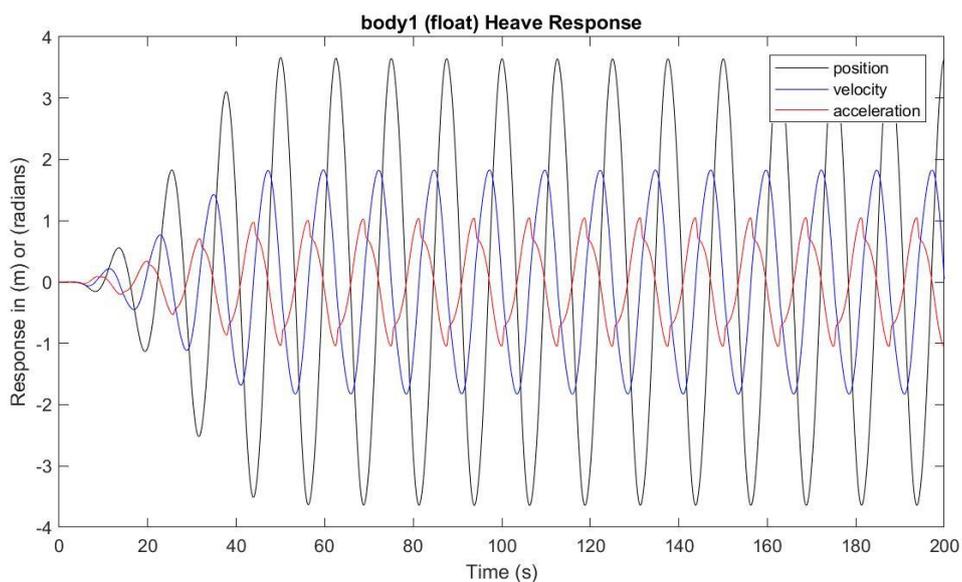
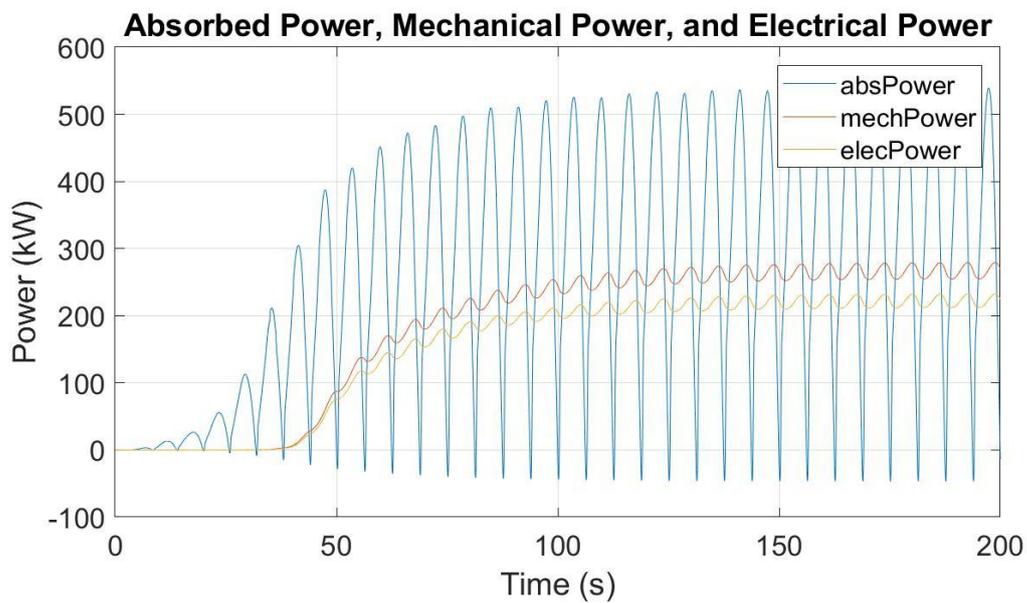
Potencia eléctrica media: 221.7650 kW

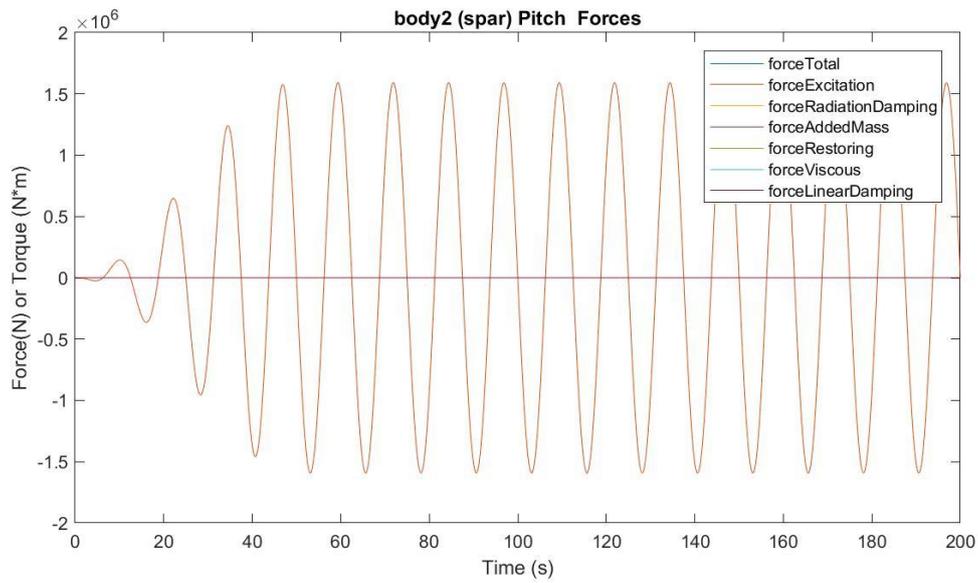
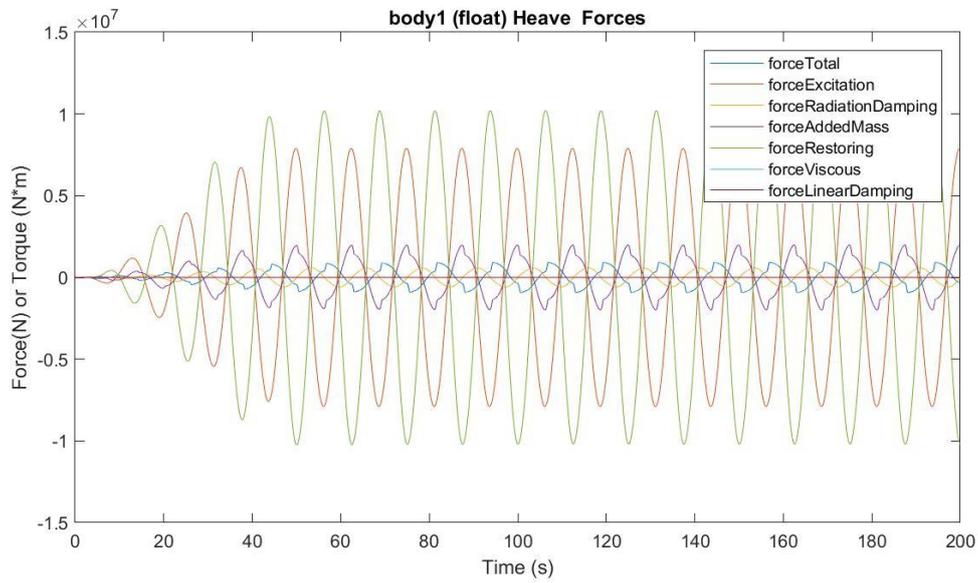
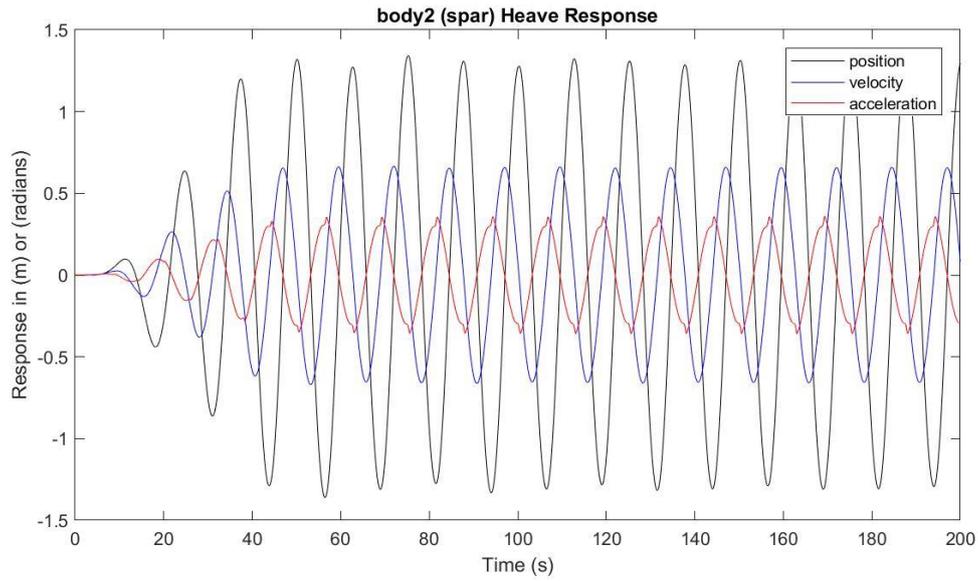
Presión media del acumulador de alta presión: 25.2875 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.1857 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.6627 m, 1.8304 m/s y 1.0509 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.3414 m, 0.6654 m/s y 0.3597 m/s²





$H_s = 7.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

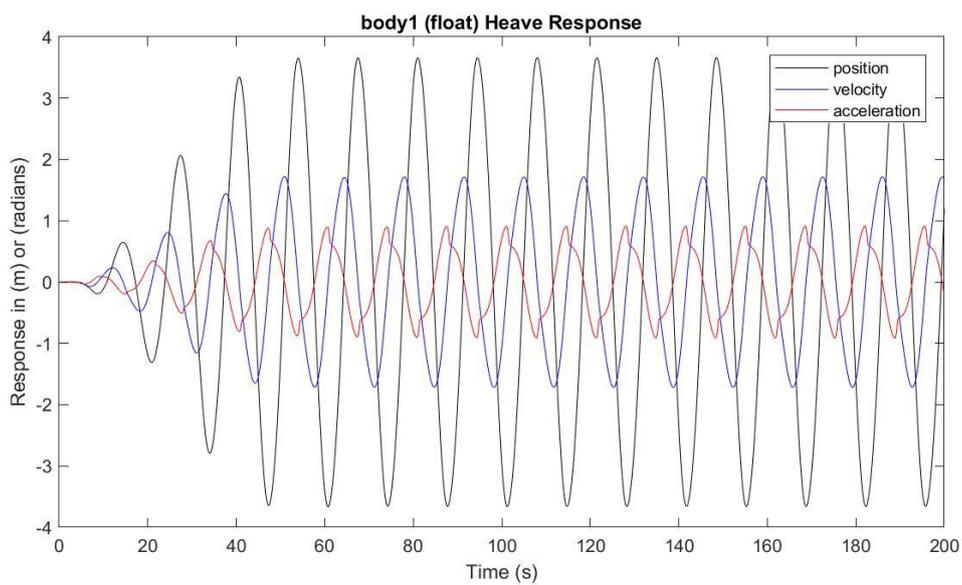
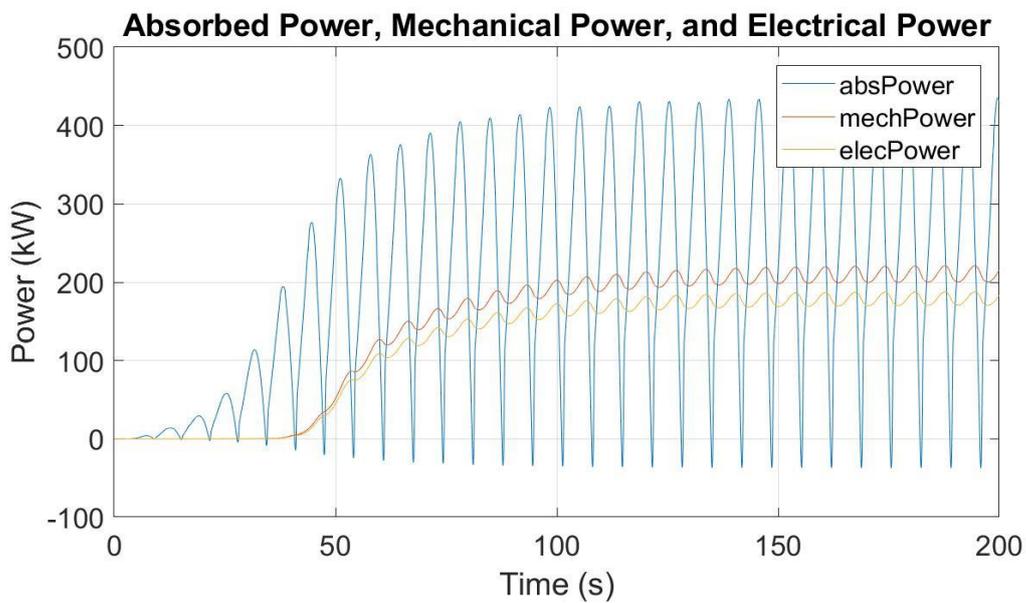
Potencia eléctrica media: 178.1941 kW

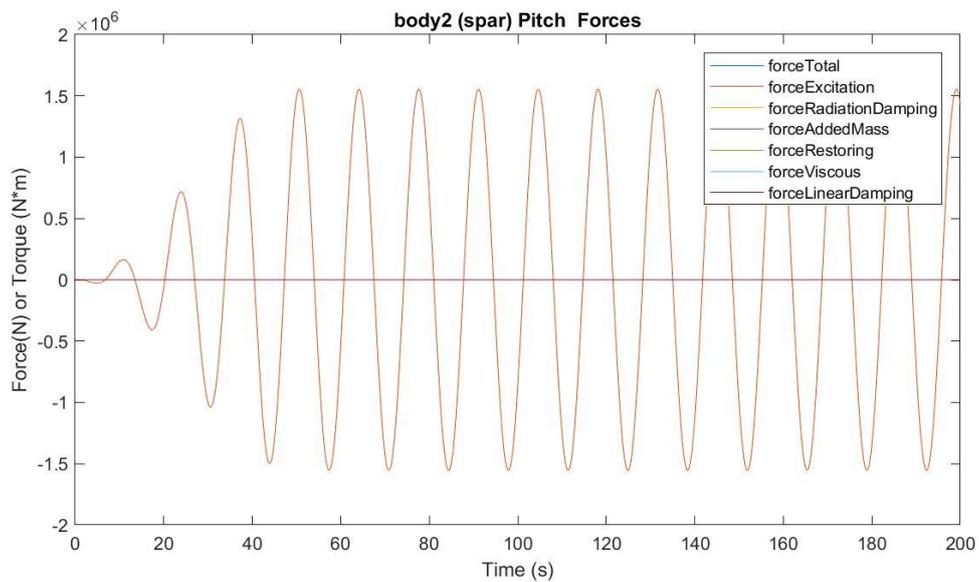
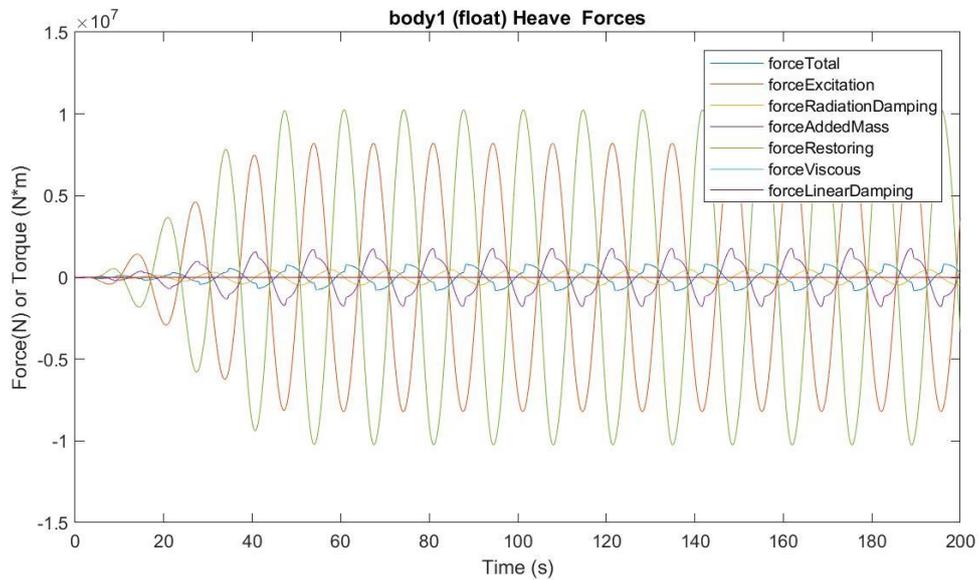
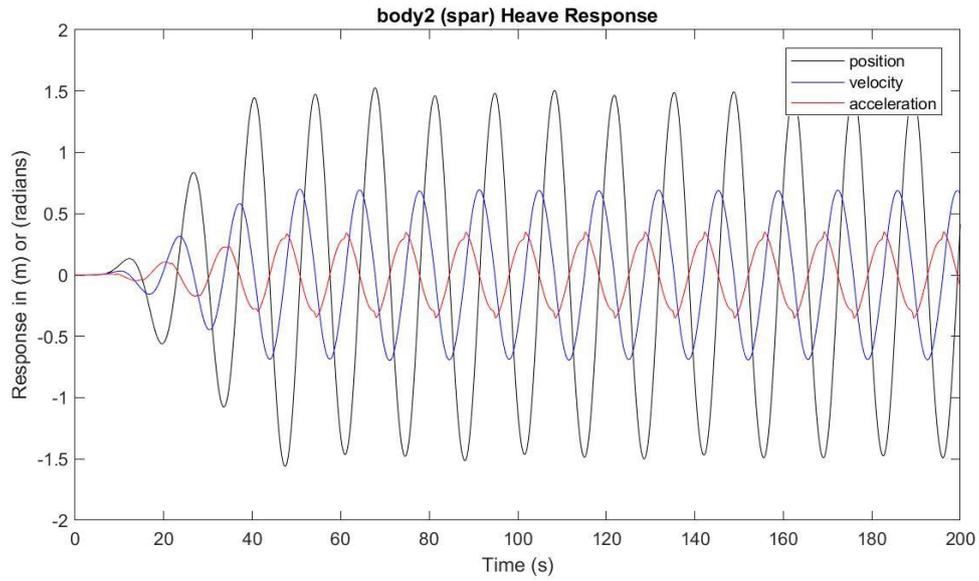
Presión media del acumulador de alta presión: 24.8415 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.6691 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.6600 m, 1.7220 m/s y 0.9144 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.5284 m, 0.7006 m/s y 0.3527 m/s²





$H_s = 7.25 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

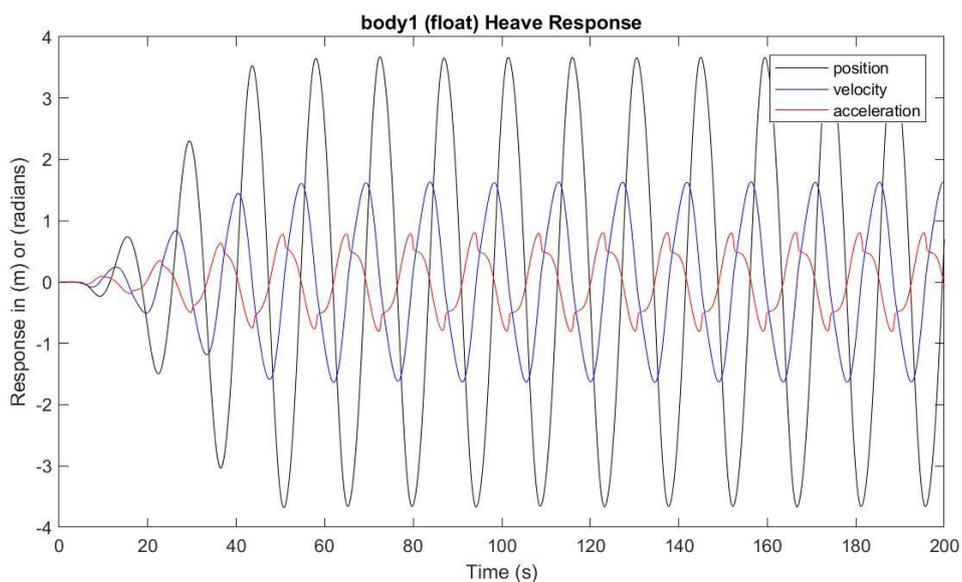
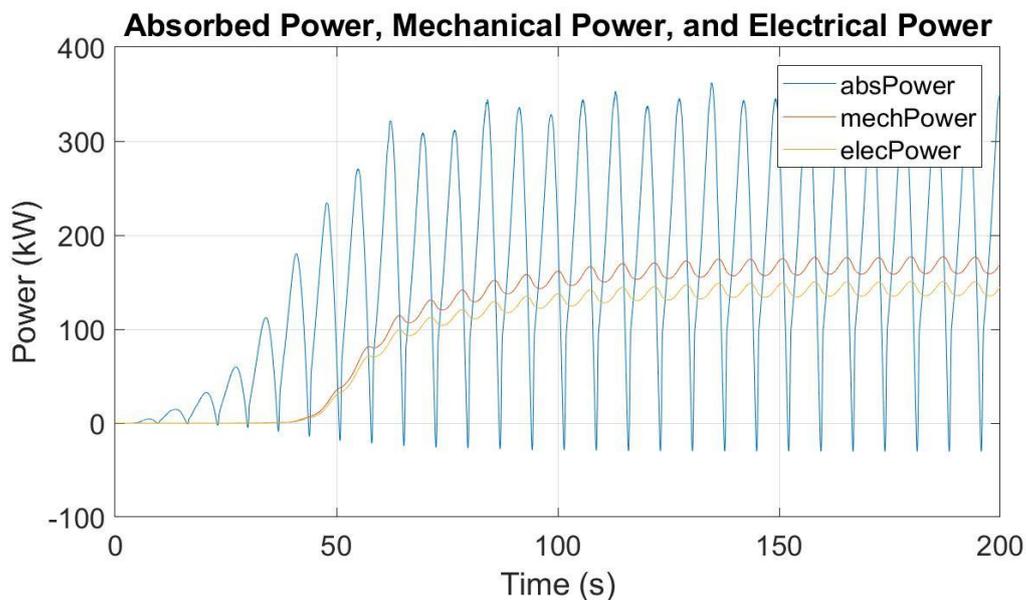
Potencia eléctrica media: 141.6599 kW

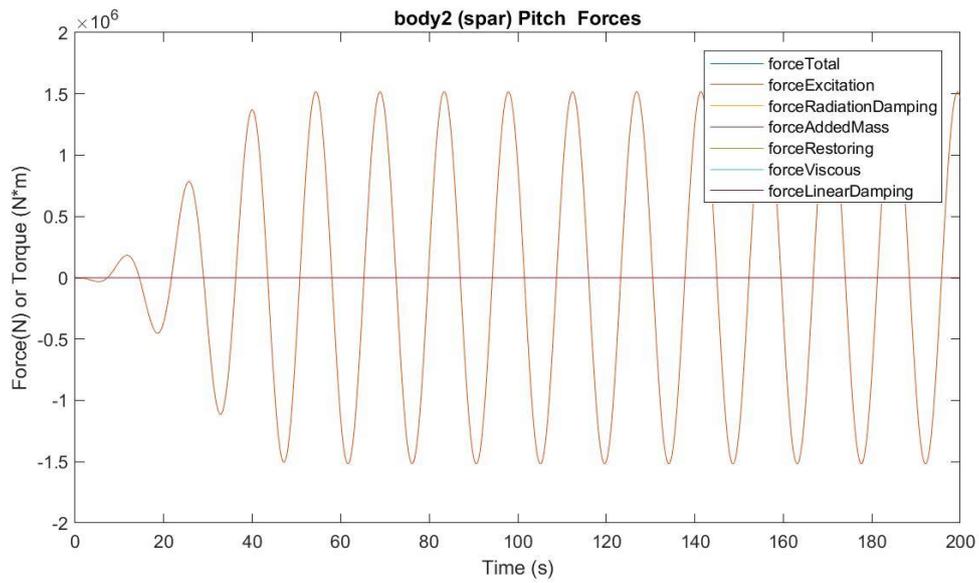
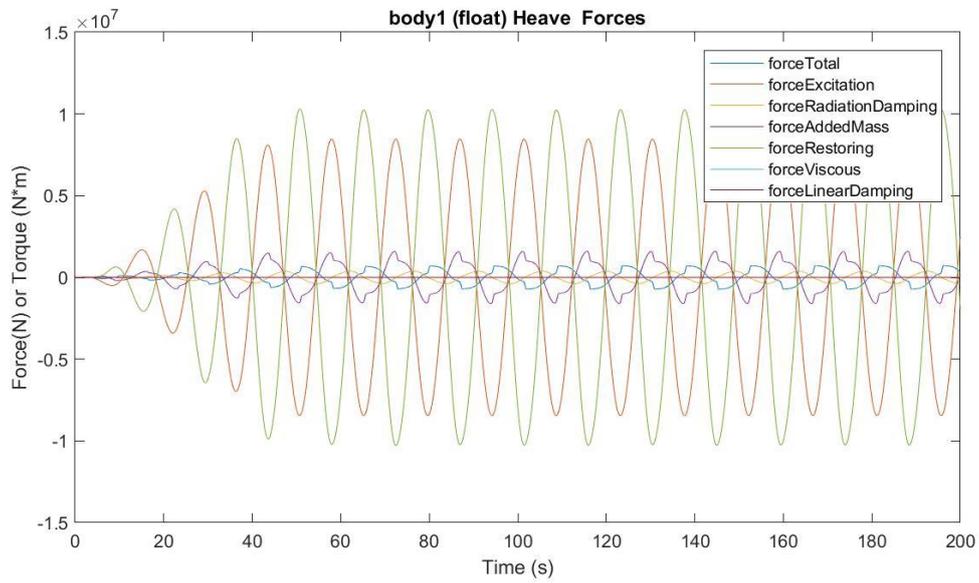
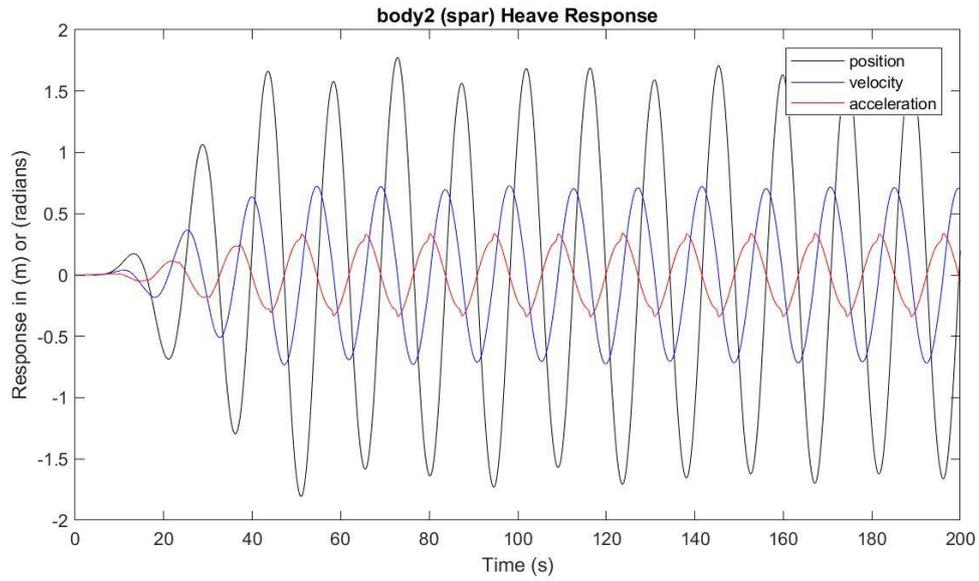
Presión media del acumulador de alta presión: 24.4782 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.0918 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.6731 m, 1.6345 m/s y 0.8074 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.7739 m, 0.7282 m/s y 0.3422 m/s²





$H_s = 7.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

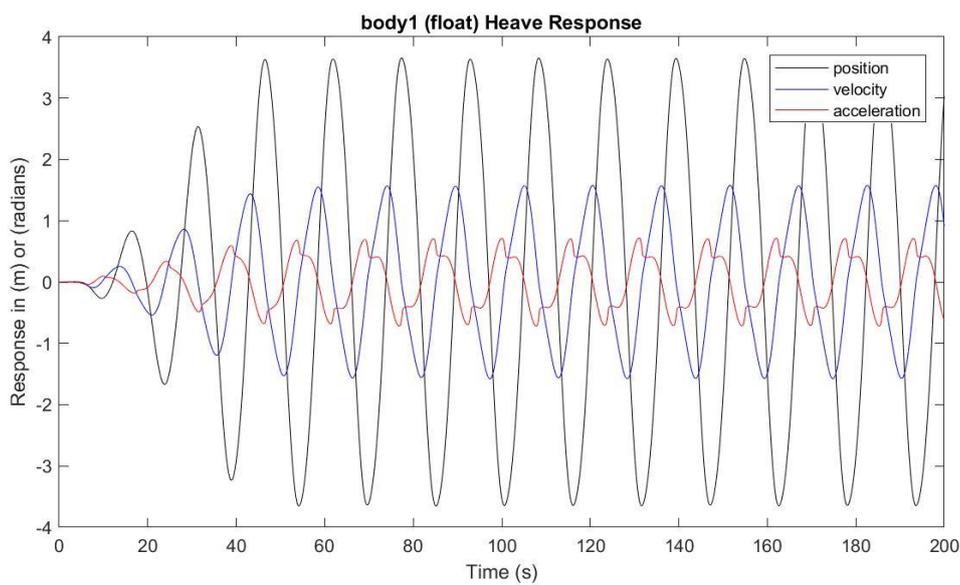
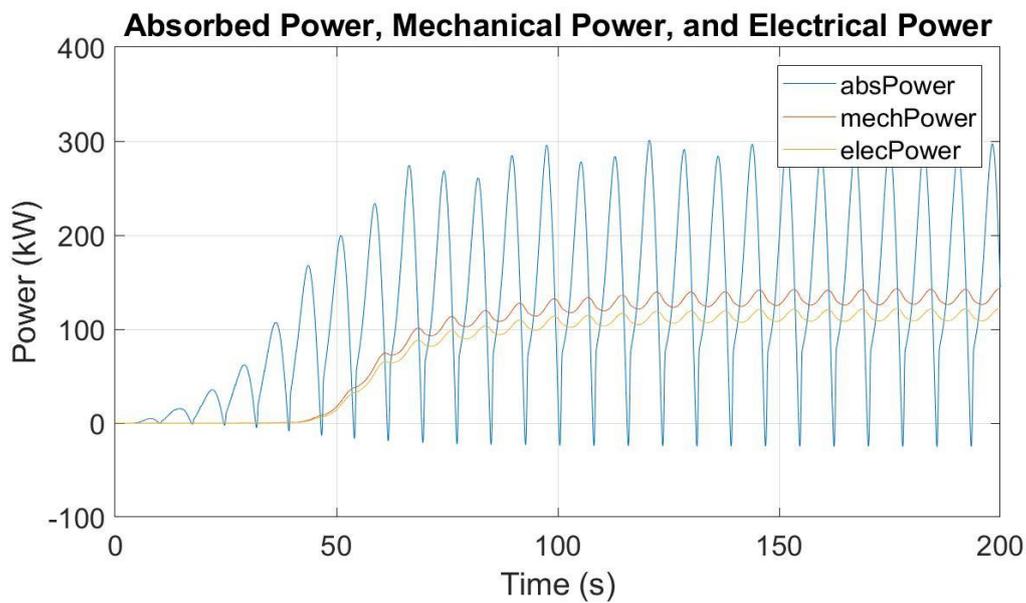
Potencia eléctrica media: 114.4874 kW

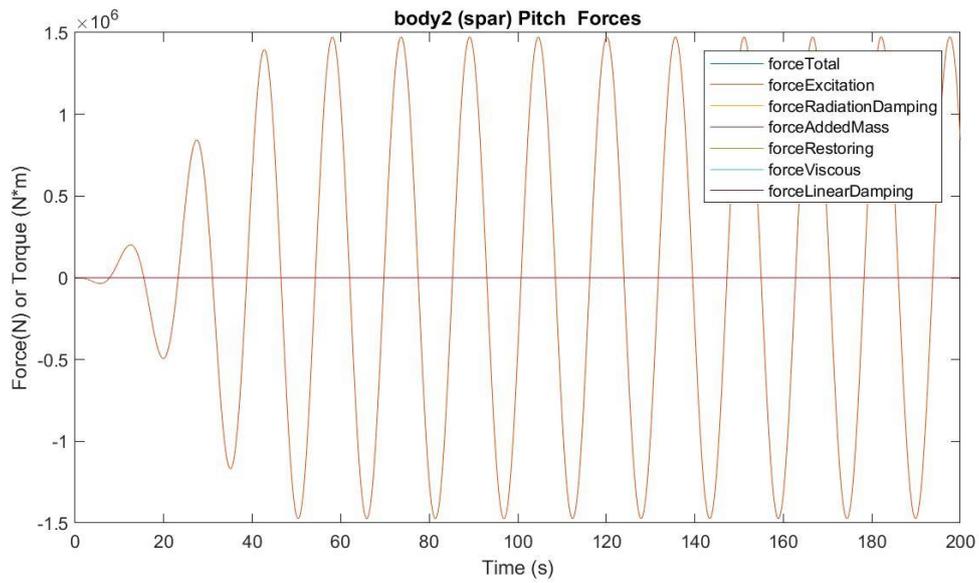
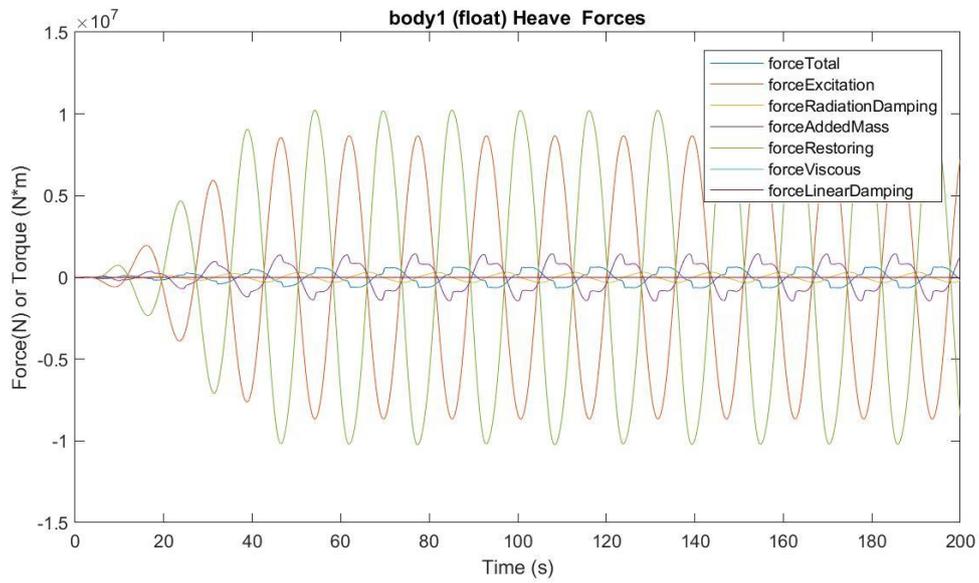
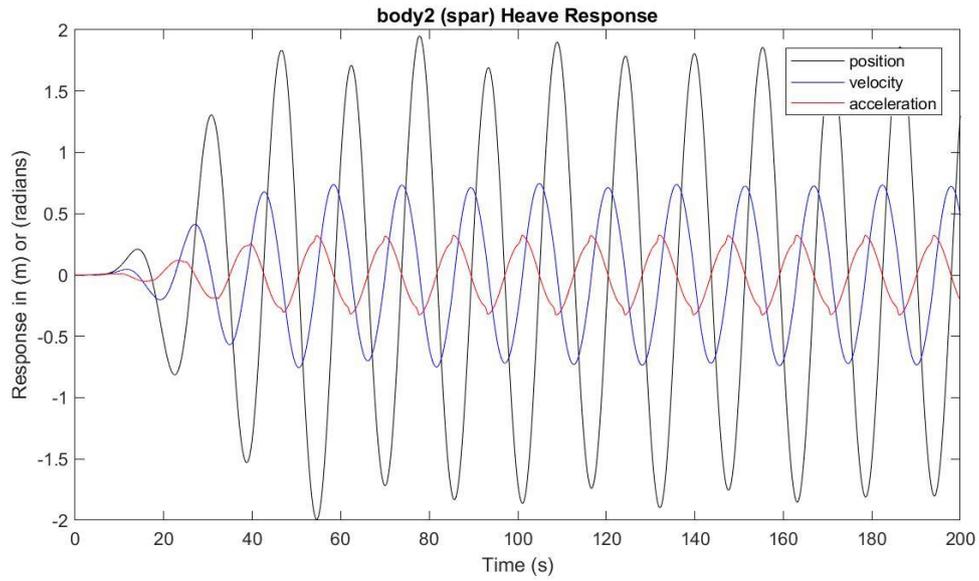
Presión media del acumulador de alta presión: 24.1811 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.4599 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.6570 m, 1.5796 m/s y 0.7192 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.9505 m, 0.7468 m/s y 0.3283 m/s²





$H_s = 7.75 \text{ m}$

$T_e = 12.5 \text{ s}$

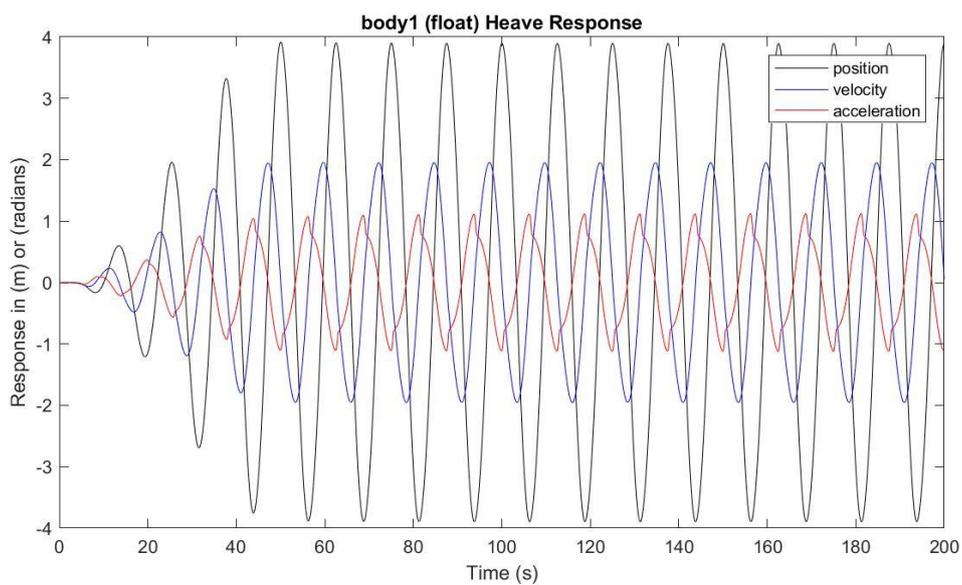
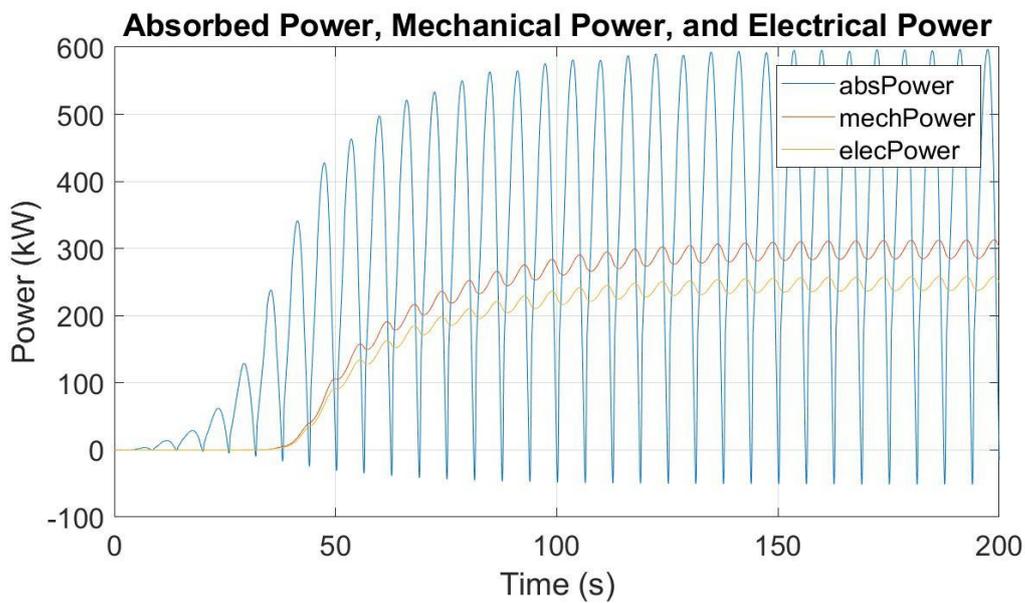
Potencia eléctrica media: 247.4383 kW

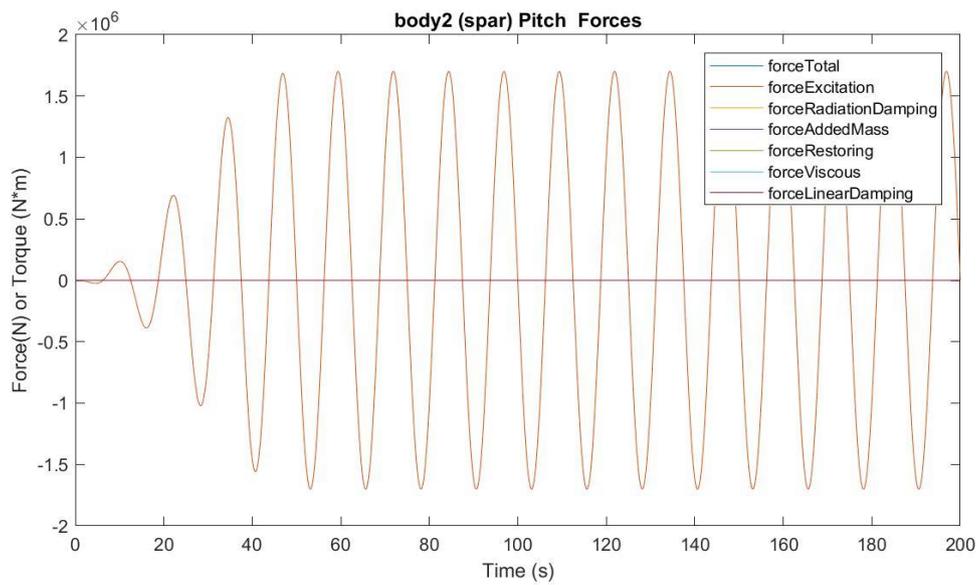
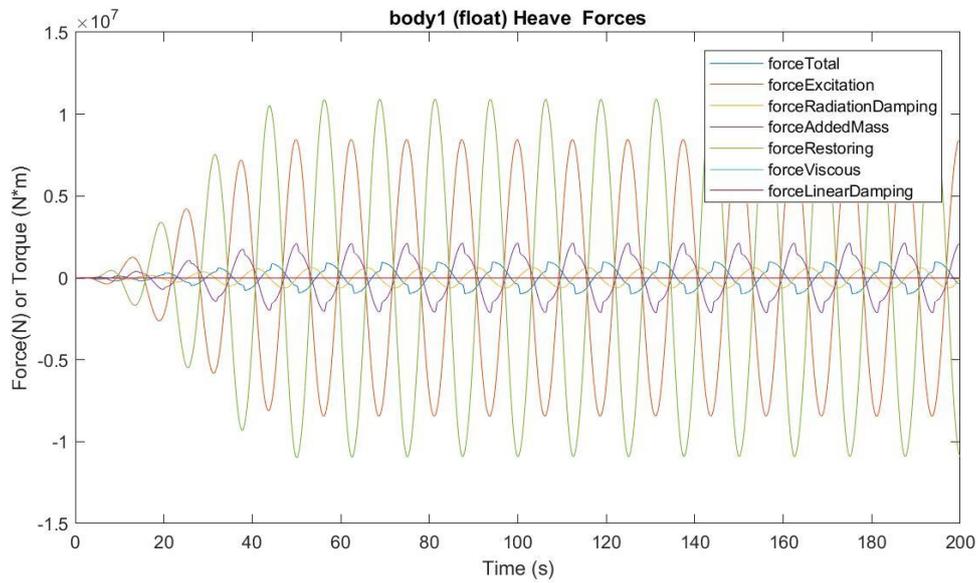
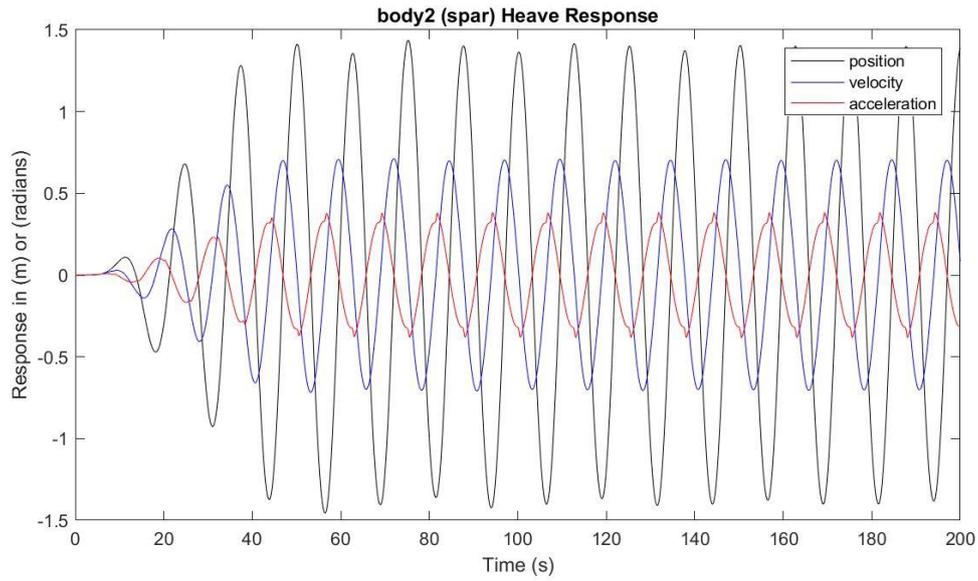
Presión media del acumulador de alta presión: 25.5244 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 14.9433 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.9169 m, 1.9573 m/s y 1.1206 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.4354 m, 0.7124 m/s y 0.3835 m/s²





$H_s = 7.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

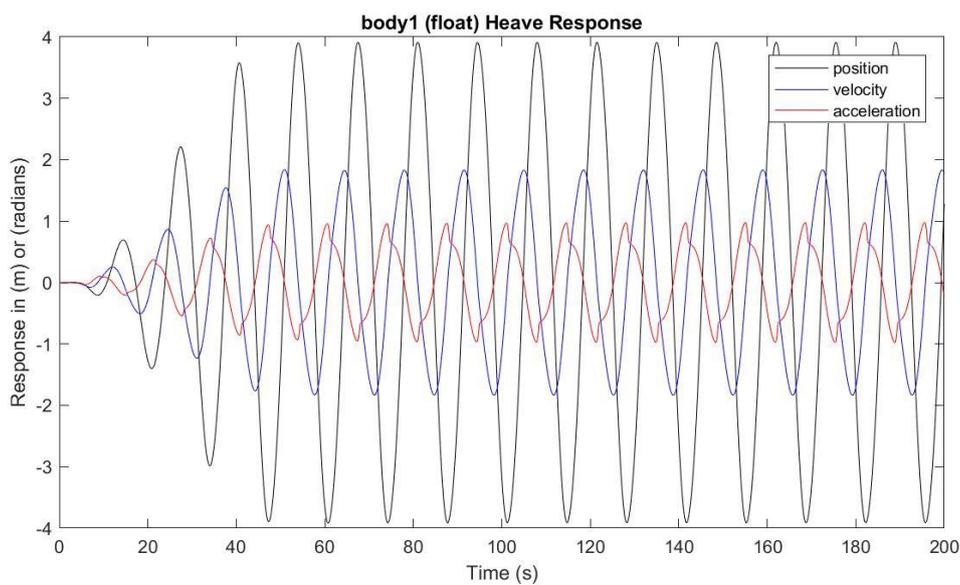
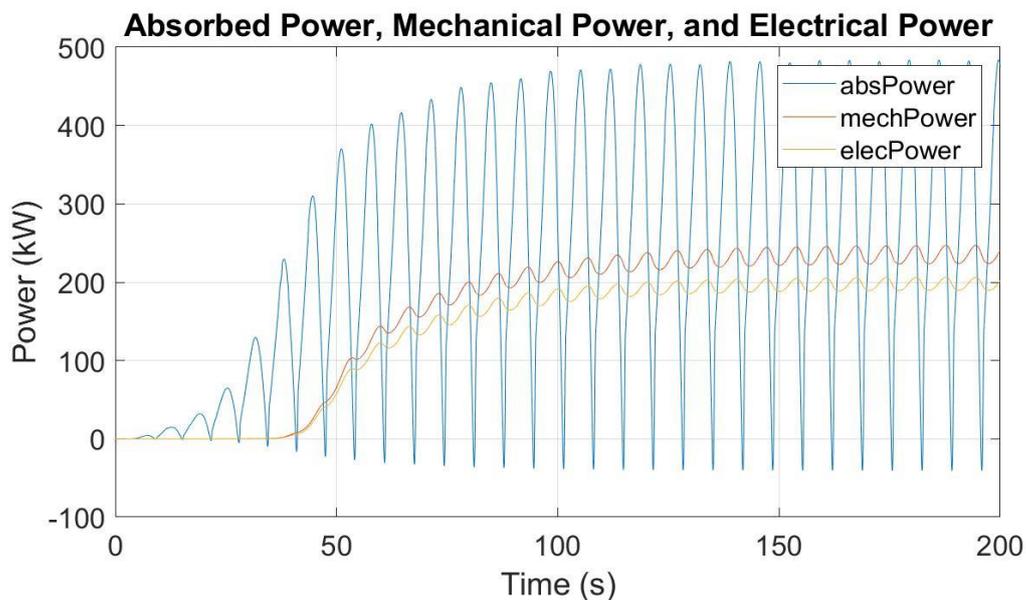
Potencia eléctrica media: 196.9487 kW

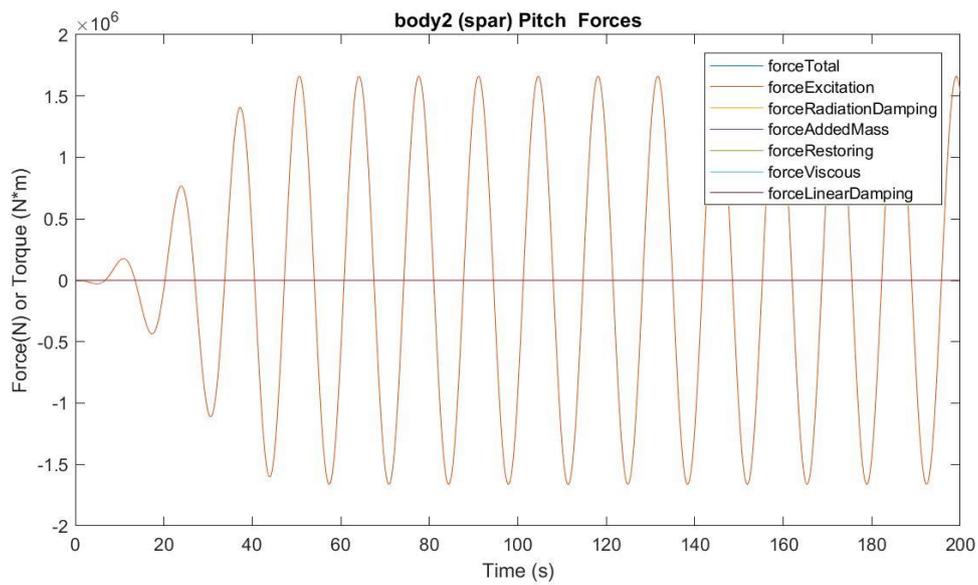
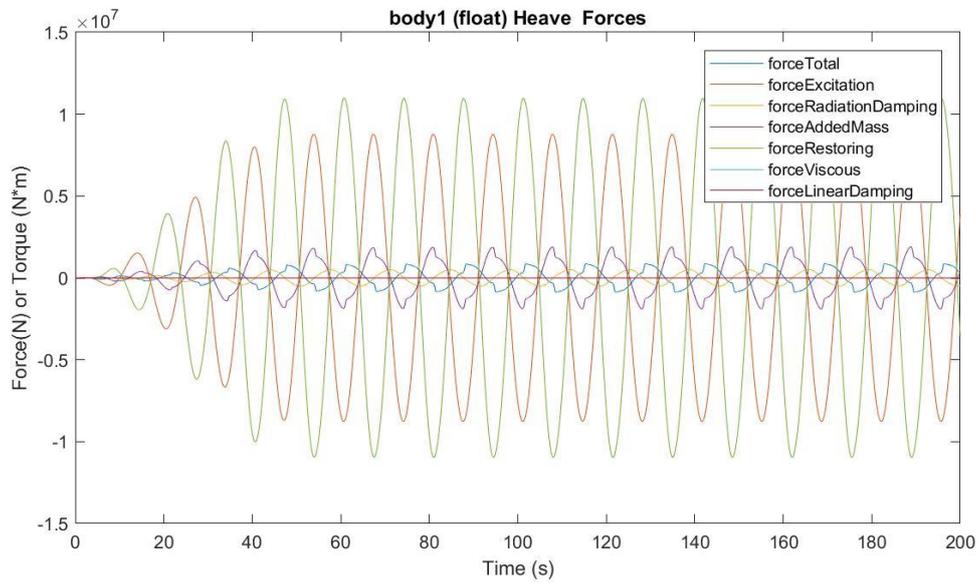
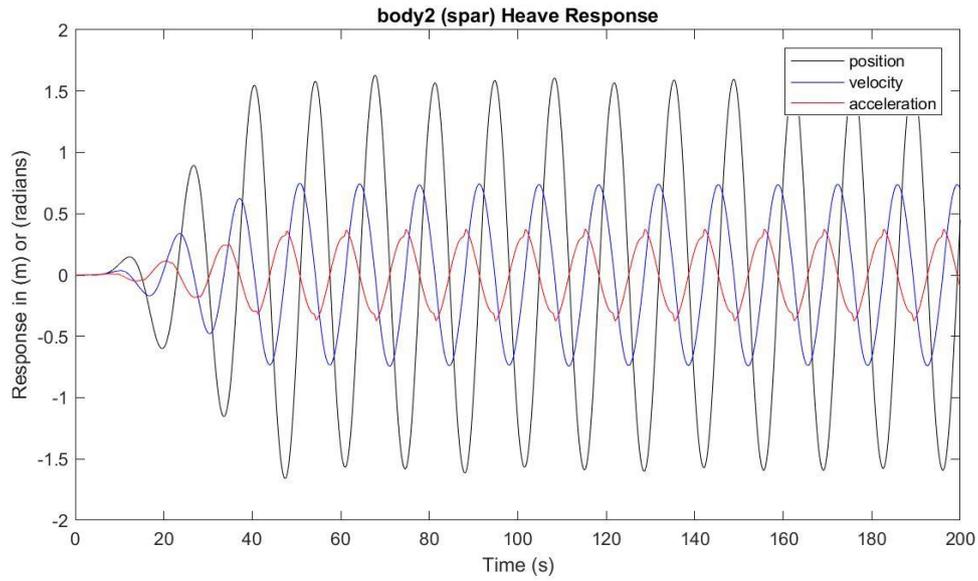
Presión media del acumulador de alta presión: 25.0379 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.4512 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.9133 m, 1.8399 m/s y 0.9744 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.6290 m, 0.7483 m/s y 0.3757 m/s²





$H_s = 7.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

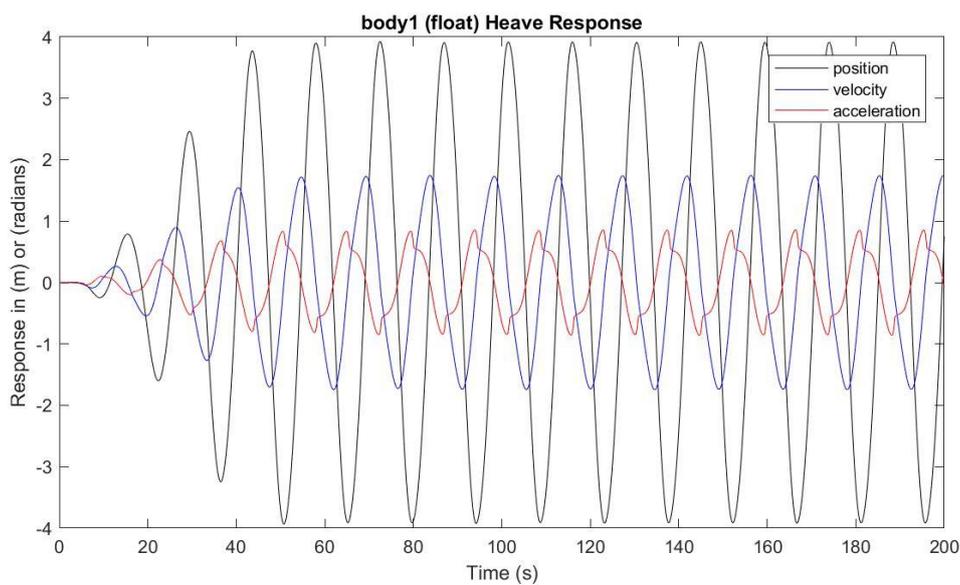
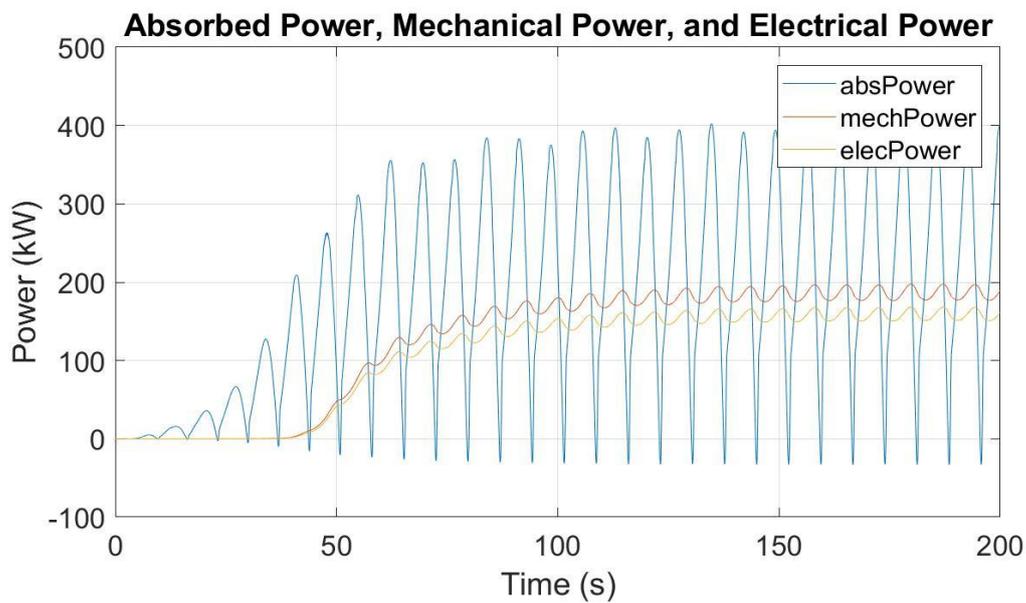
Potencia eléctrica media: 157.8780 kW

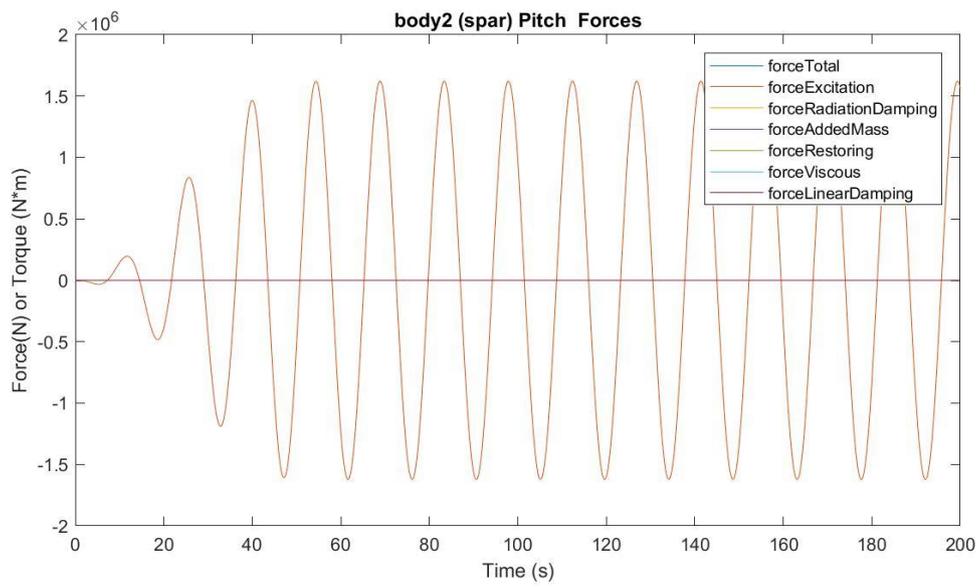
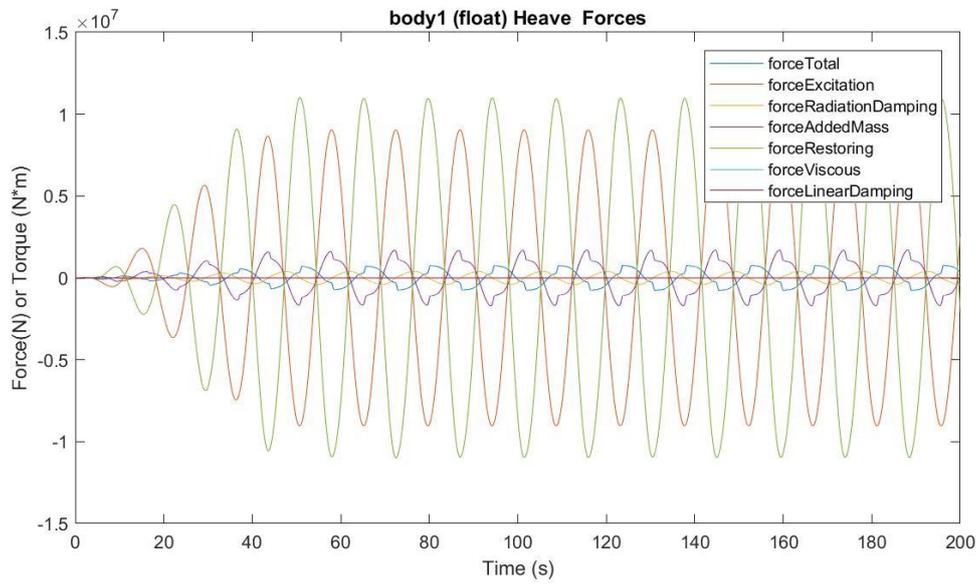
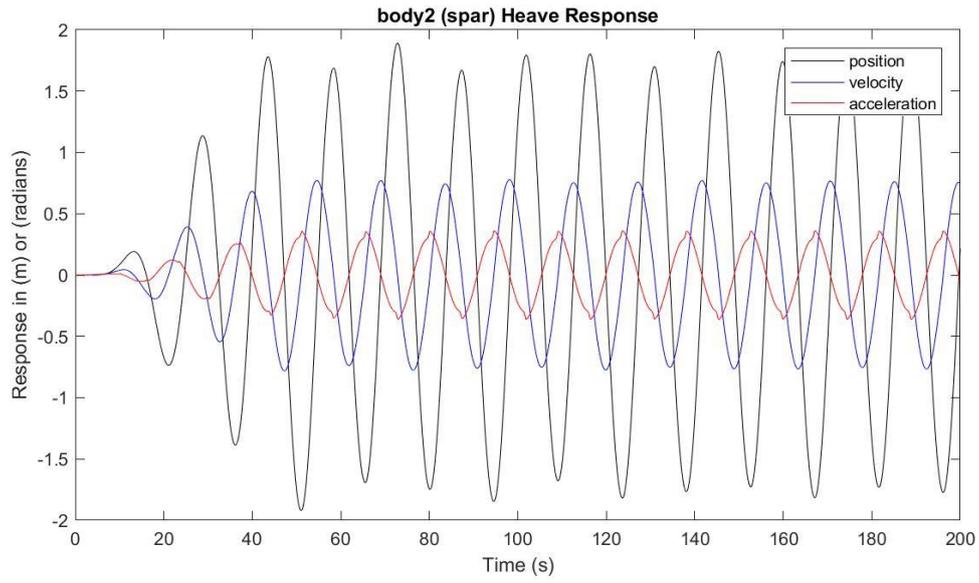
Presión media del acumulador de alta presión: 24.6423 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.8970 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 3.9256 m, 1.7444 m/s y 0.8579 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.8914 m, 0.7772 m/s y 0.3642 m/s²





$H_s = 8.25 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

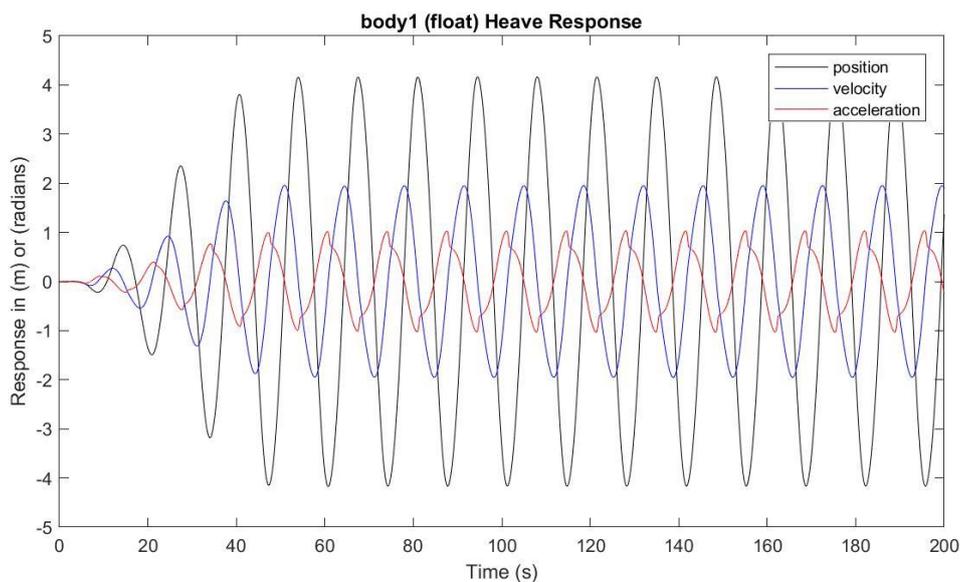
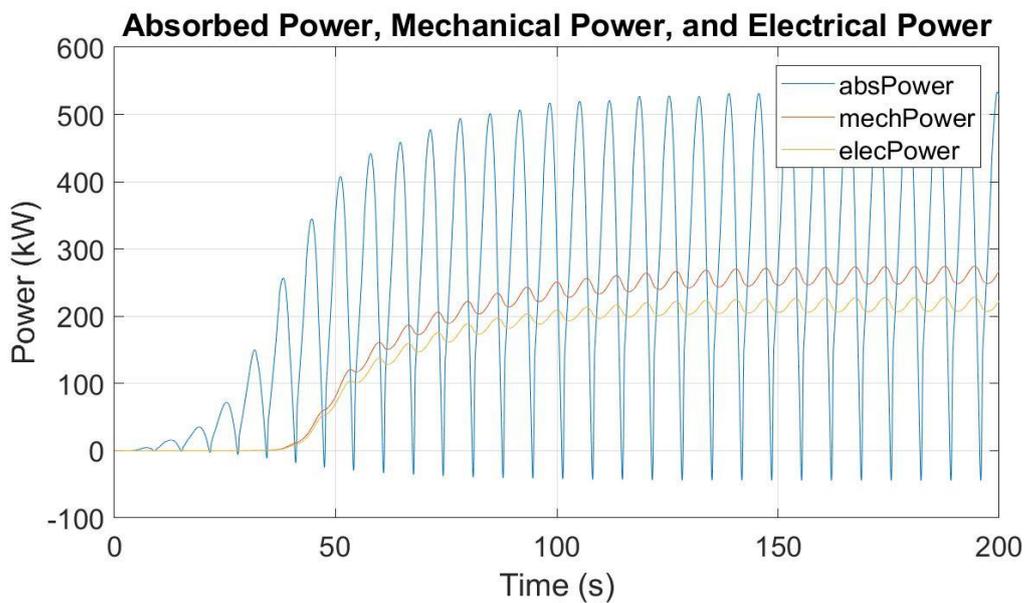
Potencia eléctrica media: 216.4507 kW

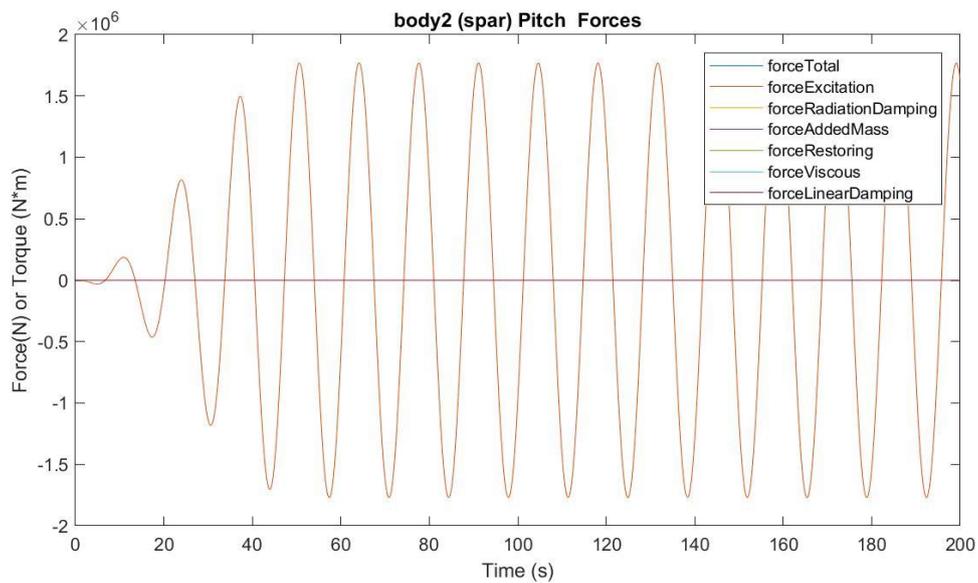
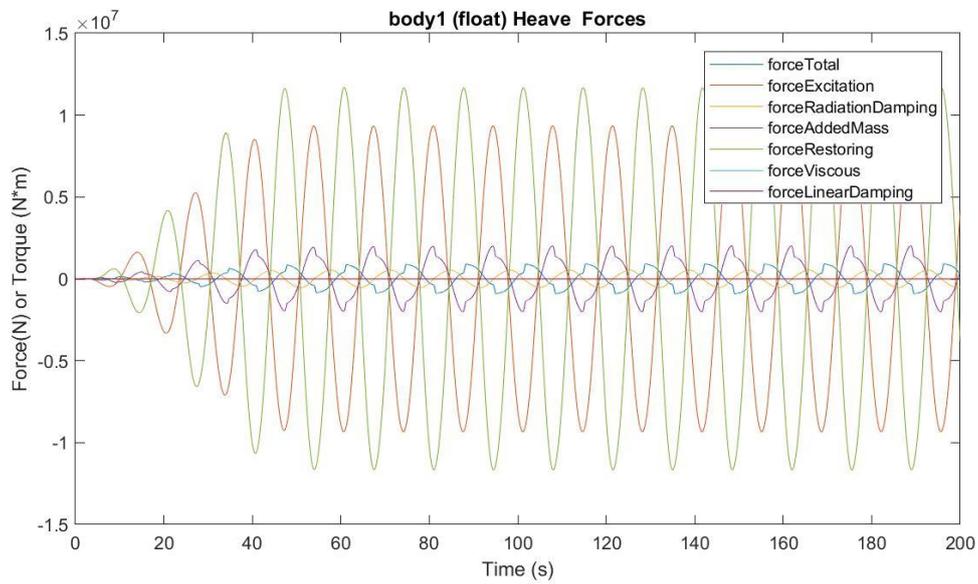
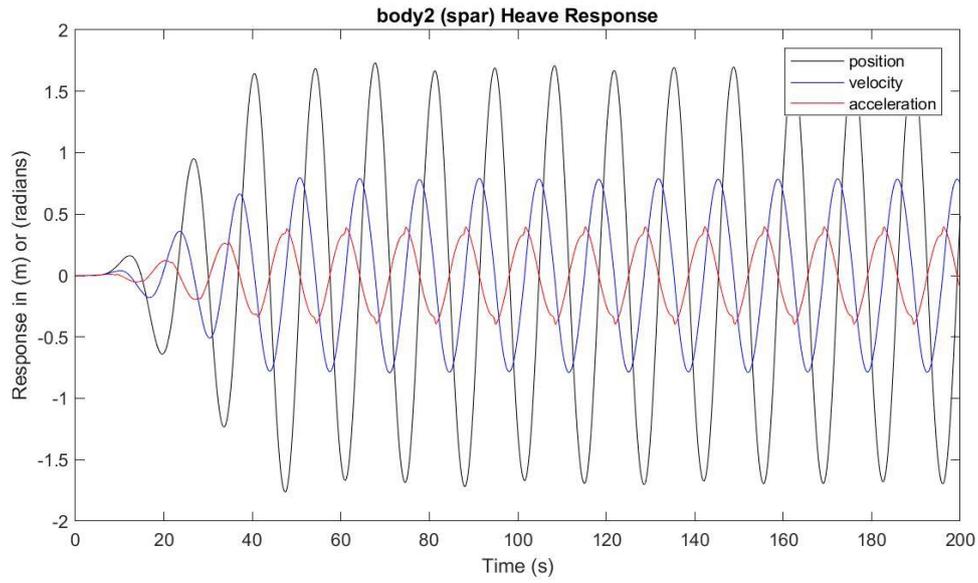
Presión media del acumulador de alta presión: 25.2378 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.2369 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 4.1665 m, 1.9583 m/s y 1.0343 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.7320 m, 0.7966 m/s y 0.3987 m/s²





$H_s = 8.25 \text{ m}$

$T_e = 15.5 \text{ s}$

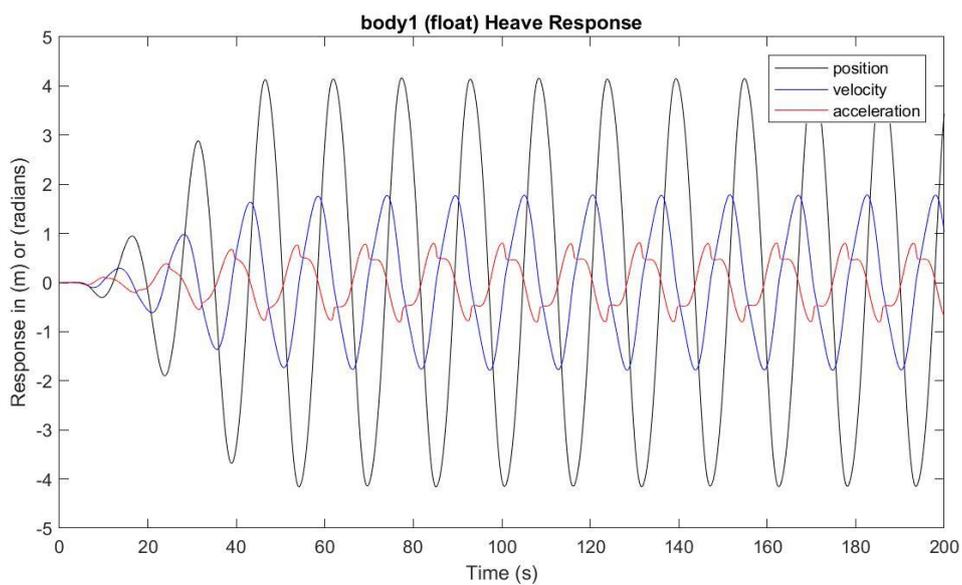
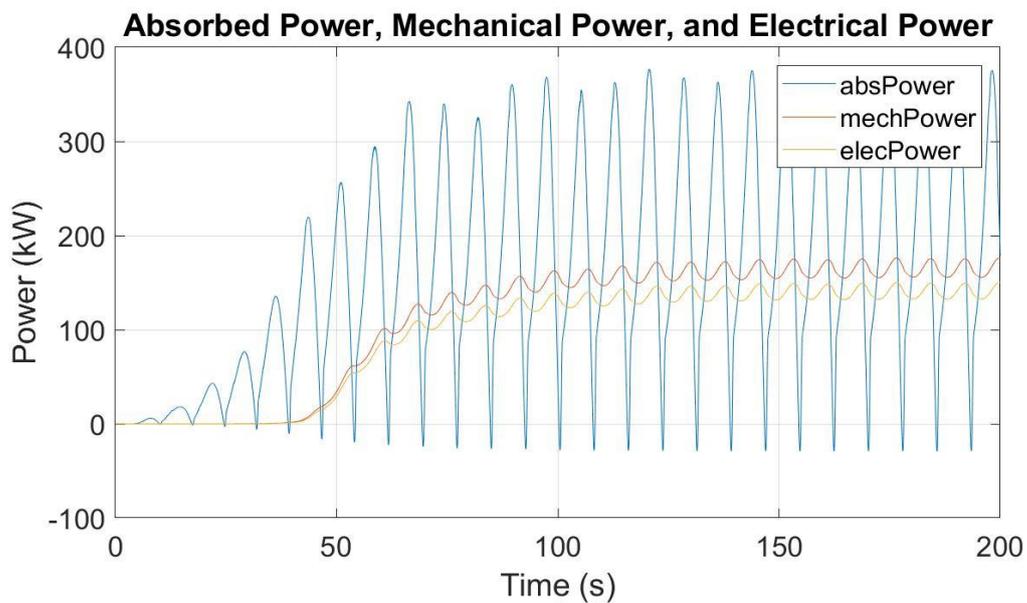
Potencia eléctrica media: 140.1946 kW

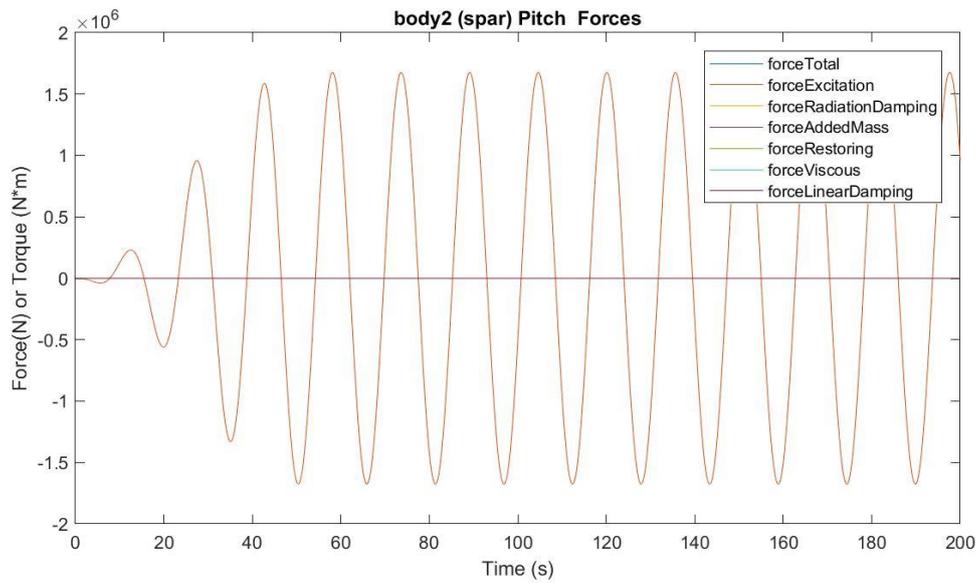
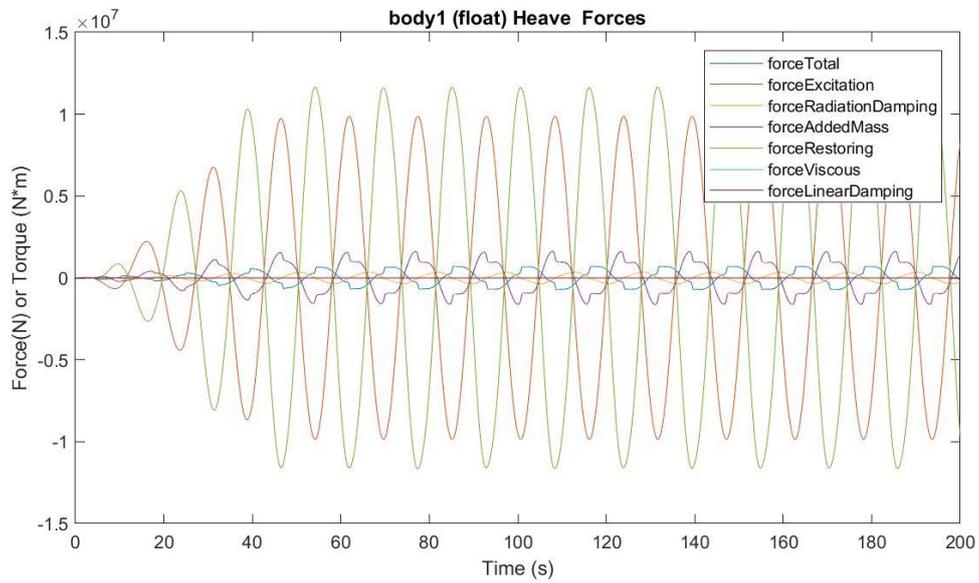
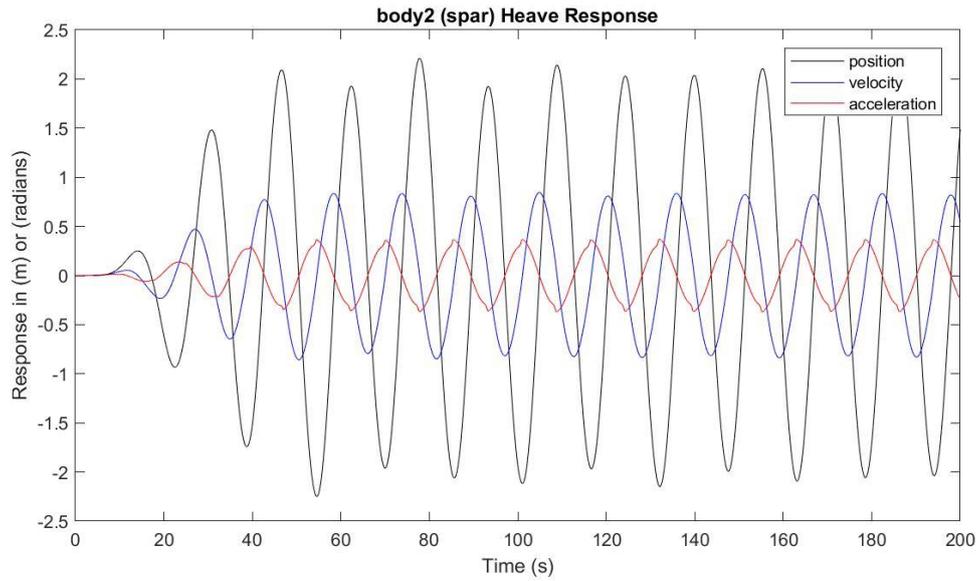
Presión media del acumulador de alta presión: 24.4629 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 16.1103 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 4.1630 m, 1.7856 m/s y 0.8070 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 2.2111 m, 0.8463 m/s y 0.3705 m/s²





$H_s = 8.75 \text{ m}$

$T_e = 13.5 \text{ s}$

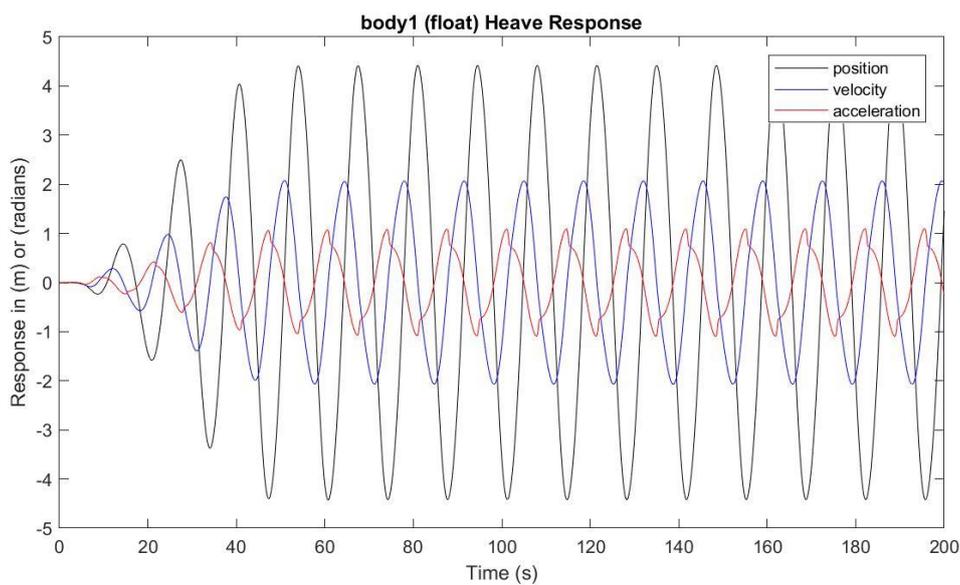
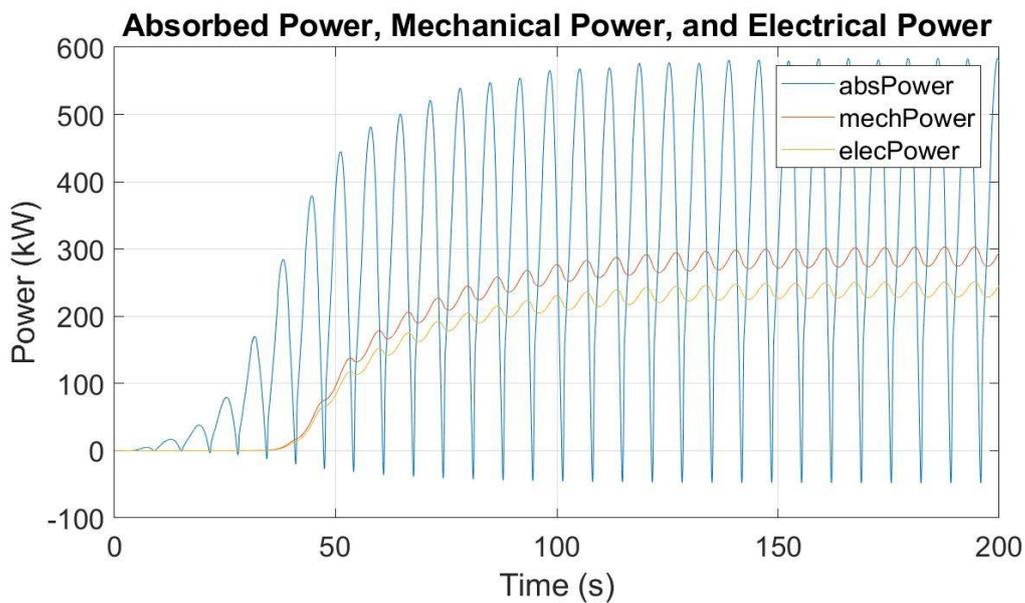
Potencia eléctrica media: 238.6522 kW

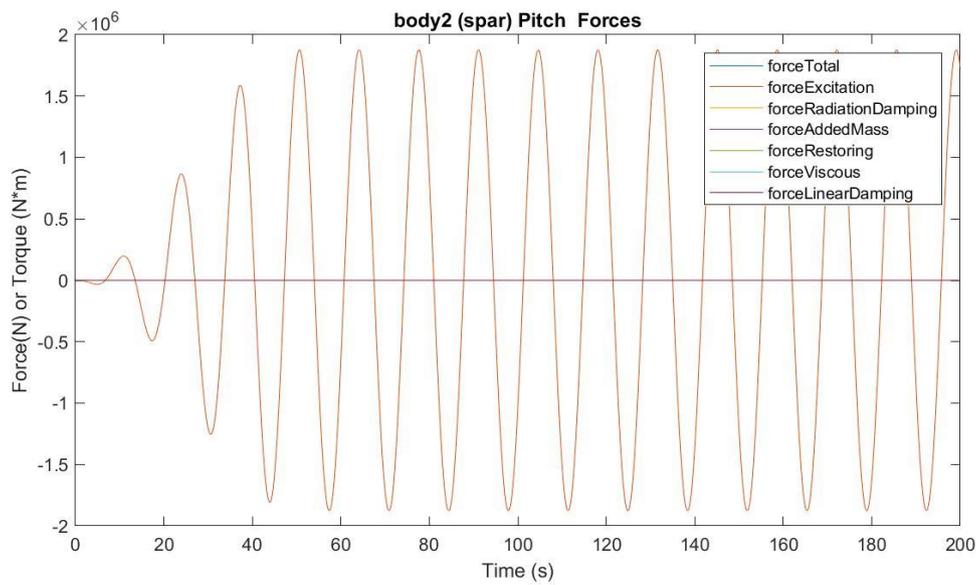
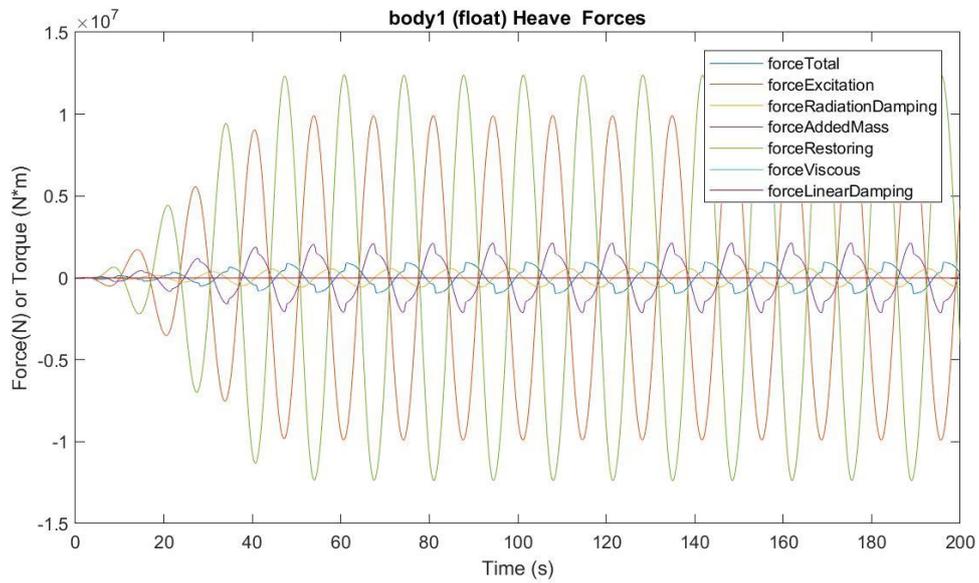
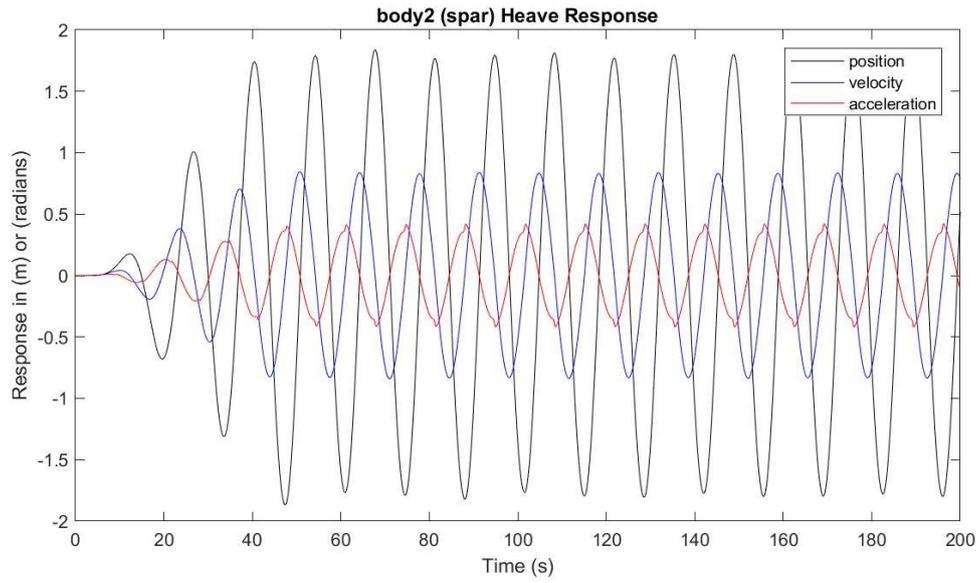
Presión media del acumulador de alta presión: 25.4414 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.0263 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 4.4199 m, 2.0770 m/s y 1.0946 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 1.8364 m, 0.8452 m/s y 0.4218 m/s²





$H_s = 8.75 \text{ m}$

$T_e = 14.5 \text{ s}$

Potencia eléctrica media: 191.6894 kW

Presión media del acumulador de alta presión: 24.9798 MPa

Presión media del acumulador de baja presión: 15.5138 MPa

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (1): 4.4334 m, 1.9640 m/s y 0.9623 m/s²

Máx. desplazamiento, velocidad y aceleración (2): 2.1297 m, 0.8768 m/s y 0.4086 m/s²

