

# Desarrollo y aplicación de un modelo acoplado para el diseño y verificación de la estructura de la plataforma ATIR 2.0



Julio García Espinosa, Universidad Politécnica de Madrid

Francisco Otero, Magallanes Renovables

Marta García, Magallanes Renovables

Javier Calderón Sánchez, Universidad Politécnica de Madrid

Borja Serván Camas, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería

64º Congreso Internacional de Ingeniería Naval e Industria Marítima  
Gijón 26-28 de marzo de 2025



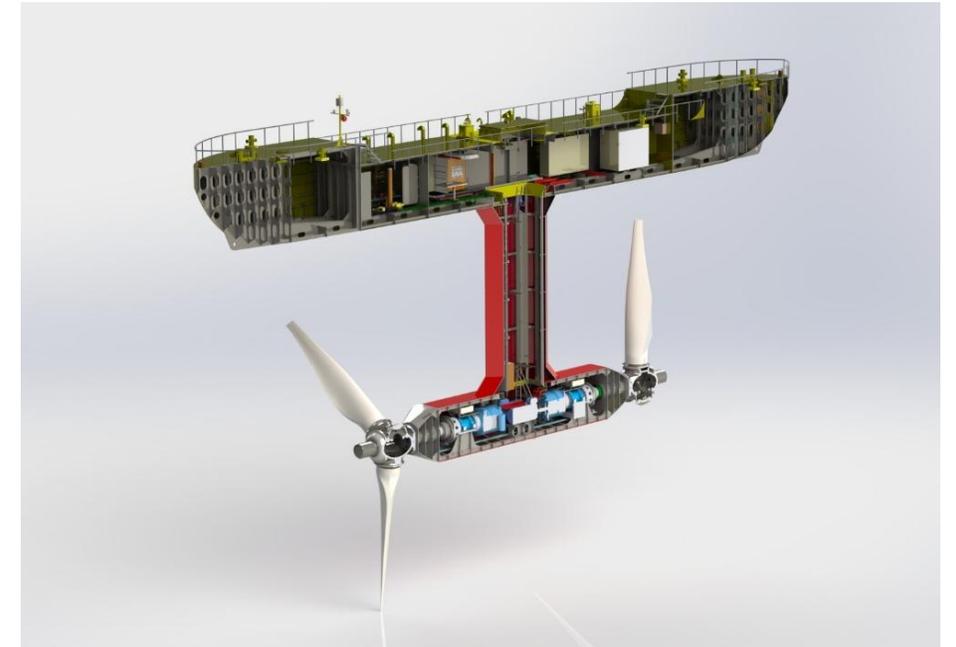
UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
INGENIEROS NAVALES

# La tecnología ATIR

- ♦ La tecnología ATIR (Magallanes Renovables) es una solución innovadora y eficiente para la generación de energía a partir de corrientes de marea.
- ♦ El concepto aprovecha la experiencia de las industrias eólica y naval: combinando una plataforma flotante fondeada con un tren de potencia situado a 15 metros bajo el agua, donde dos turbinas contra rotativas se encargan de extraer energía con la máxima eficiencia.
- ♦ ATIR ha sido demostrada con éxito en 5 años de pruebas de un prototipo a escala real (1.5 MW) en el sitio de pruebas de EMEC en Fall of Warness (Escocia), conectado a red a través de los cables submarinos y la subestación terrestre de EMEC.



Característica	Valor
Eslora total	53.60 m
Manga de trazado	7.00 m
Puntal de trazado	3.20 m
Calado de trazado	1.21 m

D3

BY  
DESIGNED  
FOR IT



# Magallanes Renovables

Nacimiento  
Magallanes  
Renovables

Prototipo  
escala 1:10

Prototipo  
escala real  
ATIR 1.0

Generación  
ATIR 1.0  
EMEC (Orcadas)

Instalación  
plataforma  
comercial  
ATIR 2.0

2009



2013



2017



2019



2026

Estado del arte de la  
energía mareomotriz



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
INGENIEROS NAVALES





**CEHINAV**  
**ETSIN-UPM**

**Joint Research Unit** **CIMNE<sup>R</sup>**

in cooperation with **COMPASS**

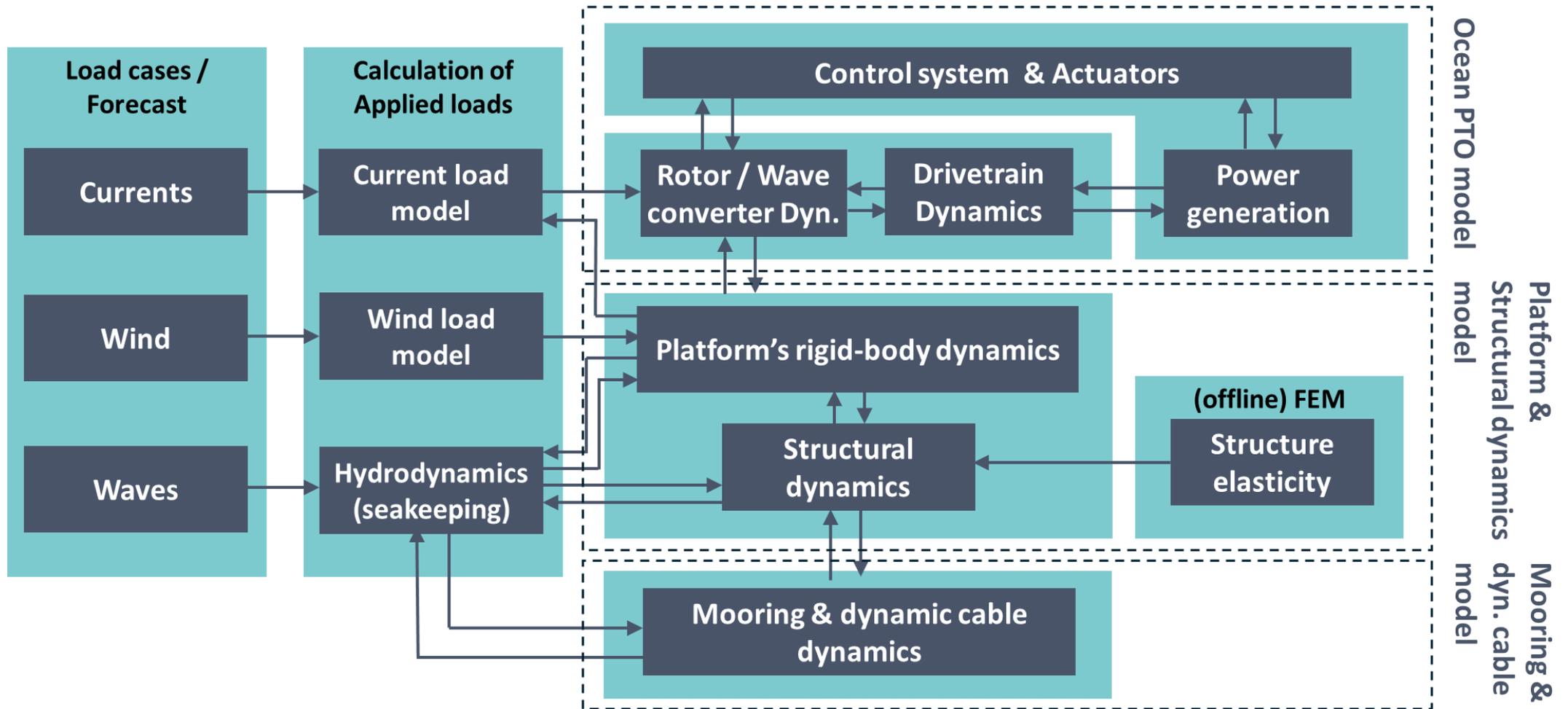
- ◆ Creado el 3/8/2021 (acuerdo de colaboración estratégica entre ETSIN-UPM y CIMNE-MARINE)
- ◆ Es uno de los principales grupos de investigación en ingeniería naval y offshore en España:
  - ◆ Equipo de 21 investigadores (ingenieros navales, oceánicos y civiles, incluyendo 3 catedráticos).
  - ◆ Enorme experiencia en I+D y transferencia de tecnología (+25 proyectos de I+D nacionales, europeos e internacionales y +60 contratos con la industria en los últimos 10 años).
  - ◆ Instalaciones experimentales de CEHINAV (canal de remolque y dinámica de olas, laboratorio de tanques estabilizadores ...).
- ◆ Capacidades / Experiencia:
  - ◆ Ensayos hidrodinámicos (towing, decay, anti-roll, heave plates, ...) + estudios CFD.
  - ◆ Diseño y evaluación estructural + nuevas soluciones de materiales y métodos de construcción.
  - ◆ Desarrollo de herramientas innovadoras de análisis numérico.
  - ◆ Desarrollo de soluciones de gemelos digitales.
  - ◆ Modelado y diseño de operaciones marítimas.
  - ◆ Internet de las Cosas (IoT) para la industria naval y offshore.
  - ◆ Gestión y análisis de datos con técnicas de ML e IA.

# Diseño y optimización de ATIR 2.0

- ◆ La concepción básica y el escantillonado inicial de la estructura de la plataforma ATIR 2.0 se han basado en el diseño del prototipo ATIR 1.0 y en la norma BV NR 600 [1].
- ◆ Esta presentación se centra en las actividades realizadas dentro del proyecto "Desarrollo, diseño y plataforma de control de la plataforma española de energía marina renovable ATIR 2.0" (Misiones CDTI) y en concreto en las tareas de optimización y verificación de la resistencia estructural y a fatiga de la nueva estructura.
- ◆ JRU CIMNE-UPM ha desarrollado una metodología avanzada de análisis hidroelástico para superar limitaciones de los métodos tradicionales y ha sido contratada para brindar soporte en las tareas de optimización y verificación estructural de ATIR 2.0.
- ◆ El diseño y verificación de dispositivos de energía oceánica trata de adaptar la experiencia de las industrias naval y offshore, pero presentan desafíos únicos en configuración estructural, dinámica y exposición ambiental. La búsqueda de reducción de peso y costes lleva a estructuras muy flexibles. La interacción entre oleaje, corriente y respuesta estructural debe analizarse con gran precisión.

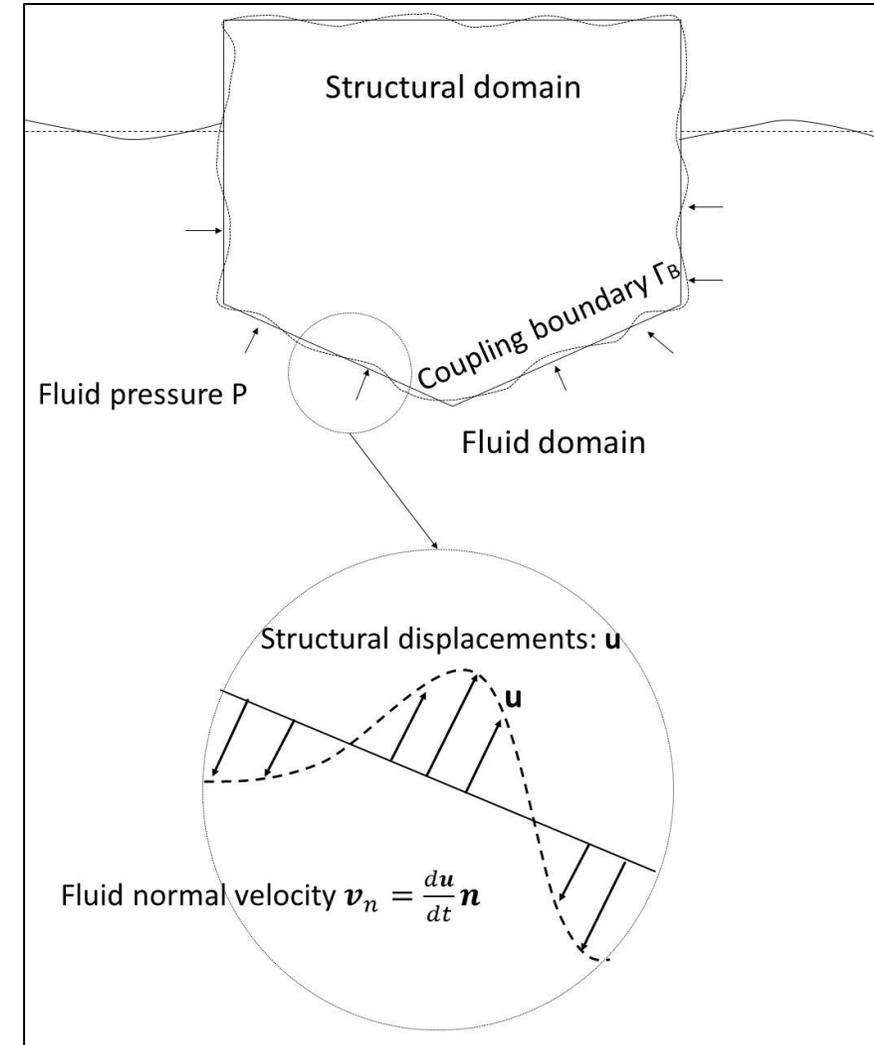
[1] BV NR 600. Hull Structure and Arrangement for the Classification of Cargo Ships Less Than 65m and Non-Cargo Ships Less Than 90m. Bureau Veritas Marine & Offshore. November 2022

# Modelo de Análisis ILA

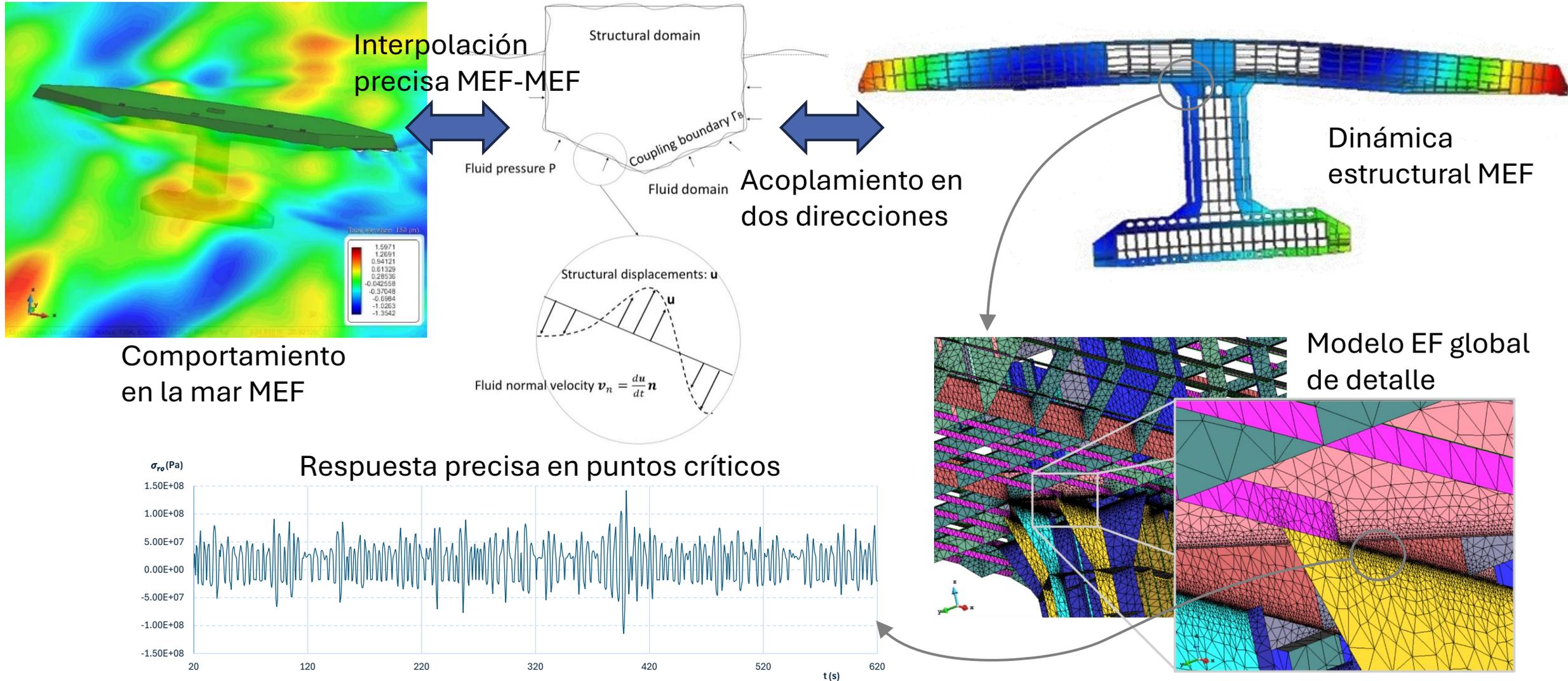


# Modelo de Análisis ILA

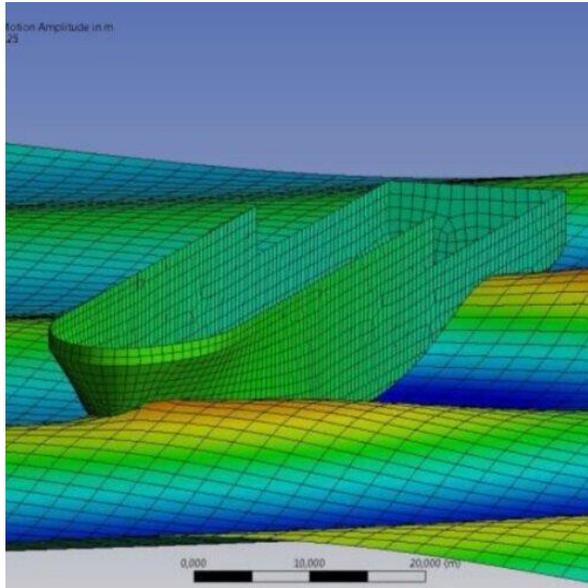
- ◆ Modelo de Elementos Finitos (EF) global y detallado para evaluar esfuerzos en zonas estructuras críticas.
- ◆ Modelo hidro-elástico en SeaFEM, resolviendo dinámica de fluidos y estructura con el Método de Elementos Finitos (MEF).
- ◆ Algoritmo de interacción fluido-estructura fuertemente acoplado (dos direcciones) basado en un esquema particionado.
- ◆ El modelo de análisis integrado incluye:
  - ◆ Fondeo lineal definido por matrices de inercia, amortiguamiento y rigidez, obtenidas con OrcaFlex.
  - ◆ Modelo cuasiestático del rotor basado en curvas de empuje y par (obtenidas a partir de cálculos CFD).
- ◆ Optimización computacional: Uso de reducción del orden modal para disminuir tiempos de cálculo.



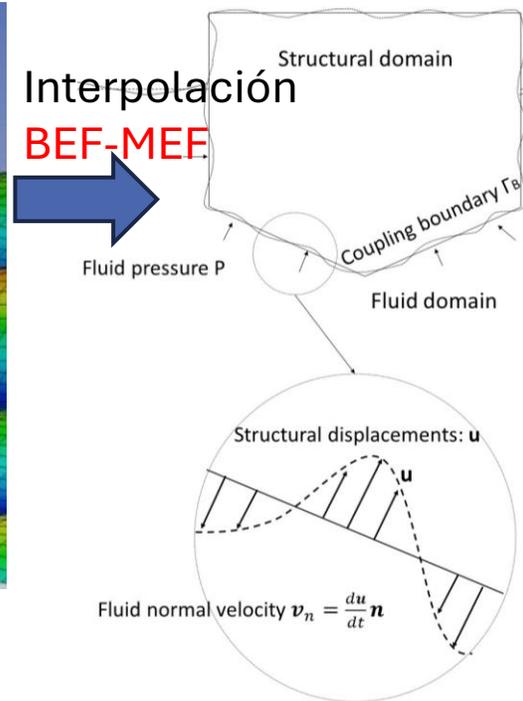
# Modelo hidroelástico (vs enfoque tradicional)



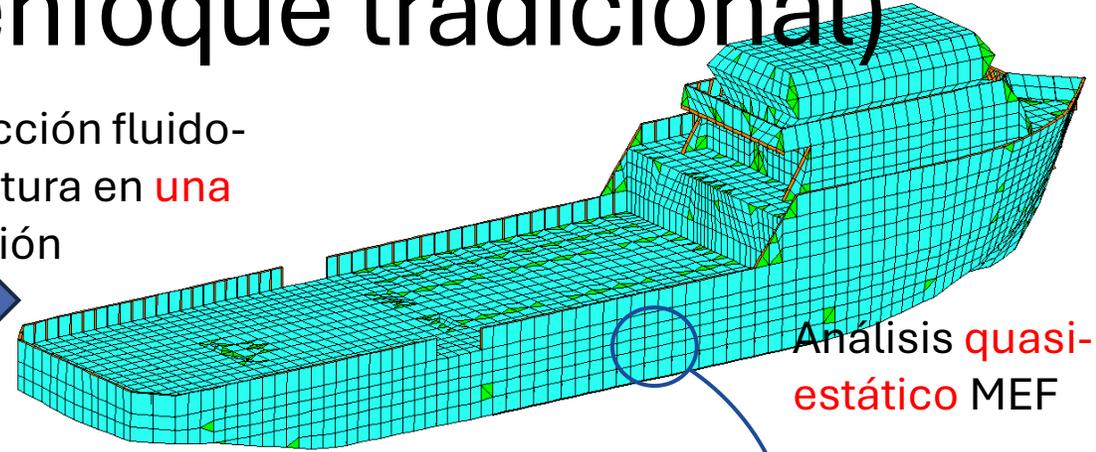
# Modelo hidroelástico (vs enfoque tradicional)



Comportamiento en la mar **BEM**



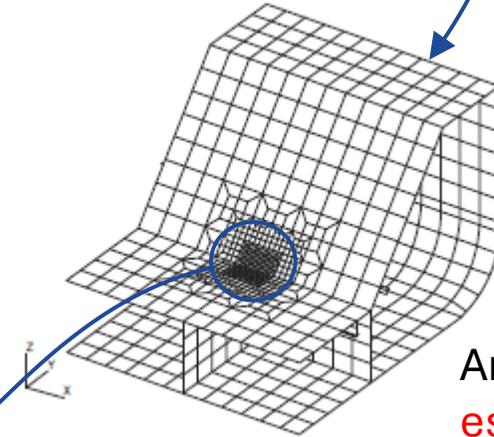
Interacción fluido-estructura en **una** dirección



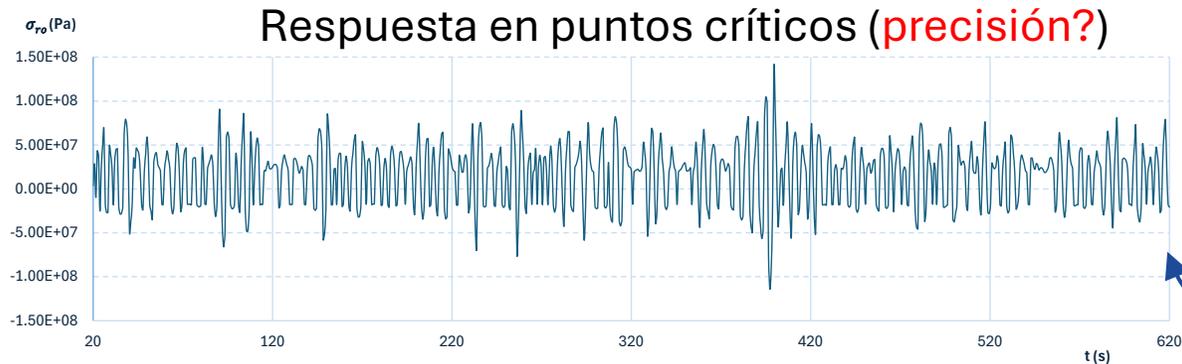
Análisis **quasi-estático** MEF

Modelos global (buque viga) o parcial y local de detalle

Interpolación global-local

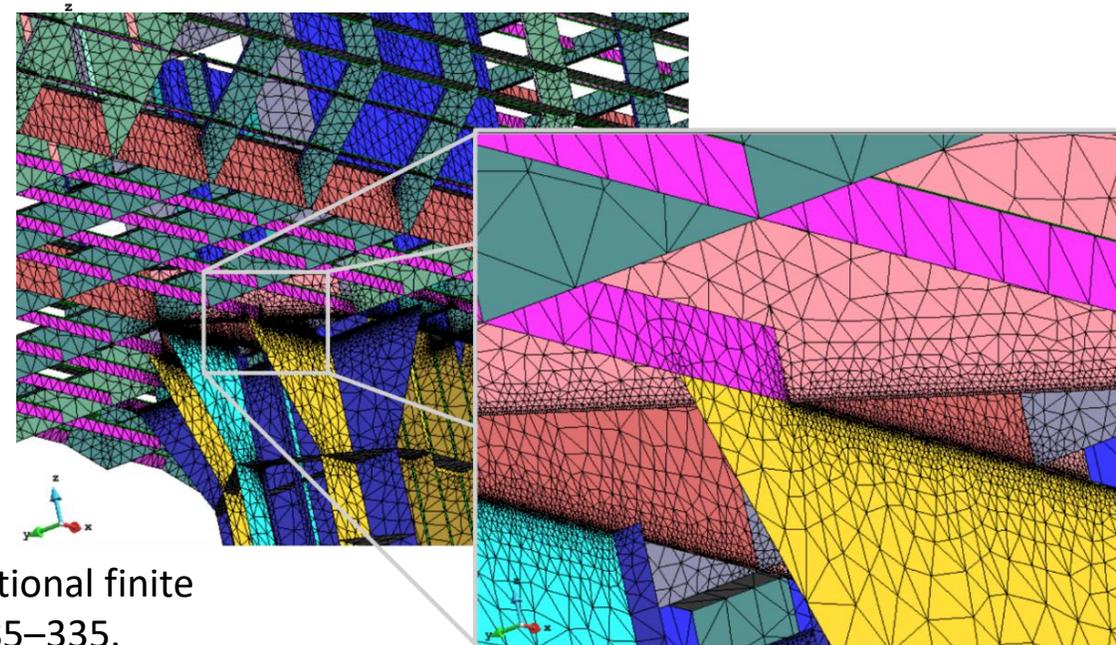
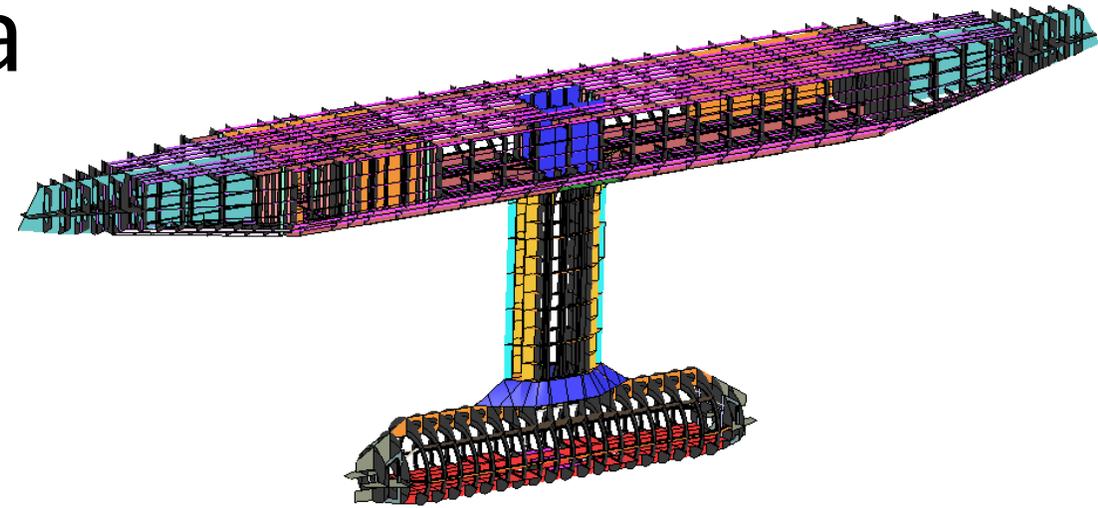


Análisis **quasi-estático** MEF



# Modelo EF de la estructura

- ◆ Modelo MEF de detalle basado en elementos tipo lámina triangulares con 'drilling rotations' [1] más elementos tipo viga para modelar la inercia del bulbo en perfiles de tipo HP (**RamSeries**).
- ◆ Se han utilizado elementos sólidos, con baja rigidez, para modelar el lastre y la masa e inercia de los componentes principales del PTO.
- ◆ La geometría incluye todos los detalles de la estructura salvo ciertas simplificaciones (pequeños aligeramientos o detalles en zonas no críticas).
- ◆ Se ha refinado la malla en la cercanía de los puntos críticos para el cálculo del daño por fatiga ( $h < t$ ).
- ◆ El modelo incluye la definición de cargas de fondeo y PTO.



[1] Felippa C, Haugen B. A unified formulation of small-strain corotational finite elements: I. Theory. *Comput Methods Appl Mech Eng* 2005;194:2285–335.

# Modelo EF de la estructura

- ◆ Elevados requisitos de cálculo del modelo de dinámica estructural.
- ◆ Solución: Método de reducción de orden basado en proyección modal.
- ◆ Estrategia:
  - ◆ Se proyecta la solución FEM sobre una base modal reducida.
  - ◆ Se usa superposición modal para resolver la dinámica estructural.
- ◆ Alta precisión:
  - ◆ Se emplean cientos o miles de modos para garantizar una gran precisión en la resolución.
  - ◆ Separación de la solución en cargas estáticas y dinámicas para mayor precisión en determinación de esfuerzos estructurales.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^{N_{FEM}} q_i(t) \cdot \mathbf{a}_i(\mathbf{x})$$



$$\ddot{q}_i + c_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = f_i(t)$$

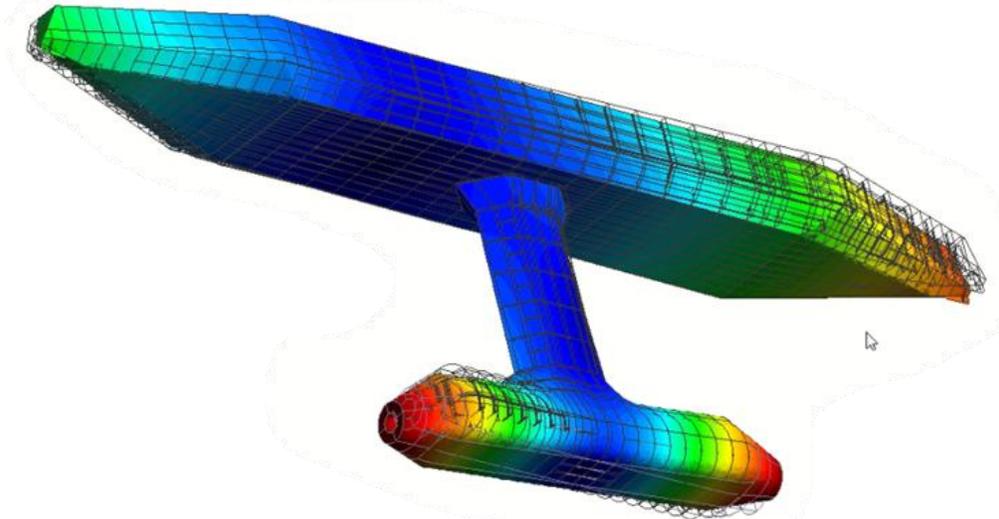


$$\omega_{max} \geq 4 \cdot \Omega_{max}$$

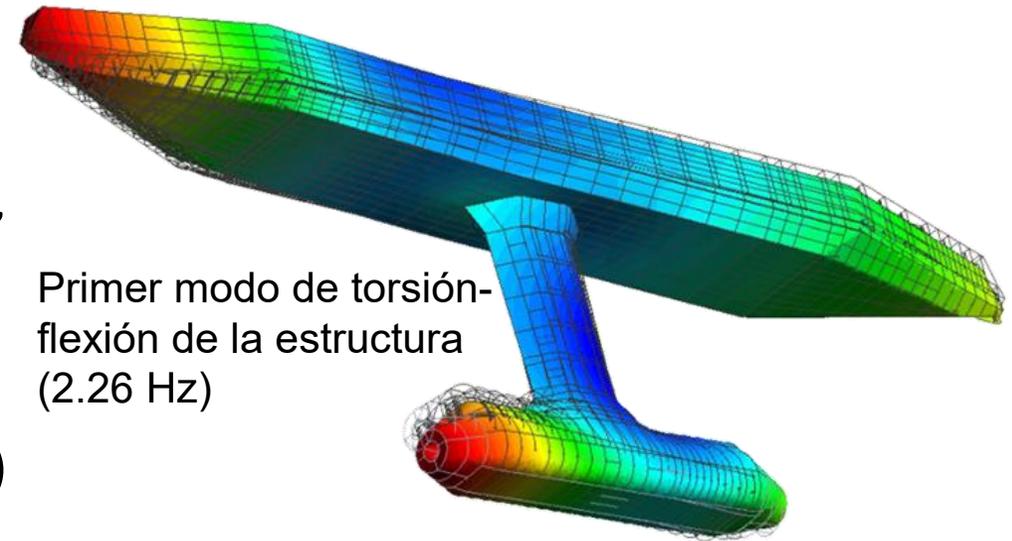
$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^{N_R \ll N_{FEM}} q_i(t) \cdot \mathbf{a}_i(\mathbf{x})$$

# Modelo EF de la estructura

- ◆ Pruebas preliminares realizadas para validar la precisión del modelo estructural (entre otras).
  - ◆ Ajustes de pesos y centro de gravedad.
  - ◆ Verificación con análisis estático.
  - ◆ Iteraciones para mejorar la calidad de la malla.
  - ◆ Análisis detallado de los primeros 50 modos para detectar posibles comportamientos espurios.
- ◆ El análisis modal previo, permite evaluar el posible riesgo de resonancia estructural con la frecuencia de giro de los rotores.
  - ◆ Resultados: Primeros modos en 2.16 Hz y 2.26 Hz, sin riesgo de resonancia (margen mayor del 20% con las frecuencias excitadoras).
  - ◆ La metodología desarrollada permite calcular la frecuencia real (y amortiguamiento por radiación) de los modos en agua con alta precisión.



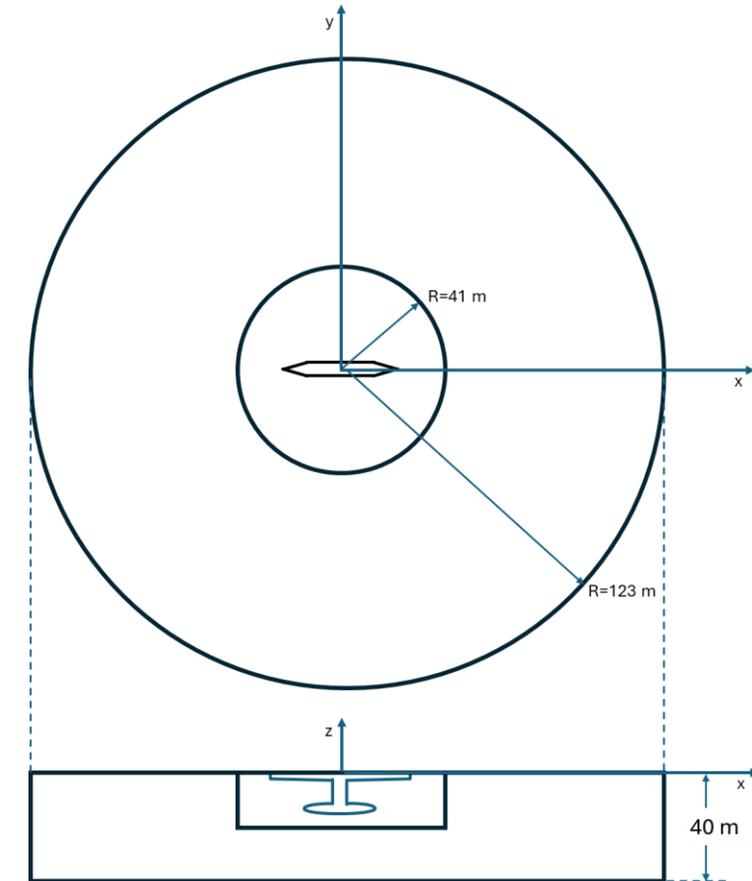
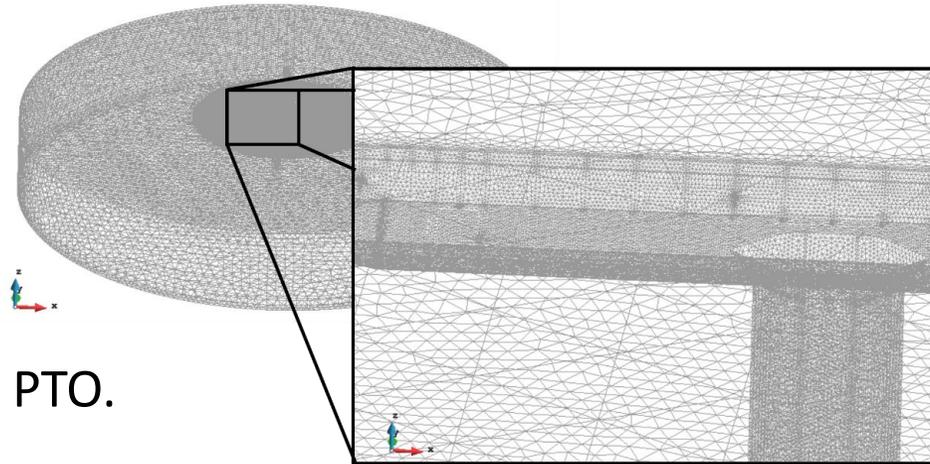
Primer modo de torsión de la estructura (2.16 Hz)



Primer modo de torsión-flexión de la estructura (2.26 Hz)

# Modelo EF de comportamiento en la mar

- ◆ Se ha generado un modelo de comportamiento en la mar (SeaFEM).
- ◆ Para generar este modelo, se ha definido un dominio de análisis cilíndrico alrededor de la plataforma de diámetro 246 m y con una profundidad de 40 m.
- ◆ Se ha discretizado este dominio con tamaño máximo de 0.15 m sobre el casco de la plataforma, de 0.75 m sobre la superficie libre del volumen interior, y de 2.5 m sobre la superficie libre del volumen exterior.
- ◆ De esta forma, se ha obtenido una malla de análisis de 873,295 tetraedros lineales.
- ◆ El modelo incluye la definición del fondeo y PTO.

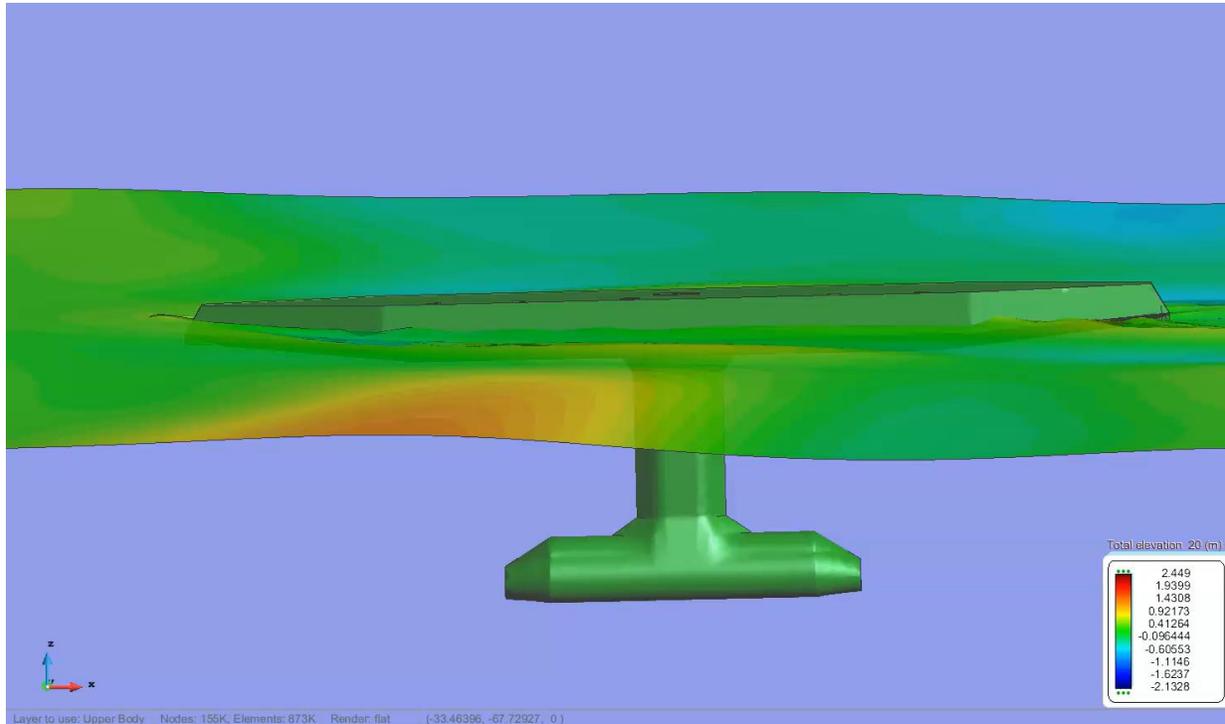


# Alcance del estudio

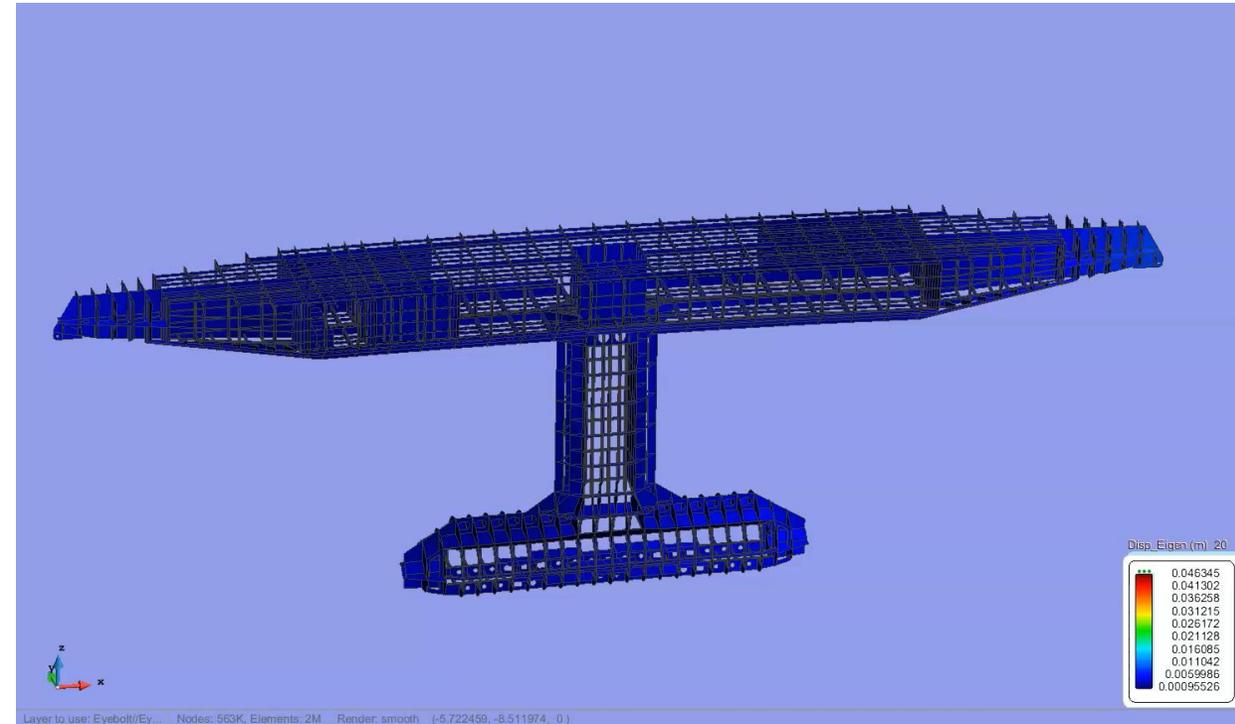
- ◆ El estudio se baso en la especificación técnica IEC TS 62600-2 [1] donde se define la combinación de estados límite últimos (ULS) y estados límite de fatiga (FLS), para la verificación de la estructura de un convertidor de energía de corrientes de marea.
- ◆ Como parte de la primera fase de revisión del diseño y dimensionamiento preliminar, se presentan aquí algunos resultados de la condición DLC 1.1 (operación normal) con casos ULS con un factor de seguridad parcial de  $\gamma_f = 1.35$ , y casos FLS con un factor de seguridad parcial  $\gamma_f = 1.0$ .
- ◆ Las condiciones metoceánicas se basan en los datos disponibles para Fall of Warness.
- ◆ Se ha hecho una estimación del daño por fatiga en 35 puntos de zonas identificadas como críticas en las áreas de conexión entre el cuerpo superior y el mástil, entre el mástil y la góndola, en los polines del tren de potencia principal, y en la estructura del cáncamo del sistema de fondeo.
- ◆ Los 200 primeros modos de la estructura cubren el rango hasta 50 Hz. Teniendo en cuenta que los periodos característicos del oleaje en Fall of Warness están entre 2.5 y 17.5 s (0.4 y 0.057 Hz), se cumple sobradamente el criterio  $\omega_{max} \geq 4 \cdot \Omega_{max}$  (incluyendo excitación de las palas) para garantizar una gran precisión en la resolución de la dinámica de la estructura.

[1] IEC. Marine energy- Wave, tidal and water current converters. Part 2. Marine energy systems – Design requirements. Technical Specification 62600-2. 10/2019

# Algunos resultados del análisis

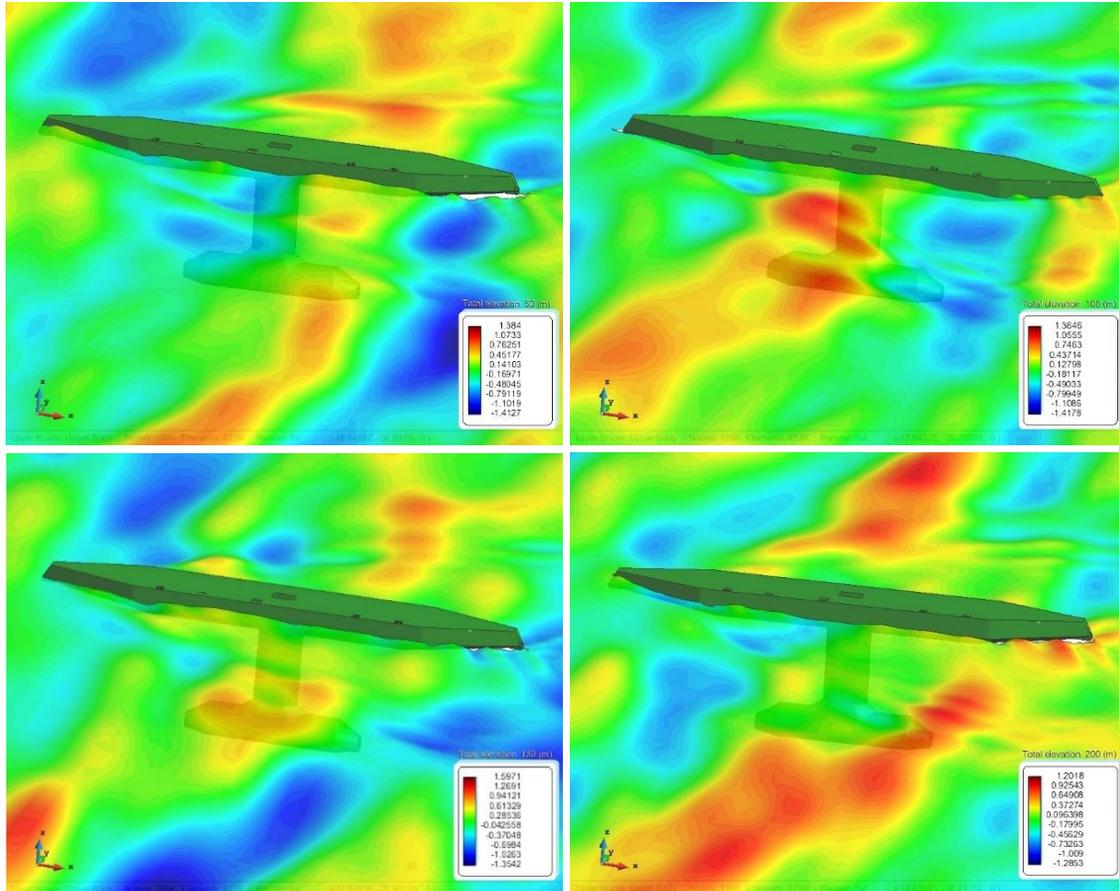


FLS DLC 1.1 (JONSWAP  $\alpha=45^\circ$   $T_p=6.4$  s,  $U_{ref}=3$ m/s)

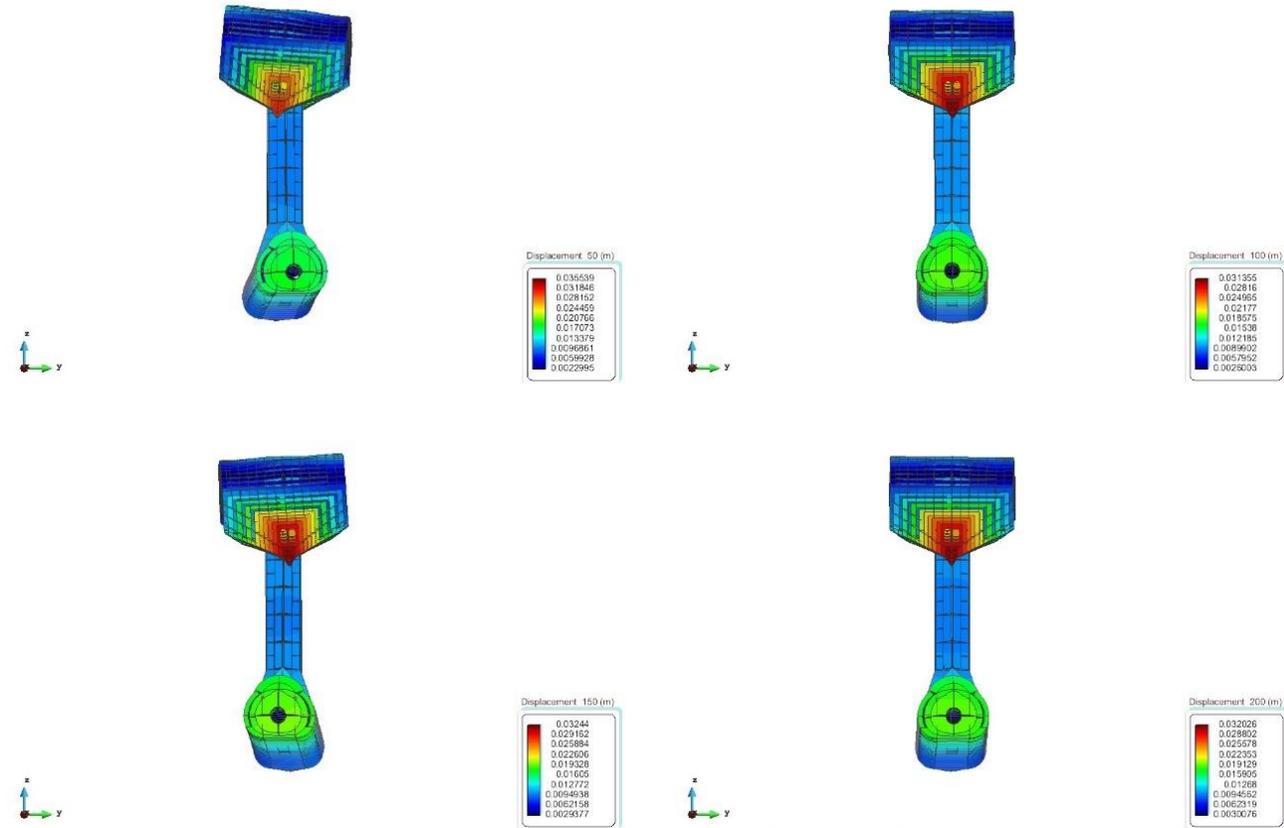


FLS DLC 1.1 (JONSWAP  $\alpha=0^\circ$   $T_p=6.2$  s,  $U_{ref}=3$ m/s)

# Algunos resultados del análisis



Diferentes instantáneas (50, 100, 150 y 200 s) de la dinámica en olas del dispositivo ATIR II en el caso FLS DLC 1.1 (JONSWAP  $\alpha=0^\circ$   $T_p=7.6$  s,  $U_{ref}=3$  m/s)



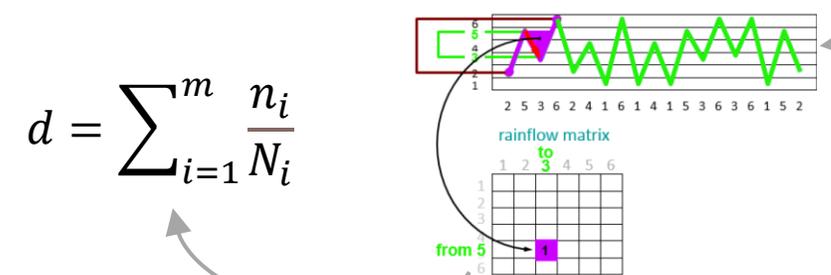
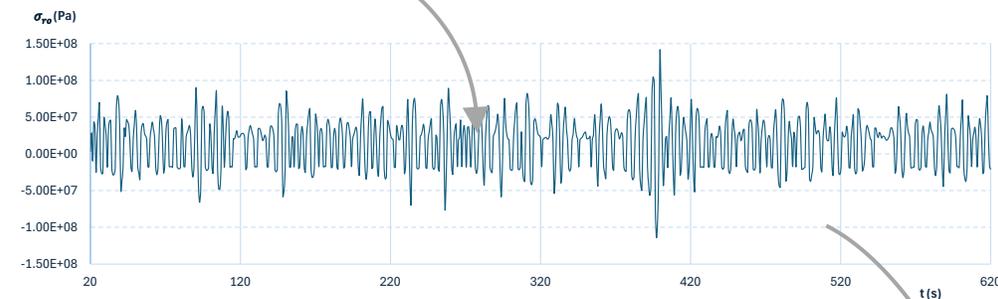
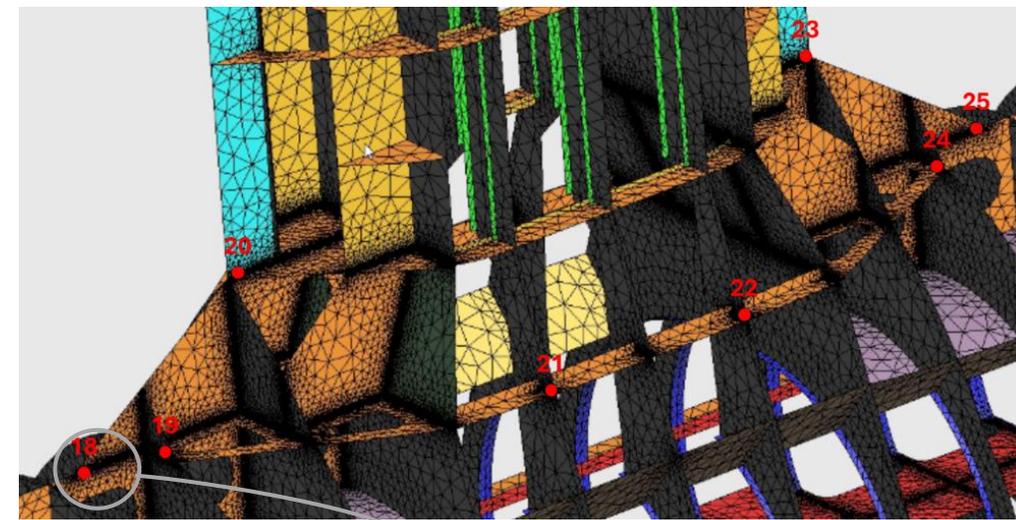
Instantáneas (50, 100, 150 y 200 s) de los resultados de la deformación de la estructura (vista frontal ampliada x100) en el caso FLS DLC 1.1 (JONSWAP  $\alpha=90^\circ$   $T_p=5.3$  s,  $U_{ref}=3$  m/s)

# Análisis de fatiga

- ◆ Se ha hecho una estimación del daño por fatiga en 35 puntos de zonas críticas en las áreas de conexión entre el cuerpo superior y el mástil, entre el mástil y la góndola, en los polines del tren de potencia, y en la unión del sistema de fondeo con el casco.
- ◆ El procedimiento para la evaluación de daño por fatiga en esos puntos críticos se ha basado, en la medida de lo posible, en las directrices de la guía [1].
- ◆ El cálculo del daño por fatiga se basa en la regla de Palmgren-Miner, donde los ciclos de carga-descarga se calculan mediante un preciso algoritmo de conteo.
- ◆ El método de conteo de ciclos que se ha usado se basa en las recomendaciones de la ASTM [2].

[1] Bureau Veritas. Guidelines for Fatigue Assessment of Ships and Offshore Units. BV NI 611. Nov. 2020.

[2] ASTM E1049–85(2017). Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis.

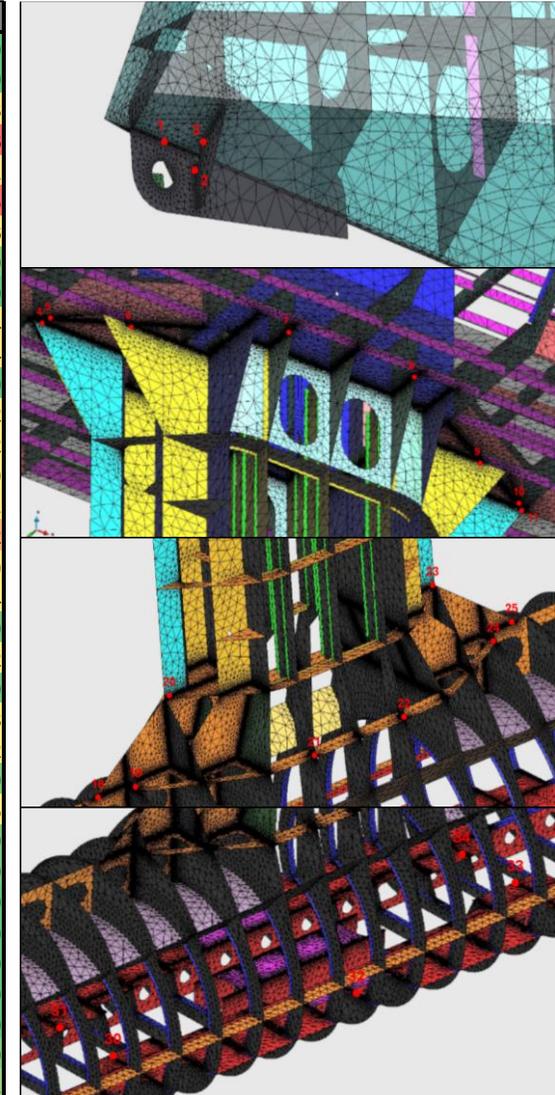


$$d = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$$

# Análisis de fatiga

- La figura muestra el resultado del cálculo de daño de fatiga en un escenario concreto para los 35 puntos críticos analizados.
- Por razones de confidencialidad, el escenario ha sido creado artificialmente para esta presentación y no corresponde con ninguno de los analizados en el estudio real.

	Punto	Elemento	Daño Tr Top	Daño Tr Bottom	Daño Tc
Cáncamo	1	1887476	1.868E-09	4.560E-10	0.0000
	2	1886467	2.060E-09	5.645E-10	0.0000
	3	2007843	4.775E-04	3.376E-05	0.0688
Cuerpo superior-mástil	4	1642450	8.860E-04	6.337E-03	0.9126
	5	1318873	3.695E-05	4.934E-04	0.0711
	6	1641096	6.343E-03	6.500E-04	0.9135
	7	1674046	1.105E-05	1.104E-05	0.0016
	8	1678396	4.323E-10	2.709E-07	0.0000
	9	1640052	2.074E-09	6.685E-13	0.0000
	10	1279794	4.539E-04	4.433E-04	0.0654
	11	1645749	4.469E-04	4.404E-04	0.0644
	12	1273467	1.269E-12	9.719E-10	0.0000
	13	1639096	2.651E-04	9.136E-05	0.0382
	14	1669323	5.878E-08	8.527E-06	0.0012
	15	1665127	6.867E-06	3.956E-08	0.0010
	16	1638298	6.459E-05	2.159E-04	0.0311
	17	1279267	3.007E-03	3.050E-03	0.4392
	Mástil-góndola	18	1482101	3.336E-04	3.309E-04
19		1765901	2.954E-08	3.026E-06	0.0004
20		1551734	1.506E-09	1.381E-07	0.0000
21		1483643	1.241E-06	1.007E-08	0.0002
22		1805724	1.108E-07	1.015E-09	0.0000
23		1536758	2.160E-06	4.285E-07	0.0003
24		1819168	1.212E-07	1.477E-06	0.0002
25		1808670	2.378E-07	1.320E-07	0.0000
26		1820134	3.636E-06	3.714E-06	0.0005
27		2015816	1.532E-07	2.701E-08	0.0000
28		2014429	2.180E-09	1.418E-07	0.0000
29		1768038	0.000E+00	4.524E-16	0.0000
Polines	30	1225705	7.528E-14	1.558E-13	0.0000
	31	1225869	1.817E-09	6.744E-09	0.0000
	32	1536070	7.917E-09	1.475E-09	0.0000
	33	1966659	5.717E-14	1.920E-13	0.0000
	34	1966392	2.314E-07	4.507E-10	0.0000
	35	1579063	9.463E-08	4.541E-07	0.0001



# Conclusiones (I)

- 📌 Se ha presentado una **innovadora metodología para el análisis y soporte a la optimización de la estructura** de la plataforma de generación de energía a partir de corrientes de marea ATIR 2.0.
- ⚠️ Este tipo de estructuras presentan **desafíos únicos** en configuración estructural, dinámica y exposición ambiental. La búsqueda de reducción de peso y costes lleva a estructuras muy flexibles. La interacción entre oleaje, corriente y respuesta estructural debe analizarse con gran precisión.
- ⚡ En este trabajo se ha desarrollado un **novedoso modelo ILA**, cuyo núcleo es un modelo de análisis hidroelástico acoplado, basado en un modelo EF detallado de la estructura ATIR 2.0.
- 💡 Para reducir los tiempos de cálculo del modelo estructural, se ha utilizado un método de **reducción modal que permite disminuir drásticamente el tiempo de análisis** sin comprometer la precisión.
- 🏆 La metodología de análisis presentada, basada en el modelo integrado descrito, ha sido **aceptada por Bureau Veritas para la verificación de la resistencia estructural y la fatiga de la estructura**.

# Conclusiones (II)

- 🚀 El punto de partida de este trabajo ha sido un diseño preliminar de la estructura de la plataforma ATIR 2.0, desarrollado a partir del prototipo inicial ATIR y con un escantillonado preliminar basado en la normativa BV NR 600. Tras el análisis realizado, **se han propuesto diversas modificaciones en el diseño para mejorar el comportamiento dinámico y respuesta estructural** de la plataforma.
- ⚠️ A pesar de la significativa reducción del tiempo de cálculo, estos siguen siendo elevados: **cada caso requiere unas 70 horas de procesamiento** en una estación de trabajo con un AMD Ryzen Threadripper 3970X 3.70GHz utilizando 4 núcleos. Considerando que la verificación de la estructura en un proceso de certificación requiere evaluar más de 1.000 casos, este tiempo sigue siendo prohibitivo salvo para hacer un estudio parcial limitado a unas decenas de análisis.
- 💡 Para abordar esta limitación, la estrategia adoptada consiste en calcular los **operadores de amplitud de respuesta modal a partir de análisis con ruido blanco** para cada carga, utilizando el mismo modelo integrado desarrollado. Con esta información, el tiempo de realización de cada condición se reduce a solo unos minutos, lo que **permite realizar cientos de simulaciones de larga duración en pocas horas**.
- 🎯 Se espera que el proceso de optimización y verificación estructural descrito culmine en breve con la certificación de tipo de la plataforma ATIR 2.0.

# Desarrollo y aplicación de un modelo acoplado para el diseño y verificación de la estructura de la plataforma ATIR 2.0

Julio García Espinosa, Universidad Politécnica de Madrid

**Contacto: [julio.garcia.espinosa@upm.es](mailto:julio.garcia.espinosa@upm.es)**

Francisco Otero, Magallanes Renovables

Marta García, Magallanes Renovables

Javier Calderón Sánchez, Universidad Politécnica de Madrid

Borja Serván Camas, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería

64º Congreso Internacional de Ingeniería Naval e Industria Marítima  
Gijón 26-28 de marzo de 2025



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
INGENIEROS NAVALES