



Modelos numéricos para la implementación de sensórica en un cable dinámico submarino para eólica offshore flotante.

Antonio Rico^{1,2*}, José Ignacio Llorente², Ibon Larrea³, Fernando Salcedo¹, Joseba López¹, Daniel Mulas¹.

¹ TECNALIA Research & Innovation, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), antonio.rico@tecnalia.com

² Mechanical Engineering Department, University of the Basque Country UPV/EHU, joseignacio.llorente@ehu.eus

³ Ditrel Industrial S.L., i.larrea@ditrel.es

La instalación en los últimos años de varios parques eólicos offshore flotantes es un paso muy importante de cara a lograr la viabilidad comercial de esta tecnología. Sin embargo, el agresivo entorno marino, caracterizado por fuertes solicitaciones causadas por vientos, olas y corrientes, combinado con el creciente tamaño de las turbinas eólicas y el comportamiento dinámico de sus componentes, plantea serias preocupaciones sobre la viabilidad de la producción de energía y la durabilidad del sistema en un entorno tan agresivo.

Un componente crítico dentro de las plataformas eólicas flotantes es el cable dinámico, responsable de transportar a la red de tierra la energía generada en mar. Cualquier fallo en este cable provocaría la caída de la generación, al menos, de la turbina eólica asociada, lo que enfatiza la necesidad de un diseño preciso de estos cables dinámicos durante las fases más tempranas del proyecto de un parque eólico flotante.

Sin embargo, la complejidad de la estructura interna de estos cables dinámicos, formadas por diversos cuerpos con diferentes características mecánicas, hace muy difícil el desarrollo de modelos numéricos fiables.

Este hecho, unido al restringido acceso a infraestructuras de ensayos o a datos reales necesarios para validar dichos modelos, redonda en la dificultad de obtener diseños precisos y tempranos.

TECNALIA dispone de un laboratorio flotante, el HarshLab, fondeado en condiciones offshore en la costa de Vizcaya, en el que va a instalar un cable dinámico en los próximos meses, incorporando en el conector submarino, fabricado por la empresa DITREL, con el que este cable se une a dicho laboratorio, un conjunto de instrumentos de medida con el propósito de monitorizar el comportamiento de dicho cable umbilical.

Este trabajo pretende exponer los modelos numéricos que se han empleado para implementar la sensórica apropiada en el conjunto de cable y conector submarino, así como presentar los primeros resultados de esa monitorización y validación de los modelos, si a la fecha del congreso hubiera ya resultados.

1. Introducción

El rápido crecimiento de la tecnología eólica offshore debe su éxito a varios factores entre los que cabe destacar la abundancia del recurso eólico y su alta calidad, junto con la disponibilidad de espacios abiertos para la instalación de parques eólicos sin que entren en conflicto con otros usos humanos [1].

Históricamente, las tecnologías fijas dominaron la generación eólica offshore, basándose en cimentaciones ancladas de forma segura al lecho marino, normalmente monopilotes o estructuras tipo jackets o celosía. Sin embargo, estas soluciones fijas se limitan a lugares específicos donde las profundidades del agua no superan los 60 metros [2], comúnmente conocidos como plataforma continental. Para áreas más allá de la plataforma continental, donde las profundidades del agua alcanzan varios cientos de metros, en la última década han surgido soluciones flotantes para la energía eólica offshore. Estos diseños innovadores permiten que las turbinas eólicas funcionen de manera efectiva en aguas más profundas. Actualmente están en funcionamiento varias plantas de demostración que emplean plataformas flotantes, lo que demuestra la viabilidad de este enfoque [2].

Si bien se han desarrollado diversas soluciones para turbinas eólicas marinas flotantes, sus componentes principales siempre incluyen una plataforma flotante, una turbina eólica con su torre, un sistema de fondeo y un sistema de exportación eléctrica, comúnmente conocido como cable dinámico, como se muestra en la **Figura 1**.

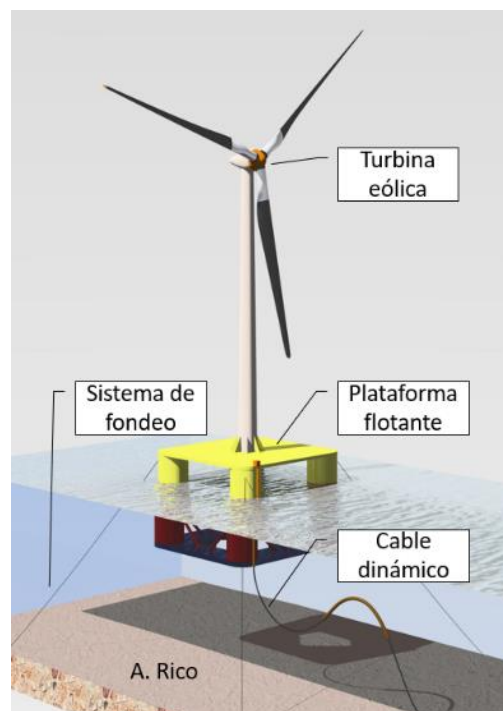


Figura 1. Componentes principales de una plataforma eólica flotante.

A pesar de su papel crítico, los cables dinámicos a menudo se pasan por alto durante las primeras etapas de los proyectos de implantación de parques de eólica flotante, además de simplificarse en exceso en las fases posteriores de diseño [3]. Esta falta de atención al diseño y la planificación de los cables dinámicos ejerce una presión adicional sobre los plazos durante la fabricación, las pruebas y la instalación. En consecuencia, como resultado de este hecho, los incidentes con los cables de alimentación son la mayor causa de pérdidas en la industria eólica marina [4].

Esta criticidad es evidente en las declaraciones de la directora financiera de Ørsted, Marianne Wiinholt [5], sobre las reparaciones de los cables submarinos de algunos de sus parques offshore debido a un fallo de diseño, con un coste de dichas reparaciones de casi quinientos millones de dólares.

En este sentido, reconociendo la importancia del correcto diseño de los cables de evacuación eléctrica submarinos, el “Joint Industry Project” (JIP) de DNV [6] se centra en proporcionar normas y regulaciones apropiadas a este tipo de cables submarinos.

Sin embargo, para poder conseguir la experiencia y datos necesarios para lograr un correcto diseño de los cables dinámicos, es necesario una ingente cantidad de información y de, sobre todo, ensayos empíricos en entornos relevantes que permitan la validación de los modelos matemáticos empleados en el diseño de estos cables.

Existen en el mundo científico diversos equipos que están, precisamente, llevando a cabo este tipo de ensayos de validación de modelos numéricos empleados para caracterizar cables dinámicos. Cabe señalar los trabajos de Di-Rong Li et al. [7] en los que se evalúa la viabilidad de utilizar un sistema de cables dinámicos totalmente

suspendidos entre plataformas flotantes para un parque eólico offshore, incluyendo simulaciones numéricas y un experimento a escala reducida, realizado a 1:49, para validar los resultados numéricos.

Sin embargo, no se encuentran en el estado del arte estudios que validen modelos numéricos de estos cables en entornos reales. Por tanto, el trabajo que está llevando a cabo el equipo de autores en el marco de una tesis doctoral es pionero en realizar mediciones en un cable dinámico real en un entorno offshore, con el objetivo de validar los modelos numéricos empleados en su diseño.

Este artículo presenta los modelos numéricos empleados y la información relevante obtenida de ellos, con el fin de identificar los sensores seleccionados, así como su ubicación y distribución óptimas para medir el estado de cargas y la dinámica del cable, descrito en secciones posteriores. El objetivo final es validar los modelos numéricos utilizados en el diseño del cable dinámico. [8]

El presente artículo se divide en un primer apartado donde se describen los medios involucrados: el laboratorio HarshLab, el cable dinámico y el conector submarino empleado. En un segundo apartado se describen los modelos numéricos empleados para el cálculo. Por último, se exponen las conclusiones del estudio y se sugieren próximos pasos a seguir.

2. Descripción de los medios

El centro tecnológico Tecnia Research & Innovation dispone de un laboratorio singular, permanentemente fondeado en condiciones offshore: **el HarshLab** [9].

HarshLab es un laboratorio flotante único en su género para ensayar desarrollos destinados al mundo offshore, en un entorno real y en condiciones controladas, desde equipos a nuevos materiales y recubrimientos.

HarshLab permite la evaluación de equipos y componentes en entorno real offshore, en una gran variedad de condiciones que van desde la zona atmosférica hasta el lecho marino.

El laboratorio está fondeado en BiMEP (Biscay Marine Energy Platform) [10], en el Golfo de Bizkaia, a una distancia de 1,6 millas náuticas del pueblo de Armintza (Bizkaia, España).



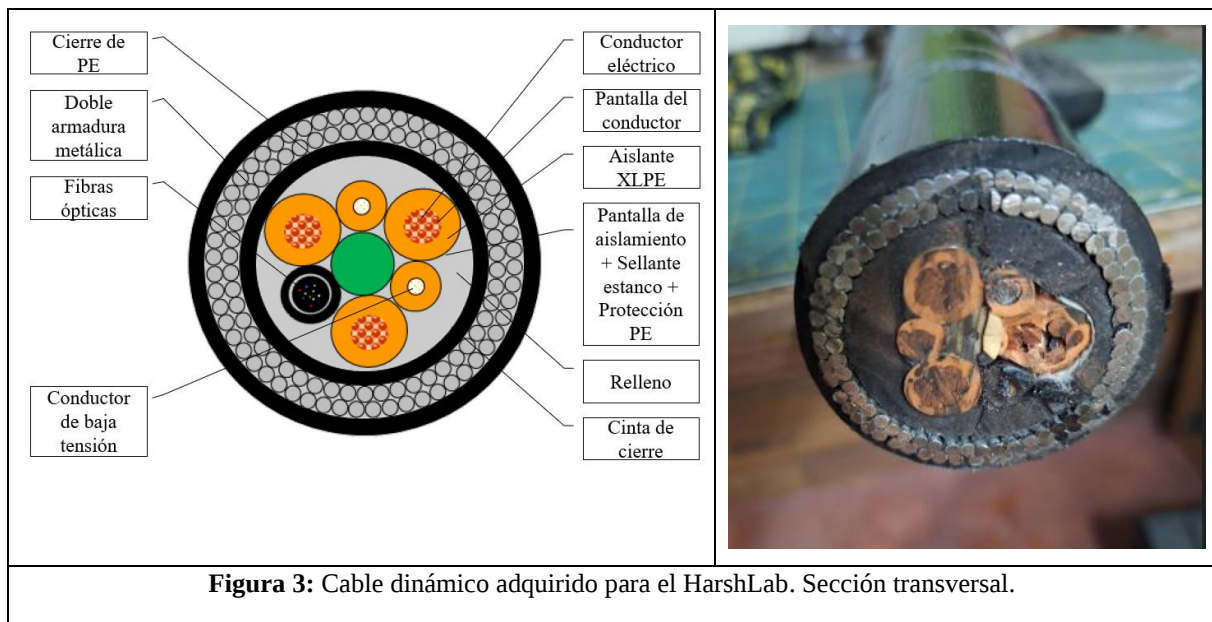
Figura 2: HarshLab - Laboratorio offshore para ensayos de materiales y componentes [9].

Está prevista la conexión a la red eléctrica y de telecomunicaciones del HarshLab mediante un **cable dinámico** submarino. Para ello, Tecnia ha adquirido un cable dinámico sobre el que se ha realizado los trabajos que se describen en este documento. Este cable dinámico se conectará a uno de los cables submarinos de los que ya dispone BiMEP y que unen la zona de BiMEP con la subestación de tierra de Armintza.

Este cable dinámico tiene un diámetro exterior de 60 mm, formado por dos armaduras helicoidales, siendo el sentido de arrollamiento de la armadura exterior contrario al de la armadura interior. La protección exterior contra roces y abrasiones se confía a una última capa de polietileno de alta densidad.

Desde el punto de vista eléctrico y de comunicaciones el cable dinámico dispone de tres conductores eléctricos principales de 20kV, dos conductores auxiliares para 400V y 24 fibras ópticas para comunicación.

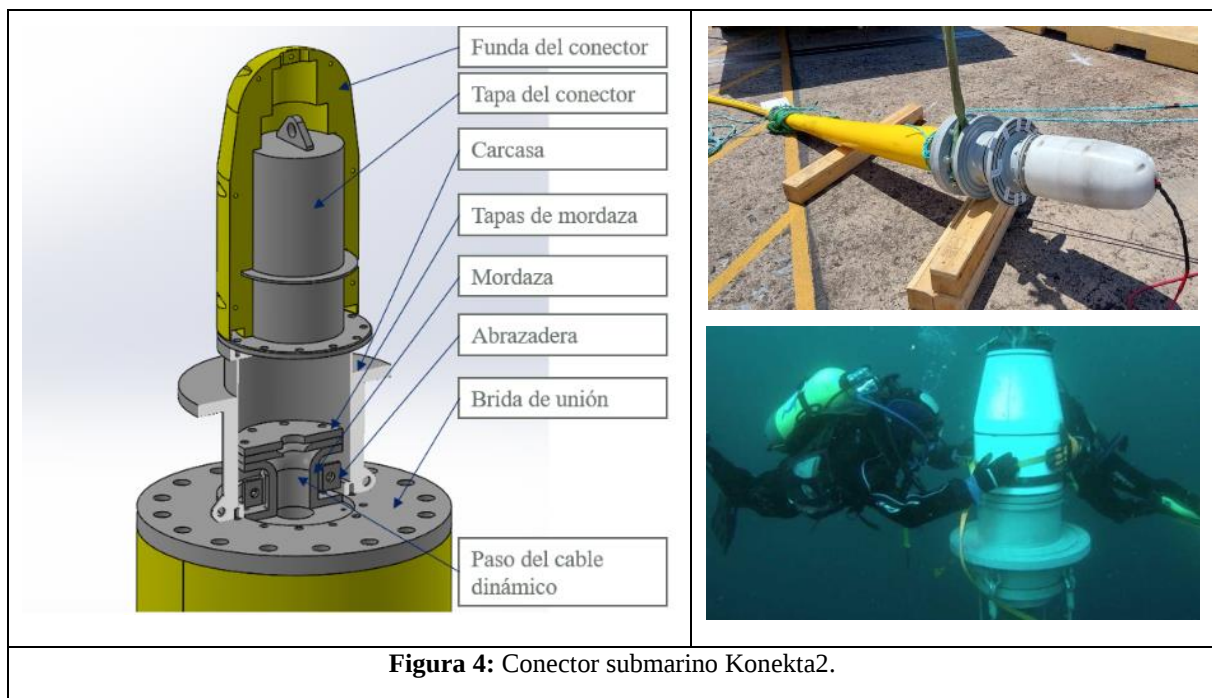
En la **Figura 3** se muestra una sección transversal de este cable dinámico.



El cable dinámico descrito se conecta, por su extremo inferior, al cable estático propio de BiMEP mediante un conector submarino. Esta conexión, al ser estática y del tipo “dry-mate”, no presenta interés desde el punto de vista mecánico.

Sin embargo, la parte superior del cable dinámico se conecta a la plataforma HarshLab mediante un **conector submarino** tipo KONEKTA2 [11]. Esta conexión mecánica es, precisamente, la zona de mayor concentración de cargas dinámicas del conjunto.

El conector submarino Konekta2, que se muestra en la **Figura 4**, está fabricado por la empresa Ditrel Industrial S.L. en base a la patente licenciada por Tecnalía [12]. Este conector se caracteriza porque permite realizar el proceso de conexión de un cable dinámico a la zona sumergida de una plataforma flotante de una manera rápida, sencilla y sin emplear grandes medios de instalación. Para ello, el Konekta2 emplea un sistema de doble tapa, que unido al uso de pre-conectores en el cable dinámico, permite que todos los trabajos de pelado del cable, colocación de terminales, tanto eléctricos como de fibra óptica, así como el resto de los trabajos complejos que se necesitan para conectar un cable dinámico sean realizados en tierra, en las instalaciones del fabricante, agilizando enormemente los trabajos en mar, en la cubierta de un buque, lo que simplifica y abarata tremendamente la maniobra.



Este conector submarino penetra por el fondo de la plataforma HarshLab, a través de un alojamiento diseñado a tal efecto.

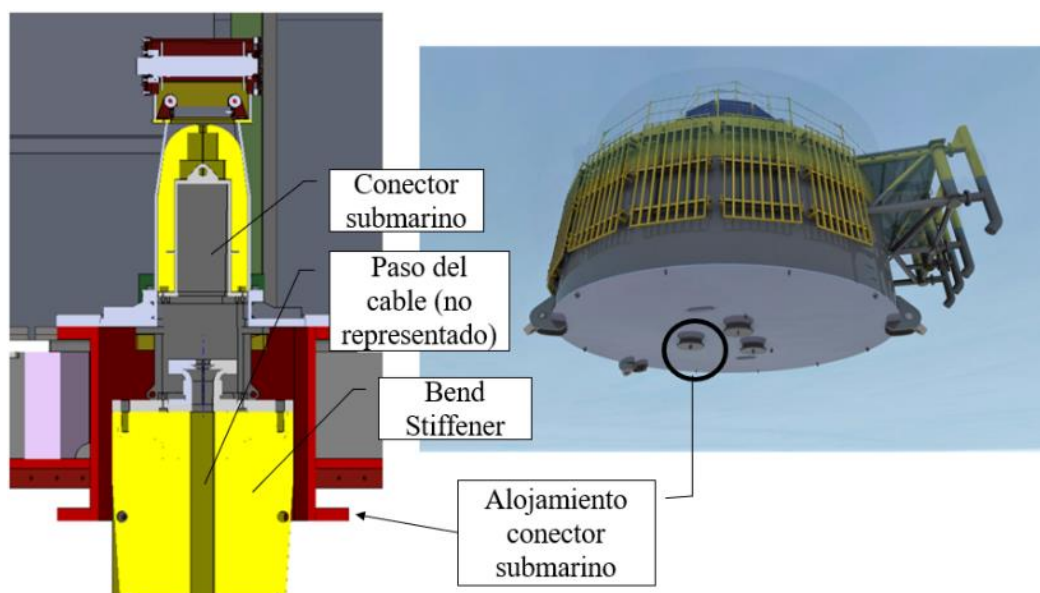


Figura 5: Conexión del conector submarino en la plataforma HarshLab.

Son numerosos los estudios que demuestran que el punto del cable con mayores cargas de fatiga es el punto de contacto entre el cable y el conector [13]. Es por ello que es habitual instalar en esta zona del cable un rigidizador a la flexión, denominado “Bend stiffener” cuya función es limitar los daños a flexión en esa área.

Además, es habitual emplear en los cables otros accesorios para conseguir el comportamiento dinámico deseado ante las condiciones meteoceánicas. Tales son, por ejemplo, elementos de flotación o contrapesos.

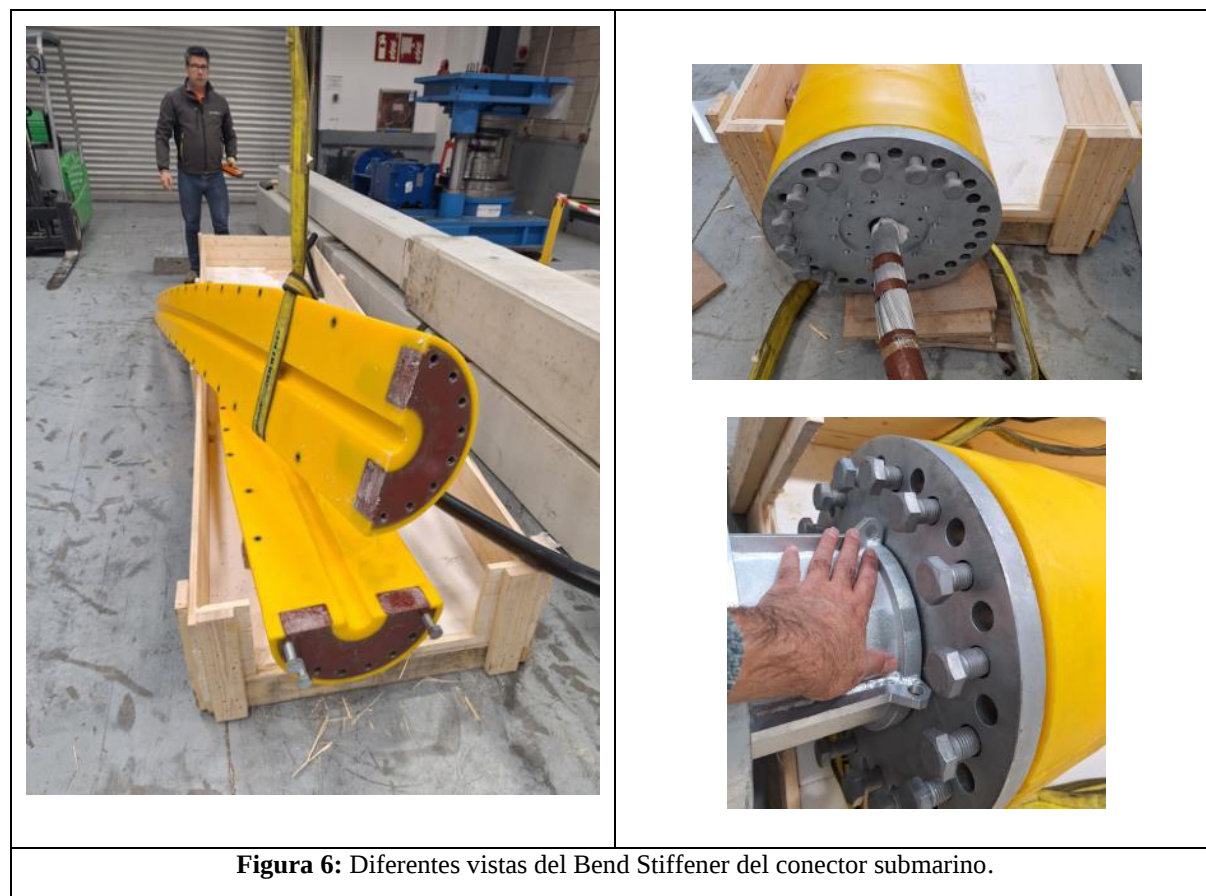
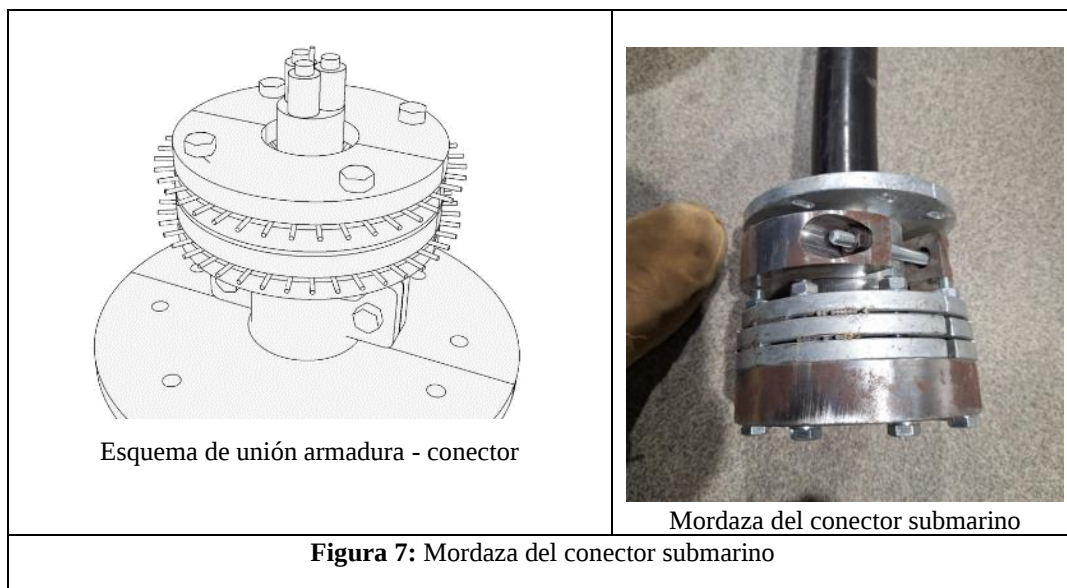


Figura 6: Diferentes vistas del Bend Stiffener del conector submarino.

Por último, un elemento fundamental del conector es la mordaza. Este elemento es el que fija las armaduras del cable al conector y, por tanto, es responsable de transmitir las cargas del cable dinámico al conector submarino.



3. Modelos numéricos empleados

Para el diseño del cable dinámico se ha hecho necesario emplear tres modelos numéricos:

- **Modelo global del cable dinámico**, llevado a cabo mediante el software ORCAFLEX [14] y que permitirá determinar la configuración más adecuada de cable para que tanto las cargas como los radios de curvatura que va a sufrir este cable estén dentro de los límites proporcionados por el fabricante.
- **Modelo local del cable**, realizado mediante el software ANSYS [15] y cuyo objetivo es comprender el comportamiento de los diferentes componentes del cable dinámico y, en especial, la transmisión de cargas a través de la doble armadura de éste.
- **Modelo del conector submarino**. Realizado también mediante el software ANSYS con el propósito de determinar las deformaciones en el mismo y poder tomar decisiones sobre la posición de las galgas extensiométricas.

3.1. Modelo global del cable dinámico.

El cálculo de la configuración del cable dinámico, la posición de los pesos adicionales añadidos, la posición y tamaño de los elementos adicionales de flotación implica modelar el cable submarino que se desea analizar con el propósito de estudiar ante determinados casos de carga el comportamiento mecánico del mismo. Por supuesto, los casos de carga vendrán impuestos por las condiciones de mar (viento, oleaje y corrientes) que se prevean.

Este modelo numérico del cable puede realizarse mediante modelos numéricos analíticos [13] o mediante software comercial. Para el estudio propuesto se ha utilizado el software comercial ORCAFLEX [14].

OrcaFlex emplea un modelo de elementos finitos para el análisis del cable dinámico, como se muestra en la **Figura 8**.

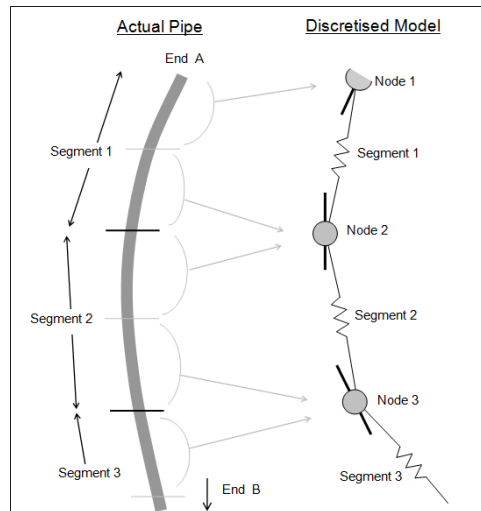


Figura 8: Discretización de un cable dinámico

Para ello divide el cable dinámico en una serie de tramos, los cuales son modelados como segmentos rectos sin masa, con un nodo en cada extremo. A cada segmento se le asigna las características mecánicas que corresponda, tal como rigideces axiales, a la flexión o a la torsión. La masa de cada segmento es considerada en el nodo correspondiente.

Con estas premisas se ha creado un modelo del HarshLab, de sus tres líneas de fondeo y de su cable dinámico con todos sus accesorios, tal cual se representa en Figura 9

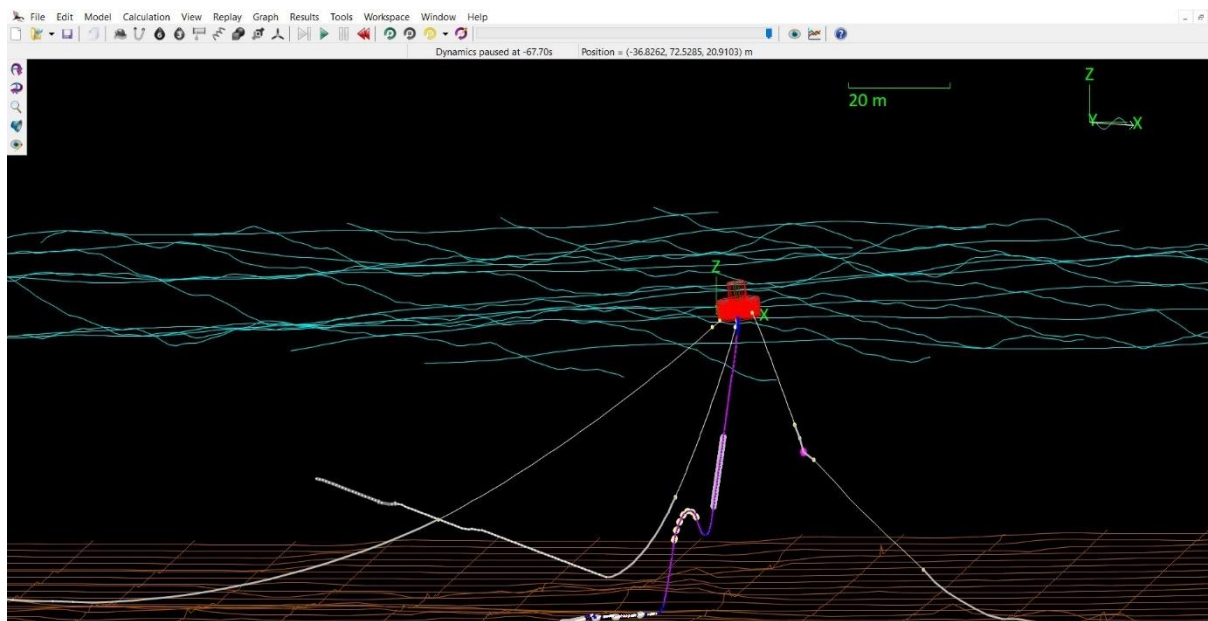


Figura 9: Modelo del HarshLab en OrcaFlex

En este modelo se han considerado dos casos de carga. El primero es el caso estático, esto es, en ausencia de oleaje, viento o corrientes. Y el segundo se ha considerado las condiciones meteoceánicas equivalentes a un periodo de retorno de 50 años en BiMEP[10]. Estas condiciones de carga se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Condiciones de carga.

Condición de carga	Altura significativa de ola (Hs)	Altura de ola máxima	Periodo De pico	Velocidad viento	Velocidad corriente
Estático	0 m	0 m	0 s	0 m/s	0 m/s
RP50	11,45 m	22,2 m	15,4 s	30,6 m/s	0,74 m/s

El motivo para considerar estas dos condiciones de carga es para así poder considerar un estado de carga del cable mínimo (estático) en el que la carga que sufre el cable es la de su propio peso y un estado de carga máximo (RP50) donde el oleaje, corrientes y vientos añaden una carga adicional debido a la dinámica del conjunto. Los instrumentos de medida que se implementen deberán poder medir en ese rango.

Para el cálculo de la dinámica del HarshLab impuesta por el oleaje, se han considerado los trabajos de JR Morison [16].

Una vez creado el modelo, se ha corrido la simulación en el dominio del tiempo por un periodo de 1.000s, eliminando los primeros 100s para permitir un correcto desarrollo del oleaje.

En la Figura 10 se representa la tensión efectiva, en función del arco de cable, a la que está sometido el cable dinámico en la condición de carga de estático. Puede apreciarse cómo el máximo valor se produce, efectivamente, en el punto de contacto con el HarshLab, alcanzando un valor de 10,69 kN.

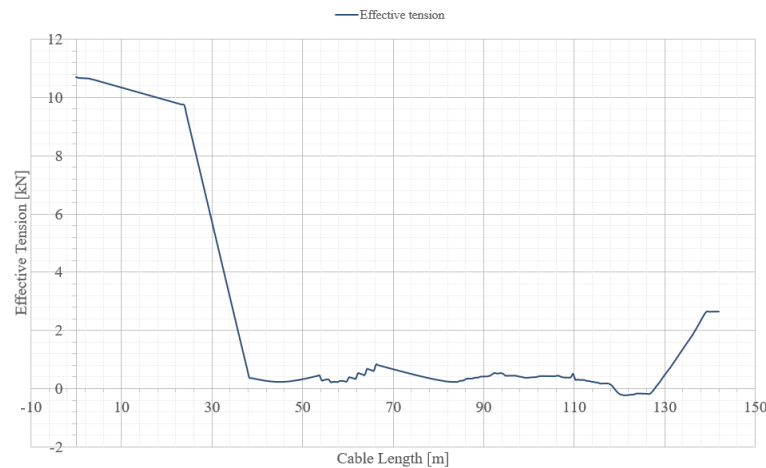


Figura 10: Tensión efectiva en función de la longitud en el cable dinámico para condición de carga “Estático”.

De igual forma, en la Figura 11 se muestra el resultado para la condición de carga RP50. En este caso, dado que el resultado proviene de correr el modelo por un periodo de 1.000s, se muestran los valores de la tensión efectiva máximo, mínimo y medio, siempre en función del arco de cable.

En este caso, puede apreciarse cómo los valores máximos no se corresponden con el punto de contacto con el HarshLab debido a las fuerzas de inercia de los pesos adicionales que se han añadido al cable dinámico. A los efectos de los equipos de medida a instalar, se considerará el valor máximo en contacto con el HarshLab: 22,50kN.

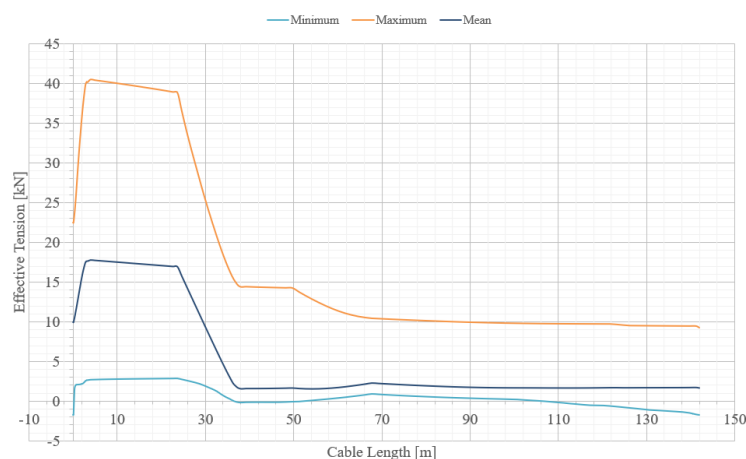


Figura 11: Tensión efectiva en el cable dinámico para condición de carga periodo de retorno 50 años.

3.2. Modelo local del cable dinámico.

Como se ha venido describiendo en los apartados anteriores, los cables dinámicos son una estructura compleja, desde el punto de vista mecánico, formado por diversas capas y diversos materiales. Desde el acero de los alambres de la armadura, pasando por el cobre de los conductores hasta el polietileno de los rellenos o de la camisa exterior.

Así, se hace necesario conocer si todas las capas de las que está formado un cable dinámico se deforman de la misma manera para colocar las galgas extensiométricas en la zona del conjunto donde sepamos que realmente estamos capturando la medida de la tensión.

Hay múltiples estudios en el estado del arte que apuntan a que las tensiones en un cable dinámico se transmiten por sus armaduras, siendo despreciable la aportación a la mecánica del cable del resto de componentes [17]. Así pues, no parece descabellado considerar todo el núcleo del cable como un cilindro homogéneo cuya única misión es mantener la estabilidad de las armaduras.

La Figura 12 muestra una sección del modelo de cable dinámico realizado por este autor para estudiar los fenómenos que aparecen en la interfaz armadura – mordaza. Puede apreciarse cómo se ha considerado el núcleo como un cilindro homogéneo.

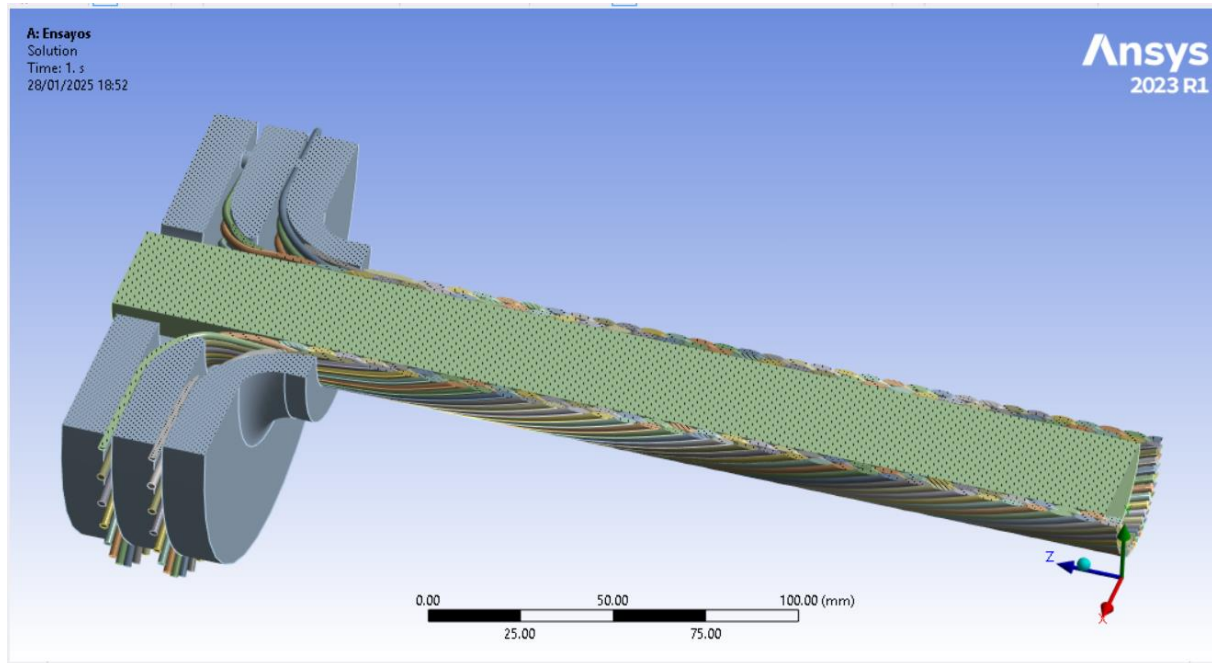


Figura 12: Modelo de cable dinámico de núcleo homogéneo.

De igual forma, se ha realizado un modelo de elementos finitos con ayuda del software ANSYS, para comprobar si es viable realizar la medida de elongación mediante galgas directamente sobre la camisa exterior del cable.

Como puede apreciarse en la Figura 13, existe una gran divergencia entre las elongaciones elásticas, según en qué componente del cable se considere. Este fenómeno se debe a que, si son las armaduras quienes transmiten las cargas del cable dinámico, existe un deslizamiento entre armaduras y camisa exterior y armaduras y núcleo interno.

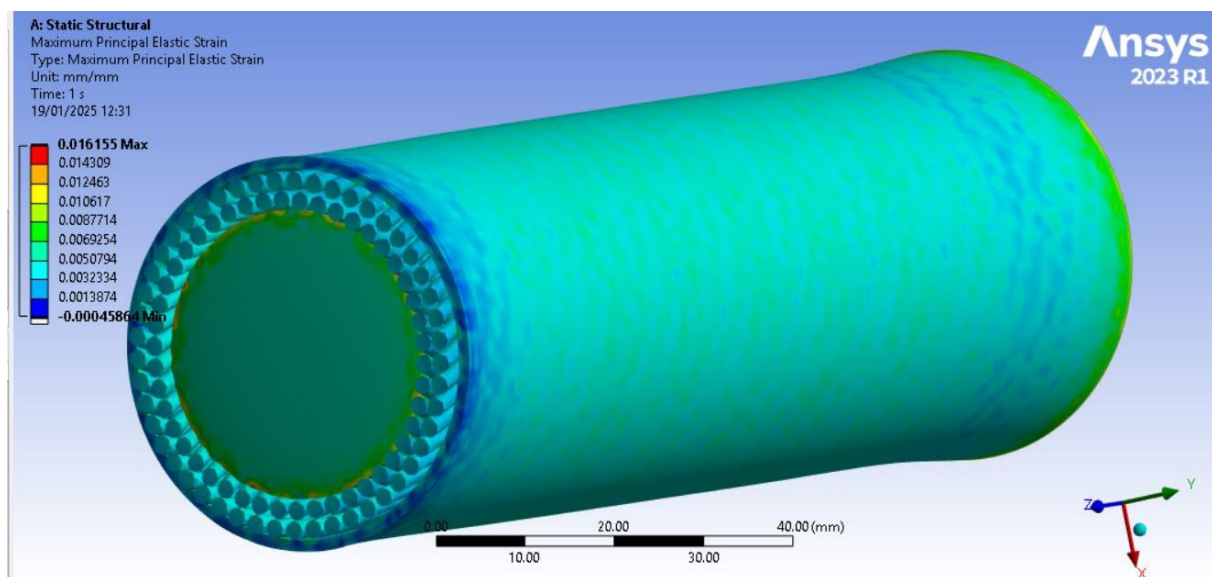


Figura 13: Modelo de cable dinámico de núcleo homogéneo. Elongaciones elásticas.

3.3. Modelo del conector eléctrico submarino.

Por último, se ha llevado a cabo un modelo de elementos finitos, también con ayuda del software ANSYS, de parte del conector submarino, de la carcasa de éste, que es la pieza donde se hace firma el cable submarino, mediante una mordaza apropiada, a la par que se une mecánicamente a la plataforma flotante, en este caso el HasrhLab.

Este modelo se ha sometido a dos condiciones de carga, resultante del modelo global del cable dinámico creado en OrcaFlex, esto es, a la tensión axial derivada de la condición de carga “estática” y a la tensión axial derivada de RP50.

En el caso de la condición de carga “estática” se sometió al modelo creado del conector submarino a una carga axial de 10,69 kN, según se dedujo del apartado 3.1, dando unos valores de elongación de $42\mu\epsilon$. Para la condición de carga “RP50” se ha sometido, en el modelo numérico, a una tensión axial de 22,50kN, también deducida del modelo descrito en 3.1, dando como resultado una elongación de $94\mu\epsilon$.

En la Figura 14 se muestran los resultados de estos análisis.

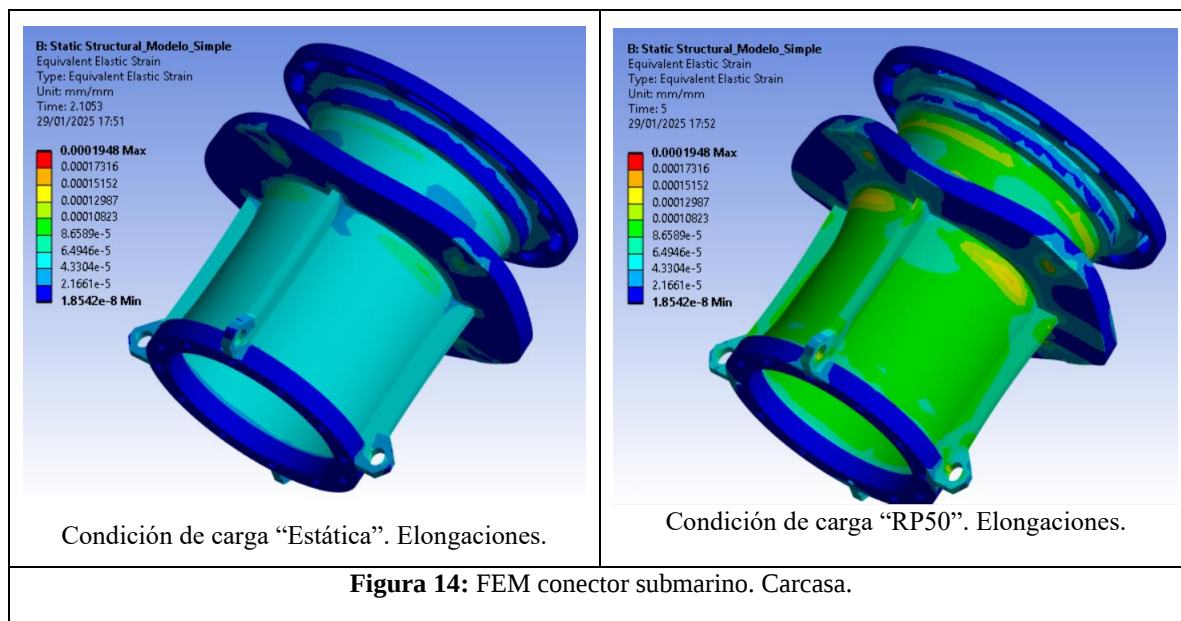


Figura 14: FEM conector submarino. Carcasa.

4. Conclusiones

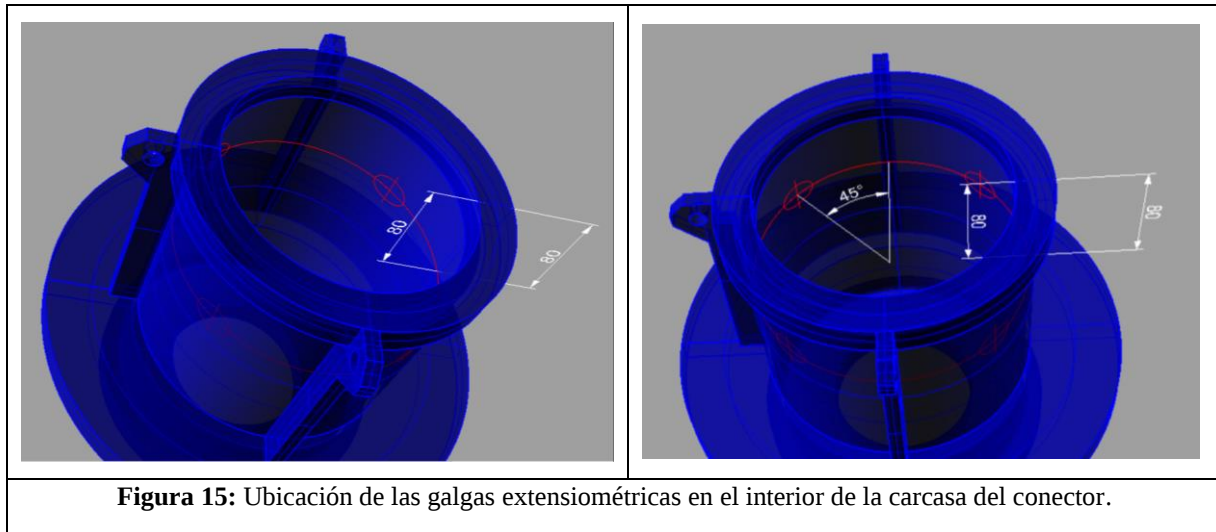
Los cables dinámicos empleados en eólica offshore flotante son uno de los elementos más críticos de dichos parques y, por tanto, se hace necesario poder monitorizar su comportamiento mecánico para predecir fallos. Sin embargo, a día de hoy, existe muy poca información de cómo llevar a cabo dicha monitorización. En ese sentido, este trabajo pretende aportar ciertas conclusiones.

En primer lugar, este estudio deja patente que se hace imprescindible la realización de un modelo global del cable dinámico para poder establecer cuáles son las cargas mínimas y máximas que monitorizar. Ese modelo global puede llevarse a cabo bien mediante modelos numéricos analíticos o mediante software comercial.

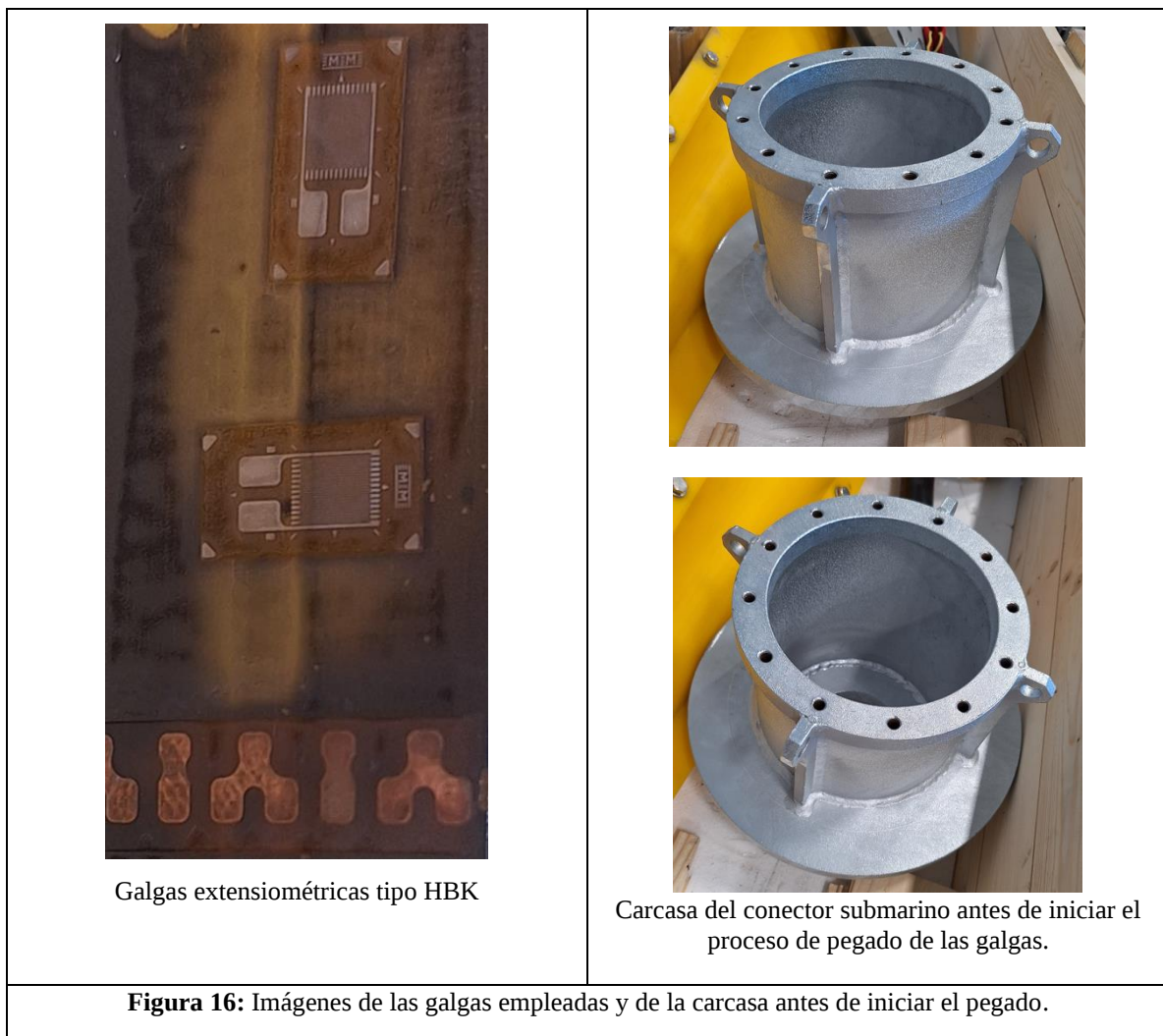
En cualquier caso, del modelo local de cable dinámico, se desprende que no es obvio la ubicación en el cable de los sensores necesarios para una monitorización apropiada. Puede verse cómo la capa exterior, o camisa del cable, se deforma de manera independiente a cómo lo hace la armadura, siendo ésta la responsable de la transmisión de las cargas, por lo que una medida sobre la camisa puede que no refleje la realidad del estado de cargas del cable. Sucede lo mismo con el núcleo: Incluso aunque se emplearan las fibras ópticas de comunicaciones, ubicadas en el interior del cable, para realizar la monitorización del mismo, nada garantiza que, a tracción axial, el núcleo se deforme de igual forma que la armadura.

Finalmente, a la vista del modelo de conector submarino, puede apreciarse cómo es la carcasa de éste el único elemento del conjunto donde la monitorización sí refleja la realidad del estado de cargas. Además, el rango de elongaciones que se desprenden del modelo refleja que el uso de galgas extensiométricas simples es una buena opción para llevar a cabo esta monitorización.

Es por ello que se ha implementado un conjunto de 4 galgas extensiométricas de la marca HBK[18] ubicadas en el interior de la carcasa del conector, repartidas radialmente según la Figura 15.



En la Figura 16 puede apreciarse el tipo de galga extensiométrica empleada, así como imágenes de la carcasa del conector antes de proceder al pegado de las galgas.



De igual forma, en la Figura 17 se muestran sendas fotografías con las galgas extensiométricas escogidas ya instaladas en el interior de la carcasa del conector submarino..

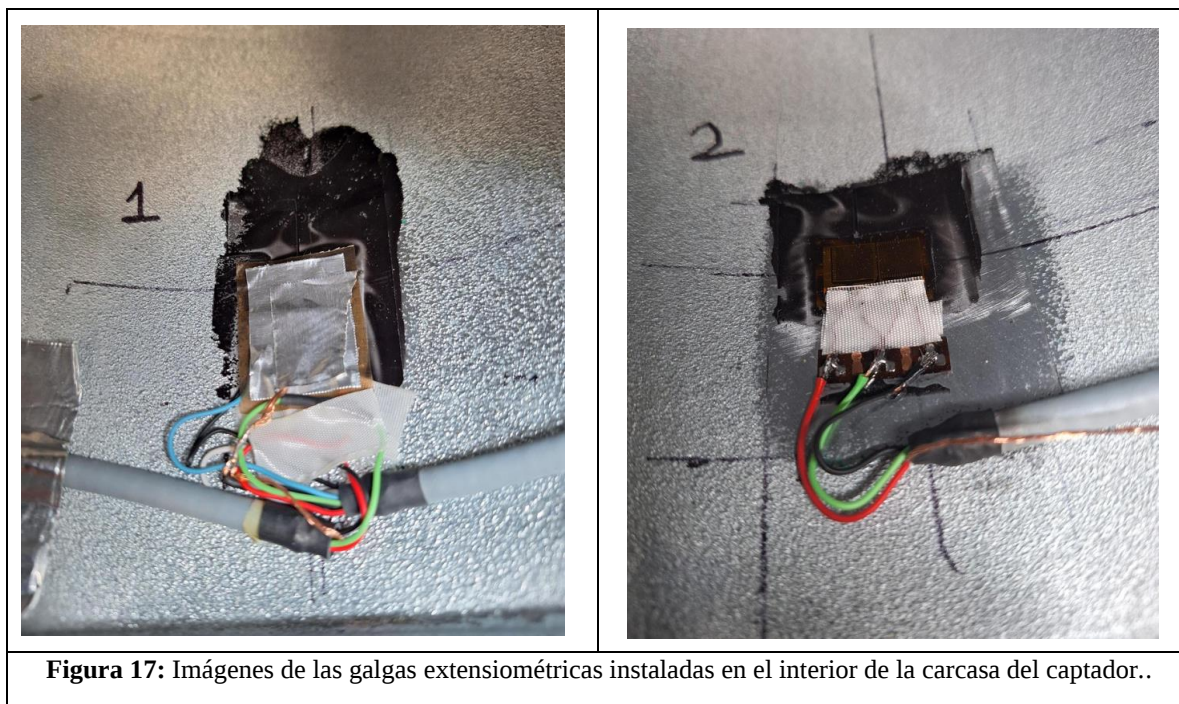


Figura 17: Imágenes de las galgas extensiométricas instaladas en el interior de la carcasa del captador..

5. Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración del equipo de Tecnalía, en especial con el área de Smart Monitoring y con todo el personal involucrado en la instalación del cable dinámico del HarshLab.

6. Referencias

- [1] DNV, DNV Floating offshore wind. The next five years, (2022).
- [2] W. Musial, P. Spitsen, P. Duffy, P. Beiter, M. Marquis, R. Hammond, M. Shields, Offshore Wind Market Report: 2022 Edition, U.S. Department of Energy (DOE) (2022).
- [3] D. McLaurin, A. Aston, J. Brand, Prevention of Offshore Wind Power Cable Incidents by Employing Offshore Oil/Gas Common Practices, in: IOWTC2021, ASME 2021 3rd International Offshore Wind Technical Conference, 2021. <https://doi.org/10.1115/IOWTC2021-3524>.
- [4] J. Sharma, GCube - Down to the wire, n.d.
- [5] B. Radowitz, Damaged offshore wind cables to cost Orsted almost half a billion dollars, Rechargenews (2021). <https://www.rechargenews.com/wind/damaged-offshore-wind-cables-to-cost-orsted-almost-half-a-billion-dollars-cfo/2-1-1002964>.
- [6] S. Okkenhaug, A.L. Haukanes Hopstad, Joint Industry Project - DNV - Optimizing mooring and dynamic cable design requirements for floating wind, DNV (2023). <https://www.dnv.com/article/optimizing-mooring-and-dynamic-cable-design-requirements-for-floating-wind-245037>.
- [7] D.-R. Li, Y.-S. Su, R.-Y. Yang, Experimental and Numerical Study of Suspended Inter-Array Cable Configurations for Floating Offshore Wind Farm, Journal of Marine Science and Engineering 12 (2024). <https://doi.org/10.3390/jmse12060853>.
- [8] J.M.B. Martínez, Mosaicos romanos mitológicos en Chipre, España y Portugal, (n.d.).
- [9] R.& I. Tecnalía, HarshLab - Laboratorio offshore para ensayos de materiales y componentes, (2024). <https://harshlab.eu/>.
- [10] Ente Vasco de la Energía, Bimep - Biscay Marine Energy Platform, (2024). <https://www.bimep.com/area-bimep/caracteristicas-tecnicas/>.
- [11] I. Larrea, Conector eléctrico submarino KONEKTA2 - Ditrel Industrial S.L., (2024). <https://www.ditrel.es/productos-y-servicios/view/11/konekta2>.
- [12] A. Rico, WO2014154913A1 System and method for connecting a line to marine equipment, 2013. <https://patents.google.com/patent/WO2014154913A1/en?inventor=rico+rubio%2c+antonio&oq=rico+rubio%2c+antonio>.
- [13] A. Rico, J. López-Queija, J.I. Llorente, Í. Mendikoa, A. Bidea, Method for early analysis of the umbilical cable in a floating offshore wind turbine., (n.d.).
- [14] Orcina Ltd, OrcaFlex Software, (2024). <https://www.orcina.com/orcaflex/>.

-
- [15] ANSYS, Inc, Ansys Mechanical Finite Element Analysis (FEA) Software for Structural Engineering, (2025). <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>.
- [16] J.R. Morison, J.W. Johnson, S.A. Schaaf, The Force Exerted by Surface Waves on Piles, *Journal of Petroleum Technology* 2 (1950) 149–154. <https://doi.org/10.2118/950149-G>.
- [17] J.-M. Leroy, Y. Poirrette, N. Brusselle Dupend, F. Caleyron, Assessing Mechanical Stresses in Dynamic Power Cables for Floating Offshore Wind Farms, in: *Volume 10: Ocean Renewable Energy*, American Society of Mechanical Engineers, Trondheim, Norway, 2017: p. V010T09A050. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-61630>.
- [18] HBK Ibérica, Galgas extensométricas HBM, (n.d.). <https://www.hbm.com/es/0014/galgas-extensometricas/>.