

## **Experiencias en el desarrollo y aplicación de herramientas de cálculo y verificación de estructuras marinas para generación de energía**

Dr. Julio García Espinosa<sup>1,2</sup>, Dr. Borja Serván Camas<sup>2</sup>, D. Daniel Sá<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Compass Ingeniería y Sistemas, S.A., C/ Tuset 8, 7-2, 08006 Barcelona.

<sup>2</sup>Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Edificio C1, Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona.

### **Resumen**

En los últimos años se ha despertado un enorme interés por la obtención de energía de fuentes renovables, siendo el mar uno de los principales focos de este interés. La razón principal es la enorme disponibilidad de energía en este medio, tanto en forma de viento, como de corrientes, diferencias de temperatura, oleaje y mareas.

A raíz de este interés, se han invertido importantes recursos en el desarrollo de plantas para la extracción de energía de las diferentes fuentes mencionadas. De manera no exhaustiva, podemos mencionar los aerogeneradores, las plantas de extracción de energía de las olas, de corrientes, las presas de marea, los convertidores de energía térmica del océano, generadores por diferencias de presión osmótica y de columna de agua oscilante.

En este trabajo se presentan las experiencias de la empresa Compass Ingeniería y Sistemas S.A. (CompassIS) y del grupo de investigación naval del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), en el desarrollo de herramientas de predicción de cargas, de cálculo y verificación de estructuras, así como de comportamiento en la mar. Finalmente se mostrarán diferentes ejemplos prácticos de aplicación al diseño de diferentes estructuras marinas de obtención de energía, desarrollados para varias empresas de relevancia en este campo.

### **Abstract**

Over the last years great interest has developed in the harvesting of power from renewable resources. The sea has been a main focus of this development. The reason is the huge amount of energy available as waves, marine currents, thermal energy, tidal and wind waves.

Significant resources have been invested in the development of plants to harvest the energy of the ocean in the different mentioned sources. For example, we can mention wind turbines, waves and marine-current energy converters, tidal barrages, ocean thermal energy converters OTEC, oscillating water column devices (OWC) and osmotic-pressure difference systems.

In this work, the experiences of the company Compass Ingeniería y Sistemas S.A. (CompassIS) and the naval research group of the Internacional Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) in the development of tools for sea loads prediction, structural design and verification, and seakeeping, will be presented. Several examples of application of these tools to the design of offshore energy converters will be introduced, including offshore wind turbines, oscillating water column devices and wave energy harvesting systems developed for some stakeholders in this field.

### **Fuentes de energía marina**

En sentido estricto, se consideran cinco tipologías diferentes de energía marina o energía aprovechable obtenida del mar: la procedente de las mareas, de las corrientes, de las olas, del gradiente salino y del gradiente térmico. Todas ellas tienen origen común en las dos fuentes primarias: la energía del sol y la gravitatoria procedente de la rotación de la tierra.

La energía de las mareas, o mareomotriz, resulta de aprovechar la energía potencial creada por las fuerzas periódicas producidas por la interacción gravitatoria del sistema Tierra-Luna-Sol. La energía de las olas, o undimotriz, resulta de la captación de la energía potencial y cinética asociada al oleaje. La energía térmica oceánica, o gradiente térmico, se define como la conversión en potencia útil de la

diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y aquella ubicada en profundidad. La energía del gradiente salino u osmótico, aprovecha la diferencia de salinidad que se encuentra en la confluencia de agua de los océanos y el agua dulce de los ríos. Finalmente, la energía de las corrientes marinas consiste en el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes.

Existe una gran disparidad entre la disponibilidad práctica que se estima para cada una de estas fuentes, y por lo tanto despiertan un interés muy desigual. Tal y como se muestra en la Tabla 1, la energía undimotriz es la que probablemente ofrece mayor potencial, estimado hasta en 80000 TWh/año, lo que justifica el significativo esfuerzo que se está dedicando a su desarrollo.

Fuente	Disponibilidad (TWh/año)
Energía de las olas	8000 – 80000
Energía de las mareas	800
Energía de las corrientes	300
Gradiente salino	2000
Gradiente término	10000
Disponibilidad teórica total	21000- 93100

**Tabla 1. Disponibilidad estimada de las diferentes fuentes de energía marina [1]**

Aparte de las cinco fuentes referidas, y aunque en sentido estricto su origen no es marino, no debemos olvidar la forma de aprovechamiento de energía en el mar con mayor potencial de crecimiento en el próximo decenio: la eólica marina.

El gran desarrollo de la energía eólica se ha llevado a cabo hasta la fecha en instalaciones terrestres, representando en la actualidad las instalaciones marinas menos del 2% del total de potencia instalado. Sin embargo, las previsiones para los próximos años ponen de manifiesto la creciente preponderancia del caso marítimo sobre el terrestre. En Europa, la Asociación Europea de Energía Eólica, considera que para 2020, la potencia marina instalada representará una tercera parte de la electricidad generada a partir del viento [2]. Este crecimiento se deberá principalmente al doble efecto del crecimiento del mercado marítimo y a la estabilización del mercado terrestre, derivada de la ocupación de los emplazamientos óptimos, pero también a la significativa reducción de los costes de producción de este tipo de instalaciones, y a la gran disponibilidad de recursos (desarrollando tan sólo el 5% de las áreas disponibles en el mar del Norte, se obtendría energía para cubrir prácticamente un cuarto de la demanda eléctrica de toda la Unión Europea [2]).

El cumplimiento de estos planes de desarrollo para Europa implicaría el desafío de instalar hasta 5 GW de aerogeneradores offshore de media anual hasta 2020 [2], es decir, la construcción de no menos de 600 turbinas al año.

El interés y el desafío que supondrá en los próximos años el desarrollo de estas tecnologías, ha motivado los trabajos de la empresa Compass Ingeniería y Sistemas S.A. (CompassIS) y del grupo de investigación naval del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), en el desarrollo de herramientas de predicción de cargas, de cálculo y verificación de estructuras, así como de comportamiento en la mar, que se presentan en este artículo. En este trabajo se mostrarán finalmente diferentes ejemplos prácticos de aplicación al diseño de diferentes estructuras marinas para la obtención de energía, realizados para varias empresas de relevancia en este campo.

### **Herramientas de cálculo para el estudio del comportamiento en la mar de estructuras flotantes**

El cálculo del comportamiento en la mar de cuerpos flotantes es una herramienta básica en el diseño de las estructuras que nos ocupan. Por otro lado, dada la diversidad de necesidades que se plantean en este ámbito, difícilmente una única herramienta de este tipo puede cumplir de manera óptima con todos los requisitos. En el caso que nos ocupa, se han desarrollado dos herramientas de

características bien diferenciadas, que cubren de manera adecuada un amplio abanico de necesidades:

- Una sencilla herramienta de cálculo que permite calcular de manera rápida la respuesta dinámica de una estructura compuesta por elementos tubulares, utilizando la formulación de Morison.
- Una sofisticada herramienta de cálculo del comportamiento de la mar de una estructura, que permite resolver el problema de difracción-radiación de un cuerpo flotante, mediante el método de los elementos finitos.

La primera de las herramientas mencionadas se ha desarrollado en Tcl, dentro de la plataforma Lognoter. Lognoter es un software libre de gestión de conocimiento que incluye sencillas herramientas para la generación de formularios sofisticados, por lo que consideró la utilidad más adecuada para este propósito.

Las características básicas de esta herramienta, cuya interfaz de usuario se muestra en la Figura 1, son:

1. Permite calcular las curvas RAOS de una estructura tubular, mediante la resolución de las ecuaciones de la dinámica del cuerpo en el dominio de la frecuencia. Las fuerzas de excitación sobre los diferentes elementos tubulares son evaluadas mediante la conocida ecuación de Morison.
2. La definición de la estructura puede hacerse mediante la introducción directa de las características de los diferentes tubos en la interfaz o bien es posible importar los datos de un modelo de vigas definido en el programa RamSeries (ver <http://www.compassis.com>).
3. Los resultados pueden exportarse en formato ASCII compatible con Ms EXCEL.

Esta herramienta puede ser usada libremente y está disponible para la descarga en <http://www.lognoter.com/c/lognoterforms>.

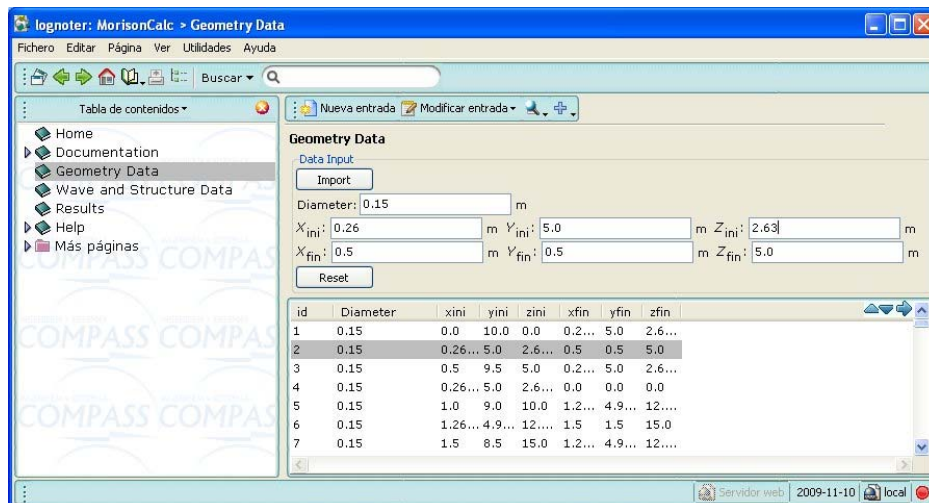


Figura 1. Interfaz de usuario del programa de cálculo de comportamiento en la mar MorisonCalc

Esta herramienta tiene como principal ventaja la sencillez de uso, y la rapidez, ya que permite efectuar de manera casi instantánea el cálculo del comportamiento en la mar de una estructura. Por el contrario, sus limitaciones son evidentes: su aplicación está limitada a estructuras compuestas por elementos cilíndricos y se basa en una formulación simplificada (ecuación de Morison) que sólo es válida en el

caso de que la longitud de la ola sea mucho mayor que el diámetro de los elementos cilíndricos que componen la estructura.

Por ello, como complemento a esta herramienta, es necesario disponer de un código de cálculo sofisticado que permita el estudio preciso del comportamiento en la mar de estructuras complejas, aunque sea a costa de requerir un mayor tiempo de cálculo.

Las herramientas de cálculo basadas en el método de los elementos de contorno (boundary element method o BEM) son hoy en día ampliamente utilizadas para estudiar el comportamiento en la mar de estructuras. Sin embargo, las limitaciones de este método, y sobre todo la necesidad de desarrollar herramientas de interacción fluido-estructura, que permitan conocer con suficiente fiabilidad, la respuesta estructural de un cuerpo ante la acción de las olas, ha provocado un intenso trabajo en los últimos años para desarrollar un código basado en el método de los elementos finitos (MEF) que permita resolver este tipo de problemas (ver por ejemplo [3,4]).

A continuación se describirá brevemente el modelo numérico MEF desarrollado en este trabajo.

Consideremos el problema de difracción-radiación de un cuerpo flotante:

$$\nabla^2 \phi^1 = 0 \quad \text{en } \Omega \quad (1)$$

$$\partial_t \phi^1 + g\eta^1 = -P_a / \rho + C \quad \text{en } z = 0 \quad (\text{condición de superficie libre dinámica}) \quad (2)$$

$$\partial_t \eta^1 - \partial_z \phi^1 = 0 \quad \text{en } z = 0 \quad z = 0 \quad (\text{condición de superficie libre cinemática}) \quad (3)$$

$$\partial_n \phi^1 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \quad \text{en } S \quad (4)$$

Donde  $\phi^1$  y  $\eta^1$  son el potencial de velocidad y la elevación de la superficie libre de primer orden;  $\Omega$  es el dominio de fluido limitado por el plano  $z = 0$ ;  $P_a$  es la presión atmosférica,  $\rho$  es la densidad del agua,  $C$  es una constante y  $S$  es la superficie donde se prescribe la velocidad normal del fluido.

Las ecuaciones (2) y (3) se pueden combinar para dar:

$$\partial_n \phi^1 = -g \partial_z \phi^1 - \partial_t (P_a / (\rho g)) \quad \text{in } z = 0 \quad (5)$$

Entonces, el potencial de velocidad puede obtenerse de resolver la ec. (1) junto con las condiciones de contorno dadas por las ecs. (4) y (5), donde la elevación de la superficie libre ha quedado desacoplada. Una vez que se conoce el potencial de velocidad, la altura de la superficie libre se evalúa directamente de la ec. (2).

El modelo se puede fácilmente extender al segundo orden, resultando el conjunto de ecuaciones que se muestra a continuación. Los detalles de la obtención de las mismas, se omiten aquí por simplificar la exposición.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \phi^2 = 0 \quad ; \mathbf{x} \in \Omega \\ \zeta^2 = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi^2}{\partial t} - R^1 \quad ; z = 0 \\ \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi^2}{\partial t^2} = -\frac{\partial \phi^2}{\partial z} - S^1 - \frac{\partial R^1}{\partial t} \quad ; z = 0 \\ R^1 = \frac{1}{g} \zeta^1 \frac{\partial^2 \phi^1}{\partial t \partial z} + \frac{1}{2g} (\nabla \phi^1 \cdot \nabla \phi^1) \quad ; z = 0 \\ S^1 = \zeta^1 \frac{\partial^2 \phi^1}{\partial^2 z} - \frac{\partial \zeta^1}{\partial x} \frac{\partial \phi^1}{\partial x} - \frac{\partial \zeta^1}{\partial y} \frac{\partial \phi^1}{\partial y} \quad ; z = 0 \end{array} \right.$$

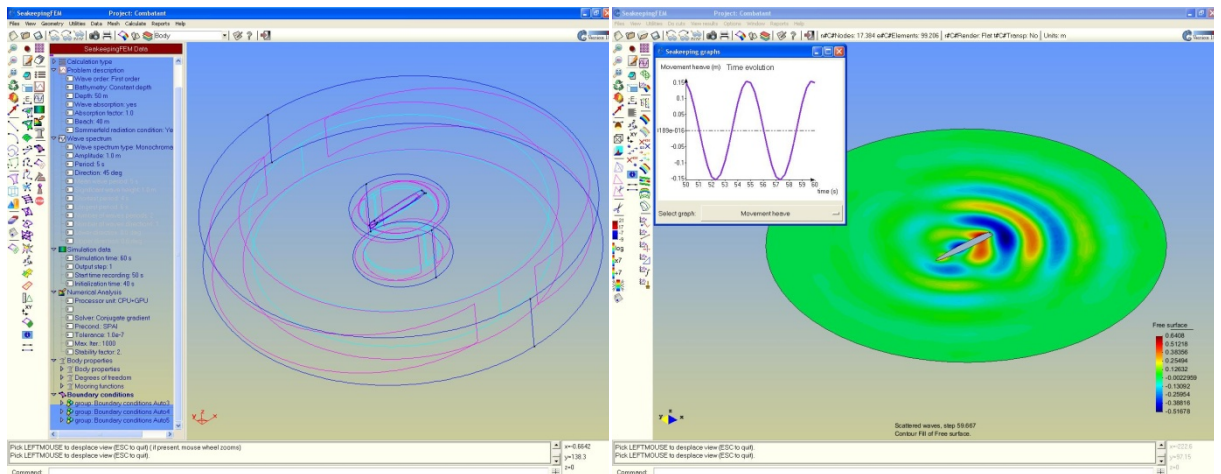
Como ya se ha comentado, la integración de las ecuaciones se realiza mediante el método de los elementos finitos (MEF). La formulación débil correspondiente, está dada por:

$$\forall i \quad \sum_j \left[ \int_{\Omega} \nabla N^i \nabla N^j dv \right] \phi^j = \int_{\Gamma} N^i (\nabla \phi \cdot \mathbf{n}_{\Gamma}) ds \quad (6)$$

El término de la derecha de la ecuación (6) puede aproximarse por:

$$\int_{\Gamma} N^i (\nabla \phi \cdot \mathbf{n}_s) ds = \left[ \int_{\Gamma} N^i N^j ds \right] (\mathbf{v}^j \cdot \mathbf{n}_{\Gamma}) \quad (7)$$

donde  $\mathbf{v}^j = (\nabla \phi)^j$  es el vector de velocidad en el nodo j.



**Figura 2. Imagen del preproceso y postproceso del sistema de cálculo del comportamiento en la mar por el MEF desarrollada**

Finalmente es importante destacar, que al objeto de reducir el tiempo de cálculo, se decidió implementar la resolución del problema sobre GPU. La implementación de los algoritmos de resolución correspondientes (CG preconditionado con esquema deflated [5] y SPAI) está basada en CUDA (Computer Unified Device Architecture), usando la librería CUBLAS. De esta forma, y con una tarjeta

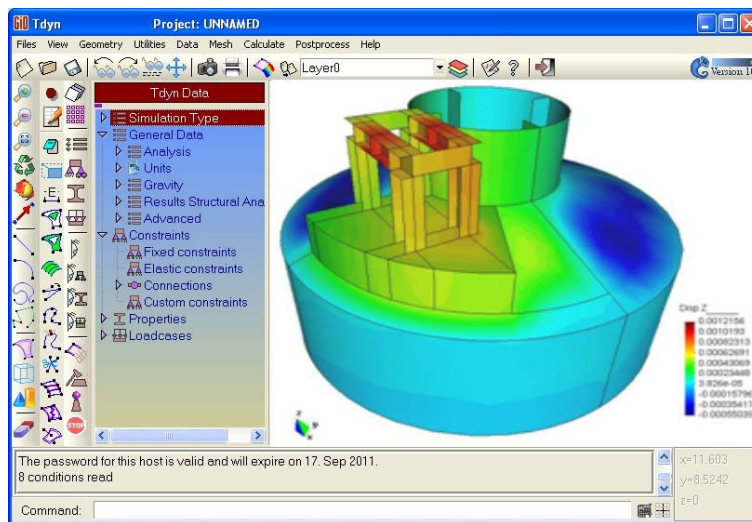
básica Nvidia GTX 280, se han obtenido ganancias en el tiempo de resolución de hasta 5 veces, comparado con una resolución equivalente en una GPU típica.

Esta herramienta está integrada en el software Tdyn [6].

### Adaptación de herramientas MEF de cálculo estructural

Ramseries [7] es un entorno de análisis estructural basado en el método de los elementos finitos (ver Figura 3), integrado dentro del entorno de simulación multifísica Tdyn (ver <http://www.compassis.com>). El núcleo de cálculo del programa ha sido desarrollado durante los últimos 10 años en colaboración entre CompassIS y CIMNE, priorizando en este desarrollo las necesidades más habituales de cálculo en el ámbito de las ingenierías naval y civil.

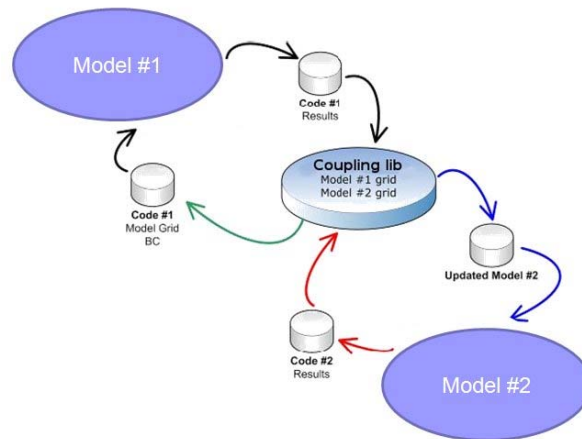
El diseño y verificación estructural de sistemas de extracción de energía marina ha planteado nuevas necesidades. Además de diversos pequeños desarrollos en general relacionados con la implementación de nuevas tipologías de cargas, la principal tarea ha estado enfocada al desarrollo de herramientas que permitan realizar sofisticados cálculos de interacción fluido-estructura.



**Figura 3. Cálculo del soporte de un amortiguador de una unidad de extracción de energía undimotriz, mediante el programa Ramseries**

Para facilitar esta integración en todas las situaciones que se puedan presentar, se ha desarrollado una librería en C++ con interfaces C y Fortran, que permite el intercambio sincronizado de información entre dos procesos que se ejecutan a la vez. La comunicación se produce a través de puertos TCP-IP, mediante Tcl-sockets.

Esta librería permite no sólo la comunicación, sino que además gestiona la interpolación de los datos entre diferentes mallas de cálculo. Además, permite utilizar diferentes esquemas de cálculo, desde un intercambio de información paso a paso, hasta análisis basados en los resultados de cálculos anteriores, mediante la lectura de resultados de solicitaciones fluidodinámicas en archivos de formato definido.



**Figura 4. Esquema de funcionamiento de la librería de comunicación desarrollada**

La Figura 4 muestra el esquema de funcionamiento del algoritmo básico implementado. Las solicitaciones (presiones y tracciones) obtenidas del modelo fluidodinámico o de comportamiento de la mar (Model#1) son enviadas a través de la librería al modelo de cálculo estructural (Model#2), realizándose automáticamente las interpolaciones necesarias. El resultado del cálculo estructural son los movimientos y deformaciones del objeto, que son enviadas a través de la librería de comunicación para realizar las adaptaciones de la malla.

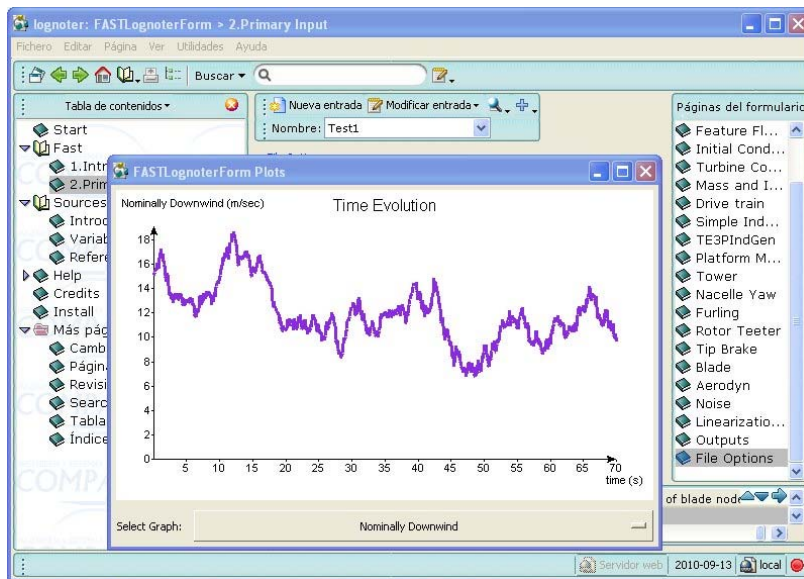
Como complemento a la utilidad de comunicación, se ha llevado a cabo una importante adaptación del entorno de pre/postproceso del programa (basado en GiD, ver <http://www.gidhome.com>). Este desarrollo, compilado en forma de librería y desarrollado sobre Tcl-Tk, permite gestionar gráficamente toda la información de un modelo CAE y almacenarla en una base de datos XML.

Finalmente, es importante destacar el trabajo realizado específicamente para la integración del código de cálculo del comportamiento en la mar, basado en la ecuación de Morison. Dada la simplicidad de este modelo, se desarrolló una interfaz específica que permite intercomunicar la información de un modelo de barras con el código de cálculo del comportamiento en la mar, a la vez que utilizar sus resultados, para de manera automática imponer las solicitaciones en el modelo de cálculo estructural.

### **Desarrollo de una interfaz de usuario para FAST-Aerodyn**

FAST y Aerodyn [8] son un conjunto de utilidades para cálculo aeroelástico de palas de aerogeneradores, desarrollados por el National Wind Technology Center que pueden ser usados libremente, y que además han sido certificados por Germanischer Lloyd Wind Energie, siendo adecuados para cálculo de cargas sobre aerogeneradores para su diseño y certificación.

Lamentablemente, este conjunto de utilidades carece de interfaz de usuario, por lo que su uso profesional está limitado por este hecho. Por ello se decidió inicial el desarrollo de una interfaz gráfica basada en el sistema Lognoter, de la cual se presenta una imagen en la Figura 5.



**Figura 5. Interfaz de usuario basada en Lognoter para FAST/Aerodyn**

Esta herramienta permite introducir los datos básicos necesarios para la ejecución del programa FAST, de una manera ordenada por páginas, y visualizar los diferentes resultados obtenidos de manera gráfica, en el propio entorno. Además, los datos de entrada de los diferentes análisis pueden almacenarse en la base de datos interna para usos futuros.

La utilidad desarrollada se puede usar libremente y está disponible para descarga en <http://www.lognoter.com/c/lognoterforms>.

### Experiencias en el campo de la energía undimotriz

Como ya se ha comentado, de todas las fuentes energéticas marinas, la energía undimotriz es probablemente la que ofrece mayor potencial, dado que la energía aprovechable se estima en hasta 80000 TWh/año. Aunque las expectativas para su comercialización se alejan a plazos de 5-10 años, existiendo en la actualidad más de 1000 patentes mundiales.

En este apartado se presentarán algunas experiencias de los autores en este campo, comenzando con el trabajo realizado en el diseño de la estructura de una plataforma semisumergible fondeada de 6MW de potencia nominal para la empresa Hidroflot (<http://www.hidroflot.com>) y certificada por Germanischer Lloyd (Ocean Wave Energy Converter). Esta plataforma, está compuesta por 16 columnas sobre las que deslizan otras tantas boyas. Los movimientos verticales de ascenso y descenso de las boyas arrastran un sistema de tracción mecánico a un multiplicador de velocidad de doble entrada y doble sentido de giro, lo que permite que sea accionado a la vez por dos boyas de captación. Este multiplicador está acoplado a un generador regulado electrónicamente. Tanto el concepto del dispositivo, como el sistema mecánico de generación, son patentes de la propia Hidroflot.

El dispositivo está diseñado para operar hasta con olas de 6 m de altura. Para condiciones de mar con olas de amplitud superior, la unidad es inundada y se sumerge a una profundidad de 10 m. Luego es reflotada mediante bombeo y soplado de aire comprimido en los tanques inundados.

La Figura 6 muestra una vista general y detalle de la unidad que tiene unas dimensiones de 44.62 m de manga y 23.28 m de puntal, con un calado de 16.32 m.



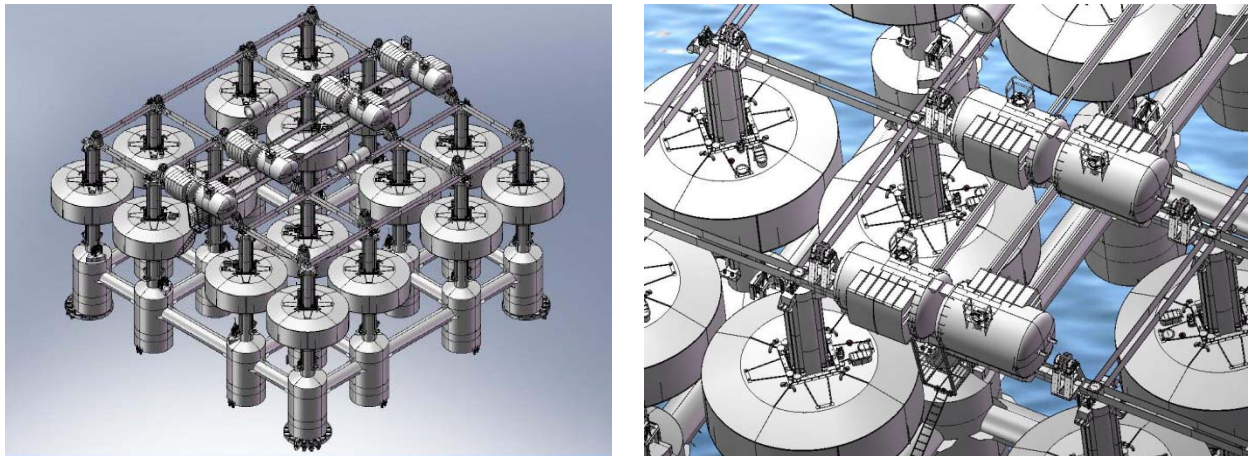


Figura 6. Vista general y detalle del dispositivo de generación de energía undimotriz de Hydroflot

El proceso que se ha llevado a cabo para comprobar el adecuado comportamiento de la unidad y dimensionar y verificar la estructura, se resume a continuación:

1. Estudio hidrostático, y de estabilidad, cálculo del desplazamiento y lastre necesario.
2. Estudio del comportamiento en la mar del sistema fondeado. Para este estudio se utilizó la herramienta basada en las ecuaciones de Morison, presentada anteriormente.
3. Cálculo dinámico de la estructura completa sometida a la acción de las olas, mediante un modelo de barras, y considerando el resto de acciones sobre la estructura, de acuerdo a los criterios estándar para estructuras offshore.

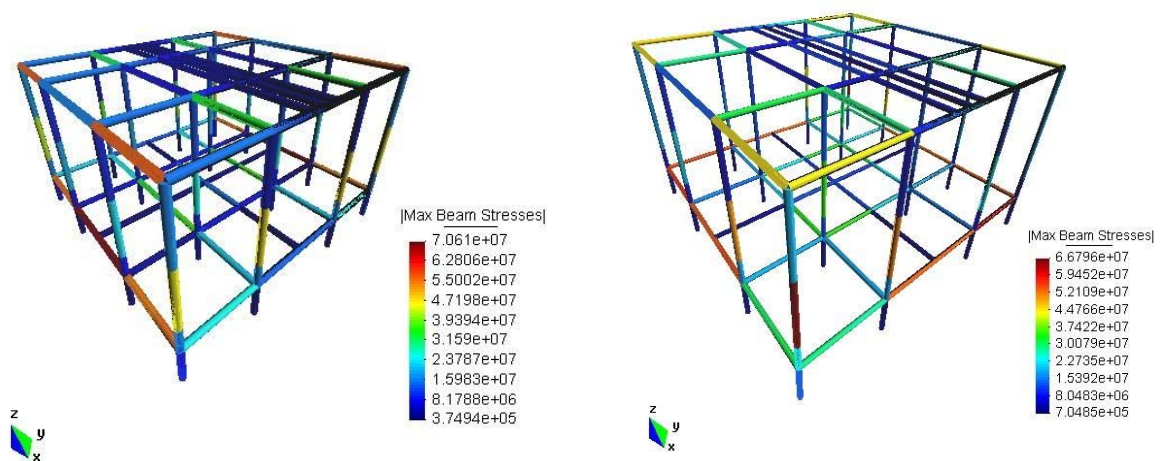
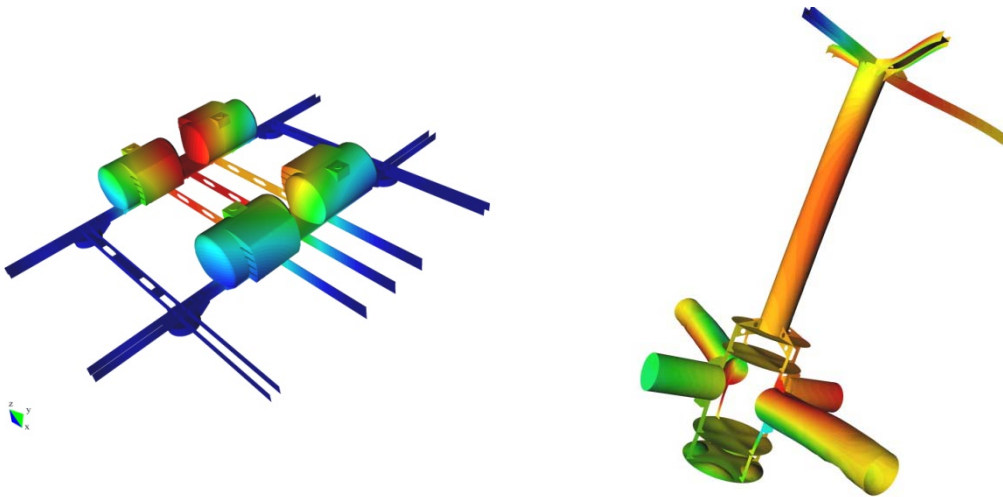


Figura 7. Esfuerzos máximos sobre los elementos de barra, obtenidos para la acción de una ola de 6 m de altura, para dos direcciones de incidencia (0° y 45°).

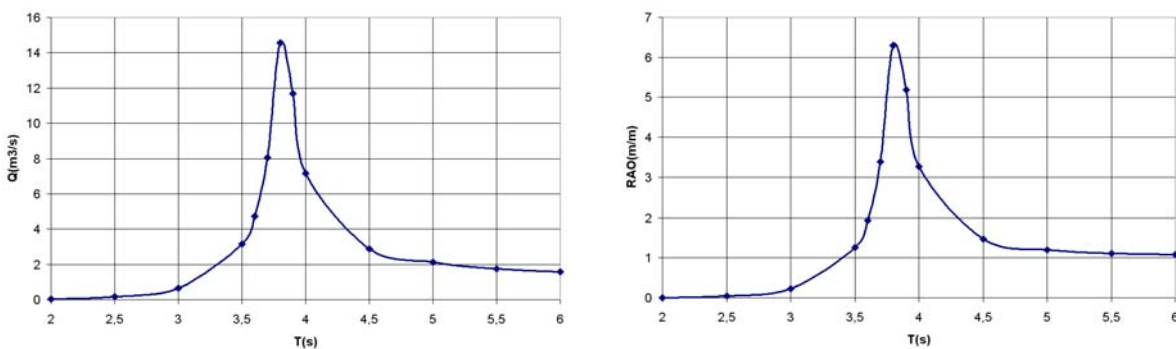
4. Finalmente se crearon modelos locales de detalle, mediante elementos de lámina y viga (ver Figura 8). Estos modelos abarcaban el total de la estructura y fueron utilizados para la verificación detallada de uniones y elementos críticos, así como la verificación de la respuesta a fatiga. Estos análisis detallados se realizaron para las condiciones dinámicas más críticas y para la condición de inmersión de la estructura.



**Figura 8. Cálculo directo por el método de los elementos finitos de la estructura Hidroflot. A la izquierda, detalle del conjunto multiplicador-generador. A la derecha, detalle de la estructura de una de las columnas.**

En segundo lugar se presentan los trabajos llevados a cabo para la evaluación de la capacidad y rendimiento de un dispositivo de generación de energía basado en el principio de la columna de agua oscilante (oscillating water column o OWC).

El dispositivo estudiado consiste básicamente en una campana de sección rectangular sumergida en parte, abierta por la parte inferior, y cerrada por la parte superior. La parte superior de la campana está abierta a un conducto conectado con una turbina tipo Wells de 18.5kW, unida a un generador. La turbina es el elemento encargado de la extracción de la energía del flujo de aire causado por el movimiento oscilatorio del agua en el interior de la campana, que a su vez es inducido por las olas marinas.



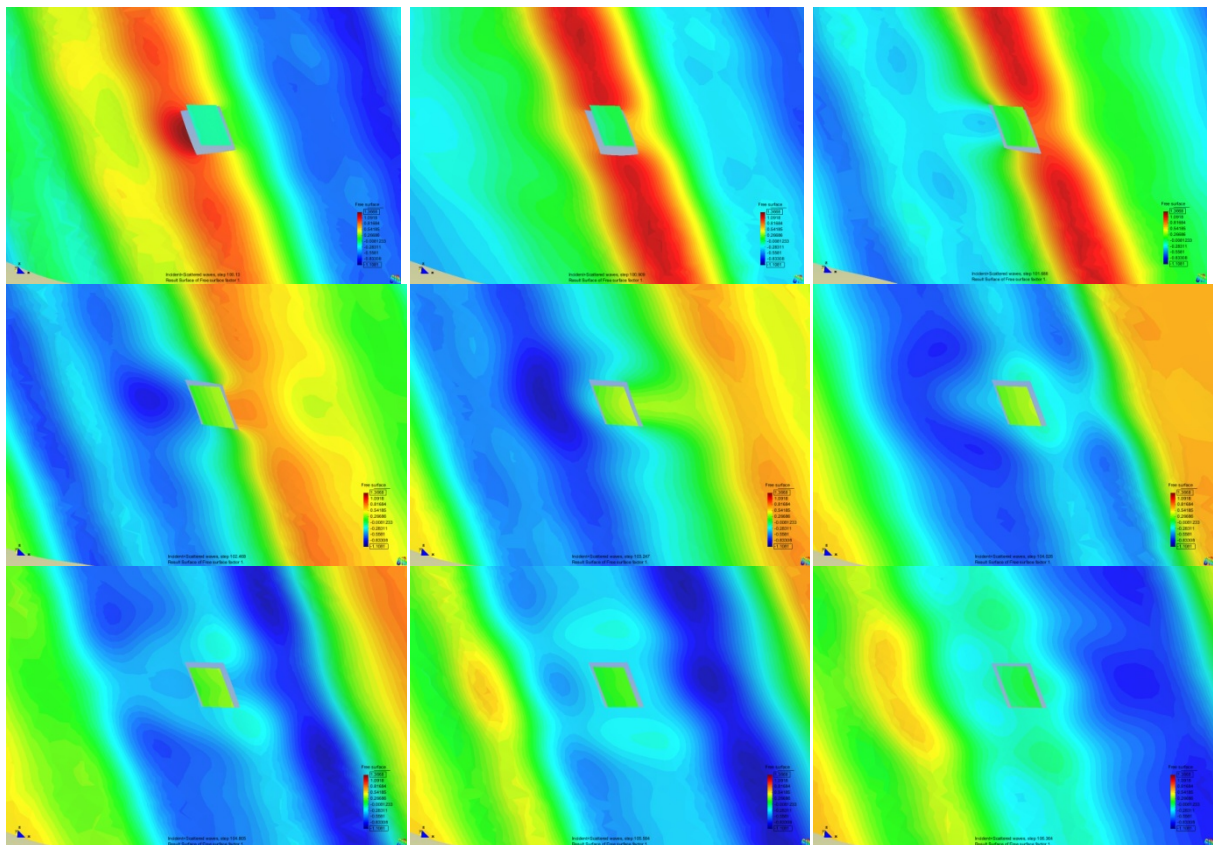
**Figura 9. Caudal de aire generado por el dispositivo (izquierda) y amplitud de la elevación de la superficie libre en el interior de la campana respecto a la de la ola incidente (derecha), en función del periodo**

En una fase previa del estudio, se han realizado diversos ensayos numéricos del comportamiento de la campana, sin considerar el efecto de la turbina, y que por tanto la presión sobre la superficie libre en el interior de la campana es la presión atmosférica. El objetivo de estos estudios previos era evaluar la respuesta del sistema ante olas regulares, para lo que se definió una dimensión de campana estándar. Para estos estudios se utilizó el programa MEF de comportamiento en la mar, ya descrito, y cuyos resultados se resumen en la Figura 9. En ellos se puede observar como para 3.8s de periodo de la ola se produce un fenómeno de resonancia bastante importante, consiguiéndose multiplicar hasta por 6 la

elevación de la superficie libre en el interior de la campana. Por otro lado, para periodos por debajo de 3.0s, el caudal de aire generado en el dispositivo es ínfimo.

En esta primera fase, también se estudió el efecto del calado del dispositivo en su funcionamiento, y en concreto en la aparición del fenómeno de resonancia, encontrándose que, dentro del rango práctico, su influencia en el valor del periodo de resonancia era limitada. Finalmente, se analizó la sensibilidad del dispositivo al ángulo de incidencia de las olas, concluyéndose que para la configuración estudiada, la respuesta era muy estable.

La segunda fase del estudio consistió en el análisis del comportamiento de la turbina en situaciones reales de operación. Para ello se obtuvieron datos de condiciones ambientales (profundidad, periodo medio y altura significativa del oleaje) de diversas zonas del litoral español. Estos datos están habitualmente disponibles para profundidades de 30m o más (ver por ejemplo [9]), por lo que no son directamente utilizables para un dispositivo que, como el que nos ocupa, se instalaría en profundidades menores. Por ello, los datos disponibles fueron trasladados a las zonas elegidas mediante modelos numéricos de transporte de oleaje desarrollados por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM-UPC, <http://lim-ciirc.upc.es/>).



**Figura 10. Secuencia de resultados (elevación de la superficie libre) de la simulación del dispositivo OWC**

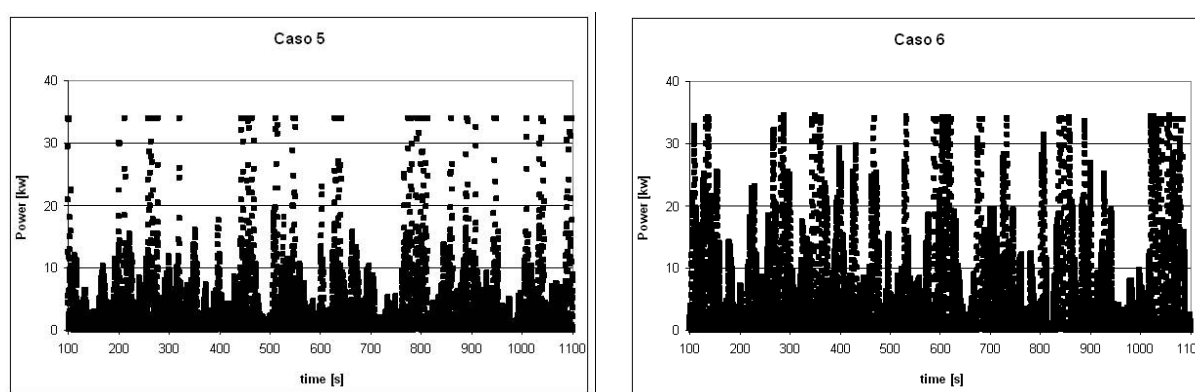
Para completar el modelo, el comportamiento de la turbina fue definido con expresiones analíticas obtenidas a partir de las características ofrecidas por un conocido fabricante. La contrapresión que produce la turbina sobre la superficie del agua se puede asumir proporcional al cuadrado del caudal de aire  $Q$ , mientras que para calcular la potencia obtenida, se utilizó una regresión cúbica de los datos del fabricante:

$$K_w = 0.0779 \cdot |Q|^3 - 0.065 \cdot Q^2 + 0.1933 \cdot |Q|$$

El programa MEF de comportamiento en la mar fue adaptado de manera que pudiera imponerse como condición de contorno, la contrapresión no lineal que produce la turbina, teniendo en cuenta además que por motivos de seguridad esta no superará los 10kPa, valor a partir del cual se limita la producción energética. Asimismo, se incorporó al código el cálculo de la potencia instantánea generada.

En la Figura 10 se muestra una secuencia de resultados de la evolución de la superficie libre en una de las simulaciones. Finalmente, la Figura 11 muestra la evolución de la potencia instantánea generada por el dispositivo durante 1100 s de simulación. En las pruebas realizadas con diferentes configuraciones del dispositivo, se han calculado unos rendimientos entre el 8 y 15% (es decir, el sistema es capaz de captar hasta el 15 % de la energía disponible en las olas).

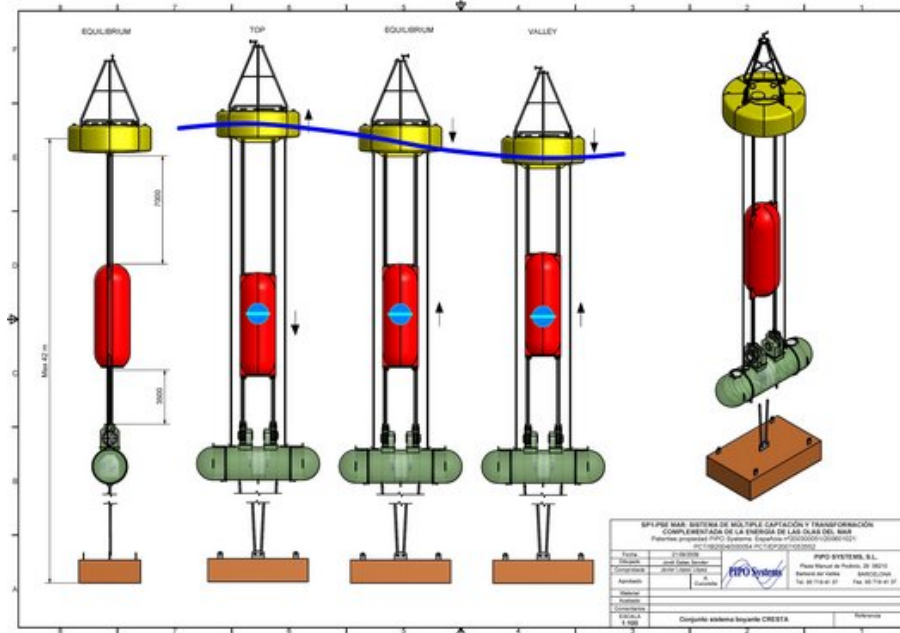
De los estudios realizados, parece poder deducirse que la contrapresión que crea la turbina, determina una densidad energética mínima para que el sistema funcione de manera óptima. Esta contrapresión tiene un significativo efecto amortiguador en la elevación de la ola en el interior del dispositivo. Este hecho, unido a la limitación de seguridad por sobrepresión en la entrada de la turbina, provoca que a partir de un cierto valor, el aumento de la sección de la campana no incremente significativamente la potencia media generada por el sistema. A la inversa, podría decirse que existen unas dimensiones de la campana, para las cuáles la relación entre potencia generada y coste de instalación es óptima.



**Figura 11. Potencia instantánea generada por dos dispositivos de dimensiones diferentes, en un mar de altura significativa 1.5 m y periodo 6 s (izquierda), y 1.95 m y 8 s (derecha).**

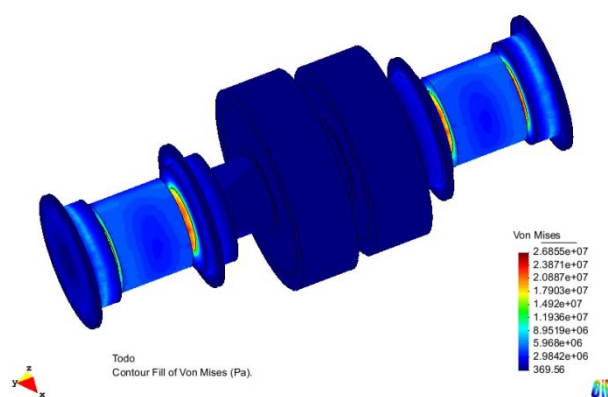
En estos momentos se está construyendo un prototipo a escala real del sistema OWC, sobre el que se realizarán pruebas de campo en condiciones reales de operación.

Por último, se presenta a continuación un breve resumen del trabajo desarrollado para las empresas Anortec (<http://www.anortec.com>) y Pipo Systems (<http://www.piposystems.com>) en la evaluación y comprobación del dispositivo Welcome, del que se muestra un esquema de funcionamiento en la Figura 12. Este dispositivo, basado en el concepto APC-PISYS creado y patentado por Pipo Systems, se trata de un sistema trivolumétrico (tres boyas, una de ellas de volumen variable) de captación múltiple y transformación de la energía de las olas. Es un sistema mixto que permite el aprovechamiento del movimiento vertical de la boya y la columna de agua oscilante (a partir de la boya de volumen variable).



**Figura 12. Esquema de funcionamiento del dispositivo Welcome**

En este caso se han llevado a cabo dos tareas principales. Por un lado se desarrolló un modelo dinámico unidimensional del sistema, para el cual se determinaron los coeficientes de fricción y masa añadida de los elementos móviles, mediante cálculo CFD con el programa Tdyn (ver <http://www.compassis.com>). El objetivo del desarrollo del modelo era, por un lado, tener un sistema capaz de evaluar de manera rápida el funcionamiento del sistema, y por otro poder calcular las sollicitaciones dinámicas que sufren los elementos mecánicos del dispositivo. Con este modelo dinámico se llevaron a cabo diversos ensayos de funcionamiento para varias condiciones de mar idealizadas, obteniendo potencias pico de hasta 90 Kw. Por otro lado, se crearon modelos MEF de los elementos mecánicos principales que analizaron para verificar su integridad estructural (ver Figura 13). Las sollicitaciones utilizadas en estas simulaciones fueron obtenidas del modelo dinámico generado.



**Figura 13. Resultado del cálculo estructural MEF del sistema de transmisión del dispositivo Welcome**

El dispositivo Welcome está actualmente siendo instalado al noreste de Gran Canaria y comenzará su operación en los próximos meses.

Se ha de indicar que el proyecto Welcome está desarrollado dentro del subprograma de Proyectos Singulares y Estratégicos del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, de acuerdo con las actuaciones incluidas en el Plan E.

### Experiencias en el campo de la eólica marina

En este apartado vamos a presentar un breve resumen del trabajo de desarrollo que se está llevando a cabo para la empresa Iberdrola Ingeniería y Construcción. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una herramienta personalizada para la creación paramétrica y análisis automático de aerogeneradores offshore. Esta herramienta está basada en el sistema Ramseries y en una librería de generación paramétrica de modelos desarrollada por CompassIS.

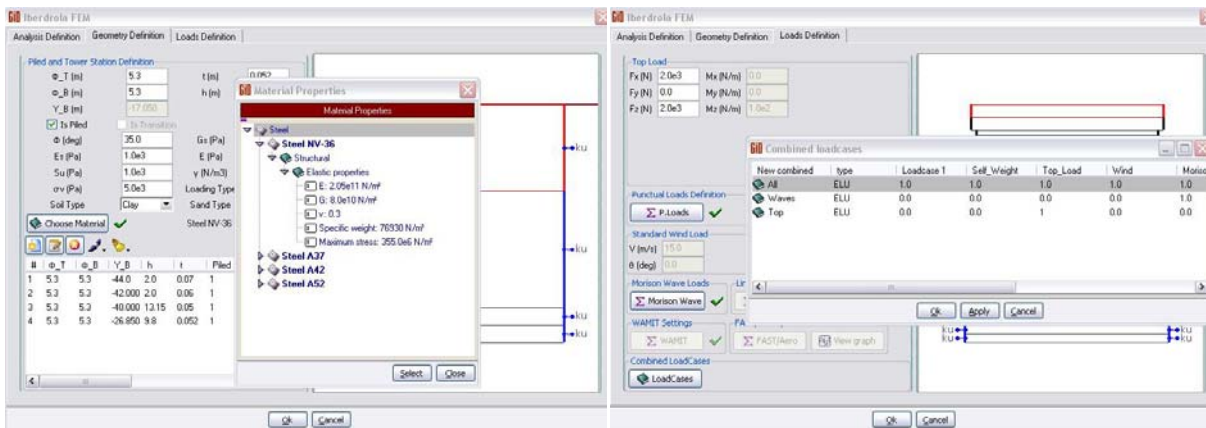


Figura 14. Herramienta de generación paramétrica de modelos CAE de aerogeneradores offshore

Para ello, se han definido unas especificaciones ambiciosas que cubren todas las necesidades de cálculo y verificación estructural, así como la evaluación del fondeo o pilotaje y del comportamiento en la mar. Estas especificaciones se pueden resumir en los siguientes puntos:

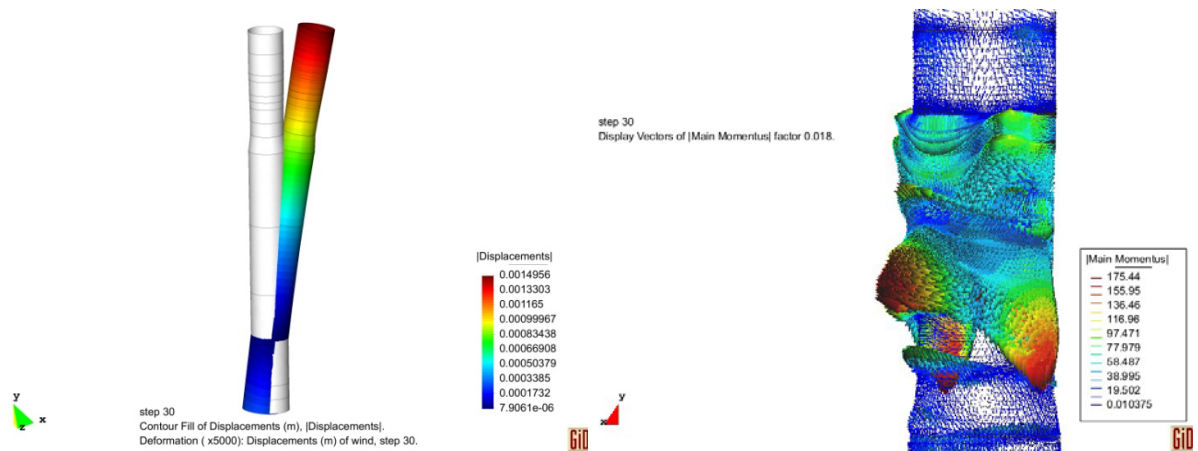
- Desarrollo de una interfaz de usuario para definición paramétrica del modelo CAE del aerogenerador. Esta interfaz de usuario, permite generar un modelo completo listo para el análisis en tres sencillos pasos:
  1. Selección del tipo de análisis: Se seleccionan las características básicas del análisis (análisis modal, dinámico, estático, tipos de cargas, etc.) y la tipología de aerogenerador.
  2. Definición geométrica: Se definen todas las componentes de una geometría a partir de un conjunto de secciones o elementos genéricos, definidos por sus parámetros geométricos básicos (ver Figura 14). A partir de ellos, el sistema genera automáticamente la geometría del modelo, mediante operaciones CAD básicas (copia, extrusión, intersección, etc.).
  3. Definición de cargas: La definición de propiedades y cargas del modelo se vincula automáticamente a los componentes geométricos definidos.

Toda la información del modelo paramétrico queda almacenada en una base de datos XML que puede ser recuperada para usos posteriores.

- Integración en un mismo entorno de todas las herramientas necesarias (aeroelasticidad de palas y comportamiento en la mar).

En el mismo entorno de cálculo se disponen de herramientas de cálculo aeroelástico de las palas (basada en Fast/Aerodyn) y de comportamiento en la mar. Las solicitaciones resultantes de estos cálculos pueden ser utilizadas directamente para el cálculo estructural

- Desarrollo de una herramienta de generación automática de informes, según los requisitos de Iberdrola Ingeniería y Construcción, basados en el programa Lognoter.
- Implementación de utilidades de verificación quasi-automática, basada en los códigos y normativa más comunes.



**Figura 15. Resultados del análisis FEM de la estructura de soporte de un aerogenerador marino pilotado**

Este proyecto está actualmente en una fase avanzada de desarrollo, estando plenamente funcional el sistema de generación paramétrica de modelos.

## Conclusiones

En este artículo se han presentado los trabajos realizados para desarrollar y adaptar diferentes programas de cálculo para cubrir las nuevas necesidades planteadas en el diseño y verificación de instalaciones de captación de energía marina.

Los satisfactorios resultados obtenidos en la aplicación de esos programas de cálculo en diferentes casos prácticos, demuestran que se han conseguido los objetivos planteados en su desarrollo.

## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a las empresas Anortec, Hidroflot, Iberdrola Ingeniería y Construcción y Pipo Systems por su imprescindible contribución a este trabajo. Asimismo, se quiere agradecer al Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC su ayuda en la caracterización del oleaje para los estudios del dispositivo OWC.

Finalmente, nuestro agradecimiento a D. Miquel Solé y D. Kaya Yaykiran por su trabajo en el desarrollo de las herramientas Lognoterforms (la interfaz gráfica para los programas FAST/Aerodyn y la herramienta de cálculo de comportamiento en la mar basada en la ecuación de Morison, respectivamente).

## Referencias

- [1] I. Losada, El mar como fuente de energía, Ingeniería y Territorio. Volumen 90: Energía III. 2010.
- [2] Delivering Offshore Wind Power in Europe. European Wind Energy Association. Disponible para la descarga en <http://www.ewea.org>.

- 
- [3] M. S. Turnbulla, A. G. L. Borthwick, , R. Eatock Taylor, Wave–structure interaction using coupled structured–unstructured finite element meshes. *Applied Ocean Research*. Volume 25: 2, Pages 63-77, April 2003.
- [4] C.Z. Wang, and G.X. Wu, Analysis of second-order resonance in wave interactions with floating bodies through a finite-element method. *Ocean Engineering*. Volume 35: 8-9, pages 717-726, June 2008.
- [5] R. Aubry, F. Mut, R. Löhner and J. R. Cebal, Deflated Preconditioned Conjugate Gradient Solvers for the Pressure-Poisson Equation. *J. Comp. Phys.* 227, 24, 10196-10208 (2008).
- [6] Tdyn: The FEM multi-physics solver, ver <http://www.compassis.com>.
- [7] Ramseries: Advanced FEM structural solver integrated with Tdyn, ver <http://www.compassis.com>.
- [8] FAST / Aerodyn. Información disponible en <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>.
- [9] I. Galparsoro, P. Liria, I. Legorburu, Pablo Ruiz-Minguela, G. Pérez, J. Marqués, Y. Torre-Enciso y M. González. 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, Tecnalia* (2010).