

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

**UN MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS  
PARA ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DE  
ESTRUCTURAS NAVALES**

Autor: Julio García Espinosa  
Director: Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra  
Codirector: Honorio Sierra Cano



## Capítulo 6

# Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

En la introducción de esta tesis se planteaba como meta general el desarrollo de un sistema para ayuda al diseño hidrodinámico de buques. Se pretendía poner a disposición del arquitecto naval un sistema que permitiese mejorar los procedimientos actuales de diseño hidrodinámico de barcos, configurando una suerte de *canal de experiencias virtual*, al alcance de su mano, en la mesa de diseño. A continuación, discutiremos en qué medida se ha cumplido este ambicioso objetivo, y las posibilidades de resolución a medio plazo de las dificultades aún planteadas. Por otra parte, el trabajo desarrollado ha abierto nuevas vías de interés, cuya exploración planteará las futuras líneas de investigación en este ámbito.

A lo largo del presente trabajo se ha presentado una metodología basada en el método de los elementos finitos para el análisis de problemas de flujo incompresible en fluidodinámica naval. Esta metodología, original de este trabajo, se basa en la obtención de unas nuevas ecuaciones diferenciales, basadas en criterios discretos, alternativas a las tradicionales ecuaciones de Navier Stokes. El procedimiento de obtención de estas ecuaciones diferenciales se denomina *Cálculo Finitesimal*. Las propiedades de las nuevas ecuaciones, permiten resolver el problema mediante el método de los elementos finitos, obteniendo soluciones estables.

Adicionalmente, se extendieron los procedimientos desarrollados para el análisis de problemas en los que el fenómeno de la turbulencia es importante. De esta manera, se aplicaron los criterios mencionados con anterioridad para derivar las ecuaciones estabilizadas de Reynolds. Junto a ellas se presentaron diferentes modelos básicos de turbulencia, dejando la aplicación de modelos más complejos para una futura labor de investigación.

Sin embargo, el punto más novedoso del presente trabajo es la aplicación del método de análisis de flujo incompresible mencionado a problemas navales. Esto requiere de la inclusión de una condición de superficie libre, cuya complejidad ha quedado patente en estas páginas. Esta complejidad ha dejado, necesariamente, problemas abiertos, como el desarrollo de una condición de contorno libre para el problema con superficie libre. Aunque se han investigado diferentes alternativas como el uso de elementos infinitos [Bet92] o el desarrollo de condiciones absorbentes discretas [D'E97], no ha sido posible el desarrollo de una metodología general adecuada.

El método de resolución del problema de mecánica de fluidos, con una condición de contorno de superficie libre, es original de esta tesis, introduciendo el planteamiento del *Cálculo Finitesimal* como una alternativa general para la resolución de problemas, en diversos campos de la mecánica de medios continuos. Esta nueva condición de superficie libre, aporta nuevas posibilidades a los métodos de análisis *CFD* de buques. Entre ellas cabe destacar su validez a altos números de Froude, frente a los métodos tradicionales, basados en la teoría de buques lentos.

Por último, se ha presentado un procedimiento que permite la adaptación de la malla de elementos discretos, base para la resolución del problema, a la variación de forma del dominio de análisis, debida a la nueva posición de la superficie libre, o de los cuerpos analizados en cada problema particular. Este método, basado en técnicas presentadas en [CBO99], ha sido modificada, para hacerla adecuada a los problemas aquí planteados. Esta metodología, unida a una descripción arbitraria (*ALE*) de las ecuaciones, permite resolver el problema de interacción fluido estructura que se plantea.

El desarrollo del procedimiento de resolución de las ecuaciones de Navier Stokes, junto a la posibilidad de adaptación iterativa de la malla de elementos finitos, es también original de esta tesis y abre un importante campo en el mundo naval a los métodos, que como la integración por elementos finitos, necesitan una discretización volumétrica.

El sistema resultante, se ha probado adecuado para el diseño hidrodinámico óptimo de diferentes artefactos navales, presentándose en este trabajo, diferentes aplicaciones prácticas. Pero, adicionalmente, es posible su uso para el análisis de una gran variedad de problemas dentro y fuera del ámbito naval, como ha quedado patente en varios ejemplos aquí incluidos. Esta flexibilidad amplía, sin duda, las posibles futuras líneas de trabajo. Entre ellas, cabe destacar el complejo problema de interacción fluido estructura que el análisis de velas conlleva. Esta línea, inaugurada recientemente, ha comenzado a dar resultados de interés industrial, algunos de los cuales se han recogido en este trabajo.

Por otra parte, incluíamos en la introducción, diversas especificaciones

que fueron recogidas tras una consulta a posibles usuarios finales del sistema, entre los que se encontraban oficinas de diseño, universidades, canales de experiencias y astilleros. A continuación discutiremos el trabajo desarrollado para cumplir con las mencionadas especificaciones.

- *El código resultante del proyecto debe poder utilizarse en ordenadores personales tipo PC y redes de PCs.* Este punto limita principalmente los requisitos de memoria de la aplicación. En este sentido, ha sido una preocupación constante el disminuir al mínimo el uso de memoria. Con este objetivo, se eligieron los tetraedros lineales como elementos óptimos para la discretización de la malla, que permiten el análisis de problemas de hasta 2.500.000 de elementos (en torno a 750.000 nodos) en un PC con 1Gb. de memoria RAM. Por otra parte, es muy destacable la elección de un esquema semi implícito para la integración temporal de las ecuaciones de Navier Stokes, lo que permite reducir de manera muy apreciable, los requisitos de memoria del sistema, y aun más, con el uso de métodos preconditionados e iterativos de resolución de sistemas de ecuaciones, aplicados a matrices esparcidas (en inglés *sparse matrixes*) con almacenamiento óptimo. Además, la posibilidad de ser operado en redes de PCs obligó a hacer un estudio de las herramientas disponibles para la ejecución en paralelo sobre redes. En este sentido se desarrollaron rutinas apoyadas en las librerías PVM (*Parallel Virtual Machine*) [Gro] y MPI (*Message Passing Interface*) [GL96] que permiten ampliar las capacidades de la metodología, elevando, en muchos casos, varias veces la velocidad de cálculo y los límites de memoria del sistema, mediante técnicas de descomposición de dominios, basadas en la librería METIS-PARMETIS [GK98]. También se exploraron las posibilidades de la librería denominada PETSc (*Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation*) [BGCS] [BGCS98], que incluye una implementación paralela de diferentes métodos de resolución de sistemas lineales y no lineales. Sin embargo, este trabajo, iniciado en la presente tesis, no se considera, ni mucho menos, terminado, pero abre una línea llena de posibilidades. En este sentido, cabe añadir, que un importante límite encontrado para el análisis de grandes problemas, se centra en el pre y postproceso de los mismos, cuya optimización, en el sentido aquí planteado, debe tenerse en cuenta.
- *El tiempo de cálculo para aplicaciones típicas debe situarse por debajo de las 12h. (una noche) por análisis.* En este sentido, la elección del algoritmo de Pasos Fraccionados semi implícito, debe considerarse adecuada. Este algoritmo ha demostrado ser considerablemente más

rápido para los análisis realizados, que otras metodologías probadas. Por otra parte, se ha llevado a cabo la optimización de la velocidad del código numérico, basada en las orientaciones para programadores en procesadores *INTEL Pentium*, disponibles en <http://www.intel.com>.

- *El código resultante del proyecto debe correr sobre sistema operativo WINDOWS de Microsoft. Además debe existir la posibilidad de poder ser ejecutado en otras plataformas y sistemas operativos (principalmente UNIX y LINUX, junto con el ya mencionado WINDOWS). El sistema desarrollado, escrito por completo en C++ estándar, ha sido utilizado bajo los sistemas operativos mencionados. Como beneficio adicional, cabe señalar que la programación orientada a objetos, base del lenguaje C++, otorga una gran flexibilidad al sistema resultante, permitiendo el análisis conjunto de diversos cuerpos (varios buques por ejemplo) con diferentes características y condiciones de contorno.*
- Respecto a los *Resultados de interés*, cabe señalar que la mayoría de ellos son salidas naturales del sistema. Sin embargo, el análisis del problema en olas, aunque ha sido planteado en este trabajo, aún requiere un intenso proceso de prueba y validación, antes de concluir su validez. En cualquier caso, los resultados preliminares, ofrecen grandes esperanzas en este aspecto.
- Otros aspectos como la *robustez y fiabilidad* del código han sido, en todo momento, detalles cuidados especialmente. De todas formas, sólo un extenso proceso de prueba, por parte de usuarios finales<sup>1</sup>, permite evaluar estos aspectos.

---

<sup>1</sup>Que sólo ha sido llevado a cabo parcialmente.