



LA SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN BUQUES DE LA ARMADA ESPAÑOLA

José A. LÓPEZ MORENO
Ingeniero superior de Telecomunicaciones

Fernando OBELLEIRO
Catedrático de Telecomunicaciones
de la Universidad de Vigo



(Ing.) (RE)



A simulación electromagnética en España goza de una salud envidiable. Disponemos de un equipo de expertos formado por personal de universidades, Navantia y la Armada, con los conocimientos, experiencia y medios, tanto *hardware* como *software*, que nos sitúan en una posición de liderazgo a nivel internacional, lo que sin duda redundará en la calidad de los diseños y a la postre en la capacidad operativa de nuestros buques.

La simulación del comportamiento electromagnético de un buque es un tema de gran interés que se ha convertido en imprescindible en las primeras etapas del diseño de nuevas unidades. Problemas tales como el diseño y



Buque *Cantabria* con una representación parcial de corrientes inducidas sobre su superficie obtenida con el código de simulación electromagnética M3.

emplazamiento de antenas, la evaluación y control de la sección radar (SER/RCS) o la realización de estudios de compatibilidad electromagnética (EMC) e interferencias (EMI) entre los diferentes sistemas instalados a bordo, así como los análisis de niveles de radiación peligrosos (*radiation hazards*, RADHAZ) para personal (HERP), armamento (HERO) y combustibles (HERF), son aspectos cruciales a tener en cuenta en las etapas iniciales de diseño, permitiendo de esta forma verificar el cumplimiento de los requisitos aplicables y minimizando los problemas asociados a correcciones posteriores al proceso de fabricación. Para abordar estas tareas resulta fundamental disponer de herramientas rigurosas y contrastadas de simulación electromagnética que, partiendo del modelo virtual (CAD) de un buque, permitan predecir su comportamiento electromagnético en todos los aspectos previamente mencionados.

Durante las dos últimas décadas, se ha podido constatar un drástico cambio de rumbo en el ámbito de la simulación electromagnética, también denominado electromagnetismo computacional (CEM); dicho cambio ha venido impulsado por dos motores: los avances científicos y las mejoras en capacidad de computación.

La utilización de métodos rigurosos basados en la resolución de ecuaciones integrales obtenidas a partir de las Ecuaciones de Maxwell (métodos de onda completa o *full-wave*) ha ido creciendo progresivamente; estos tienen un coste computacional muy elevado, pero los avances algorítmicos y de computación han permitido extender su rango de aplicación a frecuencias

cada vez más altas y a problemas más complejos y próximos a la realidad. De esta forma, los métodos *full-wave* han ido desplazando progresivamente a los asintóticos que se utilizaban previamente —de alta frecuencia, basados en aproximaciones asintóticas, como la Óptica Geométrica (GO), Óptica Física (PO), Teoría Geométrica de la Difracción (PTD), etc.—, cuya sencillez conlleva imprecisiones significativas, siendo por tanto poco fiables para validar diseños o tomar decisiones que a la postre condicionen la operatividad de un buque.

Aparte del giro en CEM hacia métodos *full-wave*, con el paso de los años también se han constatado cambios importantes en la fisonomía de la comunidad de usuarios de electromagnetismo computacional. En un principio, los programas de simulación electromagnética estaban restringidos a un número muy reducido de grupos de investigación, principalmente ligados a las universidades, mientras que en la actualidad existen docenas de herramientas comerciales disponibles para tal fin. La mayoría de ellas pertenecen a empresas que nacen como *spin-offs* de grupos de investigación universitarios y que en la actualidad se han convertido, en algunos casos, en grandes corporaciones. De este modo, se puede decir que existen actualmente dos tipos de usuarios en el ámbito del CEM: por un lado, están los códigos científicos, típicamente en el seno de grupos de investigación de universidades, que están en constante evolución/renovación, incorporando y adaptándose a los últimos avances científicos y tecnológicos, lo que los hace cada día más eficientes y precisos, adecuando aún más sus capacidades a las necesidades reales de la industria; y por otra parte están los programas comerciales, de evolución mucho más lenta, cuyo objetivo no es producir ciencia, sino, lógicamente, satisfacer las expectativas económicas de las empresas responsables de su comercialización.

Además, simultáneamente a los avances algorítmicos, los progresos en tecnología e ingeniería han dado lugar a un aumento acelerado de la complejidad de las nuevas aplicaciones con interés práctico en la industria. En el caso particular de los problemas de EMC/EMI en el ámbito militar, estos avances han dado lugar a un incremento muy importante del número y complejidad de los sistemas radio y sensores electromagnéticos instalados a bordo de estructuras portantes como buques o aviones. Estos sistemas constan de transmisores de elevada potencia y receptores de alta sensibilidad, tanto de banda estrecha como de ancha, confinados en un espacio extremadamente limitado, y deben operar concurrentemente utilizando las mismas bandas radio o bandas adyacentes. Todo ello da lugar a problemas electromagnéticos multiescala de elevada complejidad por dos motivos fundamentales:

- La presencia simultánea de grandes superficies conductoras (como mamparos) con detalles de tamaño eléctrico muy reducido, típicamente localizados en las inmediaciones del punto de alimentación de las antenas.

- Existencia de distintos tipos de materiales que pueden en ocasiones ser extremadamente complejos (conductores, dieléctricos, absorbentes, selectivos en frecuencia o incluso metamateriales).

Los problemas que aparecen en el estudio electromagnético riguroso de un buque real son inherentemente multiescala, y por eso su resolución exige el uso de diferentes formulaciones adecuadas a la física particular de cada caso. A día de hoy esto sigue suponiendo un desafío muy importante, incluso para los códigos de simulación más avanzados. Huelga decir que tales obstáculos no son resolubles por los programas de simulación comerciales actuales, que están más bien enfocados a un uso sencillo en dificultades de menor complejidad y de pequeño tamaño en términos de longitudes de onda.

Los problemas multiescala son en cambio la motivación para unos pocos grupos de investigación pertenecientes a la parte académica/científica de la comunidad CEM. Buena muestra de ello son los avances más recientes y novedosos en electromagnetismo computacional:

- El *Multilevel Fast Multipole Algorithm* (MLFMA) (1), desarrollado en la Universidad de Illinois por el profesor Weng Cho Chew. El MLFMA ha permitido incrementar en más de seis órdenes de magnitud el tamaño de los problemas abordables con métodos exactos *full-wave*, llegándose en el año 2001 a analizar un problema con más de 10 millones de incógnitas (onda completa, matriz llena) (2), un auténtico hito en CEM.
- El siguiente objetivo en este ámbito se alcanzó en 2010 con el desarrollo del algoritmo *MLFMA-Fast Fourier Transform* (MLFMA-FFT) por parte de un grupo español formado por profesores de las universidades de Vigo y Extremadura (3), que ha supuesto un nuevo paradigma en la aplicación de los grandes avances en computación de altas prestaciones (HPC) a los algoritmos acelerados en CEM, llegando a niveles de escalabilidad sin precedentes en arquitecturas de supercomputación masivamente paralelas, tal como destaca Weng Cho Chew en una reciente revisión sobre el presente, pasado y futuro de los métodos

(1) SONG, J. M.; LU, C. C.; CHEW, W. C.: «Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, n.º 10, pp. 1.488-1.493, octubre 1997.

(2) VELAMPARAMBIL, S.; CHEW, W. C.; SONG, J. M.: «10 million unknowns: Is it that big?», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, n.º 3, pp. 43-58, abril 2003.

(3) TABOADA, J. M.; ARAÚJO, M.; BÉRTOLO, J. M.; LANDESA, L.; OBELLEIRO, F.; RODRÍGUEZ, J. L.: «MLFMA-FFT parallel algorithm for the solution of large-scale problems in electromagnetic (invited paper)», *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 105, pp. 15-30, 2010.

- en CEM (4), que han permitido elevar el techo de la resolución exacta de problemas EM a otros con más de 1.000 millones de incógnitas (5), dos órdenes de magnitud por encima del estado del arte anterior.
- También merecen especial mención los recientes avances realizados por el grupo del profesor Jin-Fa Lee de Ohio State University, responsable del *Domain Decomposition Method* (DDM) (6), que permite mejorar extraordinariamente, y en muchas ocasiones directamente desbloquear, la convergencia en problemas multiescala. Esto se logra mediante la descomposición inteligente en subproblemas que pueden ser resueltos de forma independiente (por lo tanto con *solvers* optimizados a la física concreta de cada uno) y que luego son ensamblados mediante condiciones de contorno en transmisión para proporcionar la solución exacta del sistema completo, en una estrategia que ha venido a denominarse *divide and conquer* (divide y vencerás) (7). La resolución de problemas multiescala como los que aparecen en un estudio EMC/EMI de un buque, con un grado de precisión mínimo exigible, resultaría completamente inviable sin la aplicación cuidadosa y adaptada al problema del DDM.

La integración de los anteriores avances en los programas comerciales no es trivial, exige mucho tiempo de desarrollo y verificación, además de la necesidad de implementar complejas interfaces gráficas que incorporen las diferentes casuísticas para que el código sea utilizable por parte de usuarios no expertos. Así, aunque es cierto que algunos códigos comerciales están incorporando versiones más o menos simplificadas de MLFMA, la aplicación del MLFMA-FFT con recursos de computación arbitrariamente masivos, o del DDM, con capacidad real de tratar adecuadamente problemas multiescala y/o multifísica, a día de hoy queda restringida a unos pocos grupos de investigación que dominan el estado del arte actual en CEM.

Existe otro aspecto muy importante a tener en cuenta a la hora de aplicar con éxito las herramientas de simulación a la resolución de problemas

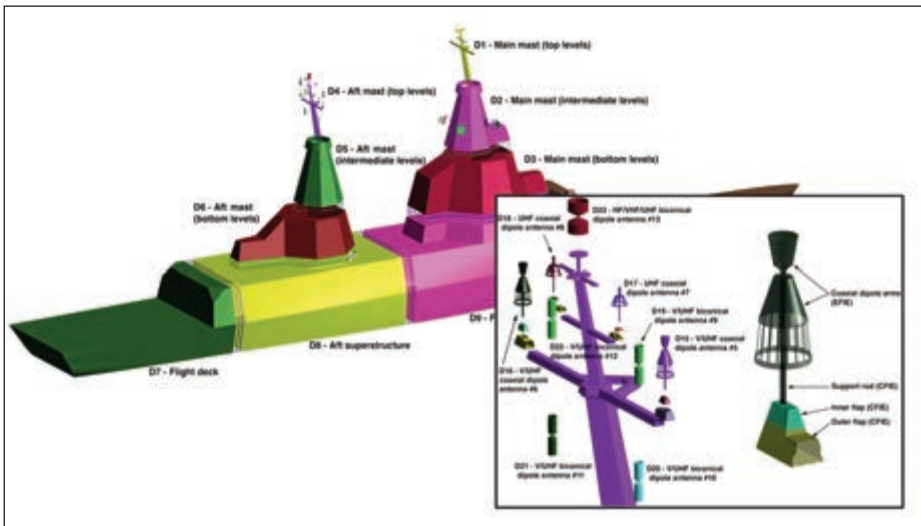
(4) CHEW, W. C.; JIANG, L. J.: «Overview of Large-Scale Computing: The Past, the Present and the Future», *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, N.º 2, pp. 227-241, febrero 2013.

(5) TABOADA, J. M.; ARAÚJO, M.; OBELLEIRO, F.; RODRÍGUEZ, J. L.; LANDESA, L.: «MLFMA-FFT parallel algorithm for the solution of extremely large problems in electromagnetics (invited paper)», *Proceedings of the IEEE, Special issue on Large Scale Electromagnetic Computation for Modeling and Applications*, vol. 101, n.º 2, pp. 350-363, febrero 2013.

(6) PENG, Z.; WANG, X.-C.; LEE, J.-F.: «Integral equation based domain decomposition method for solving electromagnetic wave scattering from non-penetrable objects», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, n.º 9, pp. 3.328–3.338, septiembre 2011.

(7) PENG, Z.; LIM, K. H.; LEE, J.-F.: «Non-conformal domain decomposition methods for solving large multi-scale electromagnetic scattering problems». *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, n.º 2, pp. 298-319, febrero 2013.

complejos. Aún en conflictos pequeños de complejidad media, el usuario debe ser experto y tener conocimiento de los algoritmos subyacentes, sus limitaciones y puntos fuertes. En un estudio llevado a cabo recientemente por Guy A. E. Vandenbosch, de la Katholieke Universiteit Leuven (8), en el que se invitó a las empresas responsables de los programas comerciales con mayor difusión —como CST (9), IDS (10), FEKO (11) o HFSS (12)— a resolver un problema sencillo consistente en una única antena, los resultados fueron dispares cuando se compararon con las medidas, presentando en varios casos niveles de error importantes. En ocasiones, estos son achacables al propio método, pero en otros casos son debidos a la falta de experiencia y conocimientos del usuario. Si lo anterior sucede para un problema sencillo de una antena aislada, no resulta difícil imaginar la situación en los casos más complejos de EMC/EMI,



Descomposición en dominios (DDM) para la simulación EM *full-wave* de antenas realistas a bordo de un buque ficticio. El tamaño del mallado (discretización) del modelo EM oscila entre $1/10$ y $1/1700$ a 1 GHz, revelando una fuerte componente multiscala. El elevado tamaño (*large-scale*) del problema resultante, con 56 millones de incógnitas (matriz densa), junto con la fuerte componente multiscala, imposibilitan su resolución precisa mediante técnicas convencionales.

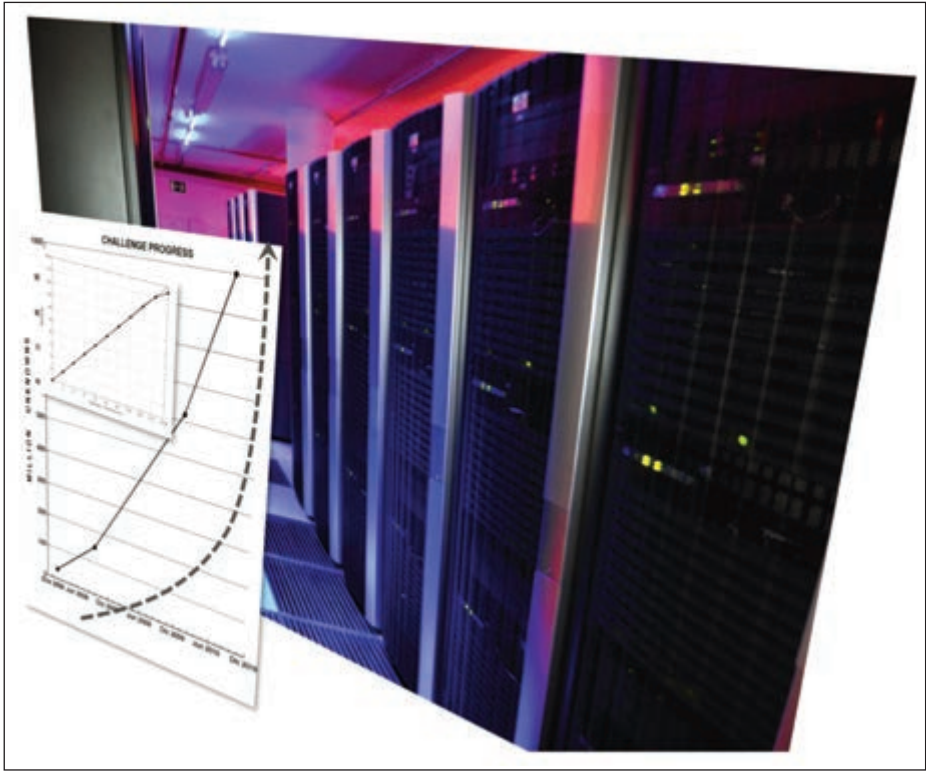
(8) VANDENBOSCH, G. A. E.: «The future of Computational Electromagnetics: Science or Product», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, n.º 3, pp. 264-269, junio 2011.

(9) www.cst.com.

(10) www.idscopy.com.

(11) www.feko.info.

(12) www.ansoft.com.



Clúster de supercomputación en la Universidad de Vigo con gráfica de evolución del número de incógnitas de los hitos alcanzados en electromagnetismo computacional.

y autónomas. En el primer caso, es necesario realizar fuertes inversiones periódicas en la adquisición de nuevos servidores y nodos de computación, lo cual a su vez implica disponer de un equipo de técnicos de sistemas para mantener actualizados tanto el sistema operativo como las librerías matemáticas optimizadas para el mismo (*math kernel libraries*). En el caso de las ICTS, obviando la dificultad de acceso a las mismas, la tarea de adaptar y compilar los códigos para la arquitectura de cada supercomputador es un reto en sí mismo, precisando de la colaboración estrecha entre los técnicos del centro que gestiona la ICTS y los propios desarrolladores del *software*.

En base a todo lo anterior, podemos afirmar que la utilización de un *software* comercial, supuesto un uso adecuado por parte de ingenieros expertos, puede resultar de utilidad en la industria, complementando el *know-how* adquirido y facilitando la resolución de problemas sencillos sobre porciones de la superestructura con versiones considerablemente simplificadas de la

misma. No obstante, cuando de lo que se trata es de resolver de manera precisa un problema real (en toda su complejidad) con implicaciones en las decisiones de diseño, es imprescindible disponer de herramientas *software* y *hardware* de vanguardia, junto con un equipo multidisciplinar de expertos que garantice la definición precisa del problema numérico, la utilización óptima del *software* y la posterior interpretación correcta de los resultados obtenidos de la simulación, discerniendo la posible presencia de componentes espurios, problemas de convergencia, etc. Es de prever que los programas comerciales, aunque con mucho retraso (aproximadamente diez años), evolucionarán y tratarán de ir incorporando en el futuro versiones simplificadas de los avances actuales en electromagnetismo computacional; no obstante, resultará muy complejo, por no decir que imposible, automatizar o plasmar en una GUI (interfaz gráfica de usuario) todas las casuísticas, *know-how* y especificación de parámetros necesarios para una implementación rigurosa del DDM en un código de propósito general; siempre será imprescindible contar con un equipo humano de usuarios cualificados con conocimientos avanzados sobre los códigos para su utilización atendiendo a las características específicas de cada problema (definición de subdominios, mallados multiescala conformados, selección de condiciones de transmisión y parámetros de control, etc.), sin olvidar nunca la necesidad de disponer de recursos de supercomputación de última generación.

De manera ideal, un equipo de semejantes características debería contar con:

- Personal de la propia Armada con conocimientos y experiencia en la definición de los requisitos electromagnéticos del buque.
- Personal de la empresa responsable del diseño/construcción del buque con elevado conocimiento de todos los sistemas involucrados en los estudios.
- Personal de las universidades o centros de investigación con experiencia en electromagnetismo computacional avanzado y que hayan estado implicados en el desarrollo del código de simulación.
- Acceso a servidores de supercomputación de altas prestaciones con técnicos expertos en la instalación y el mantenimiento del *hardware* y *software* de los mismos.

Además, este equipo no puede entenderse como algo estático, sino que debe estar en permanente evolución, adaptándose constantemente a los nuevos avances en *hardware* y librerías matemáticas de computación e incorporando las últimas novedades científicas en el ámbito del electromagnetismo computacional.

La situación en la Armada española/Navantia

En lo que a nuestra Armada respecta, podemos decir que se encuentra en una posición privilegiada, ya que tiene a su disposición un equipo de primer nivel formado por expertos:

- Científicos/investigadores de las universidades de Vigo (UV) y Extremadura (UEx).
- Personal de Navantia (oficinas técnicas y Navantia Sistemas).
- Ingenieros de la propia Armada pertenecientes al Centro de Medidas Electromagnéticas de la Armada (CEMEDEM), a las Inspecciones de Construcciones (ICO) y al Ramo Técnico de Sistemas (RTSIST) de la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL).

A lo largo de los últimos años, y gracias a la participación ininterrumpida en distintos proyectos financiados por el Gobierno español y empresas tanto nacionales como extranjeras, este equipo (en adelante M3) ha podido ir creciendo, adquiriendo cada vez más experiencia, conocimientos, infraestructuras y herramientas necesarias para poder estar en una posición de liderazgo mundial a la hora de abordar retos de investigación y desarrollo (I + D) en el ámbito de la compatibilidad electromagnética (EMC, EMI, EMR), radar y guerra electrónica. Estos retos incluyen desde el diseño y la simulación de sistemas, pasando por su desarrollo y fabricación, y finalmente la caracterización experimental con medidas a bordo de buques de guerra de última generación. Hoy el M3 está en una posición privilegiada, sustentada sobre cuatro pilares:

- El potencial humano: un equipo de más de 40 personas entre catedráticos, profesores e investigadores de las dos universidades involucradas, personal de Navantia experto en los sistemas integrados en los buques, y de la Armada, ingenieros especializados en diseño del *topside* y realización de medidas electromagnéticas con las que se ha certificado la validez y exactitud de las simulaciones.
- La experiencia: el equipo M3 ha estado involucrado en el diseño de los nuevos buques construidos por Navantia para la Armada española (y para las de otros países) durante los últimos 20 años, además de haber realizado estudios similares en buques más antiguos en el seno de diversos programas de modernización; dos profesores de la Universidad de Vigo del equipo M3 son miembros nacionales del grupo de trabajo SET-251, *Ship Radar Signature Management Benefit to Ships*, del panel *Sensors and Electronics Technology* (SET) de la OTAN.
- Recursos de computación: tanto propios (un clúster de servidores de cálculo con disponibilidad de 10 TB de memoria RAM valorado en

más de medio millón de euros, infraestructura cuyo mantenimiento/renovación supone una inversión cercana a los 120.000 euros anuales) como externos con la disponibilidad y la capacidad de acceso a grandes infraestructuras de supercomputación disponibles en España en centros como el CESGA (Centro de Supercomputación de Galicia) y el CÉNITS (Centro Extremeño de Investigación, Innovación Tecnológica y Supercomputación), entre otros.

- Y fundamentalmente el código de análisis electromagnético, que se inició en 1996 con el desarrollo de un programa de simulación electromagnética denominado HEMCUVI, cofinanciado por Navantía, la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) y los Fondos FEDER. A partir de ese momento, UV/UEX desarrollaron códigos más avanzados, como el HEMCUVE, que actualmente se denomina M3, siendo hoy en día uno de los códigos de análisis electromagnético *full-wave* más potentes, rápidos y precisos del mundo, habiendo alcanzado una posición de prestigio y liderazgo a nivel mundial. HEMCUVE/M3 ha sido galardonado con premios científicos (13) (14) de relevancia en el ámbito internacional y ostenta el récord mundial en electromagnetismo computacional, alcanzado en agosto de 2010 al resolver en el CESGA un problema electromagnético real con más de mil millones de incógnitas (15) (16) (equivalente a calcular la RCS de una fragata tipo *F-100* en banda X). La precisión/validez de las simulaciones realizadas con el código M3 ha sido certificada por el CEMEDM mediante la realización de diversas campañas de medidas a bordo de diversos buques de la Armada.

Estos cuatro puntos convierten a M3 en uno de los pocos equipos con capacidad real para abordar un estudio de simulación electromagnética riguroso sobre un buque de guerra de nueva generación. No obstante, incidir en que para continuar siendo competitivo, un equipo de este tipo no puede acomodarse, debe estar en constante evolución, incrementando su capacidad día a día,

(13) Premio internacional PRACE Award 2009, otorgado por la Partnership for Advanced Computing in Europe, organismo de la Unión Europea que regula y financia el desarrollo de los supercomputadores más potentes de Europa (www.prace-project.eu/news/prace-award-2009-winner-announced).

(14) Intel Itanium Solutions Alliance Innovation Award 2009, en la categoría de «Computationally Intensive Applications», otorgado por la Itanium Solutions Alliance, formada por las empresas más importantes del sector de la computación, como Intel, HP, Microsoft, Novell o Red Hat (www.cesga.es/File/documentos/notas_2009/CESGA_Case_Study.pdf).

(15) TABOADA, J. M.; ARAÚJO, M.; BÉRTOLO, J. M.; LANDESA, L.; OBELLEIRO, F.; RODRÍGUEZ, J. L.: *op. cit.*

(16) TABOADA, J. M.; ARAÚJO, M.; OBELLEIRO, F.; RODRÍGUEZ, J. L.; LANDESA, L.: *op. cit.*

adaptándose a los nuevos avances en *hardware* de computación e incorporando las últimas novedades *software* con repercusión en el ámbito de CEM.

Conclusión

El problema de la simulación electromagnética «rigurosa» de un buque es muy complejo, de gran dificultad, pero afortunadamente en España disponemos de medios que nos permiten mirar al futuro con confianza y optimismo. Si actuamos bien, en la línea de lo que se ha venido trabajando en los últimos años, no cabe esperar más que mejoras en el *software* y en la calidad de los diseños, lo que redundará en un beneficio triple:

- Crecimiento científico para las universidades.
- Mejora en la calidad y capacidad operativa de los buques para la Armada.
- Mejora de procesos/productos y, consecuentemente, del potencial de exportación para Navantia.

En definitiva, beneficio para España, continuando por el camino que ya llevamos andando desde hace años.



GLOSARIO:

CAD: *Computer-Aided Design.*
 CEM: *Computational Electromagnetics.*
 CEMEDEM: Centro de Medidas Electromagnéticas de la Armada.
 CÉNITS: Centro Extremeño de Investigación, Innovación Tecnológica y Supercomputación.
 CESGA: Centro de Supercomputación de Galicia.
 CICYT: Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.
 DDM: *Domain Decomposition Methods.*
 EMC: *Electromagnetic Compatibility.*
 EMI: *Electromagnetic Interference.*
 EMR: *Electromagnetic Radiation.*
 FEDER: Fondo Europeo de Desarrollo Regional.
 FFT: *Fast Fourier Transform.*
 GO: *Geometrical Optics.*
 GUI: *Graphical User Interface.*
 HERF: *Hazards of Electromagnetic Radiation to Fuel.*
 HERO: *Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance.*
 HERP: *Hazards of Electromagnetic Radiation to Personnel.*
 HPC: *High Performance Computing.*
 ICO: Ingeniería de Construcción y Obras.
 ICTS: Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares.
 I + D: Investigación y Desarrollo.
 JAL: Jefatura de Apoyo Logístico.
 MLFMA: *Multilevel Fast Multipole Algorithm.*
 PO: *Physical Optics.*
 PTD: *Physical Theory of Diffraction.*
 RADHAZ: *Radiation Hazard.*
 RAM: *Random Access Memory.*
 RCS: *Radar Cross Section.*
 RTSIST: Ramo Técnico de Sistemas.
 SER: Sección Equivalente Radar.
 SET: *Sensors and Electronics Technology.*
 TB: *Terabyte.*
 UEx: Universidad de Extremadura.
 UV: Universidad de Vigo.

Visita a la fragata *Méndez Núñez* del comandante del Mando Supremo Aliado de Transformación (SACT). (Foto: *Flickr* Armada).

