BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA DE LA ARMADA

Noviembre 2011
Número 1

A NUESTROS COLABORADORES

El acuse de recibo de los artículos enviados por nuestros estimados colaboradores no supone, por parte del BOLETÍN, compromiso de publicación. Normalmente no se devolverán los originales ni se sostendrá correspondencia sobre ellos hasta transcurridos seis meses de la fecha de su recibo, en cuyo momento el colaborador que los desee podrá reclamar la devolución.

Los originales habrán de ser inéditos, escritos en *Word* y se entregarán por vía informática (*Internet*, *Lotus Notes*) o grabados en CD. La extensión del texto no sobrepasarán las seis páginas y se presentará escrito a un espacio. La Redacción se reserva la aplicación de las correcciones ortográficas o de estilo que considere necesarias.

Las siglas y acrónimos se aclararán con su significado completo la primera vez que se utilicen (excepto las muy conocidas: ONU, OTAN, etc.) y deben corresponder a su versión en español cuando la haya (OTAN en lugar de NATO, Marina de los Estados Unidos en vez de *US Navy*, etcétera).

Las fotografías, gráficos e ilustraciones se acompañarán con un pie o título y tendrán una resolución de 300 dpi como mínimo, preferiblemente en formato JPG. Si no son del propio autor, se citará su procedencia y el autor realizará los trámites precisos para que se autorice su publicación. El BOLETÍN no se responsabilizará del incumplimiento de este requisito. Las ilustraciones enviadas en papel pasarán a formar parte del archivo del BOLETÍN y sólo se devolverán en casos excepcionales.

Se citará la bibliografía consultada.

Al final del artículo se incluirá el nombre y apellidos del autor, su categoría o profesión, el NIF, la dirección completa, con distrito postal, el número de teléfono y su dirección de correo electrónico.

ÍNDICE

EDITORIAL Pág. 1

VIEJA FOTO Pág. 2

EL PROBLEMA DE LA BALÍSTICA INTERIOR EN EL CAÑÓN ELECTROMAGNÉTICO Pág. 3
CN DR Pedro R. Saura Iniesta

CRITERIOS DE ESTABILIDAD EN AVERÍAS Pág. 5
CF DR José María Riola Rodríguez

MATERIALES SUPERCONDUCTORES FUNDAMENTO Pág. 9
CF Antonio González García

ALGUNAS EXPRESIONES QUE GENERAN NÚMEROS IRRACIONALES Pág. 13
CF Agustín E. González Morales

MÁQUINAS TERMO-ACÚSTICAS. UN MODELO LINEAL Pág. 16
CC Pedro Antonio Casas Alcaide

ARMA OFENSIVA IDEAL: ARMA INFERNAL Pág. 20
CN (R) Pedro Miranda Cuesta

SUDOKU para ingenieros Pág. 22

HUMOR Pág. 22

ANÉCDOTAS Pág. 23

SCOMBA FASE II. INCREMENTANDO LA FUNCIONALIDAD DE SCOMBA Pág.24
CF Antonio González García

¿VOLFRAMIO, WOLFRAMIO O TUNGSTENO? Pág. 28
DR Manuel Laguna Iglesias

VISITA AL CENTRO DE PUERTOS Y COSTAS Pág.31
TN Miguel Ángel Mateos Cuevas

INGENIEROS EN LA HISTORIA Pág. 33
JOSÉ ANTONIO
DE GAZTAÑETA E ITURRIBALGAZA

EDITORIAL

El capitán de navío ingeniero
Comandante director de la ETSIAN
José Francisco Rubio Pagán

Navegando

Respetado lector, tiene en sus manos el número 1 del Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada (BTIA). Pero, aunque es el número 1, no es el primero, sino el segundo.

Si la editorial del número 0 se tituló «Zarpar», parece lógico que ahora ya estemos «navegando» con el rumbo claro. Y me complace decir que en la redacción del BTIA se han recibido no pocos correos electrónicos apoyando al Boletín y su línea de pensamiento. Pero, seamos humildes, no nos vanagloriemos con lo conseguido y afrontemos este reto que supone dar a luz un BTIA cada seis meses: este es, en principio, el propósito, sin descartar que podamos alumbrar uno cada trimestre. Todo depende de los colaboradores; por eso vuelvo a animar a los ingenieros de la Armada a participar, y no sólo a los ingenieros militares, a todos. Y tampoco hay que ser excluyentes ni endogámicos: si algún ingeniero de otros ejércitos quiere enviarnos un artículo que sintonice con lo que se espera que aparezca en el BTIA, con mucho gusto lo publicaremos.

Por otro lado, desde la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales (ETSIAN) se han hecho las gestiones encaminadas a que el BTIA aparezca en la página web de la Armada, en el mismo lugar donde se pueden consultar los «Boletines y Revistas de la Armada» (Revista General de Marina, Revista de Historia Naval, Boletín Informativo de Personal, Boletín de Infantería de Marina, Cuadernos de Pensamiento Naval, Folleto del Tercio de Armada y Folleto R.O.A.).

Para finalizar, sólo una idea: estamos en crisis, y ahora, en medio de esta gran borrasca, es cuando nuestra Armada necesita, más si cabe, del supuesto ingenio de sus ingenieros.

Víeja foto

Excmo. Sr. D. José González Hontoria

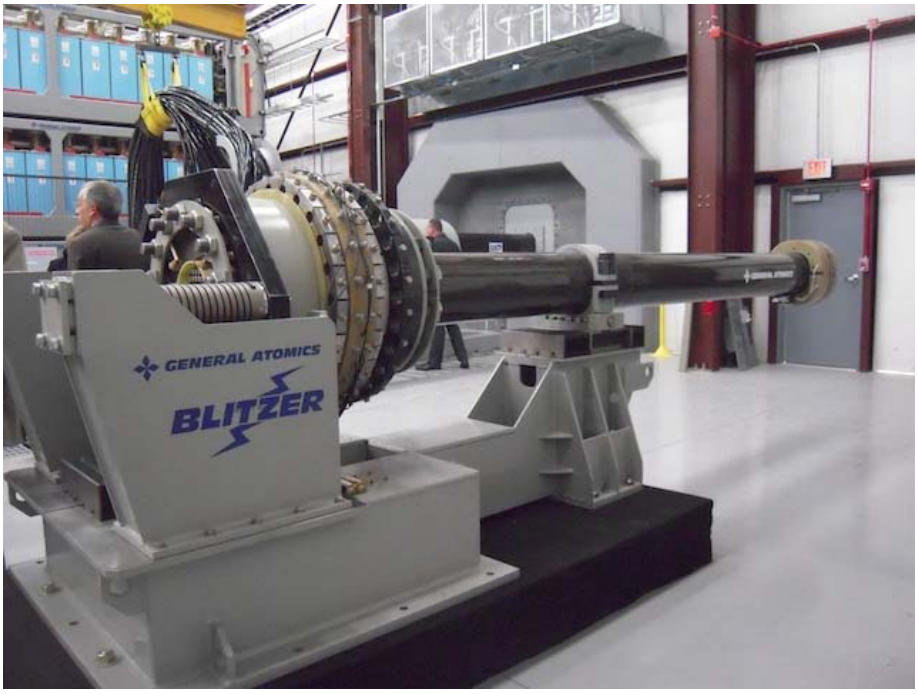
Mariscal de Campo de Infantería de Marina
y
Brigadier de Artillería de la Armada

Nació en Sanlúcar de Barrameda (Cádiz) el 21 de junio de 1840, falleció en Carabanchel (Madrid) en 1899. Efectuó varios estudios sobre los procedimientos de elaboración de pólvora y de fabricación de artillería. Proyectó diversos tipos de cañones, entre ellos el denominado *González Hontoria* y el *Trubia*, un modelo de 160 mm que en aquellos momentos fue considerado el más potente de Europa.

El problema de la balística interior en el cañón electromagnético

CN doctor ingeniero de armas navales
Pedro R. Saura Iniesta
Subdirector de Investigación y Doctorado de la ETSIAN

En la Revista General de Marina de julio de 2011 planteé la conveniencia, basándome en datos empíricos, de iniciar un programa de I+D+i para la obtención de un cañón electromagnético (EMRG) de aplicación naval. Es evidente que no se trata de una tarea fácil, pero tampoco imposible, que plantea diversos interrogantes y retos técnicos. Uno de ellos es el problema de la balística interior.

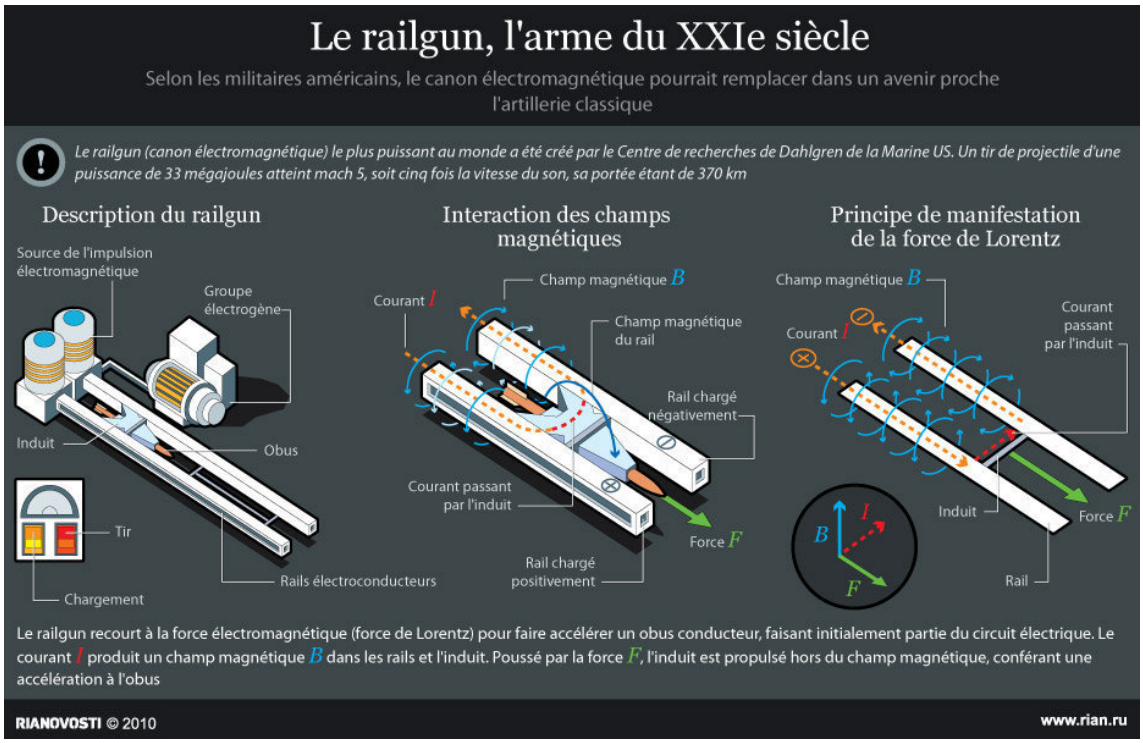


A la hora de diseñar un cañón es imprescindible afrontar unos cálculos complejos que permitan conocer la velocidad en boca del proyectil, parámetro básico para iniciar un programa de balística exterior y la consiguiente elaboración de las imprescindibles tablas de tiro que deben integrarse en el sistema de combate del buque. Esta velocidad, que tiene que ser reproducible y susceptible de modificación en función de las condiciones operativas en las que se vaya a utilizar el arma, depende fundamentalmente del impulso que se comunique al proyectil y de su rozamiento a lo largo del ánima (los raíles en el caso del EMRG).

No es un problema baladí: el impulso es una función de la energía eléctrica suministrada puntualmente para generar el campo magnético, por lo que el control debe ser muy preciso sin olvidar que posiblemente sea necesario realizar un número elevado de disparos. Es decir, se hace imprescindible un suministro de energía continuo, estable y disponible en milisegundos. Además, suponiendo resuelto el problema de la generación de dicha energía eléctrica, la dificultad estriba en su almacenamiento y disposición a discreción; lo que nos lleva a tener que emplear unos condensadores adecuados a nuestras necesidades. Es un

asunto de la máxima importancia puesto que en el EMRG el «fuego» no se provoca mediante un artificio explosivo, sino a través de un «interruptor eléctrico» que inicia la descarga de dichos condensadores.

En cuanto al rozamiento que se opone al avance del proyectil por los raíles, no olvidemos la tremenda aceleración que supone mover una masa de unos 15 Kg de 0 m/s a, pongamos, 2500 m/s en pocos milisegundos, provocando un calentamiento brutal de dichos raíles. ¿Qué material aguanta esta fricción sin degradarse? ¿Cuántos disparos es posible realizar con los mismos raíles? ¿Cuál debe ser la cadencia de «fuego»?



En definitiva, para estudiar la balística interior de un EMRG es necesario abordar el desarrollo de un algoritmo que relacione la energía eléctrica generada con el consiguiente campo magnético y la cantidad de movimiento comunicada al proyectil (el inducido), incorporando el cálculo del rozamiento en cada punto de los raíles.

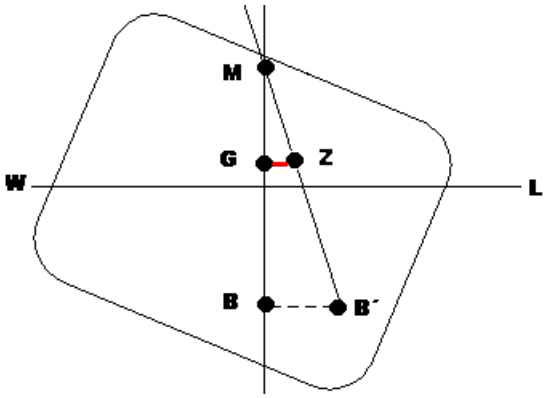
Para finalizar sólo señalaré otros dos aspectos que tampoco deben ignorarse: el comportamiento de la columna de aire situada justo delante de la ojiva del proyectil y en la zona inmediatamente detrás, en el culote. Ambos problemas exigen un estudio riguroso porque no olvidemos que el proyectil alcanza una velocidad supersónica ya *antes* de salir del «tubo» y que sigue volando en ese régimen hasta el impacto con el blanco.

Criterios de estabilidad en averías

CF ingeniero José María Riola Rodríguez
Doctor Ingeniero Naval

Las *Armadas* de todos los países procuran alcanzar un equilibrio entre la operatividad de sus buques y la protección de la tripulación ante un posible daño en el casco y la superestructura, garantizándose que todas las acciones sean acometidas con un aceptable nivel de seguridad. Pese a las diferencias, el nivel aceptable de seguridad para las *Armadas* está siendo equivalente, cada vez más, al de los buques construidos bajo legislación civil. Para profundizar en esta materia las *Armadas* están recurriendo a las *Sociedades de Clasificación* (SS. CC.), cuyos reglamentos para los buques mercantes están fijados por la *Organización Marítima Internacional* (OMI) y particularmente en la *Convención Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar* (SOLAS).

La estabilidad en averías es fundamental para la conservación de cualquier buque, ya que cuanto más tiempo permanezca a flote, más eficaz será la evacuación, y en su caso, las operaciones de búsqueda y rescate. Tanto la experiencia como los estudios realizados demuestran que lo más peligroso para los buques de carga rodada, y sus homólogos militares (buques anfibios y portaaeronaves), es el efecto de una acumulación de agua en su interior. Los cálculos han puesto de manifiesto que el francobordo residual del buque y la altura de las olas en una zona específica, influyen de forma muy significativa en la cantidad de agua que puede acumularse tras una avería por colisión o el impacto de un arma.



Cuando se inunda un compartimento se produce una pérdida de flotabilidad, acompañada de una variación de asiento y de una escora que modifican las alturas metacéntricas transversal y longitudinal, provocando una nueva flotación de equilibrio. Además el estado de la mar en el momento de la avería puede incrementar la entrada dinámica de agua por encima de esa flotación de equilibrio con la consiguiente pérdida de estabilidad.

Existen diferentes normativas de estabilidad después de averías cuyos criterios son los más utilizados en la actualidad tanto en el campo militar como en el civil. Las principales son la *Design Data Sheet* (DDS) estadounidense, el *Naval Ship Code* (NSC) promulgado por la OTAN, y dentro del convenio SOLAS, el *Acuerdo de Estocolmo*, en donde se considera el agua en cubierta.

SOLAS

De todas las convenciones internacionales sobre seguridad en la mar, la más importante es la SOLAS. Es una de las más antiguas, habiéndose adoptado su primera versión en Londres en 1914. En lo que nos concierne, el apartado fundamental es el *Capítulo II-1* que estipula que la división de los buques en compartimentos estancos ha de estar concebida de modo que, después de una supuesta avería en el casco, el barco permanezca a flote en equilibrio; y hace hincapié en las prescripciones relativas a la integridad de estanqueidad, la disposición del circuito de achique y el grado de compartimentación, medido por la dis-

tancia máxima permisible entre dos mamparos adyacentes, en función de la eslora y el servicio para el que esté destinado.

En 1994 la OMI creó un panel de expertos a raíz del siniestro del *MV Estonia* en el que perdieron la vida más de ochocientas cincuenta personas. El *MV Estonia*, al igual que el *MS Herald of Free Enterprise* siete años antes, se hundió debido a que se había acumulado tanta agua en las cubiertas de carga que resultó afectada su estabilidad. El panel propuso que a la exigencia de la estabilidad con uno o dos compartimentos inundados, debería añadírsele la de cierta cantidad de agua en las cubiertas en función de la altura significativa de la ola según la mar en la que navega y del francobordo residual después de la avería por colisión. Pero, según este criterio, el volumen de agua en las cubiertas se mantiene constante para el cálculo de la curva de brazos adrizantes GZ después de la avería (figura 1, izquierda).

Como esta hipótesis es muy onerosa para el cumplimiento de los requisitos de estabilidad, se aprobó el *Acuerdo de Estocolmo*, que mantiene constante la altura de agua sobre las cubiertas en el costado del garaje, con lo que el volumen disminuye a medida que el ángulo va cambiando (figura 1, derecha). El *Acuerdo de Estocolmo* es de obligado cumplimiento en las aguas de todos los países pertenecientes a la Unión Europea, desde Finisterre hacia el Norte.

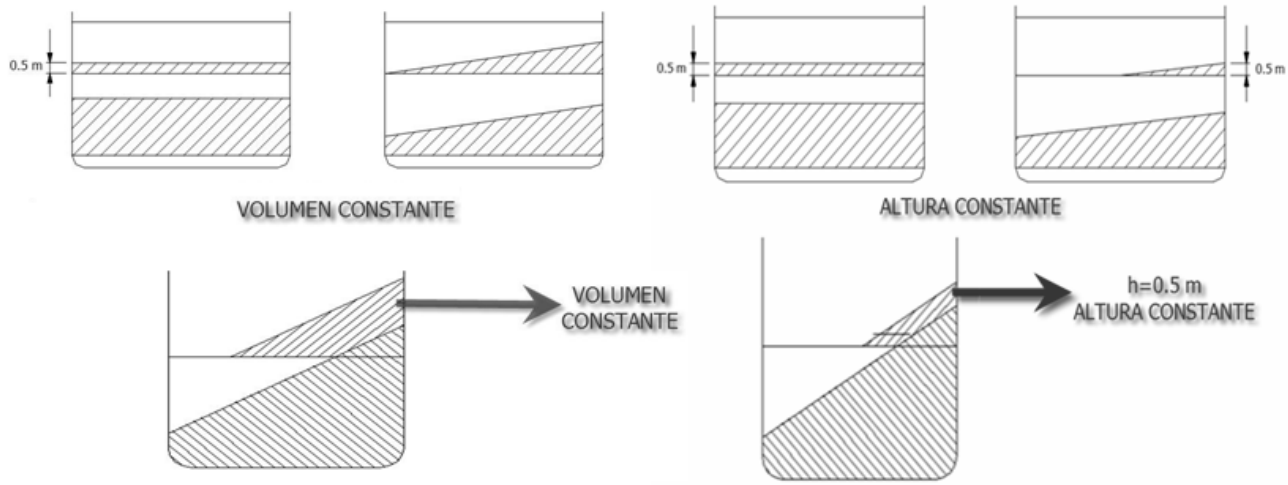


Figura 1. Métodos de volumen constante y de altura constante

Design Data Sheet (DDS)

En nuestra Armada, el criterio para evaluar la estabilidad después de averías se basa en la DDS 079-1 americana y se esquematiza en la figura 2. Una reducción del brazo adrizante igual a $0.05\cos\theta$ está incluida en la curva para tener en cuenta la inundación asimétrica desconocida o el movimiento transversal producido por desplazamientos o pérdidas de peso. La curva del brazo escorante debida al viento de costado se calcula con el mismo método usado para modelar la estabilidad intacta, pero considerando una velocidad del viento entre 32 y 33 nudos. La estabilidad después de averías se considera satisfactoria si el ángulo de equilibrio estático de la escora, θ_c (el punto *C* de la figura), sin efectos del balance debido al viento, no excede de 15 grados.

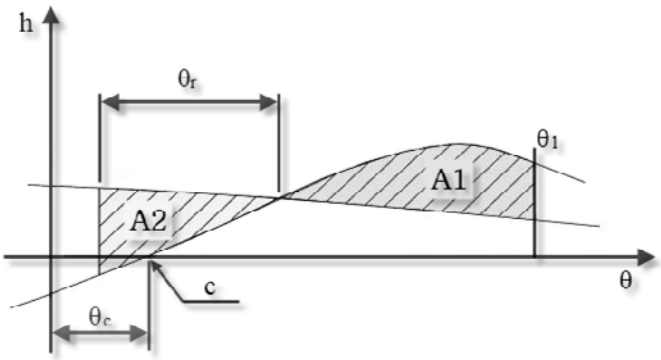


Figura 2. Criterio de estabilidad después de averías según la DDS 079

La estabilidad dinámica disponible para contrarrestar las fuerzas de escora provocadas por la mar gruesa en combinación con el viento de costado es una medida de la adecuación de la estabilidad después de averías. El ángulo límite θ_1 de la curva del brazo adrizante es 45 grados, o el que se produzca con inundaciones sin restricciones si es menor. θ_r es el ángulo esperado de balance por un viento y un estado de la mar asumidos, y debe ser verificado por la experiencia o mediante un modelo a escala. El criterio se cumple si la reserva de estabilidad dinámica A_1 no es menor que $1.4 \cdot A_2$, donde A_2 se extiende desde θ_r hacia barlovento.

Los rangos a estudiar de los posibles daños de los buques pueden ser el resultado del análisis de datos reales o fórmulas empíricas que utilizan longitudes de daños (figura 3) definidos en reglamentos deterministas.

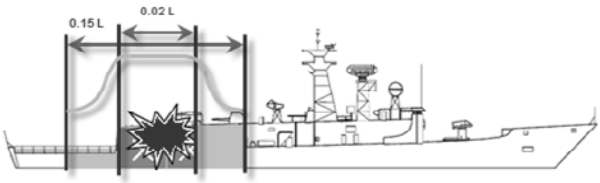


Figura 3. Perfil de la extensión del daño en un buque militar [1] [2]

Naval Ship Code (NSC)

En 2003, el *Nato Naval Group 6*, actualmente *Maritime Capability Group* (MCG-6), creó un equipo de especialistas entre los países de la OTAN, *Partners for Peace* y SS. CC., con objeto de promover la colaboración de la OTAN con las SS. CC. para la elaboración del NSC, coloquialmente conocido como Naval SOLAS. Este NSC o ANEP-77 (*Allied Naval Engineering Publication*) nació para ser el referente en materia de seguridad para construir y operar los buques de guerra, del mismo modo que el convenio SOLAS lo es para los buques mercantes. El NSC no es determinístico, sino que adopta la metodología denominada *Goal Based Standards* (GBS, estándares basados en objetivos). Esta metodología, empleada por la OMI para la elaboración de parte de sus normas, se caracteriza por definir qué debe cumplirse por encima de cómo hacerlo. Para facilitar la aplicación del NSC se confeccionó una guía explicativa: *the guide to NSC*. Algunos ejemplos de esta normativa innovadora son la obligatoriedad del estudio de las explosiones internas considerando un daño de forma esférica, la avería provocada por una vía de agua abierta en el doble fondo debido a una varada, o el estudio de una serie de fenómenos hidrodinámicos como la excitación dinámica o *broaching*. Nuestra Armada participó, con un ingeniero naval, en la elaboración de este capítulo tercero junto con especialistas de Australia, Canadá, Holanda e Italia.

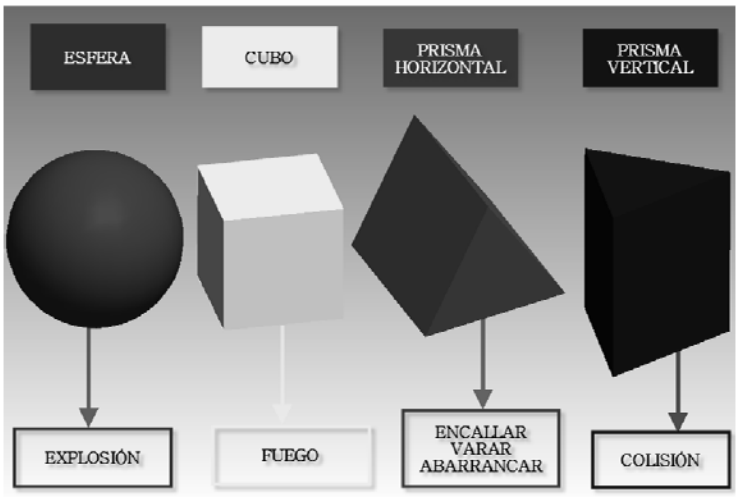


Figura 4. Formas de daños según el NSC

Las categorías de los daños se basan en formas definidas en la figura 4: *esfera*, para las explosiones interiores, o *la mitad de la esfera* en explosiones contra la parte exterior del casco; *cubo*, para volúmenes afectados por el fuego y que cambian de forma para encajar el compartimento; *prisma horizontal*, para los daños al varar o encallar; y *prisma vertical*, para averías por colisión de la proa de otro buque o impacto mecánico.

Los peores daños a estudiar durante el diseño de un portaaviones son los clasificados como categoría C y están definidos por una esfera de 10 metros de radio, un cubo de 20 metros de lado, un prisma horizontal de 40 metros de longitud y base cuadrangular de 5 metros de lado y por un prisma vertical de 40 metros de altura y base cuadrangular de 5 metros de lado. Una avería es considerada de categoría C si se produce un deterioro del 50% tanto de la resistencia estructural como de sus elementos estructurales.

A modo de resumen

Los reglamentos de los buques mercantes están establecidos dentro del marco de la legislación internacional inspeccionada por la OMI. En algunos casos sus convenios no son apropiados para los buques de guerra, pues la misión que se les encomienda demanda soluciones de diseño y operación que no son siempre compatibles con dicha filosofía OMI y sus soluciones. Por ello la OTAN, junto con la *Naval Ship Classification Association* (NSCA), han creado un equipo de especialistas que desarrollaron el NSC, publicación que proporciona la referencia para que los buques de las *Armadas* tengan unos niveles aceptables de seguridad.

Referencias

[1] Riola, J.M. y Pérez Fernández, R. (2009). Estudio comparativo entre los criterios de estabilidad de la Armada Norteamericana, Británica y del SOLAS**.** *Revista Ingeniería Naval*. Julio-Agosto, pp. 815-832.

[2] Riola, J.M. y Pérez Fernández, R. (2009). *Estudio comparativo entre los criterios de estabilidad de la Armada Norteamericana, Británica y del SOLAS***.** Primer premio en el 48º Congreso de ingeniería naval e industria marítima. Vigo. 25 y 26 de junio.

Materiales superconductores
Fundamentos
(Parte 1 de 2)

CF ingeniero Antonio González García
JAL, Ramo Técnico de Sistemas

Este artículo es un extracto del trabajo realizado para la asignatura de «Materiales Avanzados» del programa del Curso de Doctorado 2010 de la ETSIAN.

Introducción

En general, la resistividad de los metales disminuye a medida que la temperatura baja. Esta tendencia continúa hasta que cae sustancialmente por debajo de la temperatura ambiente. Incluso a pocos grados Kelvin los metales típicos industriales presentan una conductividad finita (resistividad no nula). Existen, sin embargo, algunos materiales excepcionales, fig. 1, cuya resistividad se reduce bruscamente a cero al llegar a una temperatura crítica T_C: son los superconductores.

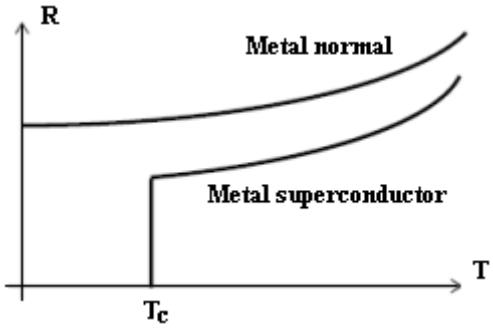


Figura 1. Curva de resistividad-temperatura

El esfuerzo investigador

Se está realizando un gran esfuerzo investigador para tratar de incrementar T_C con la esperanza de encontrar *un material superconductor a temperatura ambiente*. Como muestra la fig. 2, se ha avanzado mucho en las últimas décadas.

En 1986, A. Müller y G. Bednorz, investigadores de IBM en Suiza, crearon un compuesto cerámico ($La_{1.85}Ba_{0.15}CuO_4$) que presentaba propiedades superconductoras tipo II (unas líneas más abajo veremos qué significa tipo II) a la más alta temperatura conocida hasta entonces: 35 ºK. Un aspecto significativo de este descubrimiento es que las cerámicas son normalmente aislantes a temperatura ambiente.

En 1987 un equipo de la universidad de Alabama reemplazó el lantano por itrio en el compuesto anterior y obtuvo una T_C de 92 ºK. Este material, conocido como YCBO, fue el primer superconductor a la temperatura del nitrógeno líquido (77 ºK), lo que permitía un uso comercial competitivo con otras tecnologías. Superar la temperatura del nitrógeno líquido como agente criogénico supone un ahorro considerable, baste mencionar que producir helio líquido industrialmente cuesta unos 5 dólares por litro, mientras que el precio del nitrógeno líquido es 50 veces menor.

En los últimos años se ha profundizado en este tipo de superconductores de alta temperatura (llamados HTS). El récord actual de temperatura crítica es de 138 ºK, lo ostenta el compuesto

$Hg_{0.8}Tl_{0,2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$, descubierto en 1995. Algunos artículos científicos mencionan el $(Sn_{1.0}Pb_{0.5}In_{0.5})Ba_4Tm_5Cu_7O_{20+}$ cuya T_C es de 185 ºK, aunque este material no ha sido patentado todavía.

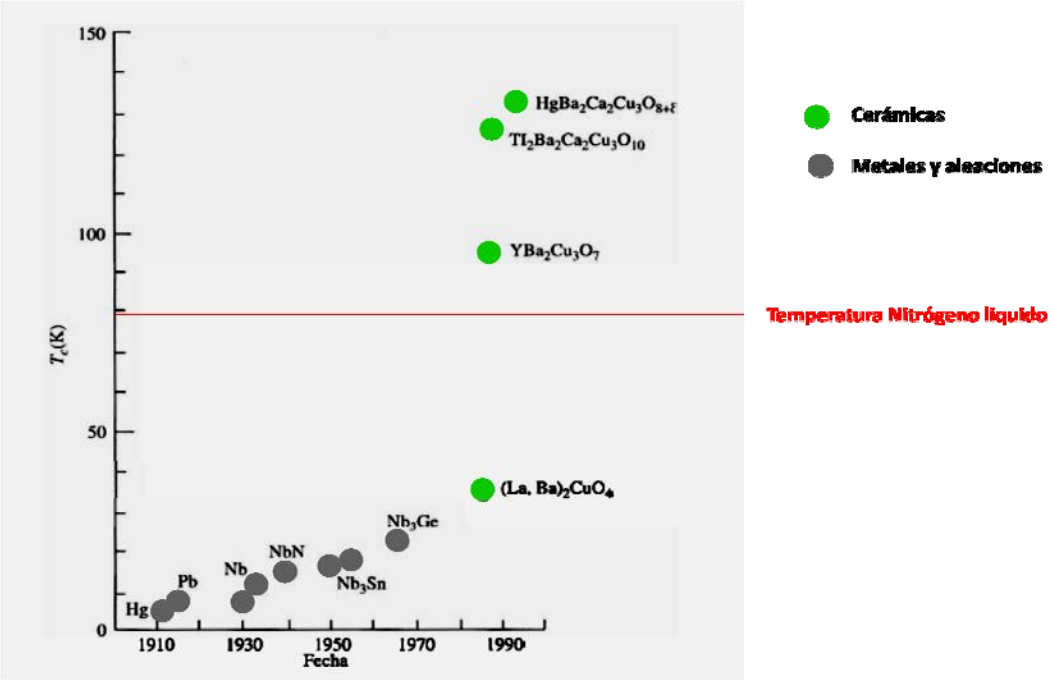


Figura 2. T_c para distintos elementos y compuestos

Recientemente se han hecho importantes progresos en la modelización de la superconductividad. Curiosamente, las vibraciones reticulares –que son la fuente de la resistividad en los conductores normales– son la base de la superconductividad en los metales.

Propiedades de los superconductores

Efecto Meissner

La principal característica de los superconductores de baja temperatura es su diamagnetismo, es decir, la exclusión del campo magnético de su interior, conocido como efecto Meissner. Este comportamiento es completamente diferente al de un conductor tradicional en cuyo seno se mantiene constante el flujo magnético.

Efecto Josephson

Algunas de las aplicaciones más prometedoras de los superconductores parecen centrarse en los dispositivos de película delgada como la *unión de Josephson*, en la que una fina lámina aislante se sitúa entre láminas superconductoras. El efecto Josephson consiste en el paso de corrientes superconductoras a través de una unión que, normalmente y desde el punto de vista de la Física clásica, no debería dejar pasar ningún electrón. Es un fenómeno que se explica perfectamente mediante la Mecánica cuántica. Esta característica, que también se observa en los nuevos materiales superconductores cerámicos, permite diseñar un interesante interruptor para circuitos lógicos. En efecto, sabemos que si se dispone de pequeñas espiras de material superconductor por las que circula una corriente, es posible almacenar información, pues la corriente genera un

momento magnético. Si la corriente circulara en sentido contrario, el momento magnético sería el opuesto. Estos dos sentidos de circulación pueden constituir dos estados de una célula de memoria.

Los dispositivos de película delgada conmutan voltajes a muy altas frecuencias y consumen mucha menos energía que los dispositivos convencionales basados en transistores integrados. Entre sus aplicaciones destacan las orientadas a conseguir procesadores más compactos y detectores de campos magnéticos ultrasensibles.

Magnetización

Los superconductores se clasifican en tipo I y tipo II. La inclusión en uno de los dos tipos se basa en su respuesta a un campo magnético aplicado. Un material tipo I exhibe una magnetización que crece linealmente con el campo hasta que alcanza el valor crítico H_C, fig. 3, en que la superconductividad cesa y la magnetización del material vuelve a su valor inicial. Un material tipo II tiene una respuesta lineal hasta un cierto campo aplicado H_{C1}; pero, si se aumenta aún más el campo, la magnetización decrece rápidamente al principio, para luego caer con una pendiente menor hasta H_{C2}. Por comodidad se define H_C para un material tipo II como el campo crítico para un material tipo I que tenga la misma área bajo la curva de magnetización y la misma pendiente inicial que el material en estudio.

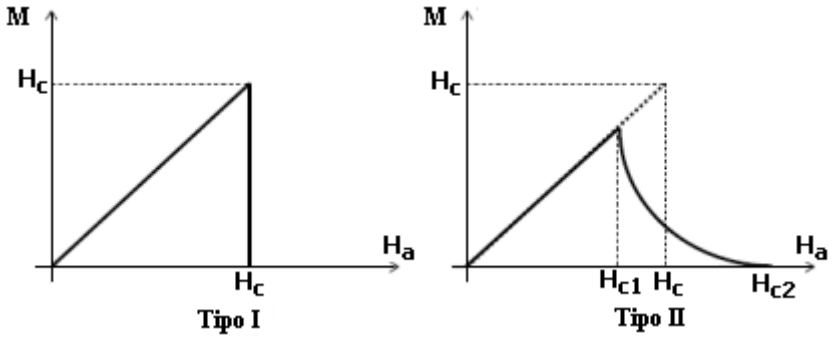


Figura 3. Campo crítico para superconductores tipo I y tipo II

En un superconductor tipo II el campo crítico superior H_{C2} puede llegar a ser de 200 Teslas. Ésta es la razón de su uso preferencial respecto a los de tipo I.

Corriente crítica

La ausencia de resistencia por debajo de una temperatura crítica T_C y un campo crítico H_C implica que si circula una corriente por el material no hay pérdidas eléctricas, pues no se produce disipación de energía por efecto Joule. En el caso de los superconductores, el límite de este comportamiento lo da la densidad de corriente crítica J_C que puede llegar a ser del orden de 10^9 A/m^2 a 77 ºK.

En definitiva, hay tres factores que condicionan el estado superconductor: la temperatura T_C, el campo magnético H_C y la densidad de corriente J_C. Estas tres magnitudes están interrelacionadas y hay una clara dependencia entre ellas, fig. 4.

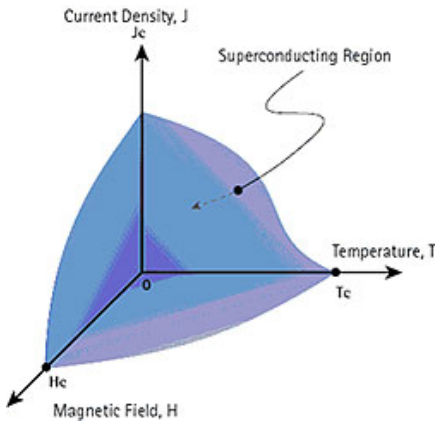


Figura 4. Estado superconductor en función de T_C, H_C y J_C

Fuerzas de levitación

Los sistemas de levitación magnética basados en imanes permanentes son inestables. En cambio, cuando se utilizan superconductores, su comportamiento es totalmente estable.

Cuando acercamos un imán a un superconductor, en un principio el campo magnético del imán no penetra en el interior del superconductor, generándose una corriente de apantallamiento en este último que repele el campo. De este modo, aparece una fuerza de repulsión entre ellos. Si continuamos acercándolos y se supera el primer campo critico H_{C1}, comienza a penetrar campo en el superconductor, quedando dicho campo atrapado. Si ahora se intenta aumentar la separación relativa entre el imán y el superconductor, se genera una tensión magnética que se traduce en una fuerza de atracción mutua. Esta distancia relativa es un punto de equilibrio estable.

Figura 5. Levitación en superconductores

En realidad, la fuerza de recuperación que coloca al superconductor en el punto de equilibrio no es sólo vertical, sino que cuando se produce un desplazamiento lateral también aparece una fuerza que lo devuelve al estado anterior de equilibrio. Por lo tanto, este sistema es totalmente estable, volviendo siempre a la posición de equilibrio después de una perturbación. Este es el fundamento de los ferrocarriles de levitación magnética.

Primer epílogo

Como se indica en el título, este artículo tiene una segunda parte que saldrá, Dios mediante, en el próximo número de nuestro querido *Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada*. En él encontrarán las principales aplicaciones de los superconductores tanto en la tecnología civil como en la militar.

Algunas expresiones que generan números irracionales

CF ingeniero Agustín E. González Morales
Jefe de Estudios de la ETSIAN

En el pasado puede habitar el futuro.
Fernando Sanfernando

El teorema de Fermat

Pierre de Fermat (1601-1655), uno de los gigantes de las Matemáticas, enunció su famosa conjetura (hoy teorema, pues el británico Andrew Wiles la demostró en 1995) que establece que la ecuación:

$$z^n = x^n + y^n \qquad (1)$$

Pierre de Fermat

carece de soluciones naturales para n natural mayor que 2. En el margen de una página de su ejemplar de la *Aritmética* de Diofanto escribió la frase que ha provocado tres siglos y medio de investigaciones: *«Un cubo no es nunca la suma de dos cubos, una potencia cuarta no es nunca la suma de dos potencias cuartas y, más generalmente, ninguna potencia superior a dos es suma de dos potencias análogas. De esta proposición he encontrado una demostración maravillosa, que no cabe en la estrechez de este margen»*. Pues bien, paciente lector, basándome en el teorema de Fermat he deducido varias expresiones que generan números irracionales. Por ejemplo, sabemos que $\sqrt{2}$ es irracional; pero, ¿son irracionales los números $\sqrt[n]{2}$ y $\sqrt[n]{2^n + 5^n}$? La respuesta es afirmativa. A continuación se detalla la demostración.

DIOPHANTI
ALEXANDRINI
ARITHMETICORVM
LIBRI SEX,
ET DE NVMERIS MVLTANGVLIS
LIBER VNVS.
CVM COMMENTARIIS C. G. BACHETI V. C.
& observationibus D. P. de FERMAT Senatoris Tolosani.
Accessit Doctrinæ Analyticæ inventum nonum, collectum ex variis eiusdem D. de FERMAT Epistolis.
TOLOSÆ,
M. DC. LXX.

Análisis de x, y, z

La terna (x, y, z) no puede estar formada por tres números impares pues si x e y lo fuesen entonces z sería par. Sea P el conjunto de los pares y $\bar{P}$ el de los impares. La ecuación (1) se cumple si:

$$z \in P \Leftrightarrow x \in P, y \in P \qquad (2)$$
$$z \in P \Leftrightarrow x \in \bar{P}, y \in \bar{P} \qquad (3)$$
$$z \in \bar{P} \Leftrightarrow x \in \bar{P}, y \in P \qquad (4)$$

La opción $x \in P$ e $y \in \bar{P}$ es formalmente la misma que (4) pues basta permutar la nomenclatura de x con y. Pero siempre es posible convertir una ecuación de Fermat que satisfaga (2) en otra que cumpla (3) o (4). En efecto, sean $x, y, z \in P$, entonces (1) se puede reescribir $(2^i Z)^n = (2^j X)^n + (2^k Y)^n$ con i, j, k naturales y X, Y, Z impares. Dividiendo ambos miembros por la potencia de 2 de menor grado, la ecuación resultante es del tipo (3) o (4). En resumen, para analizar (1) basta estudiar (3) y (4).

$\sqrt[n]{2}$ es irracional: demostración aplicando el teorema de Fermat

Ya los griegos, antes de Cristo, demostraron que $\sqrt{2}$ es irracional. Pero, empleando el teorema de Fermat es fácil llegar a la conclusión de que $\sqrt[n]{2}$ es irracional para $n > 2$. En efecto, en (1) hagamos $x = y$, entonces $z = x\sqrt[n]{2}$, o sea $\sqrt[n]{2} = z/x$. Como no existen solu-

ciones de Fermat $x, z \in \mathbb{N}$ para $n > 2$, entonces no es posible escribir $\sqrt[n]{2}$ como una fracción, es decir, se trata de un número irracional.

$\sqrt[n]{a^n \pm 1}$ es irracional con $n > 2$ y $a \in \mathbb{N}$

Demostremos que todo número de la forma $\sqrt[n]{a^n + 1}$ es irracional. Supongamos que es posible escribirlo como una fracción irreductible: $\sqrt[n]{a^n + 1} = p/q$ con $p, q \in \mathbb{N}$. Elevando a la potencia n-sima, la ecuación se convierte en $p^n = q^n + a^n q^n$ donde:

- Si $\{p, q\} \in P$, entonces p/q no sería irreductible.
- Si $\{p, a\} \in P$ y $q \in \bar{P}$, entonces $p^n \notin P$.
- Si $p \in P$ y $\{a, q\} \in \bar{P}$, entonces es una ecuación de Fermat del tipo (3).
- Si $q \in P$ también lo ha de ser p, entonces p/q no sería irreductible.
- Si $\{p, q\} \in \bar{P}$ y $a \in P$, entonces es una ecuación de Fermat del tipo (4).
- No pueden ser a la vez $\{p, q, a\} \in \bar{P}$ pues la suma de dos números impares es par.

lo que demuestra que no es posible escribir $\sqrt[n]{a^n + 1}$ como una fracción p/q; o sea, es irracional.

De manera análoga procedemos con la expresión $\sqrt[n]{a^n - 1}$. Sea $\sqrt[n]{a^n - 1} = p/q$, es decir: $a^n q^n = p^n + q^n$ que, siguiendo razonamientos similares, vemos que se trata de una ecuación de Fermat. Por tanto, $\sqrt[n]{a^n - 1}$ también es irracional.

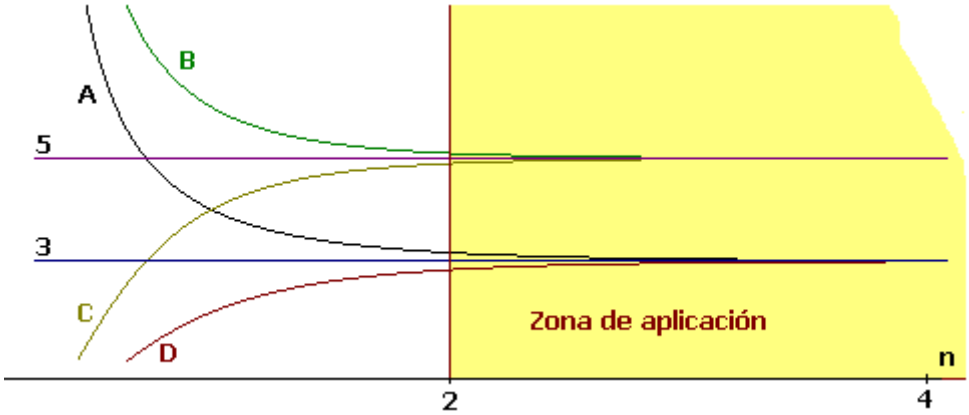


Figura 1. Gráficas de A: $\sqrt[n]{3^n + 1}$, B: $\sqrt[n]{5^n + 1}$, C: $\sqrt[n]{5^n - 1}$, D: $\sqrt[n]{3^n - 1}$

En la figura 1 se representan $\sqrt[n]{3^n \pm 1}$ y $\sqrt[n]{5^n \pm 1}$ con n en abscisas, pero sólo admitiendo los valores naturales de $n > 2$. Obsérvese que el límite cuando n tiende a infinito de $\sqrt[n]{a^n \pm 1}$ es a y que la convergencia hacia a es mayor conforme aumenta el valor de a.

$\sqrt[n]{a^n \pm b^n}$ es irracional con $n > 2$, $\{a, b\} \in \mathbb{N}$ y $a > b$

Todo número de la forma $\sqrt[n]{a^n \pm b^n}$ es irracional bajo las condiciones del epígrafe. En efecto, supongamos que es una fracción irreductible: $\sqrt[n]{a^n \pm b^n} = p/q$, es decir: $(aq)^n \pm (bq)^n = p^n$. Si a y b son primos entre sí, se trata de una ecuación de Fermat, y si a es múltiplo de b ($a = c \cdot b, c \in \mathbb{N}$), entonces:

$$\sqrt[n]{(cb)^n \pm b^n} = b\sqrt[n]{c^n \pm 1}$$

cuya irracionalidad ya está demostrada más arriba

En la figura 2 se representan $\sqrt[n]{5^n \pm b^n}$ con n en abscisas, para $b = 1, 2, 3, 4$. Obsérvese que el límite cuando n tiende a infinito de $\sqrt[n]{a^n \pm b^n}$ es a y que la convergencia disminuye conforme aumenta b.

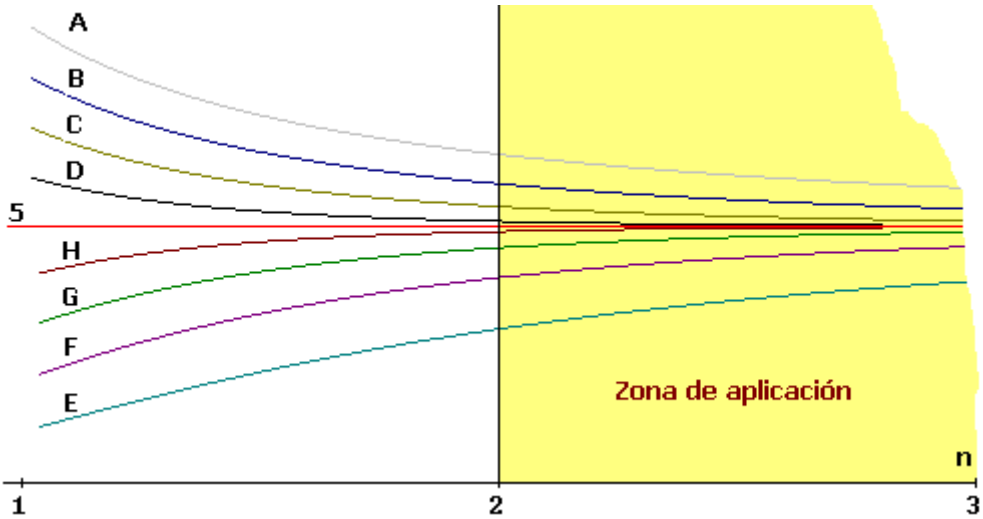
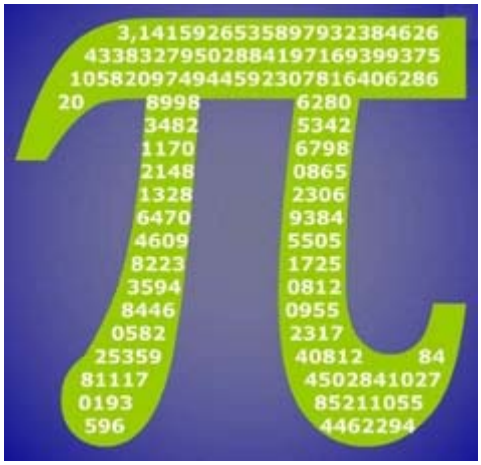


Figura 2. Gráficas de A: $\sqrt[n]{5^n+1^n}$, B: $\sqrt[n]{5^n+2^n}$, C: $\sqrt[n]{5^n+3^n}$, D: $\sqrt[n]{5^n+4^n}$
E: $\sqrt[n]{5^n-1^n}$, F: $\sqrt[n]{5^n-2^n}$, G: $\sqrt[n]{5^n-3^n}$, H: $\sqrt[n]{5^n-4^n}$

En la siguiente tabla se presenta $\sqrt[n]{2^n \pm 1}$ para distintos valores de n, con 25 decimales:

n	$\sqrt[n]{2^n+1}$	$\sqrt[n]{2^n-1}$
3	2.0800838230519041145300 56	1.9129311827723891011991 16
4	2.0305431848689307178670 59	1.9679896716654304185392 27
5	2.0123466170855583247785 60	1.9873407546644579585663 03
10	2.0001952267223593539283 16	1.9998046016161885231639 16
20	2.0000000953673884396534 45	1.9999999046325251583498 86
40	2.0000000000000454747350 88	1.9999999999999545225264 911



¿Para qué sirve todo esto?

Igual que en el artículo de los coprimos, publicado en el BTIA anterior, sugerí emplear las ternas coprimas para codificar señales, aquí podríamos aprovecharnos de la falta de «regularidad» de las cifras decimales de los irracionales. Por ejemplo: con el conjunto (+, 2, 1, 3, 13) nos estamos refiriendo a la decimotercera cifra decimal del irracional $\sqrt[n]{a^n+b^n}$ para $a=2, b=1, n=3$, en este caso el 9; mientras que con (–, 2, 1, 10, 4) hablamos de la cuarta cifra decimal de $\sqrt[n]{a^n-b^n}$ para $a=2, b=1, n=10$. ¿Útil? ¿Quién sabe? ¿En criptografía? A lo mejor sólo sirve para romper la cabeza de chalados como el que firma, o para que me la rompan los que lo lean.

Máquinas termo-acústicas. Un modelo lineal

CC ingeniero Pedro Antonio Casas Alcaide
Jefe de la Unidad de Acústica (ITM)

Introducción

Las máquinas termo-acústicas son esencialmente dispositivos de transformación entre dos tipos de energía: la acústica y la térmica, y su interés radica en que pueden alcanzar altas densidades de potencia manteniendo a la vez unos niveles de simplicidad y fiabilidad considerables. Como en cualquier máquina térmica, su comportamiento está gobernado por las leyes de la Termodinámica, y en consecuencia, según sea el sentido del flujo de calor que se establezca entre los focos térmicos de la máquina, habrá dos modos de funcionamiento: como motor y como refrigerador.

La existencia de máquinas termo-acústicas se conoce desde hace mucho tiempo, siendo a finales del siglo XVIII cuando ciertos fabricantes de objetos de vidrio soplado empiezan a documentar la aparición de un curioso efecto: cuando un bulbo esférico de vidrio conectado a un tubo del mismo material se calienta mediante la aplicación de una llama, la boca del citado tubo emite una señal acústica de cierta frecuencia. Sin embargo, no es hasta finales del siglo XX cuando aparecen los primeros modelos teóricos que predicen el comportamiento de las máquinas termo-acústicas (ver, por ejemplo, Swift, 1988).

Actualmente, las principales aplicaciones termo-acústicas se centran en el campo de la refrigeración criogénica, existiendo muchas líneas de investigación que previsiblemente darán lugar a nuevas aplicaciones en un futuro próximo como la generación de energía a bordo de sistemas aeroespaciales, la refrigeración y alimentación de sistemas electrónicos de baja potencia, etc.

La capacidad de generar modelos matemáticos sencillos en el dominio del tiempo de cualquier sistema físico, y en concreto de cualquier sistema termo-acústico, es muy importante, ya que permite disponer de herramientas para:

- implementar los elementos de regulación y control.
- realizar el diseño y el dimensionamiento inicial mediante estudios comparativos entre diferentes configuraciones, etc.

En este artículo se presenta un modelo matemático de máquina termo-acústica elemental a base de placas planas que, dada la simplicidad de su estructura, se presta especialmente bien a la construcción de simuladores digitales en tiempo real, y se ilustran las características funcionales básicas de dicha máquina en régimen estacionario y con poca separación entre las placas.

La metodología para elaborar el modelo matemático ha sido desarrollada como parte de un trabajo previo sobre eliminación de dióxido de carbono en la propulsión de submarinos, y consiste básicamente en sustituir el sistema diferencial en derivadas parciales que describe el comportamiento de la máquina por uno equivalente de ecuaciones diferenciales ordinarias usando un método espectral (ver Gourgoulhon, 2002) ligeramente retocado para simplificar el tratamiento de las condiciones de contorno.

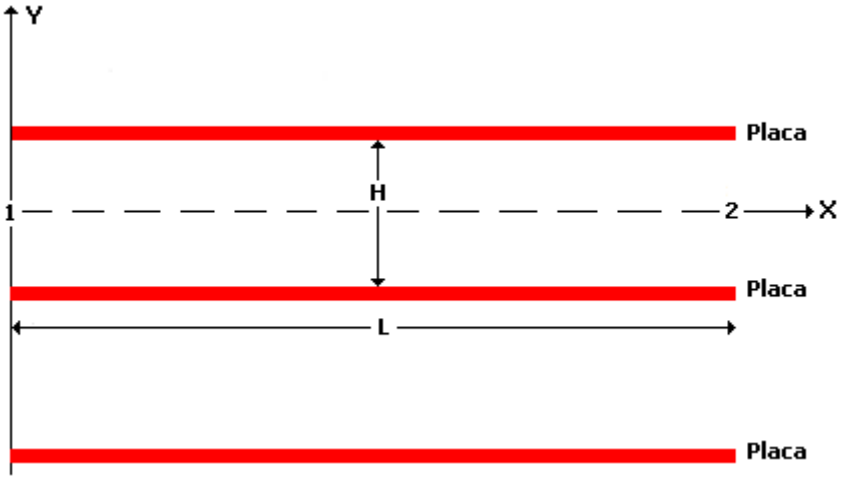
Descripción de la máquina termo-acústica elemental

Antes de presentar la máquina termo-acústica objeto del presente trabajo, se va a comenzar por explicar un ejemplo sencillo: un tubo de vidrio abierto por un extremo y cerrado mediante un bulbo del mismo material en el otro extremo.

Si se aplica una llama al bulbo, éste se calentará, y debido a la baja conductividad térmica del vidrio, el extremo abierto del tubo se mantendrá relativamente frío. En el tramo intermedio situado entre el bulbo caliente y el extremo abierto más frío aparecerá un fuerte gradiente térmico, siendo precisamente este tramo intermedio el motor termo-acústico. En efecto, si por alguna razón externa (un golpe casual, una fuente de ruido cercano, etc.) se inicia una oscilación longitudinal en el aire contenido en el tubo, los cambios de temperatura que aparecen en el aire debidos al proceso de compresión/expansión del mismo darán

lugar a un intercambio térmico igualmente oscilatorio con las paredes del tramo intermedio del tubo, tanto más acusado cuanto más pronunciado sea el gradiente térmico. Este proceso se realimentará hasta convertir al conjunto bulbo-tubo en un oscilador mecánico de frecuencia igual a su frecuencia propia (en cualquier tratado de acústica puede verse que la frecuencia propia del conjunto bulbo-tubo es función básicamente de la velocidad del sonido en el aire, del volumen del bulbo y de la longitud del tubo).

Sea ahora la máquina termo-acústica elemental estudiada en el presente trabajo una batería de placas planas rectangulares separadas entre sí la misma distancia H (ver figura). El fluido está confinado entre las placas y oscila según el eje x. Además, se supone la existencia de un gradiente térmico a lo largo de las propias placas constante e independiente del tiempo.



Detalle de tres placas cualquiera de la batería

A partir del ejemplo bulbo-tubo arriba explicado, es fácil ver la analogía con la batería de placas de la figura. En efecto, si por medios externos se crea una onda estacionaria en el fluido (por ejemplo, situando la batería en el interior de un resonador acústico), el fluido oscilará a lo largo del eje x sufriendo un proceso periódico de compresiones y expansiones. Se ve ahora que las placas juegan el mismo papel que las paredes del tramo intermedio de tubo, apareciendo un intercambio térmico oscilatorio entre el fluido y las placas. Según sea el sentido del gradiente térmico (constante e independiente del tiempo) a lo largo de las placas, habrá producción de trabajo mecánico (la onda estacionaria inicial se realimentará dando lugar a un efecto motor) o absorción de trabajo mecánico (la onda estacionaria inicial se atenuará provocando un efecto refrigerador).

Es interesante observar que únicamente la transmisión de calor que se produce entre el fluido y las placas (es decir, según el eje y) resulta relevante de cara a la aparición de efectos termo-acústico, siendo totalmente irrelevante la transmisión de calor longitudinal (según el eje x). De hecho, evitar ésta última es uno de los mayores retos en el diseño de máquinas termo-acústicas.

La disposición geométrica interna de la máquina termo-acústica elemental arriba representada se ha elegido por lo siguiente: coincide básicamente con la usual en gran parte de las aplicaciones actuales, y permite simplificar el desarrollo matemático.

No obstante, el planteamiento conceptual presentado en este trabajo puede extenderse sin dificultad a cualquier otra disposición geométrica.

Modelo matemático

El desarrollo de un ejemplo ilustrativo sencillo exige la introducción de una serie de hipótesis simplificadoras, de entre las cuales destacan las siguientes:

- Se supone el flujo unidimensional (según el eje X) y que la velocidad se mantiene constante en cada sección perpendicular al flujo (eje Y)
- Se consideran fluidos de baja compresibilidad.

- Se desprecian los efectos gravitatorios y de la viscosidad
- Únicamente se considera la transmisión de calor la dirección del eje Y
- La temperatura sigue una distribución parabólica según el eje Y
- Se supone que L es muy pequeña en relación con la longitud de las ondas acústicas

A partir de aquí, se puede llegar al sistema lineal de coeficientes constantes que aparece a continuación:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{c_s^2}{c_p}\left(-\rho_0 c_p \frac{u_2 - u_1}{L} - \beta \frac{8k}{H^2} T_1\right) \tag{1}$$

$$\frac{du_2}{dt} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{p_2 - p_1}{L} \tag{2}$$

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{c_p}\left(-c_p u_1 \frac{\Delta T}{L} - \frac{1}{\rho_0}\frac{8k}{H^2} T_1\right) \tag{3}$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{c_p}\left(-c_p u_2 \frac{\Delta T}{L} - \frac{1}{\rho_0}\frac{8k}{H^2} T_2\right) \tag{4}$$

Son cuatro ecuaciones y seis incógnitas (p_1, p_2, u_1, u_2, T_1 y T_2). Para reducir las incógnitas a cuatro, basta determinar u_1 y p_2 mediante las condiciones de contorno existentes en los extremos de las placas (en este trabajo se ha optado por las siguientes: $u_1 = u_0 \text{sen}\, \omega t$ y $p_2 = p_0$).

Resultados

El sistema de ecuaciones admite solución analítica. Tras desarrollarlo en condiciones estacionarias, se llega a las expresiones para la temperatura y la presión en el punto 1 que aparecen a continuación:

$$T_1 = -\frac{u_0 \rho_0 c_p H^2 \Delta T}{8kL} \text{sen}(\omega t + \theta) \tag{5}$$

$$p_1 = p_0 - u_0 \rho_0 L \omega \cos \omega t - u_0 \rho_0 L \omega \Delta T \beta \cos(\omega t + \theta) \tag{6}$$

en donde $\tan\theta = -(H/2\delta_t)^2$.

Estas expresiones son la forma asintótica de la solución general cuando H es muy pequeña en relación con el espesor de la capa límite térmica, no obstante permiten ilustrar las características básicas del funcionamiento de la máquina. En efecto, el espesor de la capa límite térmica influye directamente en el ángulo de desfase respecto de la velocidad. Para H muy pequeñas el desfase tiende a cero, indicando que niveles elevados de interacción térmica entre las placas y el fluido dan lugar a la formación de una onda estacionaria. Este resultado es absolutamente sorprendente, pues indica que si se facilita demasiado la transmisión de calor entre el fluido y las placas, los efectos termo-acústicos desaparecen.

Con independencia de lo anterior, puede verse que en fluidos con coeficientes de dilatación térmica pequeños se produce una onda estacionaria; en este caso, la condición estacionaria se obtiene únicamente para la onda de presión, pudiendo la onda térmica alcanzar desfases considerables según sea la separación entre placas, por ejemplo.

En cuanto a la longitud L, actúa de forma opuesta según se consideren las fluctuaciones de temperatura o de presión. Conforme L aumenta, la amplitud de las fluctuaciones disminuye en el primer caso y aumenta en el segundo.

La frecuencia acústica no tiene influencia en la amplitud de las fluctuaciones de temperatura, mientras que hace aumentar linealmente la de las fluctuaciones de presión debido a las fuerzas de inercia del fluido provocadas por su movimiento oscilatorio.

La diferencia de temperatura entre los extremos de las placas influye de una forma curiosa: cuando se anula hace desaparecer cualquier tipo de interacción térmica entre fluido y placas y da lugar a una onda de presión estacionaria. Por otro lado, el signo de la diferencia de temperatura entre los extremos de las placas hace cambiar el signo del desfase respecto de la velocidad. Este hecho en combinación con el arriba indicado permite llegar a una conclusión interesante: la frontera entre funcionamiento como motor y como refrigerador de una máquina termo-acústica puede expresarse, en primera aproximación, mediante la condición $\Delta T = 0$.

Conclusiones

Puede decirse que, a pesar de su sencillez, el modelo lineal presentado es capaz de predecir los fenómenos termo-acústicos más significativos que aparecen en la bibliografía, al menos desde un punto de vista cualitativo. Además, dicho modelo se presta especialmente bien a la construcción de simuladores digitales en tiempo real gracias a la simplicidad de su estructura matemática, siendo aplicable a multitud de situaciones como:

- Diseño de sistemas de control
- Ejecución de estudios comparativos
- Estudio de situaciones de flujo distintas del caso termo-acústico (recuérdese que la entrada en este último campo se ha reducido simplemente a imponer unas condiciones de contorno elegidas al efecto).

Notación

c_s	Velocidad del sonido (m/s)
c_p	Capacidad térmica a presión constante (J/(kg·K))
H	Separación entre placas (m)
k	Coeficiente de conducción de calor (m·kg/(s^3·K))
L	Longitud de las placas (m)
p	Presión (Pa)
t	Coordenada temporal (s)
T	Temperatura (K)
u	Velocidad (m/s)
x	Coordenada espacial en la dirección del flujo (m)
y	Coordenada espacial perpendicular a la dirección del flujo (m)
ΔT	Diferencia de temperatura entre los extremos de las placas (K)
ρ	Densidad (kg/m^3)
β	Coeficiente de dilatación térmica (K^{-1})
ω	Frecuencia angular (rd/s)
δ_t	Espesor de la capa límite térmica, $\left(\frac{2k}{\rho_0 c_p \omega}\right)^{1/2}$ (m)
Subíndice 0	Valor de referencia
Subíndice 1	Extremo anterior de las placas
Subíndice 2	Extremo posterior de las placas

Bibliografía

Gourgoulhon E., 2002, Introduction to spectral methods, 4th EU Network meeting at Palma de Mallorca
Swift G.W., 1988, Thermo-acoustic engines, Journal of Acoustical Society of America (Vol. 84 No. 4)

Arma ofensiva ideal: arma infernal

CN ingeniero (R) Pedro Miranda Cuesta
Decano del Colegio Oficial de Ingenieros de Armas Navales

En la nunca acabada búsqueda del hombre de un arma de mayor alcance y mayor precisión para destruir a sus enemigos exponiendo lo menos posible, el proyectil que se lanza y dirige automáticamente hasta el objetivo es la última expresión de esta aspiración al arma perfecta. Cuanto más pequeño sea el ingenio más velozmente volará para una determinada potencia; cuanto mayor sea la distancia más combustible necesitará; y cuanto más ligera sea la carga explosiva, el peso del equipo y del combustible, más fácil será conseguir alcance, velocidad y puntería.

Podemos decir que, desde el punto de vista estratégico, el arma ofensiva ideal será aquélla capaz de destruir un objetivo enemigo situado a gran distancia poco tiempo después de haber pulsado un botón. Es necesario, por tanto, que tenga gran alcance y velocidad, precisión en el vuelo y exactitud en el impacto, además de gran potencia explosiva. Estos requisitos los cumple un cohete dotado con una carga explosiva nuclear: el misil balístico intercontinental ICBM (Inter-Continental Ballistic Missile).

Su fabricación exige calidad alta y uniforme; los criterios del medio ambiente son mucho más exigentes que para las armas convencionales y las tolerancias han de ser cien veces mayores.

Con los ICBM la ofensiva domina a la defensiva en el arte bélico pues su interceptación es bastante difícil. Vuelan a altitudes de unos 900 km, y sus velocidades al chocar contra el objetivo pueden alcanzar valores del orden de 20 veces la velocidad del sonido. Por eso contra ellos hay muy pocas posibilidades de reacción. Si, además, este misil balístico está incorporado a un submarino nuclear, se configura un sistema de armas casi invulnerable.

Se puede decir que, de momento, la mejor defensa contra un ICBM es otro ICBM, de forma que el enemigo sepa que al accionar un conmutador es como si apretara también el botón del contrario y que, por tanto, se encontrará al poco tiempo con una represalia idéntica que le será imposible contener.

Los cuatro sistemas de navegación que se utilizan en el guiado de misiles de gran alcance son: inercial, celestial, terrenal y GPS, basados respectivamente en la ley de la inercia, la posición de las estrellas, la lectura de mapas o fotografías y la posición de satélites artificiales. Actualmente la tendencia es un sistema mixto (inercial y GPS).

La precisión del arma y la exactitud en el impacto son factores muy importantes para definir su eficacia. Para un determinado blanco se exige que el impacto esté dentro de un determinado círculo, lo que quiere decir que hay que disparar más de un proyectil o, para un solo disparo, se debe aumentar el peso y el tamaño de la cabeza de combate.

La exactitud en el impacto implica que un arma tiene alta probabilidad de destruir su blanco. Pero la exactitud es un concepto relativo que depende de la precisión del sistema de guiado y del radio de destrucción de su cabeza de combate.

Una medida de la precisión –no de la exactitud– es el llamado «círculo de igual probabilidad» que se determina experimentalmente en un polígono. Se define el radio de este círculo situando el centro de la distribución de los disparos que contiene un 50% de los puntos de impacto. Si la mayor parte de los disparos caen a un lado del blanco en vez de distribuirse simétricamente alrededor de él, el arma tiene un descentramiento medido como la distancia entre el blanco y el centro de la distribución. Por tanto, un pequeño círculo, por sí mismo, no asegura que el arma sea letal para un determinado blanco. El círculo depende de las características técnicas del sistema de guiado. Los valores del radio del círculo de los ICBM norteamericanos son del orden de 0.05 millas náuticas (93 metros), mientras que en los rusos son posiblemente el doble.

El descentramiento depende de factores como la localización del blanco, las influencias producidas durante la trayectoria que alteren la dirección y velocidad original del misil y, sobre todo, de la capacidad de corregir estas influencias que, sin embargo, como son diferentes para cada blanco y varían con el tiempo meteorológico, no pueden predecirse.

Si tenemos en cuenta el desarrollo de las dos guerras mundiales se llega a la conclusión de que la potencia de fuego le gana la partida a la rapidez en los movimientos de tropas y armas. Y nadie duda de que después de las explosiones de las bombas de fisión nuclear de 20 kilotoneladas sobre Hiroshima y Nagasaki, la capacidad de unos cientos de kilotoneladas bien colocados puede destruir la mitad de las grandes capitales. Además, el potencial explosivo de estas bombas fue ampliamente superado el 31 de octubre de 1952 cuando se probó en un atolón de las islas Marshall el primer artefacto de fusión termonuclear del mundo. La explosión de 10.4 megatones fue quinientas veces más destructiva que las citadas bombas de fisión nuclear.

De todo ello se deduce que un proyectil dirigido con carga termonuclear es *el arma ofensiva ideal*, *el arma total*, *el arma absoluta,* pero es también un *arma infernal* que cuando estalla nos conduce a una crisis terminal capaz de extinguir a la especie humana.

¿Estamos a salvo? Si somos realistas deberíamos responder negativamente. La gran zozobra es el temor a utilizar esta arma, porque, como nos enseña la Historia, no ha existido nunca un arma inventada o perfeccionada que no haya sido usada.

El progreso tecnológico no es intrínsecamente malo pero debe desarrollarse en sintonía con los progresos sociales, educacionales y humanistas. El mal es una parte sustantiva de la condición humana. Desde los orígenes del Hombre la lucha armada y la barbarie han sido una constante. Y, como dijo Hobbes, filósofo inglés del siglo XVII, «el Hombre es un lobo para el Hombre», de manera que el ser humano puede desobedecer las órdenes genéticas eliminándose a sí mismo, exterminando a sus congéneres, incluso a la especie entera, porque hoy cuenta con los medios para hacerlo. No es una exageración decir que nuestra capacidad destructiva es ilimitada.

La cuestión suprema que se presenta ante la Humanidad la planteó W. Lipmaan, escritor estadounidense contemporáneo, cuando se preguntó «cómo podrán los hombres adquirir la voluntad y la capacidad de salvarse a sí mismos». Aún no conocemos la respuesta.

Sudoku *para ingenieros*

β	ω	π	λ		φ			
φ							γ	
	λ				ε			β
	β					α		
			α	ω	γ			
		ε					π	
α			φ				ω	
	π							ε
			θ		π	β	λ	γ

HUMOR...

SE ESCRIBE «CON» HACHE DE HINGENIO:

Hay 10 clases de personas: las que saben binario… y las que no.

Estaban reunidas las funciones en una fiesta, y en un rincón había una muy sola: la función exponencial. Entonces otra función se le acerca y le dice:
-Oye, ¿por qué no te integras?
-Es que me da lo mismo…

Anécdotas

De Gauss

Tenía Gauss 10 años cuando un día, en la escuela, su profesor manda sumar los cien primeros números naturales. El maestro quería disponer de unos minutos de tranquilidad… pero transcurridos pocos segundos Gauss levanta la mano y dice «*Ligget se'* (ya está), suman 5050». Y efectivamente así es.

Johann Carl Friedrich Gauss (1777- 1855)

¿Cómo lo hizo Gauss? Pues mentalmente. Se dio cuenta de que la suma del primer término con el último, la del segundo con el penúltimo, etc., era siempre 101:

$$1, 2, 3, 4 \ldots 97, 98, 99, 100$$
$$1 + 100 = 2 + 99 = 3 + 98 = 4 + 97 = \ldots = 101$$

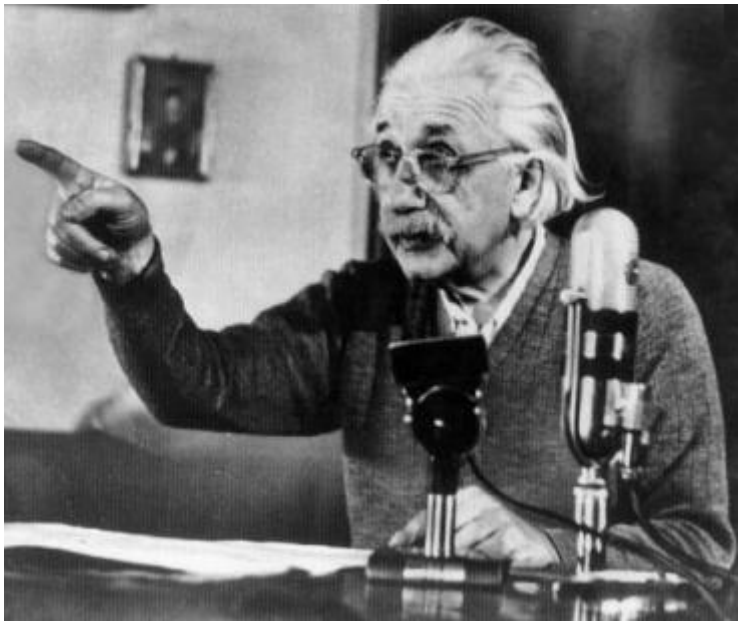
Como con los 100 números se pueden formar 50 pares, la solución es el producto $101 \cdot 50 = 5050$.

En definitiva, Gauss, siendo un chiquillo, había deducido mentalmente la fórmula de la suma de los n términos de una progresión aritmética de la que se conocen el primero y el último término.

CF ing Antonio González García

De Einstein

Dicen que allá por 1920 cuando Albert Einstein empezaba a ser conocido por su Teoría de la Relatividad, las universidades reclamaban con frecuencia su presencia para impartir conferencias magistrales. A Einstein no le gustaba conducir; pero, como le resultaba cómodo ir en coche, contrató los servicios de un conductor.



Después de varios días de viaje, y de varias conferencias, Einstein le comentó a su chofer lo aburrido que resultaba repetir lo mismo una y otra vez. «Si quiere lo puedo sustituir una noche –le dijo el conductor medio en broma–. He oído su conferencia tantas veces que la puedo recitar palabra por palabra». Einstein, sin dudarlo, intercambió su ropa con el conductor y se puso al volante. Llegaron a la sala donde se iba a celebrar la conferencia y, como ninguno de los académicos conocía a Einstein, no se descubrió la farsa: el chofer expuso la conferencia que había oído repetir tantas veces al genio.

Al final, un profesor presente en el foro le hizo una pregunta. El conductor no tenía ni idea de cuál era la respuesta, sin embargo tuvo una chispa de inspiración y le contestó: «La pregunta que me hace es tan sencilla que dejaré que mi chofer, que se encuentra al final de la sala, se la responda».

SCOMBA fase II. Incrementando la funcionalidad de SCOMBA

CF ingeniero Antonio González García
Jefe del Programa SCOMBA
JAL-RTSIST

Introducción

Cuando se publique este artículo, SCOMBA (Sistema de COMbate de los Buques de la Armada) ya es una realidad a bordo de los barcos que lo incorporan: LHD *Juan Carlos I*, BAC *Cantabria* y los BAM. La integración con éxito en dichos barcos ha demostrado que la idea inicial del desarrollo de SCOMBA era realizable, esto quiere decir que ha finalizado la era en que la construcción de un buque implicaba automáticamente el desarrollo de un nuevo Sistema de Combate. Abrimos una nueva etapa en la que la Armada dispone del SCOMBA, que debidamente coordinado con la construcción del nuevo buque, puede adaptarse a los requisitos específicos, nuevos sensores/armas e incluso al nuevo *hardware* de proceso. Lo anteriormente expuesto no será siempre posible cuando se integren sensores o armas no nacionales.

Esta versatilidad de SCOMBA se pone de manifiesto en el nuevo BAM-SR (Búsqueda y Rescate), actualmente en fase de negociación con Navantia. Este barco necesita un Sistema de Control de Operaciones de Rescate que no se va a desarrollar partiendo de cero, sino a partir de SCOMBA. La arquitectura de SCOMBA admite (con un esfuerzo de ingeniería moderado):

- Incluir la nueva funcionalidad requerida por las operaciones de buceo y de rescate de submarinos.
- Integrar nuevos sensores y actuadores, como: radar de navegación en banda S, sonar de barrido lateral, vehículo submarino no tripulado, ecosonda multihaz y el sistema de posicionamiento hidroacústico

Solución técnica

Lo expuesto anteriormente no es fácil de llevar a cabo: estamos hablando de mantener unos requisitos funcionales cruzados entre varias plataformas y emplear un código fuente con procesos comunes a dichas plataformas y al mismo tiempo secciones específicas para una sola plataforma. La complejidad es muy alta y requiere soluciones imaginativas. Para ello se recurrió a una herramienta profesional, *IBM Rational DOORS* (*Dynamic Object-Oriented Requirements System*), que permite adaptarse a las condiciones mencionadas, de forma que los requisitos estén controlados y etiquetados con la plataforma a la que pertenecen. En lo que respecta al *software*, se tomaron tres decisiones estratégicas clave:

1. Implementar un solo código fuente que, mediante *switches* de compilación, pueda generar ejecutables para las distintas plataformas.

2. Desacoplar los sensores y armas del *core* SCOMBA a través de procesadores *software* de entrada salida, llamados IOP (Input-Output Processor), de tal forma que la integración en SCOMBA de un nuevo sensor se reduce a integrar su IOP. De la misma forma es posible implementar distintas versiones de un interfaz cambiando solo el IOP (por ejemplo el equipo IFF CIT-25 se integra en SCOMBA a través de la versión F en los LHD y BAC, mientras que utiliza la versión E en los BAM).

3. Por último, para hacer frente a las previsibles obsolescencias del *hardware* comercial-industrial COTS (Commercial Of The Shelf) se desarrolló un MIDDLEWARE, esto es, una capa de *software* que desacopla las aplicaciones SCOMBA del Sistema Operativo. A esta capa se le denomina NEO (Nuevo entorno Operativo). En definitiva, un cambio de *hardware* o de sistema operativo implica cambios en NEO, pero no en las aplicaciones SCOMBA.

Arquitectura SCOMBA

Las figuras 1 a 3 muestran la arquitectura de los Sistemas de Combate de LHD, BAC y BAM.

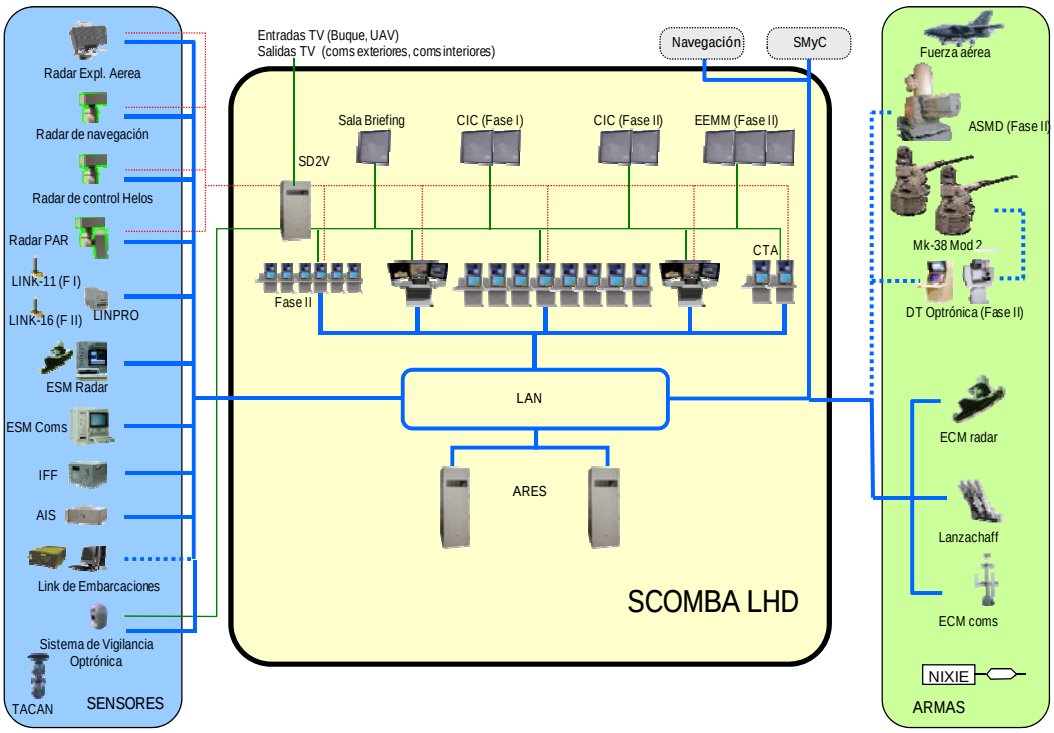


Figura 1. Sistema de combate LHD

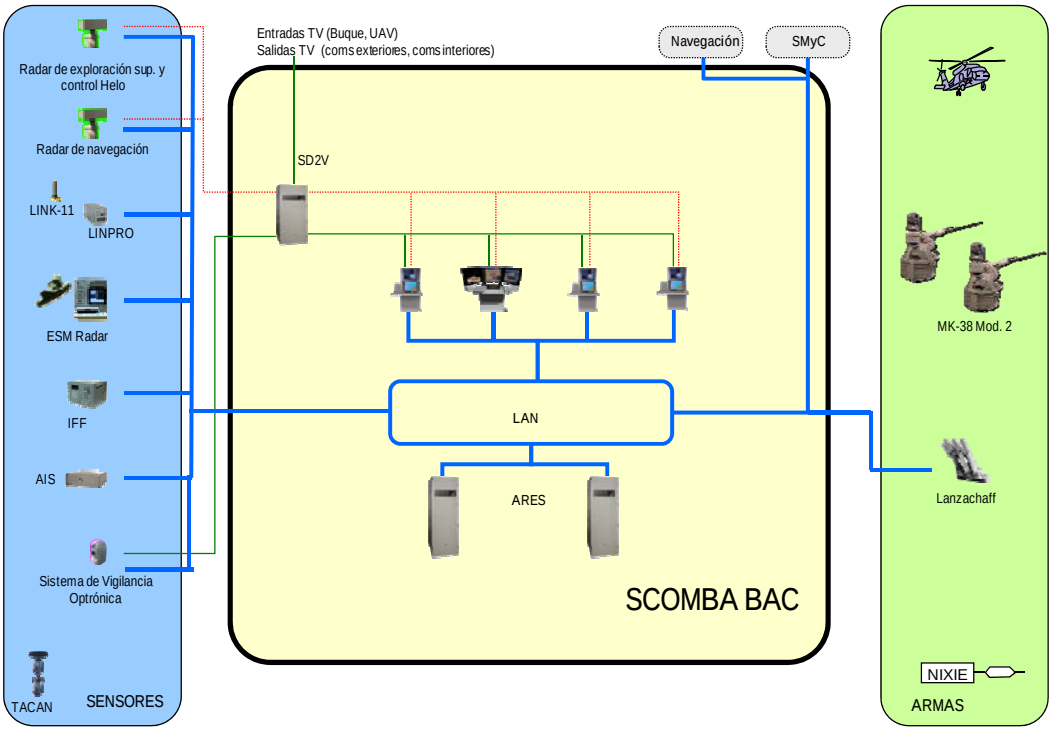


Figura 2. Sistema de combate BAC

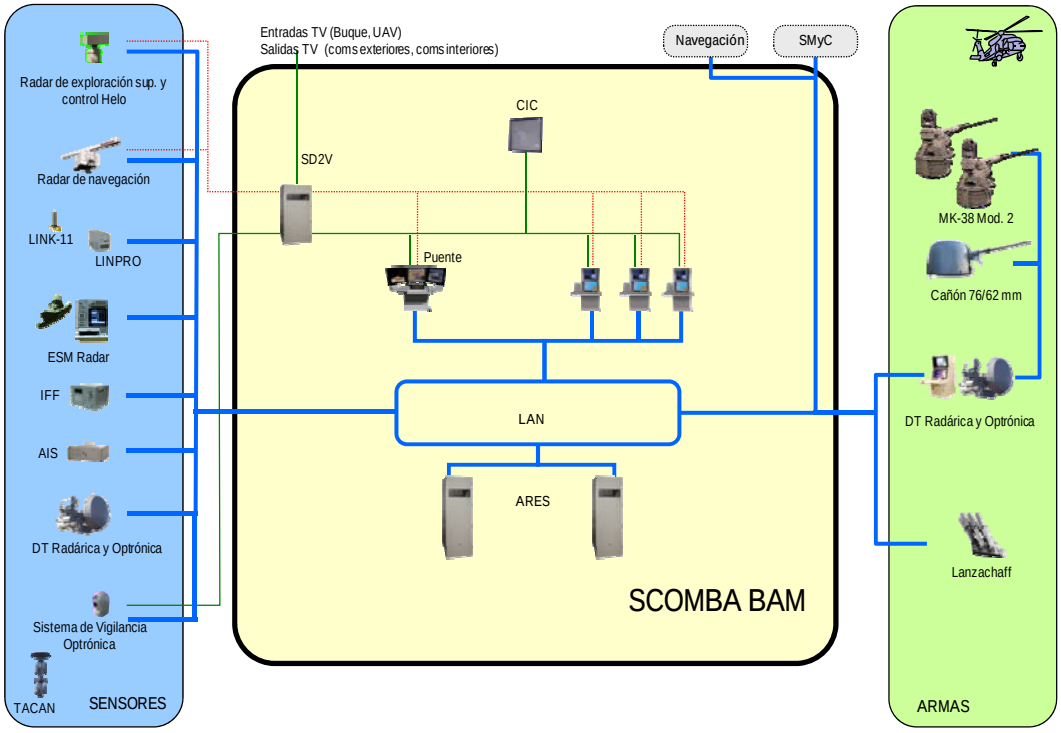


Figura 3. Sistema de combate BAM

El desarrollo de SCOMBA en las plataformas mencionadas ha supuesto la integración de varios sensores y armas no integrados anteriormente, además del trabajo de ingeniería, esto ha necesitado un esfuerzo de definición conceptual en la integración del AIS (Automatic Identification System) y del IFF (*Identification Friend or Foe*) modos 5 y S, dado que no había experiencia previa en este terreno.

SCOMBA se compone de los siguientes elementos fundamentales: las consolas SCOMBA, los armarios de proceso ARES (Armario Reforzado Electrónico Standard), el armario de proceso SD2V y la pantalla panorámica.

Figura 4
Consola SCOMBA C2D

Las **consolas SCOMBA** pueden ser de dos o tres monitores (figuras 4 y 5), y están concebidas con dos o tres procesadores independientes, de tal forma que uno solo es necesario para SCOMBA, quedando los restantes disponibles para asignarlos bien a la presentación de video o a cualquiera de las redes de Mando y Control del buque. Se ha utilizado tecnología COTS en toda la electrónica, siendo la envolvente la que proporciona las propiedades de resistencia ambiental. El operador puede emplear cualquiera de los dos/tres procesadores utilizando la bola/teclado. El resto de los elementos son el teclado táctil con botones de acción variable y el panel de comunicaciones interiores y exteriores.

Los **ARES** (Armario Reforzado Electrónico Standard) contienen los procesadores *IBM Blade Center*, la electrónica de red y los componentes de alimentación y refrigeración. El **armario SD2V** proporciona la electrónica necesaria para la presentación del video radar en las consolas, así como del procedente del CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) y los sensores optrónicos.

La **pantalla panorámica** reproduce la presentación de una de los monitores de las consolas en formato de gran tamaño, visible en todo el CIC.

Figura 5. Consola SCOMBA C3D

SCOMBA fase II

Actualmente SCOMBA está siendo sometido a la evaluación operativa en los BAM. Las dotaciones de estos buques, del CPT y del CEVACO están aportando valiosas recomendaciones y mejoras. Simultáneamente, SCOMBA ha iniciado su primer incremento funcional en base a un contrato firmado el agosto de 2011 con Navantia-Faba, con el siguiente alcance:

a) **Integración de LINK-16.** Se trata de desarrollar la capacidad para transmitir, recibir y gestionar la información de trazas a través de LINK-16. A pesar de lo laborioso, este alcance no supone un riesgo, dado que SCOMBA FASE I se desarrolló con una base de datos de trazas basada en TADIL J y la integración de LINPRO se llevó a cabo a través de la interfaz N, válida para LINK-11 y LINK-16.
b) **Incorporación de la capacidad para adiestramiento propio en la mar y en puerto**. Consiste en desarrollar la capacidad necesaria para que un porcentaje importante de la operación de SCOMBA se pueda ejercitar a bordo, sin sensores reales y sin necesidad de simuladores externos. En la mar, el concepto de adiestramiento SCOMBA permitirá asignar un cierto número de consolas al adiestramiento con trazas simuladas, mientras que el resto de las consolas permanecerán dedicadas a la situación táctica.
c) **Diseño, desarrollo y pruebas de un sistema SCOMBA de Adiestramiento para la Escuela de Especialidades «Antonio de Escaño».** Permitirá dar soporte a los cursos de SCOMBA sobre un *hardware* comercial. Desde el punto de vista de ingeniería se persigue que el *software* SCOMBA de Adiestramiento sea idéntico en un alto porcentaje al SCOMBA Táctico, de forma que durante el ciclo de vida, las sucesivas versiones de SCOMBA Táctico generen con coste mínimo las nuevas versiones de SCOMBA de Adiestramiento.

Conclusión

SCOMBA es un ejemplo de un programa concebido y desarrollado con visión de futuro, de forma que sea utilizable con mínimos cambios en cualquier plataforma de la ARMADA, imponiendo una ingeniería, un apoyo logístico, una operación y un concepto de operación único entre las plataformas SCOMBA, hasta el punto de que un operador puede pasar destinado del LHD a un BAM sin necesidad de formación adicional.

Agotada la fase de desarrollo, SCOMBA da pruebas de su «éxito conceptual» tanto en el incremento de su funcionalidad (SCOMBA FASE II) como en la adaptación al BAM-SR.

La Armada ha iniciado un decidido camino en la dirección de disponer de un Sistema de Combate estándar, flexible y con un coste moderado para la mayoría de sus buques. Con vistas a mantenerse en este camino, SCOMBA necesita una financiación estable. No olvidemos que los Sistemas de Combate extranjeros que admiramos han recibido financiación a lo largo de décadas. La Armada necesita una apuesta igualmente decidida por SCOMBA.

¿Volframio, wolframio o tungsteno?

Doctor Manuel Laguna Iglesias
Director del Departamento
de Construcción y Materiales de la ETSIAN

Introducción

¿Cuál es la denominación correcta, volframio, wolframio o tungsteno? En el Diccionario de la Real Academia Española (DRAE), edición XXII, encontramos los siguientes registros:

- **volframio**. m. Fís. wolframio.
- **wólfram**. m. wolframio.
- **wolframio** (Del al. Wolfram). m. Quím. Elemento químico de núm. atómico 74. Metal escaso en la corteza terrestre, se encuentra en forma de óxido y de sales de ciertos minerales. De color gris acerado, muy duro y denso, tiene el punto de fusión más elevado de todos los elementos. Se usa en los filamentos de las lámparas incandescentes, en resistencia eléctricas y, aleado con el acero, en la fabricación de herramientas. (Símb. W)
- **tungsteno**. (Del sueco tungsten, piedra pesada; de tung, pesado, y sten, piedra). m. wolframio.

O sea, el DRAE admite hasta cuatro acepciones. Pero, ¿cuál es la más acertada?

Un poco de historia

Creo que la respuesta la podemos encontrar en la Historia, sí, en los acontecimientos que condujeron a su descubrimiento en el siglo XVIII.

El estudio de la química del wolframio comenzó en 1781 cuando Bergman y Scheele, después de experimentar con un mineral en bruto de una piedra pesada que se creía que era una mena de estaño, comunicaron a la Academia de Ciencias de Estocolmo la sospecha de que en el ácido wolfrámico (*túngstico* para ellos) pudiera haber un nuevo metal. Pero fueron dos españoles, los hermanos Juan José y Fausto Elhuyar Lubice, los que consiguieron aislar el elemento químico wolframio dos años después. Ambos habían estudiado Química y Mineralogía en Freiberg (Alemania) donde Bergman ejercía como profesor.

No es posible entender la naturaleza de los posteriores estudios de los hermanos Elhuyar sin tener en cuenta la relación entre el gobierno español y la Bascongada: un caso ilustrativo de la interacción entre la ciencia y el espionaje militar. Cuando pidieron ayuda al gobierno español para continuar sus estudios superiores, el ministerio de la Marina y la Bascongada estaban a punto de cerrar un acuerdo de colaboración científico-técnica. Por primera vez el Estado utilizaba una sociedad civil, la Bascongada, para poner en marcha su plan de espiar la fábrica de cañones de Carrón en Escocia. Y *quid pro quo*, la Bascongada se aseguraba una vía para financiar sus planes de desarrollo científico, técnico y socioeconómico, plasmados en la fundación de la Real Escuela Metalúrgica de Bergara y el *Laboratorium Chemicum*. Este acuerdo implicaba la formación de especialistas, lo que sugería la conveniencia de que jóvenes con formación teórica y habilidad experimental suficientemente probadas fuesen pensionados

para ampliar sus conocimientos de mineralogía y fabricación de armas. Se hacía así patente que la investigación química y mineralógica era crucial para modernizar la Marina y el Ejército español

Una circunstancia que facilitó la sólida base química de los hermanos Elhuyar fue el enojo del ministro González Castejón con Juan José Elhuyar por su retraso en visitar ciertas fábricas de cañones; este enfado fue tan grande que lo cesó sin contemplaciones. En octubre de 1782, Juan José, resignado y sin recursos, se refugió en el Seminario Patriótico de Vergara donde su hermano Fausto era profesor de Mineralogía y Metalurgia desde 1781. En este centro se fundaron las primeras cátedras de Química y Mineralogía con el fin de que la ciencia sirviese a la prosperidad del Estado español.

PROPIEDADES FÍSICAS	PROPIEDADES QUÍMICAS
Peso atómico 183,92	Abundancia isótopos
Densidad 19,3 g/cm^3	184 30,6%
Punto fusión 3395 (ºC)	186 29,2%
Punto ebullición 5930 (ºC)	182 25,8
Conductividad en cal/cm s ºC	183 14,2
18ºC 0,31	Volumen atómico
827ºC 0,28	9,55
1727ºC 0,24	Radio covalente
Coeficiente lineal expansión (0 – 500ºC)	1,299
4,98x10^{-6}	Potencial ionización
Dureza Brinell	7,98 eV
Barra sinterizada 200-300	Valencias
Barra forjada 350-400	6, 5, 4, 3, 2
Resistencia a la tracción (kg/mm^2)	Estructura cristalina
Barra sinterizada 13	Cúbica centrada en el cuerpo
Barra forjada 35-150	Configuración electrónica
Modulo de Young (kg/mm^2)	Xe4f^{14}5d^{4}6s^2
35000- 38000	Oxidación
Estable a temperatura ambiente	perceptible a partir de los 400-500 ºC.

Principales propiedades físicas y químicas del wolframio

Los hermanos Elhuyar tenían 28 y 29 años cuando en 1783 publicaron su trabajo «Análisis químico del wólfram y examen de un nuevo metal que entra en su composición» (Ver: Extractos de las Juntas Generales de la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País) donde constataban que habían aislado el elemento wolframio en el mineral *wolframita*, un wolframato de hierro y manganeso. Denominaron al nuevo metal WÓLFRAN, tomado de la materia de la que lo obtuvieron, indicando, según sus propias palabras, «que este nombre le corresponde mejor que el de *tungsteno* que pudiéramos darle en atención a haber sido la *tugstene* o *piedra pesada* la primera materia de la que se ha sacado su cal, por ser el wólfram un mineral que se conocía mucho antes que la piedra pesada o, por lo menos, más generalmente entre los mineralogistas».

Las propiedades del W – especialmente su elevado punto de fusión, gran densidad y resistencia al desgaste– permiten emplearlo profusamente tanto en la industria civil como la militar, formando parte de aleaciones para herramientas (aceros rápidos, aceros para trabajos en caliente, aceros indeformables), en aleaciones termorresistentes, termopares, giróscopos, en carburos, etc.

Epílogo

Pues bien, paciente lector, ¿por qué no hacemos caso a sus descubridores españoles y empleamos «wolframio» como acepción predominante frente a tungsteno? No es mala idea.

Agradecimientos

A D. Mauricio Bádos y Dª Aderita Sancho por sus consejos y colaboración en la presentación de las imágenes.

Bibliografía

- Química general moderna. Babor.Ibarz. Ed.Marín 1979
- Inventario nacional de recursos de volframio 1985. IGME

Proyectiles subcalibrados de 105 mm y 20 mm con componentes de W

Fragmentos de cubos y bolas
de un proyectil prefragmentado
con componentes de W

Visita al Centro de Puertos y Costas (CEPYC)

TN ingeniero Miguel Ángel Mateos Cuevas
Secretario Técnico de la ETSIAN

El 6 de julio de 2011 los ingenieros alumnos de formación de la ETSIAN, acompañados por varios profesores, realizaron una visita al CEPYC, la unidad del Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Fomento (CEDEX) especializada en ingeniería portuaria, estudio de costas e ingeniería marítima en general.

El origen del CEPYC está en el Laboratorio de Puertos de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. Desde finales de los años 40 se desarrollaban allí trabajos teóricos y experimentales sobre la rotura del oleaje, la estabilidad de los diques y la hidrodinámica de las playas. En 1957 se fundó el CEDEX, pasando el Laboratorio a ser una de sus unidades especializadas.

El centro está formado por cinco sectores de actividad técnica, a saber: experimentación hidráulica, estudios de costas, ingeniería ambiental, modelos matemáticos e ingeniería de sistemas. La visita se centró fundamentalmente en el sector de experimentación hidráulica cuya misión es el estudio de ingeniería portuaria y costera en los que se emplean como herramienta fundamental la modelización física a escala reducida. Para ello cuenta con una nave de ensayos dotada de tanques, canales, talleres auxiliares de construcción y equipos de proceso.

Nave de ensayos del CEPYC (sector de experimentación hidráulica)
(Fotografía descargada de la página web del CEPYC – CEDEX:
http://lola.cedex.es/CEPYC/info/inst/ensa/nave/nave.html)

Llama la atención cómo se reproducen las características de un determinado puerto, el diseño estructural de un dique y el de cualquier obra marítima frente a la acción del oleaje y a las operaciones de atraque de los buques. Son auténticas reproducciones a escala de pedacitos de nuestras costas, hechas a base de piedra, cemento, escayola y arena, que nacen para hacer el estudio y desaparecen para dejar sitio

a nuevas construcciones; es como elaborar efímeros castillos de arena en la playa, eso sí, con todo detalle y con unos objetivos de estudio muy bien definidos.

Simulador de Maniobra de Buques del CEPYC (sector de Experimentación Hidráulica)
(Fotografía descargada de la página web del CEPYC – CEDEX:
http://lola.cedex.es/CEPYC/info/inst/mode/simu/simu.html

Perteneciente también al sector de experimentación hidráulica, a medio camino entre éste y el sector de modelos matemáticos, está el simulador de maniobra de buques que también tuvimos la suerte de visitar. Este simulador reproduce el puente de un barco, incluyendo los dispositivos usuales de información, control y comunicaciones. Es especialmente interesante la simulación animada de la visión exterior y de la pantalla del radar. Permite analizar las maniobras de los barcos en el interior de las dársenas de los puertos y también puede emplearse como un instrumento de entrenamiento náutico.

Ya de vuelta a la Escuela aún nos quedaba en la mente el *puerto de Santander* o el rompeolas de *aquella playa de Tenerife* a escala. ¡Qué maravilla!

INGENIEROS EN LA HISTORIA

JOSÉ ANTONIO DE GAZTAÑETA E ITURRIBALGAZA

Alejandro DeCinti

Este marino nació en Motrico el 11 de agosto de 1656 y falleció en Madrid el 5 de febrero de 1728 como Teniente General de la Armada.

Educado en su familia, embarcó con su padre a los dieciséis años en un galeón. Ese mismo año, y por la muerte de su padre acaecida en Veracruz, donde habían llegado ambos a bordo de un navío de aviso, se vio obligado a dirigir la derrota de vuelta de dicho navío hasta Pasajes. En 1684 fue nombrado piloto de la Armada Real del Mar Océano, y dos años después, Capitán de Mar y Piloto Mayor de la Armada, encargado de todas las derrotas y navegaciones. Inició su carrera como constructor en 1688 cuando fue destinado a Colindres para seguir las obras de la Capitana Real del Mar Océano *Nuestra Señora de la Concepción y las Ánimas*, y la *Almiranta*.

Escribió dos tratados *Norte de la navegación hallado por el Cuadrante de la Navegación* y *Cuadrante geométrico universal para la conversión esférica a los planos, aplicado al arte de navegar.*

En 1702 fue nombrado superintendente general de los astilleros de Cantabria donde construyó galeones de 74 cañones, y navíos de 60. Su personalidad le hizo resumir en un diario las bases y detalles de la construcción recogiendo todas sus observaciones, soportadas por su buena formación matemática que le permitió entender la geometría del navío como ningún precursor lo había hecho antes. El manuscrito *Arte de Fábricas Reales, ejecución de la Capitanía Real y otros bajeles de guerra y mercantes* es la cartilla con la que se construyeron los últimos galeones y la base de los navíos, y contiene instrucciones precisas para el trazado geométrico de las formas y los posibles cálculos de arquitectura naval antes de su construcción.

En 1720 entregó al Rey el original de sus *Proporciones de las medidas mas essempciales… para la fabrica de navios y fragatas…,* que contiene las instrucciones y dimensiones con que deben construirse los navíos de la Corona, siendo el primer y más completo tratado conocido de Arquitectura Naval. Esta obra junto a la *Recopilación* de Francisco Antonio Garrote (1691) y el *Examen Marítimo* de Jorge Juan (1772) pueden ser consideradas las mejores aportaciones españolas a la ingeniería y construcción navales de los siglos XVII y XVIII.

El máximo exponente de sus realizaciones fue el *San Phelipe* (1732), navío de tres puentes y de 114 cañones que se terminó cuatro años después de su muerte…

Sus navíos *Princesa* (Guarnizo, 1730) y *Gloriosa* (Habana, 1738) fueron apresados por los ingleses y llevados a Inglaterra, donde, completamente desmontados, fueron estudiados, analizados y sirvieron de modelos para una serie de navíos cuya evolución dio lugar al *Victory* (1765) de 100 cañones que participó en Trafalgar.

En 1720 Gaztañeta inició el estudio de viabilidad de nuevos arsenales, detallando sus emplazamientos y cometidos, que posteriormente darían lugar a la construcción de los tres arsenales peninsulares.

A partir de 1726 volvió a mandar nuevamente escuadras, con desigual fortuna en sus navegaciones y en sus enfrentamientos con los ingleses.

El insigne científico y marino Cosme Damián Churruca (1761-1805) fue familiar de Gaztañeta.