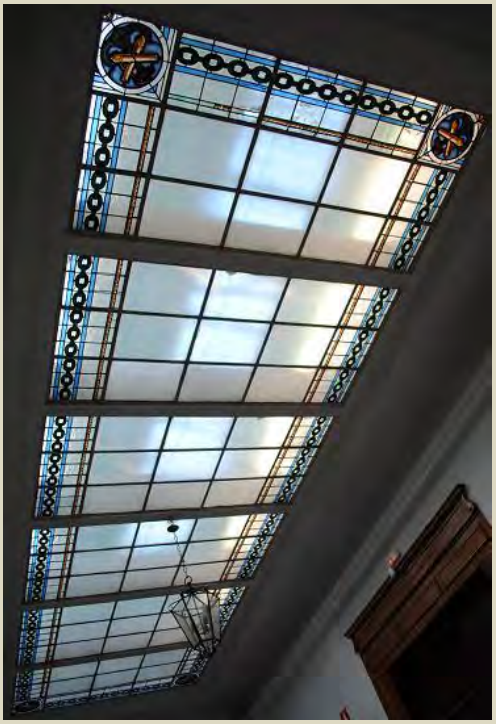
BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA

Junio 2014
Número 6



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE ARMAS NAVALES

(ETSIAN-JEPER-DIENA)

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

HOMENAJE Pág. 2

OPTIMIZACIÓN DE UN CAÑÓN NAVAL Y DE LA CARGA PROPULSANTE ASOCIADA A SU MUNICIÓN (II) Pág. 3
CN (CIA) Pedro Ramón Saura Iniesta

LA CONECTIVIDAD SIN LÍMITES: DESDE LOS SITEMAS 3.5G HASTA LA TECNOLOGIA 4G (LONG TERM EVOLUTION-A) Pág. 7
CN (CIA) Manuel Martínez Ruiz

DESARROLLOS QUE FACILITEN LAS OPERACIONES DE TOMA Y DESPEGUE DE AERONAVES EN BUQUES. Pág. 24
CF (CIA) José María Riola Rodriguez

REDUCCION DE LA FIRMA IR MEDIANTE LA REFRIGERACIÓN DE LOS GASES DE EXHAUSTACIÓN EN BUQUES DE GUERRA Pág. 32
CF (CIA) José María Riola Rodríguez
AN (CIA) Julio Manuel Pernas Urrutia

BUQUES DE GUERA ¿DEL GRIS AL VERDE? Pág. 38
CF (CIA) Indalecio Seijo Jordán

MÉTODO AVANZADO DE OPTIMIZACIÓN DE FIRMAS MAGNÉTICAS BASADO EN ALGORITMOS GENETICOS Pág. 44
CF (CIA) Antonio Villalba Madrid

MODELADO ACÚSTICO DEL SISTEMA DE ELIMINACIÓN DE CO_2 DE LA PLANTA AIP DE UN SUBMARINO Pág. 52
CC (CIA) Pedro Antonio Casas Alcaide

REFRESCO TECNOLÓGICO FRENTE OBSOLESCENCIA Pág. 64
CC (CIA) José Manuel Martínez Ruiz

INNOVACIONES EN EL AMARRE Y FONDO Pág. 67
TN (CIA) Raúl Villa Caro

INGENIEROS EN LA HISTORIA Pág. 72
MIGUEL RECHEA HERNÁNDEZ

EDITORIAL

El Capitán de Navío Ingeniero
Comandante-Director
de la ETSIAN

Queridos y respetados compañeros:

Tengo la satisfacción de presentaros otro número más de nuestra Revista y tengo que disculparme con aquellos que han enviado artículos que no han sido publicados. No ha sido por otra razón, en general, que por cuestión de espacio. Es tanta vuestra generosa participación que no hay más remedio que seguir un turno, pero todos serán publicados. No obstante, aprovecho para recordaros que éste es un ámbito estrictamente técnico alejado de opiniones ajenas a cuestiones propias de nuestra competencia profesional.

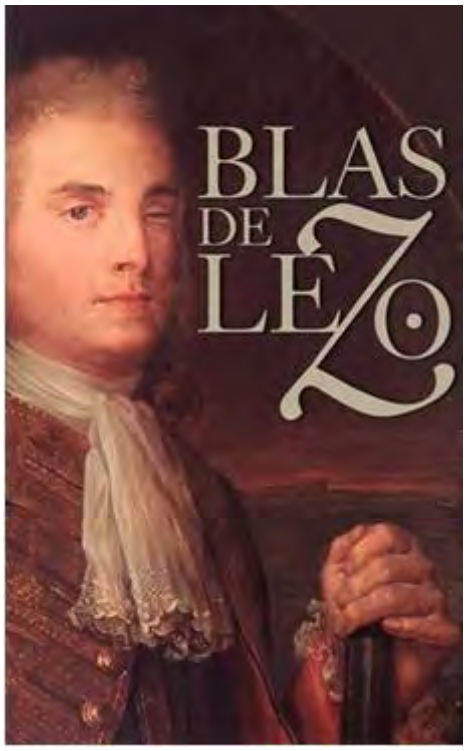
Hemos conseguido gracias al trabajo de la Jefatura de Estudios en colaboración con el Departamento de Construcción y Materiales de esta E.T.S.I.A.N. y al apoyo de la D.I.E.N.A. organizar unas nuevas Jornadas Técnicas: "TENDENCIAS DE LOS NUEVOS MATERIALES" que espero que sean de interés. Si alguien que no pueda asistir desea conocer su contenido con gusto le remitiremos la información requerida.

No quiero acabar sin un reconocimiento explícito al VA. D. FRANCISCO J. CORTÉS URÍA (DIMAN) y al CA. JAVIER BLANCO TIRADO (SUBDIMAN) por su ayuda, interés y cariño a esta E.T.S.I.A.N. facilitando la adquisición de todo el aparataje del Laboratorio de Química necesario para acometer los retos técnicos de los próximos años.

¡Muchas gracias!

Y sin más un fuerte abrazo para todos y feliz permiso de verano.

HOMENAJE A



BLAS DE LEZO Y OLAVARRIETA

Nació el 3 de febrero de 1689 en Pasajes (Guipúzcoa), en el seno de una familia de marinos, a los 12 años, su padre lo envió a un colegio naval de Francia, en que se graduó en 1701 como guardiamarina, embarcando en la escuadra francesa, a las órdenes del conde de Toulose, gran almirante de Francia. Eran tiempos convulsos para España por la Guerra de Sucesión, en la que Francia defendía los derechos dinásticos de la Casa de Borbón al trono de España frente a las aspiraciones de la Casa de Habsburgo, apoyada por el Sacro Imperio, Inglaterra, las Provincias Unidas de los Países Bajos, Prusia y la mayoría de los estados alemanes, a los que se unieron posteriormente el reino de Portugal y el Ducado de Saboya. En esta situación bélica, Luis XIV promovía la integración de los marinos españoles y sus buques con la escuadra francesa, mucho más potente y mejor organizada.

Blas de Lezo tuvo su bautismo de fuego en el combate Vélez-Málaga entre la escuadra francesa del Conde de Toulose y la anglo-holandesa del almirante Rooke. En esta cruenta batalla resultó herido perdiendo su pierna izquierda, amputada por debajo de la rodilla. Por su comportamiento fue ascendido a alférez de navío. A partir de este momento realizó una carrera meteórica por su valor y pericia. Ya ascendido a teniente de navío, durante la defensa del fuerte de Santa Catalina de Tolón, pierde el ojo izquierdo.

Con 23 años de edad, y ya ascendido a capitán de navío, continuó enfrentándose en la mar a los ingleses, consiguiendo numerosas presas, entre ellas el navío inglés Stanhope. En 1714, durante el asedio final a Barcelona, recibió una herida en el brazo derecho que se lo dejó inútil de por vida. Así, tuerto, manco y cojo, continuó

sus servicios en la mar, participando en los últimos momentos de la Guerra de Sucesión, en la reconquista de Mallorca para las armas de Felipe V. Ya empezó a ser conocido con el apelativo de "*mediohombre*".

Cuando finalizó la guerra de Sucesión, se le confió en 1723 el mando de la escuadra y el generalato del Mar del sur, donde se le encargó la limpieza de piratas de las costas del Pacífico. En 1730 fue ascendido a jefe de escuadra. En 1732 se puso al mando de una escuadra de siete navíos para tomar Orán. En 1734 el rey premió sus servicios promoviéndole a teniente general de la Armada. En 1737 volvió a América como comandante general de Cartagena de Indias, plaza que tuvo que defender de los ataques del almirante inglés Edward Vernon.

Tras la derrota de los ingleses, Blas de Lezo tuvo que hacer frente a una serie de intrigas políticas provocadas por sus enfrentamientos con el general Sebastián de Eslava, Virrey de Nueva Granada. Estos enfrentamientos provocaron que el Rey, a la vista de un informe del Virrey, diera orden para su detención y procesamiento. Dicha orden no pudo ser cumplida, porque el 7 de septiembre de 1741 moría en Cartagena de Indias, a la edad de 52 años víctima de la peste. Su situación personal en aquellos momentos era tan precaria que fue enterrado en una fosa común, hoy en día se desconoce el lugar exacto de su enterramiento. Su rehabilitación vendría años después, en 1762, cuando el Rey Carlos III concedió a su hijo, Blas Fernando de Lezo y Pacheco el título de Marqués de Oviedo, *"en atención a los méritos de su padre, el teniente general de la Real Armada, D. Blas de Lezo y Olavarrieta en la defensa de Cartagena de Indias contra el ataque inglés del almirante Vernon".*

Optimización de un cañón naval y de la carga propulsante asociada a su munición (II)

CN Doctor por la ETSIAN
Pedro R. Saura Iniesta
Comandante-Director de la ETSIAN

3.- Posibles alternativas para optimizar el rendimiento del cañón:

(Foto tomada de cuarhisto.blogspot.com)

3.1.- Incremento de la longitud del tubo.

Se presentan los problemas siguientes:

1. Aumento de peso y variación del centro de gravedad.
2. Falta de precisión en el disparo, principalmente en cañones de gran cadencia de tiro debido a la vibración del tubo.
3. Alteraciones en la resistencia del material debido a los fenómenos de flexión y torsión del tubo.
4. Los derivados del rediseño del cañón y su influencia tanto en el propio sistema de arma como en la plataforma que lo soporta.

3.2.- Disminución del peso del proyectil.

El peso del proyectil viene impuesto por el empleo táctico previsto para el arma. Para cañones de gran calibre el peso se puede reducir a 1/3 con proyectiles SABOT, para medianos calibres (30 mm) el peso del proyectil SABOT debería ser como mucho el 85% del correspondiente proyectil.

Esta opción considero que no es en absoluto aconsejable por los problemas que pueden derivarse y por su complejidad técnica.

3.3.- Mejora del rendimiento del propulsante.

Sobre este aspecto del problema se ha investigado intensamente en los últimos años, aunque por desgracia su aplicación práctica ha sido más bien escasa pues presenta los siguientes problemas:

1. Disminución en la estabilidad de la combustión.
2. Menor capacidad de resistir la fatiga bajo tensión, (rotura de granos).
3. Aumento de la erosión del tubo con la consiguiente disminución de su vida útil.
4. Aumento de los costes de fabricación debido a que se incrementa la complejidad del proceso con respecto a los propulsantes convencionales.

3.4.- Aumento del peso de la carga de proyección.

Aparentemente es la solución más adecuada para aumentar el alcance de un cañón pero presenta varios inconvenientes puesto que debemos dar por supuesto, en principio, que la carga en servicio es la máxima posible. Por tanto un aumento sin más de la carga propulsante tendría las siguientes consecuencias:

1. Elevación de la presión con posibles resultados catastróficos.
2. Posible aparición de ondas de presión en el ánima y en la recámara al aumentar la densidad de carga.
3. Aumento de la erosión.
4. Disminución de la vida del arma.

3.5.- INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE LA PRESIÓN.

Esto se consigue intentando alargar la meseta de la curva de presión, es decir aumentando el área existente entre la curva y el eje de abscisas, Hay que evitar que la curva sea picuda. Esto implica que hemos conseguido incrementar el trabajo realizado por el propulsante sin aumentar el pico de presión.

3.6.- OPTIMIZACIÓN DEL PROPULSANTE.

La optimización de la geometría del propulsante es, desde mi punto de vista, la opción más deseable para mejorar o mantener el rendimiento del cañón, tiene por objeto bien aumentar la velocidad en boca del proyectil sin provocar un aumento de presión en la recámara que provoque la explosión del cañón o un desgaste del ánima excesivamente elevado o bien mantener la velocidad en boca sin elevar la presión.
Una manera de mantener constante el valor de la presión máxima de un cañón para una carga determinada una vez que debido al desgaste propio del ánima dicha presión haya disminuido provocando una disminución de la velocidad en boca y por consiguiente una pérdida de prestaciones balísticas (disminución del rendimiento balístico), podría ser mediante el ajuste de las dimensiones del grano propulsante.

En este caso nos centraremos exclusivamente en la variación de la geometría del grano. No nos interesa el peso de la carga puesto que ya lo suponemos optimizado y además un aumento podría provocar un incremento peligroso en la presión o la generación de ondas de presión indeseables.

El problema de la influencia de la dimensión balística en los rendimientos y prestaciones de un cañón hay que afrontarlo, según nuestro criterio, desde tres enfoques bien diferenciados:

1º.- Estudio del grano desde el punto de vista de la influencia de su geometría, a igualdad de otros factores, en su combustión y evolución de la superficie de combustión.

2º.- Diseño, desarrollo, optimización y validación de un modelo matemático susceptible de ser programado que permita ser utilizado como herramienta de cálculo para economizar recursos mediante la concepción y desarrollo de granos con unas geometrías más idóneas.

Como se avanzó con anterioridad, para la caracterización global del conjunto: **cañón/carga propulsante/proyectil** se utilizan habitualmente los dos parámetros siguientes:

1º.-Rendimiento piezométrico.
2º.-Rendimiento balístico.

El **rendimiento piezométrico** se obtenía dividiendo la presión media, generada por la combustión del propulsante, por la presión máxima alcanzada durante el ciclo del disparo y que se ejerce sobre el culote del proyectil.

El **rendimiento balístico**, por otra parte, puede definirse como la relación existente entre la energía útil proporcionada al proyectil y la energía intrínseca total de la carga propulsante

El rendimiento piezométrico se puede calcular mediante la expresión:

$$R_p = \frac{P_M}{P_{MC}}$$

$$R_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_p \cdot V_b^2}{n \cdot S_T \cdot L_t \cdot P_{MC}} \qquad \textbf{(1)}$$

Siendo:

M_p = Masa del proyectil
V_b = Velocidad en boca
n = Coeficiente de velocidad de combustión.
S_T = Área de la sección recta del tubo.
L_t = Desplazamiento del proyectil en un instante t
P_{MC}= Presión máxima en cierre

El rendimiento balístico se puede expresar como:

$$R_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{M \cdot V_b^2 \cdot (\gamma - 1)}{n \cdot f \cdot M_c} \qquad \textbf{(2)}$$

Siendo:

M_C = Masa útil
γ = Relación de calores específicos
V_b = Velocidad en boca
n = Coeficiente de velocidad de combustión
f = Fuerza específica de la pólvora
M_C= Masa de la carga de pólvora

Para conseguir mejorar los rendimientos solamente actuaremos sobre las geometrías de grano. Es decir, tendremos que mantener la misma composición química y conseguir que la energía química del propulsante tenga un máximo aprovechamiento en orden a conseguir las mejores prestaciones.

El rendimiento piezométrico, a igualdad de otros factores, aumentará al hacerlo la velocidad del

proyectil en boca y mantenerse o disminuir la presión máxima en cierre. O bien si aumenta la presión máxima en cierre que este aumento sea relativamente menor que el de la velocidad en boca, aunque siempre sin superar la presión máxima de seguridad. En el caso del rendimiento balístico es evidente que el parámetro crítico será la velocidad en boca.

Por tanto para optimizar estos dos rendimientos que caracterizan las prestaciones globales del conjunto cañón-carga-proyectil sin necesidad de actuar sobre el propio cañón, proyectil ni composición química del propulsante, sólo nos queda, como proponíamos con anterioridad, intentar una modificación beneficiosa de la geometría y/o peso de la carga.

En esta serie de artículos se elaborarán detallada y justificadamente los algoritmos de cálculo necesarios para modelizar y resolver los problemas planteados. También esbozaré un programa de simulación fiable y válida para acometer otras líneas de investigación que se manifiesten como interesantes. Este programa facilitará así mismo la realización de cálculos iterativos y establecimiento de relaciones entre parámetros de interés que posteriormente se abordarán con las técnicas estadísticas más adecuadas. Tendremos pues una herramienta de trabajo que permitirá realizar, por una parte, una investigación teórica de la geometría y dimensiones óptimas del grano y, por otra, ahorrar tiempo, dinero y aumentar la seguridad reduciendo al mínimo las pruebas de Polígono.

4.- Interés militar.

Desarrollo de un procedimiento teórico, basado en los requisitos exigidos por la OTAN para este tipo de cálculos, de optimización de propulsantes y cañones que considere la práctica totalidad de los factores que puedan influir.

Obtención de una herramienta de trabajo apoyada por un exhaustivo estudio teórico que sería de gran utilidad en Polígonos de Pruebas ya que podría aplicarse tanto a cañones como a morteros e incluso con pequeñas adaptaciones a armas de pequeño y mediano calibre.

Obtención de resultados concretos de la relación cuantitativa entre la velocidad en boca y la presión máxima y las diferentes geometrías de grano en orden a mejorar o mantener las prestaciones del cañón e incluso estudiar la posibilidad de mejorar el diseño del arma.

Desarrollo de un procedimiento de fabricación de pólvoras en continuo.

(Foto tomada de cuarhisto.blogspot.com)

Continuará…….

La conectividad sin límites: desde los sistemas 3.5G hasta la tecnologia 4G (LONG TERM EVOLUTION-A)

CN (CIA) Manuel Antonio Martinez Ruiz
Dr. Ingeniero de Telecomunicación

1. Introducción

Como continuación al artículo del 2º Boletín Técnico de Ingenieros de la Armada (BTIA), donde se exponía la evolución de la telefonía móvil, desde la denominada 2ª generación (GSM) hasta la tecnología 3G (UMTS), en el presente artículo se presenta la transición de dicha tecnología hasta la denominada 4ª generación, actualmente implantada en buena parte del territorio nacional y con una buena posibilidad de ser explotado en aplicaciones de defensa.

La tecnología denominada 4G está totalmente orientada a datos, siendo las aplicaciones de telefonía tradicional las menos demandantes en términos de recursos, mientras que las aplicaciones multimedia que permiten la conectividad entre usuarios son las que han impulsado más los objetivos de calidad y tasa de datos.

La siguiente figura muestra de una forma grafica la evolución de la telefonía móvil desde la 3G hasta la 4G, incluyendo el aumento de tasa de datos y el atributo de movilidad.

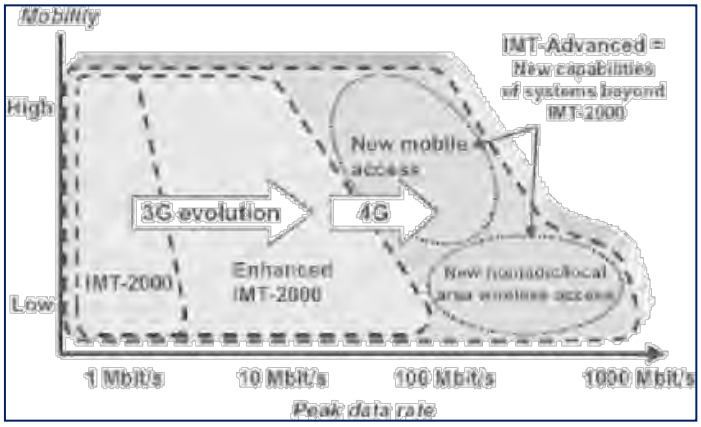


Fig. 1: Evolución de la telefonía móvil

Los requisitos iniciales en términos de máxima tasa de datos de usuario en diferentes entornos se establecieron por la Unión Internacional de Telecomunicaciones por Radio (ITU-R, en sus siglas en inglés) en el proyecto *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT-2000). En este proyecto se especifica la tasa de 2048 Kbps para entornos cerrados, 384 Kbps para entornos mixtos urbanos y 144 Kbps para entornos móviles.

En relación con el estado de la 3G, los sistemas que inicialmente se implantaron, como el *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) no alcanzaron inmediatamente las tasas establecidas en los requisitos IMT-2000, por lo que se planteó la necesidad de hacer evolucionar la tecnología hacia la 3.5G.

La combinación del *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA), 3GPP Release 5, así como la inclusión de un canal denominado *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA), introducido en el Release 6, llevaron a la tecnología referida como *High Speed Packet Access* (HSPA) o también denominada 3.5G. La mayor parte de los sistemas UMTS se han actualizado a HSPA para aumentar la tasa de datos inicial así como la eficiencia de los paquetes.

HSPA ha evolucionado hacia el denominado HSPA+, que proporciona una mayor eficiencia espectral y mayor tasa de datos así como una disminución de la latencia y permite utilizar la potencialidad de WDCMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). Las características de HSPA+ son las siguientes:

- 3GPP Release 7: técnicas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) en enlaces descendentes, modulación 16QAM para enlaces ascendentes y 64 QAM para descendentes, mejora en protocolos de nivel 2 y conectividad continua a nivel paquete de datos. Es decir en este *Release* se priman las características asociadas con la mayor tasa de datos y una mayor eficiencia de las capacidades ya disponibles.
- 3GPP Releases 8,9 y 10: las mejoras están asociadas con la capacidad multiportadora en enlaces ascendentes (2) y descendentes (4), combinación de técnicas MIMO y modulación 64QAM, además de otras características.

El incremento en la demanda de accesos móviles de banda ancha con mayor tasa de datos y mejor calidad de servicio (QoS), llevó al 3GPP a iniciar dos proyectos en paralelo: *Long Term Evolution* (LTE) y *System Architecture Evolution* (SAE) los cuales definirían el acceso tanto a la componente radio (*Radio Access Network*, RAN) como el acceso al núcleo de la red (*Core Network*). Estas especificaciones están incluidas en el paquete 3GPP *Release 8* y se denomina *Evolve Packet System* (EPS), aunque genéricamente se conocen como LTE.

EPS es un paso adelante en la consecución de una mayor eficiencia, menor latencia, optimización de paquetes así como un servicio más seguro, todos ellos atributos deseables en los sistemas 4G.

El acceso a la interfaz radio se efectúa a través del diseño de formas de onda OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) en enlaces descendentes, que evitan las interferencias inter-símbolo que son limitadoras del comportamiento a altas tasas binarias. En enlaces ascendentes se utiliza SC-FDMA (*Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*) También se utilizan las mencionadas técnicas basadas en configuraciones de antenas MIMO para aumentar la tasa binaria. A nivel red se define una arquitectura IP plana que permite implementar técnicas de calidad de servicio (QoS).

Finalmente mencionar que, al igual que UMTS, LTE incluye dos modos de operación: FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*), también conocida como TD-LTE que serán el germen de las redes basadas en TD-SCDMA. Todas estas características no han permitido alcanzar los requisitos atribuibles a los sistemas 4G, que se presentaran más adelante, por lo que esta tecnología se denomina 3.9G.

Antes de entrar en la definición de los sistemas 4G la 3GPP introdujo pequeños cambios en las especificaciones de LTE, tales como la inclusión de las denominadas *femtocells* así como los sistemas conformadores de haz de dos capas (Release 9). Ambas tecnologías están incluidas en LTE-A, y se presentaran más adelante.

La definición formal de los requisitos de sistemas 4G fueron definidas por el ITU-R en el proyecto IMT-A (*International Mobile Telecommunications-Advance),* que sustituyó al IMT-2000 anteriormente mencionado. Entre las tecnologías propuestas para aprobación como estándar internacional para comunicaciones inalámbricas 4G estaban la ya citada LTE-A, que sería completamente especificada en el *Release 10* del 3GPP. Uno de los requisitos contemplados es la compatibilidad con LTE a efectos de espectro radioeléctrico. Es decir, se deberá poder desplegar un sistema LTE-A en lugares donde ya haya sistemas LTE en operación. Otra de las tecnologías candidatas es la IEEE 802.16m *(Advanced Mobile Broadband Wireless Standard*).

2. Un paso más: de los sistemas 3.5G a los 3.9G

La cuarta generación de telefonía móvil ha sido objeto de interés desde que la *International Telecommunications Union Radiocommunication Sector* (ITU-R) finalizo la definición formal de los sistemas de tercera generación en 1997.Para crear un entorno de colaboración entre asociaciones y empresas de tele-

comunicaciones, en 1998 se creó el 3GPP (*3G Partnership Project*) el cual empezó a trabajar en la especificación de los siguientes elementos de la arquitectura: radio, red (*core network*) y servicios.

El conjunto de requisitos IMT-A establecidos por el ITU-R son los siguientes:

- Alto grado de comunalidad en la funcionalidad a nivel global.
- Flexibilidad para proporcionar un amplio abanico de servicios.
- Compatibilidad de servicios dentro del contexto IMT así como con redes fijas.
- Compatibilidad a efectos de interconexión de red con sistemas de acceso radio móviles.
- Terminales de alta capacidad y calidad.
- Sistemas de usuario susceptible de utilización en un ámbito global
- Aplicaciones, servicios y equipamiento con interfaces y utilización ergonómica y amigable.
- Capacidad de itinerancia mundial (*worldwide roaming*)
- Tasas de datos capaces de soportar servicios y aplicaciones avanzadas (100 Mbps para sistemas de alta movilidad y 1 Gbps para sistemas de baja movilidad).

Como se puede ver, todos los requisitos son de alto nivel excepto el último. No obstante se han establecido cifras de mérito donde se prioriza el comportamiento en los bordes de las celdas o la eficiencia espectral sobre la tasa máxima y la capacidad VoIP, por poner un ejemplo.

En la tabla siguiente se comparan los requisitos LTE, LTE-Advance e IMT-Advance.

Elemento	Enlace	Conf. Antena	LTE R8	LTE-A	IMT-A
Tasa datos Max	Descendente(DL)	8x8	300 Mbps	1 Gbps	1 Gbps
	Ascendente (UL)	4x4	75 Mbps	500 Mbps	-
Efic. Espec. Max	DL	8x8	15 Mbps	30	15
	UL	4x4	3.75 Mbps	15	6.75
Capacidad (bps/Hz/Celda)	DL	4X2	1.87 Mbps	2.6	2.2
	UL	2X4	-	2.0	1.4
Borde celda (bps/hz/celda/usr)	DL	4x4	0.08	0.12	-
	UL	2x4	-	0.07	0.03

Tabla 1: Requisitos Comparativos

Merece destacar la posibilidad de utilizar diferentes zonas del espectro radioeléctrico en los despliegues de LTE-A debido a que cada región o país tiene diferente legislación en relación con el uso del espectro.

Igualmente destacable es el requisito de eficiencia espectral de los sistemas LTE-A. Desde la perspectiva del enlace a nivel radio, LTE ya alcanza tasas de datos muy próximos al límite de Shannon, por lo que los sistemas LTE-A deberán orientarse a mejorar la Relación Señal Interferencia y Ruido (SINR) y por lo tanto mejorar el comportamiento de los sistemas LTE en porciones mayores de la celda.

3. 3GPP Release 8 (3.9G): Introducción a los Sistemas LTE

3.1. Requisitos.

Tasa de datos: 100 Mbps (descendente) y 50 Mbps (ascendente) para una asignación de espectro de 20 Mhz y dos antenas receptoras y una transmisora en el terminal.

Rendimiento : para enlaces descendentes, 3-4 veces mejor por Mhz que 3GPP Release 6, para ascendentes, 2-3 veces mejor por Mhz

Eficiencia Espectral: ver tabla comparativa de tasa de datos (Mbps) y eficiencia espectral especificada para LTE (bps/Hz). Se observa la mejora de operación MIMO en enlaces descendentes así como la modulación de alto nivel en el ascendente.

Descendente (20 MHz)			Ascendente (20 MHz)		
Unidad	Mbps	Bps/Hz	Unidad	Mbps	Bps/Hz
Requisito	100	5.0	Requisito	50	2.5
2x2 MIMO	172.8	8.6	16QAM	57.6	2.9
4x4 MIMO	326.4	16.3	64QAM	86.4	4.3

Tabla 2: Eficiencia Espectral

Latencia. Plano de usuario: menor de 30 ms, para la disponibilidad de un paquete entre las capas IP de usuario y de red.

Latencia. Plano de control: menor de 100 ms, para pasar un terminal desde la situación de *idle* hasta conectado.

Ancho de Banda: LTE soporta un subconjunto de anchos de banda desde 1,4; 3; 5; 10; 15 hasta 20 Mhz.

Movilidad: el sistema esta optimizado para velocidades bajas (0-15 Mph) pero también opera satisfactoriamente a mayores velocidades, como trenes de alta velocidad o vehículos.

Asignación espectro: el sistema opera en FDD y TDD.

Calidad de servicio: deberá se ser proporcionada así como VoIP.

3.2. Arquitectura de red.

La Arquitectura de red sigue el criterio de 3GPP establecido en el concepto SAE (*System Architecture Evolution)* . El objetivo es desarrollar un marco que permita la evolución de cualquier sistema 3GPP basado en redes de alta tasa de datos, baja latencia y optimización de paquetes. Para ello la arquitectura de la red se basa en dos niveles: red E-UTRAN y nivel EPC. Este último consiste en un núcleo de red IP (flat all-IP) al que se puede acceder a través tanto de tecnologías 3GPP (UMTS, HSPA, HSPA+, LTE) como de accesos radio no-3GPP (Wimax, WLAN) permitiendo mecanismos de transferencia de control o responsabilidad entre ellos.

3.2.1. Arquitectura Red LTE (E-UTRAN)

El núcleo en la arquitectura E-UTRAN es el denominado *enhance Node B* (eNodeB, o eNB) que proporciona la interfaz entre los planos de control y usuario de la red (protocolos) y el terminal (UE). Dichos nodos se conectan entre sí mediante interfaces específicas (denominadas X2).

Los eNBs están también conectados a través de una interfaz S1 a la capa EPC (*Evolved Packet Core*), específicamente a las entidades de gestión de movilidad (*Mobility Management Entity,* MME) y a los *Serving Gateways.*

En la figura siguiente se muestra la conectividad de los nodos en una red E-UTRAN y su interfaz con la capa EPC.

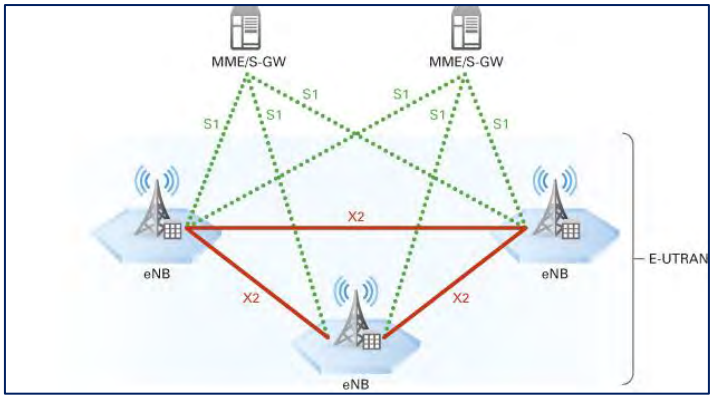


Fig. 2: Interfaces E-UTRAN

La siguiente figura muestra el detalle de la funcionalidad que se reparten los distintos elementos: eNB y EPC (interfaz S1).

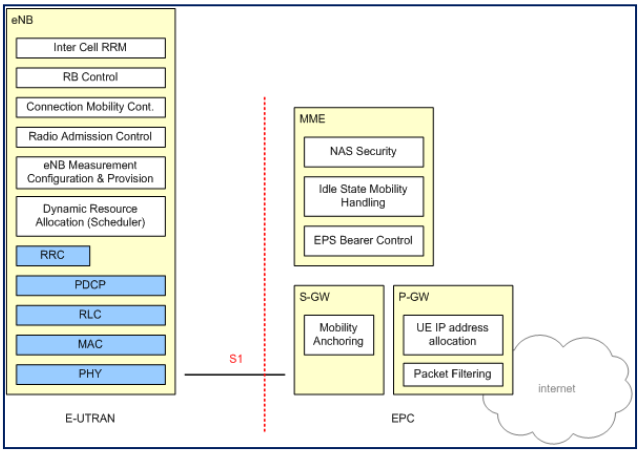


Fig. 3: Capa de protocolos entre usuario y control

Las capas de protocolos disponibles en los planos de usuario y control del nodo (eNB) así como las de las entidades correspondientes al EPC (MME, S-GW) son las siguientes:

NAS (*Non-Access Stratum*)

- Gestión de la conexión entre el UE y la red (*core network*)
- Gestión de la localización del registro

RRC *(Radio Resource Control*)

- Radiodifusión de la Información relacionada con los estratos NAS y AS
- Funciones de seguridad incluyendo gestión de claves
- Funciones de movilidad
- Funciones de QoS

PDCP (*Packet Data Convergence Protocol)*

- Compresión de cabecera
- Detección de duplicados
- Cifrado e integridad

RLC *(Radio Link Control)*

- Corrección de errores a través de mecanismos ARQ
- Detección y recuperación de errores en el protocolo
- Entrega secuencial

MAC (*Medium Access Control*)

- Multiplexacion / demultiplexacion de las los paquetes de datos de nivel superior RLC PDUs
- Reportar información de planeamiento (scheduling)
- Corrección de errores a través del Hybrid ARQ (HARQ)
- Priorización de canales

3.2.2. Arquitectura y concepto EPC (*Evolved Packet Core)*

Los componentes del núcleo EPC son los siguientes:

MME (*Mobility Management Entity*)

- Gestiona funciones de seguridad (autenticación, autorización, señalización NAS), maneja la movilidad, la itinerancia y el cambio de responsabilidad.

S-GW *(Serving Gateway)*

- El nivel EPC termina en este nodo y se conecta a la red E-UTRAN a través de la interfaz S1-U. Cada terminal (UE) se asocia a un S-GW único, en el cual residirán diversas funciones. Es el punto de referencia para la localización desde el que se efectúa el handover entre nodos eNBs así como entre sistemas 3GPP. También efectúa enrutado y envío de paquetes y facturación entre diferentes operadores.

PDN-SW (*Packet Data Network Gateway*)

- Este nodo proporciona el acceso a la red de paquetes (PDN) asignando una dirección IP al UE. Además proporciona conexiones seguras entre UEs conectadas a través de una red poco fiable (*untrusted*) No-3GPP con el nivel EPC por medio de túneles IPSec.

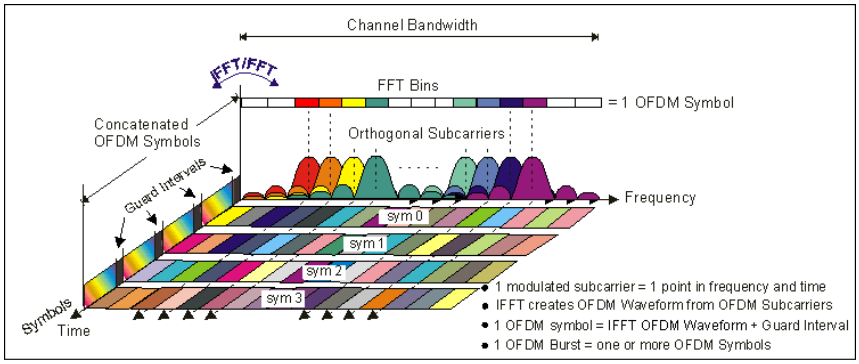
Desde la perspectiva del plano de usuario, solamente existen los nodos eNBs y los *gateways,* que es lo que permite que el sistema se considere IP-plano (*All-flat IP)*. De esta forma se reduce la complejidad de las arquitecturas de red de los sistemas precedentes.

3.3. Enlaces descendente y ascendente.

3.3.1. Acceso Múltiple en Enlace Descendente

El enlace descendente en LTE consiste en efectuar transmisiones paralelas de bloques de transporte (*Transport Blocks, TB*) en cada componente de portadora utilizando OFDMA.[1]

En OFDM el espectro disponible se divide en subportadoras, cada una de las cuales se modula de forma independiente. Es decir en OFDM los símbolos de datos se modulan independientemente y se transmiten por medio de un conjunto de portadoras ortogonales. En las redes E-UTRA, la modulación se realiza mediante QPSK, 16QAM y 64 QAM. En el dominio del tiempo se añade un intervalo de guarda a cada símbolo para reducir la interferencia entre otros símbolos que pudieran llegar a la vez debido al efecto multitrayecto. En la práctica la señal OFDM se genera utilizando una transformada inversa de Fourier (IFFT). La IFFT convierte un numero N de símbolos de datos en el dominio de la frecuencia en señales en el dominio del tiempo. Es decir, cada símbolo OFDM en el dominio temporal contiene contribuciones de todas las subportadoras que se encuentran dentro del ancho de banda de la transmisión de interés. La figura siguiente muestra la representación frecuencia-tiempo de una señal OFDM así como el acceso OFDMA.



Frequency-Time Representative of an OFDM signal

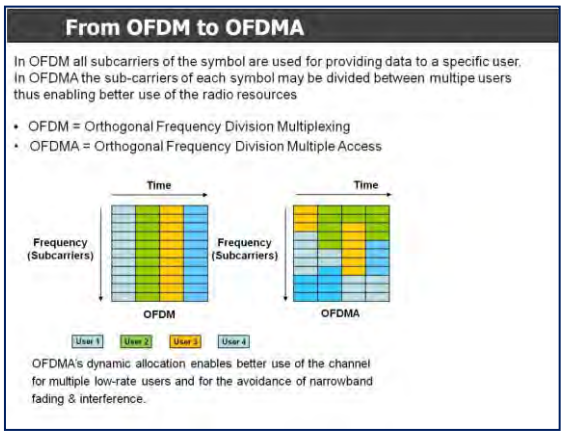


Fig.4: Representación señal OFDM y acceso OFDMA

En contraste con el esquema de transmisión OFDM, el acceso OFDMA permite el acceso de múltiples usuarios sobre el ancho de banda disponible. A cada usuario se le asigna un recurso específico frecuencia-tiempo. Uno de los principios fundamentales de E-UTRA es que los canales de datos son canales

[1] OFDMA: Ortogonal Frequency Division Multiple Access.

compartidos, es decir por cada intervalo de transmisión (TTI) de 1 ms se toma una decisión de planificación en relación con que usuarios son asignados a cada recurso tiempo frecuencia durante este TTI.

Al igual que en UMTS, en LTE se definen estructuras de transmisión que son diferentes dependiendo el tipo utilizado: FDD (tipo 1) y TDD (tipo 2). La figura siguiente muestra dichas estructuras.

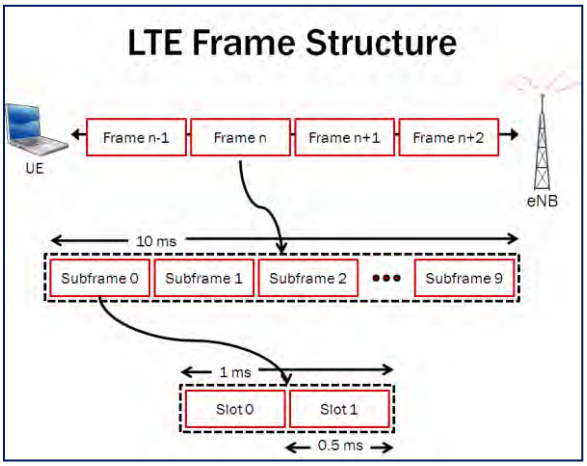


Fig.5: FDD Tipo 1

Se observa que para FDD una unidad de transmisión (*radio frame)* dura 10 ms y consta de 20 slots de tiempo de 0.5 ms cada uno. La frecuencia de muestreo (fs=I/Ts), que es una de las unidades básicas de LTE es 30.72 MHz[2].

Este número se obtiene del espaciado entre subportadoras (15 KHz.) y el tamaño de la FFT para generar los símbolos OFDM (2048[3]).

Para TDD los 10 ms de *radio frame* se dividen en dos *half -frames* de 5 ms cada uno. Cada uno de estos se divide en *5 subframes* de 1 ms, tal como se muestra en la figura siguiente.

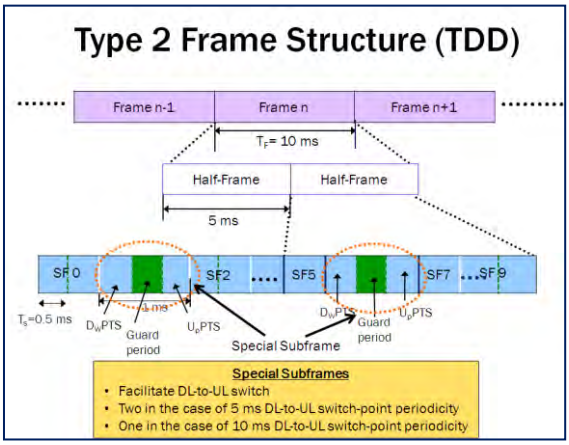


Fig.6: TDD Tipo 2

[2] Para simplificar la implementación de dispositivos multi-standard se utilizan frecuencias de muestreo fáciles de conseguir: En WCDMA múltiplo del chip-rate definido: 30,72 MHz / 8= 3.84 Mcps y en CDMA2000: 30.72 Mhz/25=1.2288 Mcps.

[3] 2048*15KHz=30.72 MHz

Se observa que cada *subframe* se caracteriza por 2 unidades de tiempo (slots) de tiempo de 0.5 ms existiendo también *subframes* especiales. Esta estructura permite 7 configuraciones ascendentes-descendentes de duración 5 o 10 ms. Cada configuración tiene una estructura diferente en cuanto al número de *subframes* dedicados a enlaces ascendentes y descendentes. Siempre que hay una conmutación de enlace descendente a ascendente se inserta un *subframe* especial. La razón es que todas las transmisiones ascendentes de diferentes terminales deben llegar a la vez al receptor de la estación base.

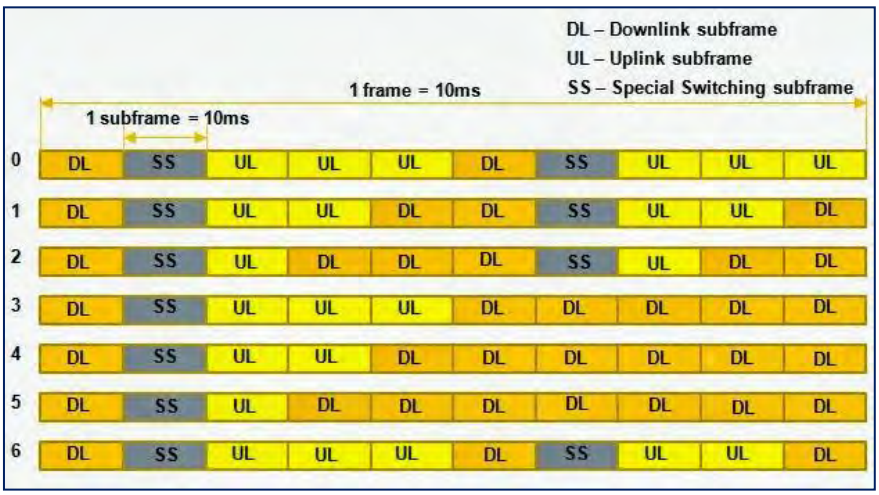


Fig. 7: Uplink /Downlink subframe

Tanto para FDD como para TDD los símbolos OFDM se asignan a los recursos en base a bloques de recursos, (*Resource Blocks*) que es una cuadricula de elementos del mapa espacio frecuencia conexos formados por 12 subportadoras y 7 Intervalos pertenecientes a un slot. Ver figura.

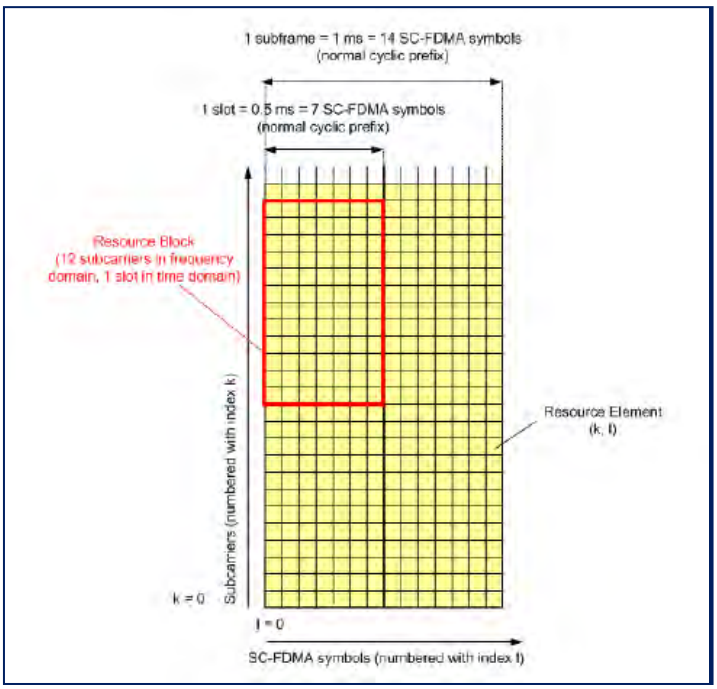


Fig. 8: Concepto de bloques de recurso

Según se puede ver, en el dominio de la frecuencia las 12 sub portadoras espaciadas los 15 KHz mencionados ocupan un ancho de banda de 180 KHz. Dado el ancho de banda máximo disponible en LTE, (20 MHz), el número de bloques puede llegar a 100 en el caso del AB máximo de 20 MHz. En LTE-A esta cifra se podría multiplicar por 5, en caso de disponibilidad de 100 MHz.

Como se ha visto, en el dominio del tiempo, a cada símbolo OFDM se le añade un prefijo de guardia. Un slot descendente consiste en 6 o 7 símbolos OFDM, dependiendo de la configuración del prefijo (extendido o normal).

Una vez definida la estructura de transmisión, veamos cómo se efectúa ésta.

Los datos se asignan a un dispositivo de usuario (UE) en términos de RBs, es decir un UE puede tener asignado un múltiplo de RBs que no tendrán que ser adyacentes necesariamente, de acuerdo con la cuadricula de recursos mostrada.

En el dominio del tiempo, cada decisión de planificación se toma en cada intervalo de transmisión de 1 ms. Todas estas decisiones se toman en la estación base y el algoritmo de planificación deberá tener en cuenta la calidad del enlace de los diferentes usuarios, la interferencia global, los requisitos de QoS, prioridades del servicio, etc. Estas son implementaciones específicas de cada operador.

La figura siguiente muestra un ejemplo de multiplexado tiempo-frecuencia de símbolos ODFMA para diferentes UEs.

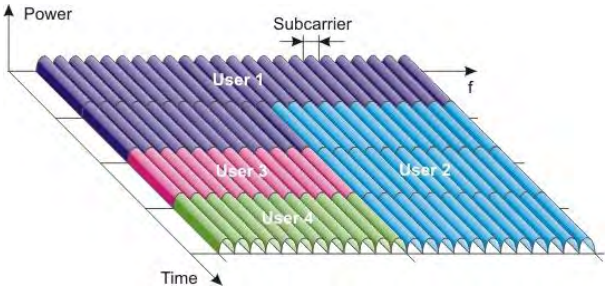


Fig. 9: Concepto de bloques de recurso

3.3.2. Enlace Ascendente

En el enlace ascendente LTE utiliza OFDMA con precodificacion DFT. En el caso de LTE-A hay una DFT por componente portadora apoyando asignación de recursos para cada portadora. Al igual que en caso de enlace descendente se trata de reutilizar al máximo los desarrollos de LTE.

Mientras OFDMA es óptimo para el enlace descendente, no lo es tanto para el ascendente, debido a que la menor relación potencia de pico a potencia media (*Peak to Average Power Ratio; PAPR)* en una señal OFDMA conlleva una peor cobertura ascendente y una difícil implementación de los amplificadores de potencia de los dispositivos (que requieren amplificadores lineales).

Por lo tanto el esquema de transmisión ascendente tanto en el modo FDD como TDD se basa en SC-FDMA (*Single Carrier Frecuency Division Multiple Access)* que tiene mejores propiedades. Es decir se prima la posibilidad de un diseño eficiente de los dispositivos de usuario, debido a la fácil implementación de los amplificadores de potencia.

Para generar la señal SC-FDMA, en LTE se utiliza el mecanismo DFT-Spread-OFDM (DFT-s-OFMD). El mecanismo se presenta en la figura siguiente:

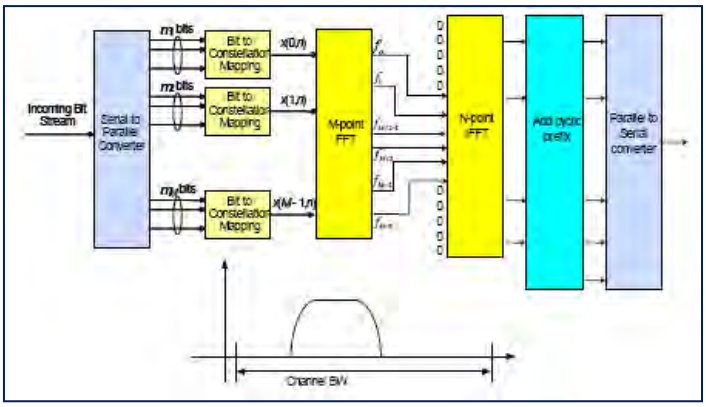


Fig. 10: Generación de la señal SC-FDMA

La diferencia entre OFDMA y SC-FDMA es que en esta última se efectúa un procesado DFT a la señal de entrada con lo que los símbolos modulados de la señal de entrada se expanden sobre todas las portadoras disponibles. Este proceso es diferente al OFDMA en donde cada subportadora solo lleva información relacionada con símbolos de modulación específicos. Ver figura siguiente.

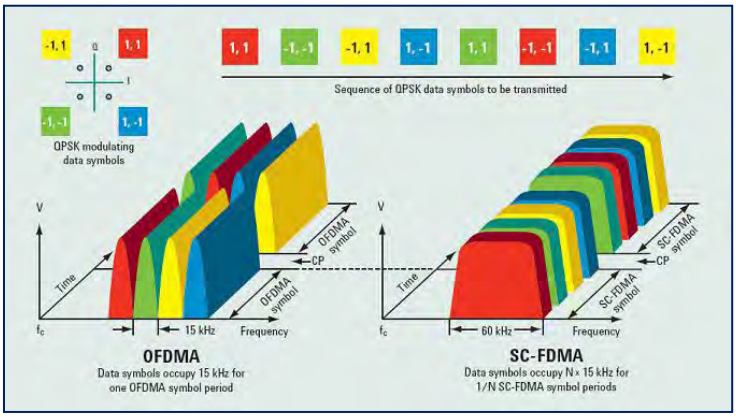


Fig. 11: Comparación señales OFDMA y SC-CDMA

La parametrización de la señal SC-FDMA en el enlace ascendente es similar al descendente, en ambos tipos de estructura de transmisión: FDD (tipo 1) o TDD (tipo 2), por lo que no se va a exponer.

La planificación de los recursos de enlace ascendente se efectúa en eNB, que es quien asigna dichos recursos a los terminales de usuario (UE) y les envía información acerca de los formatos de transmisión. Dicha decisión se hace en base de parámetros de calidad d servicio, estado del buffer de los UEs, calidad del canal, capacidades del propio terminal, etc.

Al igual que en el enlace descendente, en el ascendente los datos se asignan en múltiplos de un bloque de recursos (RB). Pero para facilitar las implementaciones de la DFT y de los sistemas de proceso de señal solo se permiten múltiplos de RBs en factores de 2, 3 y 5. Al igual que en el enlace descendente, LTE solo permite asignación de RBs contiguos. Aunque no se van a describir los canales del enlace, hay que mencionar que los intervalos de transmisión ascendentes son de 1 ms (igual que en descendente), y los datos de usuario se transmiten en el canal físico compartido de enlace ascendente (*Physical Uplink Shared Channel, PUSCH*).

El enlace ascendente permite aplicar diversidad de frecuencias, permitiendo que el UE salte de una frecuencia a otra en el siguiente slot del mismo subframe. También se permite este mecanismo a nivel sub-frame.

Merece mencionar la funcionalidad del canal de control de enlace ascendente (*Physical Uplink Control Channel*, PUCCH) el cual lleva información de control del enlace ascendente *(Uplink Control Information,* UCI), tal como información ACK relacionada con paquetes recibidos en el enlace descendente, indicación de calidad del canal, solicitudes de scheduling, información de utilización de técnicas MIMO, etc.

LTE también implementa un mecanismo de acceso aleatorio en el enlace ascendente que se utiliza para solicitar un acceso inicial, como parte de un cambio de responsabilidad (*handover*) o para restablecer una sincronización de enlace (*uplink*). 3GPP define un mecanismo de contención y otro de no contención, ambos aleatorios.

El enlace ascendente también dispone de la capacidad de retransmisión ARQ hibrido (*Hybrid ARQ,* HARQ). Cada eNodeB tiene la capacidad de solicitar la retransmisión de paquetes de datos recibidos incorrectamente. Para la implementación del protocolo se utilizan los canales específicos al efecto disponibles tanto en FDD como en TDD en los enlaces ascendente y descendente.

3.4. Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

Los sistemas MIMO son una parte esencial de LTE con el objeto de alcanzar los requisitos de tasa de datos y eficiencia espectral previstos. MIMO se refiere a la utilización de múltiples antenas tanto en el receptor como en el transmisor. La configuración básica para el enlace descendente es de 2x2, es decir dos antenas en el terminal y otras dos en la estación base. También se han especificado configuraciones 4x4. EL concepto MIMO apoya dos características específicas de LTE: multiplexado espacial (*Spatial multiplexing*), y diversidad en la transmisión (*Transmit diversit*).

- Multiplexación espacial.

  Permite la transmisión de diferentes tramas de datos simultáneamente dentro del mismo bloque de recurso (*Resource Block*). Las tramas pueden pertenecer a uno (SU MIMO) o a más usuarios (MU-MIMO). En el primer caso se incrementa la tasa de datos del usuario mientras que en el segundo se aumenta la capacidad total del enlace radio.

  En la figura siguiente se muestra el mecanismo descrito. Se observa que las antenas receptoras reciben los datos provenientes de todas las antenas transmisoras. Para que el mecanismo sea eficiente hace falta que las antenas estén suficientemente decorreladas.

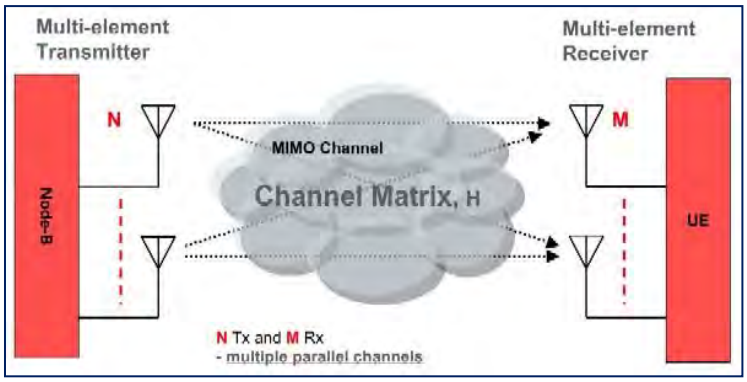


Fig. 12: Multiplexacion Espacial

En un caso real, en las implementaciones prácticas de MIMO, las tramas de datos están afectadas de un factor de peso y sumadas de forma que cada antena transmite una combinación de las tramas de datos.

- Diversidad de transmisión.

MIMO también puede utilizarse para incrementar la robustez de la transmisión radio. Estos esquemas se encuentran especificados en WCDMA Release 99, y forman parte de LTE. En este caso cada antena de transmisión transmite la misma trama de datos por lo que el receptor recibe réplicas de la misma señal. Esto hace que aumente la relación señal a ruido en el receptor lo que es especialmente deseable en escenarios de fading. Para aumentar este efecto se añade a la señal, antes de su transmisión, una codificación especifica de la antena.

LTE aplica MIMO de forma diferente en el enlace descendente y en descendente.

- MIMO en enlace descendente. LTE soporta hasta 7 modos de transmisión distintos, que pueden ajustarse de acuerdo a las condiciones del canal, requisitos de tráfico y capacidad del UE.
- MIMO en enlace ascendente. Como efecto diferencial, en este caso las técnicas MIMO tienen en cuenta las complejidades propias del terminal de usuario. Además se suele implementar MU-MIMO de forma que múltiples usuarios puedan transmitir simultáneamente dentro del mismo bloque de recursos (RB). Esto se denomina acceso múltiple por división espacial (SDMA). El esquema requiere que el UE utilice solamente una antena, lo que es una ventaja a la hora del diseño de los terminales. Caso de disponer de dos antenas, se utilizaría solamente la que ofreciera mejor condiciones radio con el nodo. La decisión de que antena utilizar la toma el UE de acuerdo a la realimentación que se recibe del nodo correspondiente.

Una mejora de LTE-A sobre LTE es la posibilidad de implementar soluciones MIMO de 8x8 en el enlace descendente y 4x4 en el ascendente. Además como se verá más adelante, LTE-A ofrece 9 modos de transmisión (TMs) en enlace descendente, en vez de los 7 de LTE.

4. 3GPP Release 10 (4G): LTE-Advance.

Algunas de las características de LTE-A ya se han descrito en LTE a modo de introducción, por lo que no se van a volver a repetir.

Al igual que LTE, la arquitectura de la red E-UTRAN para LRE-Advanced tiene como núcleo al eNodeB (eNB) que proporciona la interfaz a nivel radio con los planos de usuario y de control y con el terminal de USR (ET). Cada uno de los eNBs es un componente lógico que sirve a una o varias celdas de la red E-UTRAN. Al igual que LTE, la interfaz entre núcleos se realiza a través de una interfaz definida (X2). En LTE-A existen los HeNBs también denominados *femtocells* y que se pueden considerar nodos de bajo coste que sirven para mejorar el comportamiento del sistema en entornos interiores (indoor). Estos se pueden conectar a los EPCs directamente o mediante gateways.

4.1. Gestión del espectro y del ancho de banda.

Mientras en LTE se utilizan 20 MHz de ancho de banda, en LTE-Advance se podrían utilizar anchos de banda hasta 100 MHz en el siguiente espectro de frecuencias:

- 450-470 MHz: identificado por la WRC-07 para uso de sistemas IMT

- 698-862 MHz: Región 2 y 9 Países de la Región 3.
- 790-862MHz: Región 1 y resto Región 3.
- 2.3-2.4 GHz: Globalmente para sistemas IMT
- 3.4-4.2 GHz
- 4.4-4.99GHz

4.1.1. **Agregación de portadoras. (*Carrier Aggregation*)**

Para conseguir el ancho de banda de 100 MHz y a la vez la compatibilidad con LTE, el sistema LTE-Advance utiliza el concepto de agregación de portadoras. El esquema consiste en agrupar varias componentes de portadoras de LTE (*Component Carriers, CC*) por ejemplo de hasta 20 MHz hasta sumar un total de 100 MHz. Esto permite que los dispositivos LTE puedan seguir viendo su espectro como portadoras separadas.

Como no siempre será posible que un Operador consiga 100 MHz de espectro contiguo, por lo que LTE-A prevé mecanismos de agregación de portadora no contigua e incluso en bandas diferentes.

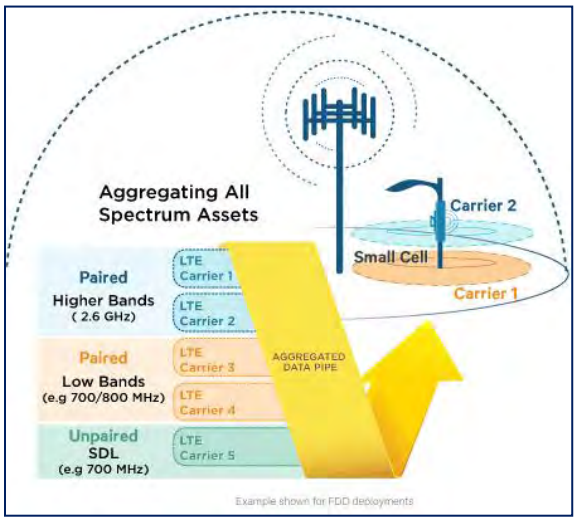


Fig. 13: Agregación de portadora

4.1.2. <u>Compartición del espectro</u>

La agregación de portadoras ofrece la posibilidad a un operador ofrecer hasta 100 MHz de ancho de banda a sus clientes. No obstante en ciertos escenarios compartir el espectro es otra opción para conseguir aumentar el rendimiento del sistema. El mecanismo de compartición de espectro está abierto también a otras tecnologías de acceso radio (*Radio Access Technology*, RAT), tales como HSPA, WiMAX, LTE en ciertas zonas específicas. Para un mismo operador, esto proporciona flexibilidad para decidir que RAT ofrecer a sus clientes en base a la calidad de servicio y demás parámetros de configuración del enlace. Los nodos eNB son los encargados de gestionar cada acceso a través de la función de gestión de recursos radio (*Radio Resource Management, RRM*). En LTE-A se introduce un grado de complejidad al ofrecer la opción de solicitar recursos a otro RAT para efectuar la agregación de portadoras en caso necesario. Es decir, en LTE-A se puede pedir prestado espectro para aumentar el rendimiento del sistema. Esta posibilidad la implementa una función RRM de más alto nivel, denominado JRRM (*Joint RRM*). Esto es lo que muestra la figura siguiente.

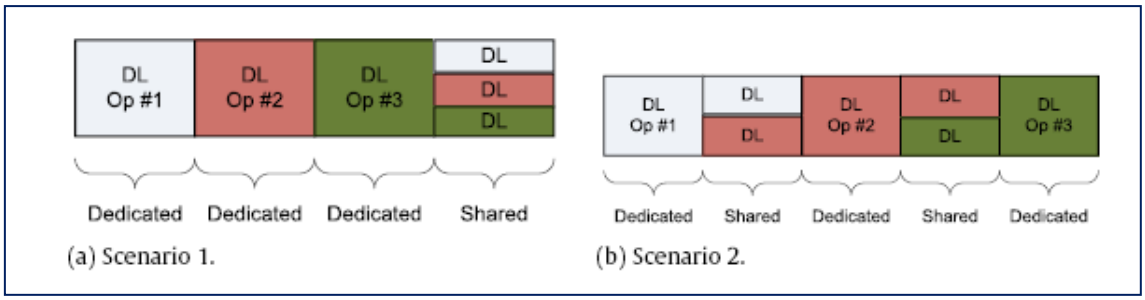


Fig. 14: Gestión de recursos radio

4.2. Canales de Control

Para utilizar el espectro disponible, los dispositivos deben tener acceso a canales de control tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente, además de otras señales de referencia. Por ello en LTE, cada componente de portadora debe tener asociado un canal de control. En LTE-A el canal de control se puede asocial a cada agrupación de portadoras (hasta 100 MHz). Con ellos los proveedores de servicio pueden planificar una migración fácil de LTE a LTE-A controlando a que bandas pueden acceder dispositivos LTE y LTE-A.

4.3. Concepto MIMO en LTE-A: Enhance MIMO

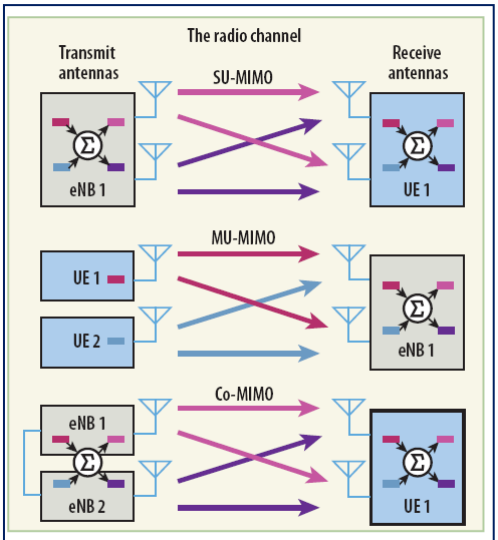
La capacidad MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) es una técnica clave en cualquier sistema de telefonía móvil, y se refiere a la posibilidad de utilizar múltiples antenas tanto en recepción como en transmisión. Por lo tanto los equipos de usuario y las estaciones base tienen diversidad de elementos radiantes para que las capacidades MIMO estén disponibles tanto en el enlace descendente como el ascendente con objeto de contribuir al aumento de la tasa de datos y la eficiencia espectral de la transmisión.

En LTE-A se utiliza la denominada MIMO mejorada (*Enhance MIMO*) para poder cumplir los requisitos establecidos en IMT-Advance. En este sentido, se mantienen las capacidades MIMO de LTE, tales como: conformación de haz y multiplexado y diversidad espacial pero se prevén mejoras para incrementar el rendimiento de la transmisión en términos de potencia pico, media y comportamiento en los bordes de la celda.

Para ello hace falta una información de realimentación en la estación base sobre el estado del canal (*Channel State Information*, CSI) de forma que el sistema se pueda adaptar a las condiciones radio del mismo. En TDD esto se puede lograr fácilmente al utilizar la misma portadora para transmisión y recepción. En FDD se necesita la información de realimentación del enlace opuesto debido a la asimetría de este modo de operación. La movilidad del terminal introduce un factor de complejidad adicional, ya que la información CSI puede llegar obsoleta.

En definitiva, las técnicas multiantena en un escenario multiusuario tienen como resultado que las tramas de datos se entregan de una forma “espacialmente multiplexada” a los diferentes usuarios, por lo que es necesario explotar todas las posibilidades de MIMO. Por ello, LTE-A tiene la capacidad de acceso SDMA (*Space Division Multiple Access*) de forma que el diagrama de radiación de la estación base se adapte para que cada usuario disponga de la máxima ganancia en su dirección. La inteligencia para la ejecución de este tipo de acceso reside en las estaciones base al recolectar información CSI de cada UE y decidir la asignación de recursos en base a dicha información.

Las figuras siguientes muestran los conceptos de MIMO mejorado: SU-MIMO (Single User MIMO), MU-MIMO (Multi User MIMO), MIMO Cooperativo.



3. Examples of single-user (SU), multiple-user (MU), and cooperative (Co) MIMO systems.

Fig. 15: Configuraciones MIMO

- SU-MIMO: permite seleccionar técnicas de multiplexado espacial, diversidad de transmisiones además de conformación de haz.
- MU-MIMO: permite las mismas capacidades que SU MIMO pero con más de un usuario.
- Cooperative-MIMO: especialmente útil en escenario de borde de cobertura celular. Varias estaciones base coordinadamente pueden efectuar transmisión y recepción coordinada. Esta técnica se denomina también *Cooperative Multipoint.*

Tanto SU-MIMO como MU-MIMO se suelen denominar también Single-site MIMO. Este concepto se refiere a cualquier comunicación MIMO que tiene lugar entre una estación base y uno o múltiples usuarios (UEs) y se implementan tanto en el enlace ascendente como en el descendente.

Técnicas Single- site MIMO.

En el caso de un único usuario, las dimensiones espaciales adicionales introducidas por MIMO en cualquier sistema de comunicaciones inalámbrico se pueden usar de tres formas diferentes:

- Diversidad en TX y RX para mejorar la fiabilidad de la transmisión.
- Multiplexado espacial para aumentar la tasa de datos.
- Conformación de haz para mejorar la cobertura.

La técnica MIMO debe actualizarse en cada *"frame"* de una trama LTE-A con objeto de adaptarse continuamente a las condiciones del canal.

MIMO en enlace descendente

En este caso el número de antenas tanto en transmisión como en recepción en la configuración MIMO de referencia es 4x4, pudiendo llegar a 8x8.

En estas técnicas multi-antena se utiliza una precodificación con objeto de mapear los símbolos de modulación sobre las diferentes antenas.

Es posible la utilización de diversidad y de multiplexado espacial. Para minimizar las interferencias intra-celda, MU-MIMO se basa en al menos una de las siguientes técnicas: conjunto de haces fijos, haces específicos para los usuarios o una combinación de ambos.

- Conjunto de haces fijos: permite asociar un haz a un usuario mediante un esquema de vectores pre-codificados, compartiendo tiempo y frecuencia, pero con diferente acceso espacial. hace falta feedback del UE para monitorizar la operación del sistema y modificarlo de acuerdo con las condiciones de movilidad del UE.
- Conformado de haz especifico de usuario: la estación base puede ajustar la transmisión del enlace descendente de acuerdo a las condiciones del canal. La idea de LTE-A es extender la técnica de conformado de haz para un usuario, actualmente disponible en LTE, a múltiples usuarios, soportando a la vez las técnicas de diversidad de transmisión y multiplexado espacial. Existen diferentes estrategias para conseguir esto, tales como *zero-forcing* (ZF), *Dirty Paper Coding* (DPC) todas ellas basadas en esquemas de precodificacion no basadas en libros de código (*non-codebook precoding*) que es el caso de la técnica descrita anteriormente.

LTE (R8) utiliza un esquema de señales de referencia comunes (*Cell Specific Reference Signals*, CRS) para conseguir la conformación del haz.

LTE-A (R10) necesita nuevas señales de referencia para conseguir el modo de MIMO indicado anteriormente: señal de referencia de información de estado del canal CSI-RS y señal de referencia de demodulación especifica del usuario DM-SR. Esta última se aplica a las tramas de datos previamente a la precodificación.

LTE-A permite también multiplexado espacial y diversidad en la transmisión. Ambos conceptos están relacionados con las técnicas MIMO anteriormente descritas.

5. Conclusión

Se han presentado las tecnologías de telefonía móvil desde la 2G hasta la 4G indicando las características de los terminales de usuario, estaciones base y redes de comunicación.

Desde el antiguo estándar GSM que permitía efectuar llamadas y mensajes cortos hasta los terminales 4G, altamente sofisticados y optimizados para aplicaciones multimedia han pasado solo 10 años. Esta generación está basada en la iniciativa IMT-A la cual tiene como objetivo:

- Un alto grado de comunalidad, flexibilidad y eficiencia independientemente del operador.
- Posibilidad de itinerancia global.
- Tasas digitales que permiten aplicaciones y servicios avanzados de usuarios de alta y baja movilidad

Ya no se puede hablar de telefonía móvil, sino de terminales altamente sofisticados que permiten el intercambio de información multimedia entre usuarios y comunidades interconectadas a través de redes de alta capacidad.

Lo que está claro es que si en 10 años la evolución de la telefonía ha sido espectacular, nadie puede predecir ahora cómo serán los estándares, sistemas y aplicaciones disponibles en el año 2025, cuando por ejemplo la Armada tenga un par de fragatas F-110 en servicio.

La tecnología en términos de telecomunicaciones y redes sigue las pautas de los estándares civiles, que a su vez están inducidos por la demanda comercial de necesidades crecientes de ancho de banda, movilidad, rapidez e interoperabilidad. Todo ello supone un reto para los ingenieros de requisitos.

Desarrollos que faciliten las operaciones de toma y despegue de aeronaves en buques

CF (CIA) José María Riola Rodríguez
Doctor Ingeniero Naval

La toma en buques de vehículos autónomos sin tripular o tripulados es una constante en las necesidades de muchos buques, plataformas offshore y desde luego en cualquier Armada. Es por ello que estos aspectos aparecen en cualquier estudio de prospectiva de los países encuadrados bajo el paraguas de la OTAN y de la EDA.

En el mundo del comportamiento del buque en la mar o "*seakeeping*" se denomina período quiescente (PQ) al tiempo de tranquilidad o de menor movimiento durante la navegación. Durante estos períodos es más fácil realizar ciertas operaciones que exigen unas condiciones más restrictivas para asegurar la misma, como pueden ser el aterrizaje o despegue de helicópteros o UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*) sobre las cubiertas de vuelo, el lanzamiento y recuperación de lanchas tipo RHIBS, entrada en dique de plataformas navales de las unidades de infantería, USV´s (*Unmanned Surface Vessels*)… Debido a este hecho existe una necesidad creciente de aumentar las limitaciones naturales de las operaciones buque–sistema, debidas al mal tiempo y particularmente al estado de la mar.

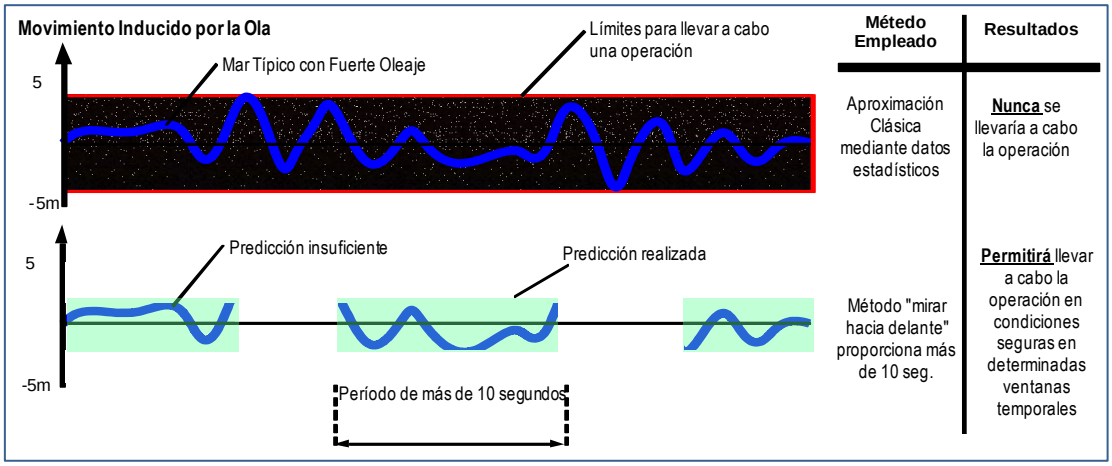


Figura 1 - Métodos de Predicción

Un claro ejemplo que define la importancia de esta línea de actuación son los estudios que se están realizando dentro del NATO *Naval Armaments Group Sub-group 61 on Virtual Ships* que tiene por objeto mejorar la predicción de estos periodos de reposo.

1. Estudios internacionales

Los mejores resultados que se han llegado a conseguir en la predicción de PQ hablan de predicciones de ola incluyendo su deformación con un adelanto de hasta 30 segundos (Morris et. al. 1997) [8] y se basan en el denominado método de "Tiempo Fijo", donde las mediciones se realizan mediante sensores situados en posiciones fijas con respecto al lugar donde queremos llevar a cabo la predicción, permitiendo calcular en tiempo real, mediante transformadas de Fourier la propagación de las olas ya medidas. Este método asume para simplificación del mismo una predicción desde una única dirección, aunque el sistema se puede extender a situaciones multidireccionales con un proceso de superposición de sistemas de ondas / olas unidireccionales. Además, se asume que el sistema de olas es un proceso lineal y no se llegan a tener en cuenta los efectos de segundo orden.

Figura 2 - Cubierta de Vuelo

Un sistema de olas contiene un amplio rango de componentes en frecuencias y se debe hacer notar que tanto la magnitud, como la fase y frecuencia de estos componentes varían con el factor tiempo, teniendo en cuenta que el propio medio en que se dan causa que cada una de estas componentes viaja a diferente velocidad. Con objeto de llevar a cabo el DSWP (*Deterministic Sea Wave Prediction*) es necesario realizar medidas de la superficie en un emplazamiento fijo de forma que se identifiquen las principales características del mismo, para poder comprobar la calidad de la predicción con el método empleado.

Hoy en día es posible conocer a través de imágenes radar la topografía del mar circundante dentro de un rango de hasta 3 millas náuticas con la calidad suficiente que precisan estos estudios, a pesar de ello aún no se consigue garantizar su viabilidad.

Nieto-Borge et al. (2004) [9] propone usar imágenes radar, mediante la transformada 3D de Fourier, filtrado en el dominio de frecuencias, y vuelta al dominio temporal mediante transformada 3D inversa, para obtener un mapa de la superficie del mar. Este trabajo nos presenta la posibilidad de invertir el denominado “clutter marino” (rizos de la mar de pocos centímetros que causan este efecto en las imágenes del radar y que normalmente se pretenden eliminar mediante filtros) que surge por el efecto “Bragg” y elaborar mapas de elevación de la superficie del mar que son de utilidad para la predicción de los PQ.

Por otro lado Dannenberg (2009) [5] ya habló de horizontes de predicción de hasta dos minutos (con estados de mar de baja intensidad), tal y como se ha probado en el proyecto OWME (*On Board Wave and Motion Estimator*) en el que se emplea el sistema WAMOS II (*Wave Monitoring System*) que conectado con un radar en Banda X, permite definir el espectro de olas, parámetros de la mar y de corrientes superficiales. Este proyecto ha sido liderado por MARIN y está recogido dentro de la red intergubernamental EUREKA formada por 38 países y la Comisión Europea, que promueve la realización de proyectos de I+D+i en colaboración y orientación al mercado.

2. Equipos existentes

Es de sobra conocido que los radares náuticos en Banda X que se emplean para navegación pueden ser adicionalmente empleados como herramienta que permita determinar las propiedades de las olas. El sistema de monitorización de olas WAMOS II, es un software que se carga en un PC, este software unido a la información que se obtiene del radar en Banda X permite extraer información de las olas identificadas por el radar, determinando la dirección de la ola, parámetros del estado del mar y de las corrientes superficiales. El sistema calcula el espectro bidimensional de la ola y deduce su altura, periodo y longitud.

El sistema ORPHEUS (*Onboard Risk Performance Hazard Evaluation*) desarrollado por QinetiQ, provee al operador de información de cómo el buque se va a comportar ante una gran variedad de escenarios de mala mar, proveyendo al operador del puente de gobierno con suficiente información para que pueda evaluar el riesgo de las operaciones que tiene previsto acometer cuando el buque está en condiciones de mar adversas.

El sistema HMS (*Helideck Monitoring System*) fue diseñado para mejorar las condiciones de vuelo y aumentar la seguridad de los tripulantes proporcionando en tiempo real una monitorización de las condiciones ambientales del tiempo y el movimiento de la pista empleando datos procedentes de sensores distribuidos en la cubierta de vuelo (velocidad del viento, dirección del mismo, temperatura, presión barométrica…).

3. Otros medios de ayuda

Adicionalmente a los sistemas de predicción expuestos que permiten en mayor o menor medida monitorizar los principales movimientos que afectan al buque en relación al movimiento inducido por las olas, existen otros sistemas que contribuyen a garantizar la seguridad de este tipo de operaciones. Para ello se establece que previo a la llegada de la aeronave (con unos quince minutos de antelación) el buque comienza la fase de preparación, según la aeronave se acerca y en la medida que la misión lo permite, el buque debe establecer condiciones de rumbo y velocidad que faciliten en cuanto al viento y al movimiento propio la toma en la pista de vuelo (la mayoría de las fuentes indican como aconsejables velocidades del buque de 6 a 10 nudos), y una vez el helicóptero toma suelo, se debe de llevar a cabo el aseguramiento del mismo, esta acción puede presentar serias dificultades en función del estado de la mar, existen fuentes documentadas de que estas actividades pueden llevarse a cabo con un estado SSN4 y balance máximo de hasta 10º.

Adicionalmente de estas primeras medidas existen en la actualidad diversos sistemas que ayudan al aterrizaje, anclaje y movimiento al hangar, cumpliendo con el STANAG 1276 (*Shipborne Helicopter Harpoon / Grid Rapid Securing System* - ratificado por España).

Figura 3 - Sistema de ayuda RAST

Citaremos entre ellos el RAST (*Recovery Assist, Secure and Traverse System*), el ASIST (*Aircraft Ship Integrated Secure and Traverse System*) o el SAMAHE (*Système d'Aide à la MAnutention d'Hélicoptères Embarqués*).

4. Determinación de periodos quiescentes

Para llevar a cabo el modelado de los movimientos del buque hay que tener en cuenta su movimiento en el fluido, que a su vez está influenciado por el efecto del oleaje. El buque al no contar con ningún tipo de sujeción posee seis grados de libertad que implican seis ecuaciones diferenciales no lineales de movimiento acopladas entre sí. Se suelen tomar el siguiente conjunto de ecuaciones (*Lloyd*, 1998 [3]; *Fossen*, 2002 [2]) como base del principio de modelado, estas ecuaciones sugieren un modelo que se considera conveniente para llevar a cabo el estudio de las mismas.

$$m + a_{11}\ x_1 + b_{11}x_1 = F_1$$
$$m + a_{22}\ x_2 + b_{22}x_2 + a_{24}x_4 + b_{24}x_4 + a_{26}x_6 + b_{26}x_6 + c_{26}\ x_6 = F_2$$
$$m + a_{33}\ x_3 + b_{33}x_3 + c_{33}x_3 + a_{35}x_5 + b_{35}x_5 + c_{35}\ x_5 = F_3$$
$$a_{42}x_2 + b_{42}x_2 + (I_{44} + a_{44})x_4 + b_{44}x_4 + c_{44}x_4 + a_{46}x_6 + b_{46}x_6 + c_{46}\ x_6 = F_4$$
$$a_{53}x_3 + b_{53}x_3 + c_{53}x_3(I_{55} + a_{55})x_5 + b_{55}x_5 + c_{55}x_5 = F_5$$
$$a_{62}x_2 + b_{62}x_2 + a_{64}x_4 + b_{64}x_4 + (I_{66} + a_{66})x_6 + b_{66}x_6 + c_{66}x_6 = F_6$$

Si se considera la simetría del mismo, se puede llegar a desacoplar en dos grupos e incluso se pueden aproximar por ecuaciones lineales. Aunque debido a su gran complejidad, es posible en algunos casos realizar el modelado ignorando ciertos movimientos debido a su pequeña magnitud en comparación con el resto de movimientos (avance y deriva, mientras que se asume que la guiñada es contrarrestada por las fuerzas de gobierno del timón). Por tanto los movimientos fundamentales empleados para este estudio son los correspondientes al balance, cabeceo y arfada.

Los requisitos de partida que se deben de tomar como referencia son los límites operacionales señalados por la STANAG 4154 (*Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process*) para aterrizaje y despegue de helicópteros en buques, así como el STANAG 4194 (*Standardized Wave and Wind Environments and Shipboard Reporting of Sea Conditions*) que recoge los estados de mar definidos a escala internacional.

Concretamente este STANAG 4154 habla de un máximo de 2,5º de balance, 1,5º de cabeceo, y una velocidad vertical de la pista de 1,0 m/s medidos en valores medios cuadráticos (r.m.s.). Como ejemplo ilustrativo podemos indicar con estos datos que si consideramos una embarcación con una pista de 15 metros de manga, el movimiento vertical en los bordes de la pista llegarían a 0.92 metros pico a pico y si la pista estuviera a 50 metros del centro de gravedad del buque, el movimiento vertical causado por el cabeceo sería de 3.70 metros pico a pico.

Otra de las aproximaciones que suele realizarse en relación a las olas es asemejarlas a ondas mecánicas, donde simplificando el proceso se pueden definir dos movimientos, el primero es el movimiento circular debido a la oscilación del medio movido por la onda y el segundo es la propagación de la onda que traslada el fenómeno con una dirección y una velocidad de onda. Los parámetros básicos que determinan las características de las olas son (suponiendo olas potenciales de perfil senoidal, moviéndose en zonas de gran profundidad cuya relación "profundidad / longitud de ola" es mayor que 0,5), asumiendo que en aguas profundas (>λ/2) la velocidad de onda es proporcional a la longitud de onda mientras que en aguas superficiales (<λ/2) la velocidad sólo depende de la profundidad:

- Distancia entre dos crestas denominado longitud de onda (λ).
- Altura de la ola definida como la diferencia de altura entre cresta y valle (H).
- Amplitud o distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación (A = H/2).
- Pendiente (δ) cociente de la altura y la longitud de onda (δ = H / λ).
- Período (τ) tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto.

- Velocidad de onda cociente entre la longitud de onda por el período ($c = \lambda / \tau$) donde para aguas profundas la velocidad (c) es proporcional a la longitud de onda (λ).
- Longitud de onda viene dada por la ecuación $\lambda = 2 \times \pi \times g/\omega^2$ donde ω es la frecuencia de las olas (rad/s).
- Pendiente máxima del perfil de ola ($\eta = \pi H / \lambda$).

Existen diversas publicaciones en cuanto a la cuantificación del tiempo de predicción necesario para que sea operativamente práctico. Dependiendo del autor se habla: Colwell (2004) [1] habla de 6 segundos; Kolway y Coumatos (1975) [6] dice que con SSN6 es posible aterrizar y asegurar el helicóptero si la duración del PQ está en el rango 6-10 segundos; Sherman (2007) [4] indica que la anticipación debe ser de entre 8 a 10 segundos en cabeceo, y 20 segundos en balance.

En recientes estudios se identifican hasta tres tipos de operaciones para los que se pueden determinar diferentes requisitos de predicción, resumiendo podemos hablar de los siguientes contextos de predicción:

- Inferiores a treinta (30) segundos para operaciones tipo: aeronaves de ala fija - aterrizaje en portaaviones, helicópteros – aterrizaje y despegue, VERTREP…
- Aproximadamente un (1) minuto para operaciones tipo: manejo de carga, lanzamiento y recogida de pequeñas embarcaciones tripuladas, reabastecimiento en la mar, operaciones de disparo, lanzamiento y recogida de vehículos no tripulados…
- Superiores al minuto para operaciones tipo: lanzamiento y recogida de sonar remolcados, embarque y desembarque de embarcaciones anfibias en buques tipo LPD…

5. Metodologías

Podemos hablar de que existen actualmente dos metodologías claramente diferenciadas para llevar a cabo la predicción de PQ.

La primera de ellas se podría definir como “mirar hacia atrás (*look back*)”, en el sentido de que va registrando datos del movimiento del buque y emplea la historia reciente de la plataforma para predecir los movimientos futuros. Esta metodología es la más desarrollada, y la bibliografía disponible habla de horizontes de predicción entre 6 y 11 segundos.

La segunda metodología, más moderna y prometedora, “mira hacia adelante (*look forward*)”, se basa en llevar a cabo la medida a distancia de las olas incidentes por la proa y amura del barco. Esta metodología requiere la ejecución de tres tareas claramente diferenciadas. Primero hay que medir la altura de la ola incidente a suficiente distancia, para poder tratar la información que se genere desde la misma. En segundo lugar es necesario predecir cómo va a ser su propagación y la consiguiente deformación de la misma hasta que alcance al barco. Finalmente, hay que calcular cómo va a ser la respuesta de la plataforma, sus movimientos, cuando esta ola deformada llegue al casco. Estas tareas quedan reflejadas en la siguiente ilustración que han sido obtenidas de los trabajos publicados por Riola y Girón-Sierra [10].

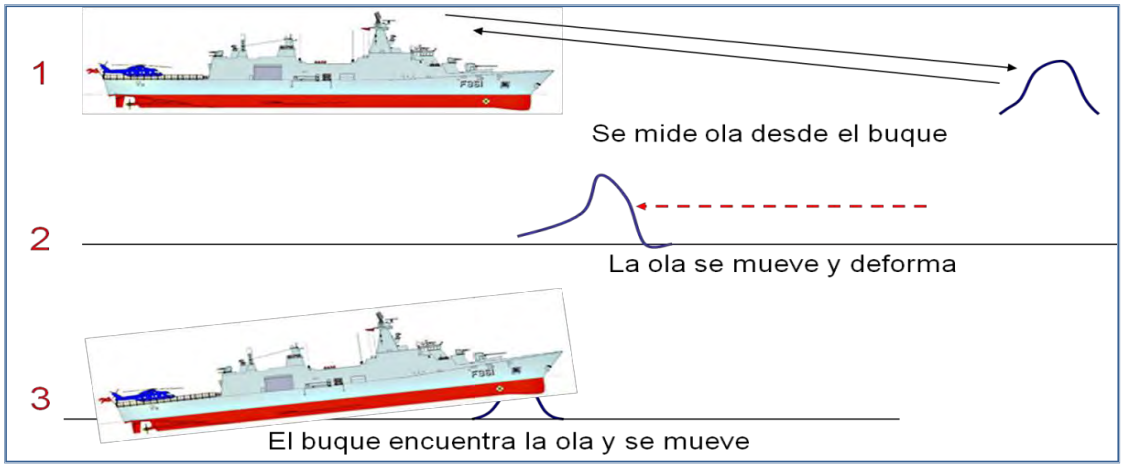


Figura 4 - Esquema del Fenómeno

6. Proyecto nacional de I+D

A nivel nacional se impulsó un programa de I+D titulado QPP (Predicción de Periodos Quiescentes) que se desarrolló en la EDA [11] como programa de categoría B enmarcado en la CapTech ESM1 (*Naval Systems & Their Environment*), en el que participaron Francia, Italia, Finlandia y España, cuyo principal objetivo consistió en la realización de un estudio que permitiese la automatización de la toma de contacto de aeronaves, tripuladas o no, en buques preparados para este fin.

La propuesta española, como parte del proyecto QPP, consistió en el uso de "*wavelets*" en la determinación de la propagación de las olas, y conjuntar esto con el tratamiento de las imágenes de radar en banda X.

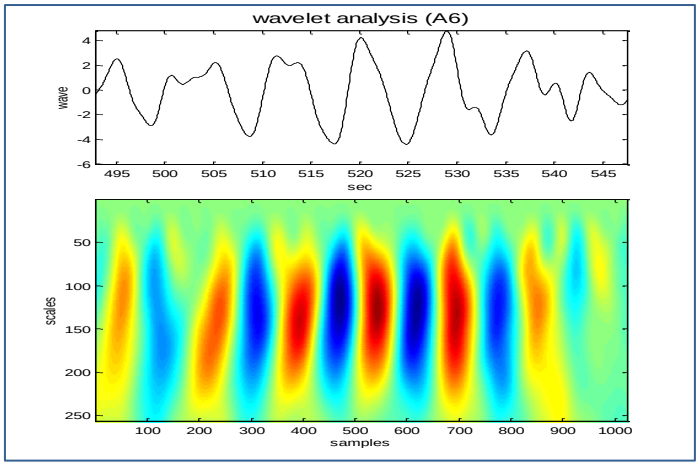


Figura 5 - Escalograma del análisis de un tren de olas con Wavelets

Existe una amplia bibliografía explicando las wavelets, entre ellas destaca (Vetterli y Kovacevic) [12], mientras que una de las primeras publicaciones en las que se hace mención conjunta del empleo de wavelets y olas es la que publicaron Lee y Kwon en 2003 [7] "*Wave Profile Measurement by Wavelet Transform*".

Una wavelet es una forma de onda de duración limitada que tiene un valor promedio cero, mientras que la transformada de Fourier consiste en descomponer una señal en funciones de senos de varias frecuencia, la wavelets consisten en descomponer una señal en versiones escaladas móviles de la original. Por tanto de forma resumida la transformada de wavelet, vista como un proceso matemático, es una ope-

ración lineal que descompone una señal compleja en bloques elementales que aparecen en diferentes escalas o resoluciones, donde estos bloques pueden ser generados de una forma sencilla, simplificando su análisis y permitiendo limpiar la señal de interferencia externa.

El análisis de wavelets no sólo nos da las frecuencias principales, sino que nos indica cuándo ocurren y cuál es su duración, la transformada de wavelets fue diseñada originalmente para "estudiar señales no estacionarias". Se trata de un análisis de tiempo-frecuencia, y mediante el cual se puede llegar a eliminar muchas veces los ruidos sin degradación, como alternativa a su uso se podría aplicar transformadas de Fourier a ventanas temporales, complicando la selección de la misma. Recordemos que dicha transformada de Fourier (WFT - Windowed Fourier Transform) representa una muy útil herramienta de análisis, y es muy empleada para el análisis de señales unidimensionales e imágenes, descomponiendo las mismas en un conjunto infinito de señales periódicas seno y coseno de diferentes frecuencias y amplitudes.

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_0 t + b_k \operatorname{sen} k\omega_0 t$$

Donde la frecuencia se define como w0 = 2 Π / T0 . Conforme se añaden más elementos al sumatorio, la señal se aproximará más a la original y el nivel de detalle mejora al ser la variable en el espacio de la frecuencia ω mayor.

$$C\ (escala, posición) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\varphi\ (escala, posición, t)dt$$

Figura 6 - Esquema Transformada Wavelet

Existen diversos tipos de wavelets, entre ellas destacamos las de Gauss, Morlet, Sombrero Mejicano… cuyas ecuaciones y representaciones se indican a continuación.

$$Gauss: F = Cp\ e^{-x2}$$
$$Morlet: \psi(x) = \left(e^{-x2/2}\right) \cos(5x)$$
$$Sombrero\ Mexicano: \psi(x) = \left(2\pi^{-1/4}\right)(1 - x^2)\left(e^{-x2/2}\right)/\sqrt{3}$$

La función wavelet base ha de cumplir dos condiciones para poder ser empleada:

- Condición de admisibilidad: que expresa que la función está localizada en el tiempo o en el espacio; que la transformación con esa función sea invertible; que su transformada de Fourier es un filtro continuo paso banda, con rápido decaimiento hacia el infinito y hacia ω = 0; y que la función debe tener un valor cero en la frecuencia cero.
- Condición de regularidad: que expresa que la wavelet madre ha de ser localmente suave y concentrada en los dominios del tiempo y la frecuencia.

Estas transformadas se han empleado en otras aplicaciones, como son el estudio de las olas excepcionales en relación a sus características pero no en cuanto a sus ocurrencias que son bastante frecuentes. Dichas olas según la teoría lineal para un estado de mar determinado estacionario la altura extrema es de aproximadamente dos veces la altura significativa que se corresponde con la altura que observan los marineros desde el puente de gobierno. Tienen una muy corta duración (1/4 de periodo de ola) es decir de 2 a 5 segundos. La previsión de la altura máxima se determina mediante la distribución de Rayleigh.

La primera diferencia que se aprecia entre ambos métodos, es que el análisis de Fourier está asociado al concepto de espectro o contenido de frecuencia de una señal, mientras que el análisis wavelet se asocia al concepto intuitivo de resolución o escala de la señal. Otra diferencia radica en que la transformada de Fourier descompone una señal mediante funciones base en una suma ponderada de senos y cosenos, mientras que la transformada wavelet emplea como funciones base a las wavelets, de frecuencia variable y duración limitada. La transformada wavelet de una señal que cambia con el tiempo depende de dos variables (frecuencia y tiempo) y por tanto para el análisis tiempo-frecuencia presenta ventajas frente al método tradicional de Fourier, sobre todo cuando se analizan señales con discontinuidades. La principal diferencia la encontramos en que las funciones de la transformada de Fourier no están localizadas en el espacio, mientras que las funciones wavelet sí lo están. Finalmente la transformada de Fourier acepta el hecho de que las señales a analizar son de duración infinita o periódicas, mientras que las wavelets no aceptan este hecho.

7. Referencias

1 Colwell, J. L. (2004). Flight Deck Motion System (FMDS): Operating Concepts and System Description. *Defence R&D Canada, Technical Memorandum,* DRDC Atlantic TM 2004-003.

2 Fossen, T.I. (2002). Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. *Marine Cybernetics AS*. Trondheim, Norway.

3 Lloyd, A.R.J.M. (1998). *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*. A.R.M.J. Lloyd, Gosport, Hampshire, U.K.

4 Sherman, B. W. (2007). *The Examination and Evaluation of Dynamic Ship Quiescence Prediction and Detection Methods for Application in the Ship-Helicopter Dynamic Interface*. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.

5 Dannenberg, J., Reichert, K. and Van den Boom, H. (2009). Wave Profiles Derived from Nautical X-band Radar as Data Source for Ship Motion Prediction. In: *Proc. 11th Workshop on Wave Hindcasting & Forecasting*.

6 Kolway, H. G. and Coumatos, L. M. J. (1975). State-of-the-Art in Non-Aviation Ship Helicopter Operations. *Naval Engineers Journal*, april, 155-164.

7 Lee, H.S. and Kwon, S.H. (2003). Wave Profile Measurement by Wavelet Transform. *Ocean Engineering*, 30, 2313-2328.

8 Morris, E. L., Zienkiewicz, H. K. and Belmont, M. R. (1997). Short-term Forecasting of the Sea Surface Shape. *International Shipbuilding Progress*, 45, 444, 383-400.

9 Nieto-Borge, J., Rodriguez, G., Hessner, K. and Izquierdo, P. (2004). Inversion of Marine Radar Images for Surface Wave Analysis. *J. Atmospheric Ocean Technology*, 21, 1291–1300.

10 Riola, J.M. y Girón-Sierra, J.M. (2010). Predicción de Periodos Quiescentes en Buques. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa*, 27, 21-23.

11 Subdirección General de Tecnología y Centros (2008). Los CapTechs de la Agencia Europea de Defensa. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa nº 21 Especial*, Madrid: Autor.

12 Vetterli, M. and Kovacevic, J. (1995)-(2007). *Wavelets and Subband Coding*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Reducción de la firma ir mediante la refrigeración de los gases de exhaustación en buques de guerra

CF (CIA) DR. José María Riola Rodriguez
AN (CIA) Julio Manuel Pernas Urrutia

Dicen que fue la Armada Canadiense a finales de los años 30 la primera que se preocupó de la reducción de la firma de sus buques con un camuflaje anti-iluminación de luz difusa en el rango visible. También se suele adjudicar este honor al submarino alemán U-480, ya que contaba con un revestimiento de caucho y una capa de bolsas de aire para no ser detectado por los sónares de los aliados.

Desde entonces la reducción de la firma es una disciplina de la táctica militar y las contramedidas pasivas, que cubre una amplia gama de técnicas utilizadas en plataformas aéreas, navales y terrestres, alcanzando incluso a los propios combatientes. El objetivo que se persigue es disponer de un camuflaje, por ejemplo, en diferentes rangos del espectro electromagnético, para no ser detectado con dispositivos radar, de infrarrojos, sonar…

En el caso del rango infrarrojo, se considera una banda entre el ojo visible y las microondas, es decir, de unas longitudes de onda entre 0,75 y 1000 μm. Al tener la radiación infrarroja una serie de características específicas relacionadas con la emisión y transmisión de calor, esta se emplea en múltiples aplicaciones de defensa, en particular en cámaras de detección y guiado de misiles anti-buque. Para contrarrestar esta amenaza será necesario reducir la firma del buque mediante la reducción de la emisión de calor al exterior.

Supervivencia del buque de guerra

A la hora de evaluar la capacidad de supervivencia del buque de guerra durante el proceso de diseño, habrá que considerar los siguientes aspectos [1]:

- Susceptibilidad.- Probabilidad de recibir impactos. Dependerá del espectro de energía emitido y/o reflejado.
- Vulnerabilidad.- Grado de deterioro alcanzado tras un ataque. Dependerá del nivel de compartimentado, tipo de estructura, etc.
- Siniestralidad.- Probabilidad de destrucción después de recibir un impacto.

Los conceptos de susceptibilidad y vulnerabilidad contribuirán de manera directa a la siniestralidad y supervivencia del buque en el sentido siguiente [1]:

$$Siniestralidad = Susceptibilidad\ x\ Vulnerabilidad$$
$$Supervivencia = 1 - Siniestralidad$$

Para conseguir una baja susceptibilidad o detectabilidad habrá que minimizar la cantidad de energía emitida y/o reflejada por el buque con el fin de reducir su influencia en el entorno, surgiendo de esta forma el concepto de *"firma"*.

Las firmas del buque de guerra son [1] [2]:

- Firma radar, relacionada con la energía de tipo electromagnético reflejada por la obra muerta y superestructura del buque.
- Firma acústica, relativa a la energía vibratoria de la maquinaria transmitida desde la obra viva al mar.

- Firma magnética, asociada a los campos magnéticos generados por la estructura del buque.
- Firma infrarroja, correspondiente a la radiación electromagnética emitida en la franja infrarroja del espectro.
- Firma eléctrica, generada por corrientes eléctricas producidas entre elementos metálicos unidos por un electrolito (agua de mar).
- Firma de presión, producida por el efecto Bernouilli del agua fluyendo desde su proa hacia su popa.

La tecnología *"stealth"*, también conocida como LOT (*"Low Observability Technology"*), consistirá en la instalación de contramedidas a bordo de buques con el fin de hacerlos invisibles a detectores radar, infrarrojos, etc. El grado *"stealth"* a alcanzar dependerá del nivel de amenaza (fijado por el Estado Mayor) y del coste de su implantación a bordo.

Firma infrarroja (IR)

Cualquier objeto a una temperatura superior a 0 K emitirá energía en la región IR del espectro electromagnético. La radiación emitida por un cuerpo negro se podrá representar como una función de longitud de onda (λ) y temperatura (T) de acuerdo a la *"ley de Planck"* [3]:

$$S_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} \qquad (1)$$

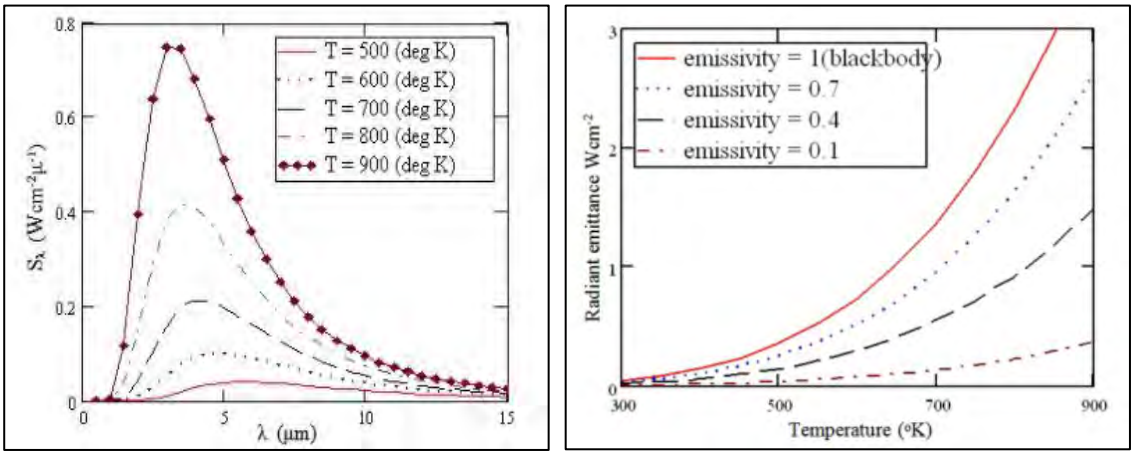
donde S_λ representa la emisión de radiación espectral ($Wcm^{-2}\mu^{-1}$) y c_1, c_2 son constantes de radiación (c_1 = 3.7415×104$Wcm^{-2}\mu^4$; c_2 = 1.43879×$10^4\mu K$). Integrando respecto de λ entre cero e infinito, se obtiene la "ley de Stephan-Boltzman" para un cuerpo negro [3]:

$$S = \sigma T^4 \qquad (2)$$

donde S es la emisión de radiación y σ es la constante de Stephan-Boltzman (σ = 5.667×10-12W $cm^{-2}K^{-4}$). Para cualquier otro emisor, habrá que introducir el siguiente coeficiente en la anterior ecuación [3]:

$$\varepsilon = \frac{S_{fuente}}{S_{cuerpo\ negro}} \qquad (3)$$

donde ε es la emisividad de la fuente para una temperatura (T) y longitud de onda (λ) determinadas.



Radiación espectral (cuerpo negro) y curvas de emisión IR en función de ε, [3]

El efecto atenuador de la atmósfera en la energía IR emitida por un cuerpo vendrá representado por el concepto de *"transmitancia atmosférica"* [3]:

$$\tau_a = e^{-\alpha R} \tag{4}$$

donde R es la distancia entre emisor y detector IR y α es el coeficiente de atenuación, descomponiéndose a su vez en los términos a *"absorción"* y γ *"dispersión"* (debido al vapor de agua y niebla contenidos en la atmósfera):

$$\alpha = a + \gamma \tag{5}$$

Como norma general, la atmósfera absorberá la totalidad de radiación IR emitida por un buque, excepto en ciertas bandas del espectro denominadas también *"ventanas atmosféricas"* y localizadas en la banda de 3 a 5 µm y de 8 a 12 µm.

Las *"ventanas atmosféricas"* se caracterizarán por elevados valores de transmitancia (τ_a), debido a bajos valores de atenuación (α). La presencia en la atmósfera de humedad, nubes y niebla tendrá una gran influencia en la absorción de radiación IR.

Las fuentes fundamentales de radiación IR del buque de guerra, clasificadas en función de las *"ventanas atmosféricas"*, son [2]:

- El casco, superestructura y elementos de cubierta, debido a que son calentados por el sol y a un insuficiente aislamiento en cámaras de máquinas. Su contribución principal será en la banda de 8 a 12 µm.
- Conductos de exhaustación y otras superficies calentadas por los gases de escape, contribuyendo tanto en la banda de 3 a 5 µm como en la 8 a 12 µm.
- Gases de exhaustación, con una contribución muy significativa en la banda 3 y 5 µm, debido a la presencia de dióxido de carbono y vapor de agua.

Las amenazas del buque de guerra respecto de su firma IR serán principalmente las siguientes [2]:

- Misiles anti-buque con guiado IR (p.e. AGM-119 *"Penguin"*).
- Detección y seguimiento con cámaras de visión nocturna (p.e. tipo *"flir"*).

Si tradicionalmente los sistemas de guiado IR de misiles han empleado la banda del espectro de 3 a 5 µm (dirigiéndose hacia las zonas más calientes del buque), los *"seekers"* de los misiles de nueva generación reconocerán tanto la banda de 3 a 5 µm como la de 8 a 12 µm, por lo que no sólo los puntos más calientes del buque, sino toda su superficie se constituirá como fuente de guiado. Además, al ser el guiado IR una técnica pasiva, el misil no emitirá señal alguna al exterior, no anunciando así su presencia.

En cuanto a la detección, los buques de guerra se detectarán por la firma IR dividida sobre un fondo de mar y otro de cielo, en la banda de 8 a 12 µm del espectro mediante el empleo de cámaras termográficas (tipo *"flir")*. La detección será, por lo tanto, más fácil cuanto mayor sea el contraste entre las dos firmas.

Las medidas de reducción de firma IR irán siempre encaminadas a reducir las diferencias de temperaturas entre las superficies del buque y los gases de exhaustación con el ambiente.

Dentro del conjunto de medios IRCM (*"Infrared Countermeasures"*) disponibles a bordo de buques de guerra modernos, destacan los siguientes [5]:

- Aislamientos adecuados en cámaras de máquinas y otros espacios donde se pueda disipar calor.

- Sistemas de distribución de agua salada (tipo *"washdown"*) a través de rociadores dispuestos a lo largo del buque para la reducción de la temperatura en la cubierta intemperie, mamparos externos y costados.
- Eductores/difusores para enfriar los conductos y penachos de exhaustación de motores de combustión interna.

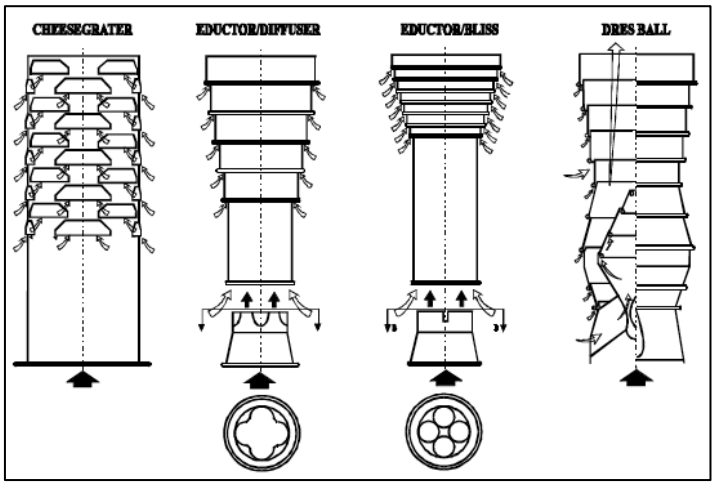
Con el fin de determinar el grado de protección de una unidad frente a amenazas IR, se recurre habitualmente a su clasificación mediante la asignación de niveles IRSS - *"stealth"* (*"Infrared Signature Suppresion"*) en función de los IRCM utilizados [5]:

I. Ningún IRCM activo.
II. Refrigeración básica de conductos de exhaustación y activación de sistemas *"washdown"*.
III. Refrigeración de gases de exhaustación por debajo de los 250 C y activación de sistemas *"washdown"*.
IV. Refrigeración de gases de exhaustación por debajo de 150 C y activación de sistemas *"washdown"*.

Refrigeración de gases de exhaustación. Estado del arte y futuro

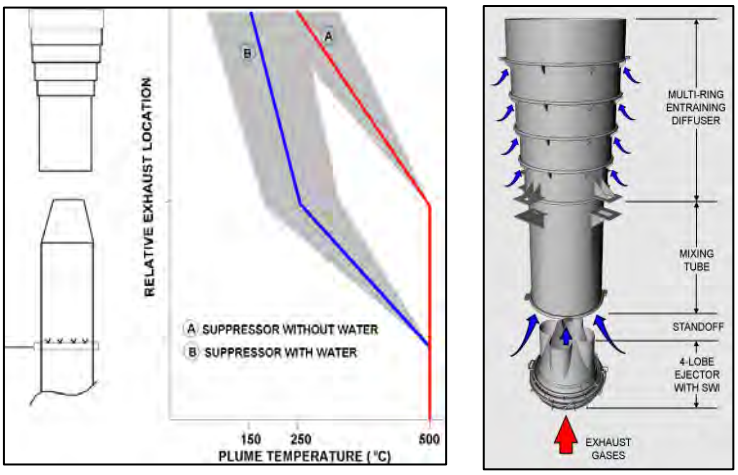
Existen diversos sistemas para la reducción de la firma IR generada por los gases de exhaustación en buques de superficie. La solución mayoritaria pasa por emplear aire ambiente a través de dispositivos de carácter estructural instalados en el último tramo de los conductos de exhaustación. A estos sistemas se les conoce con el nombre de "sistemas pasivos", destacando los siguientes [2] [5]:

- Sistemas *"eductor/difusor"* (Armada Española) y *"dres-ball"* del fabricante Davis Engineering Ltd., capaces de rebajar la temperatura del penacho de los gases de exhaustación por debajo de 250 C, manteniendo a su vez la temperatura de los conductos de exhaustación 25 C por encima de la temperatura ambiente.
- Sistema *"cheesegrater"* (Royal Navy), cuya única finalidad es la refrigeración de los conductos de exhaustación visibles, siendo necesario recurrir a sistemas auxiliares de ventiladores para los penachos.
- Sistema *"eductor/bliss"* (US Navy), con un modo de funcionamiento similar a los sistemas de Davis Engineering Ltd.
-



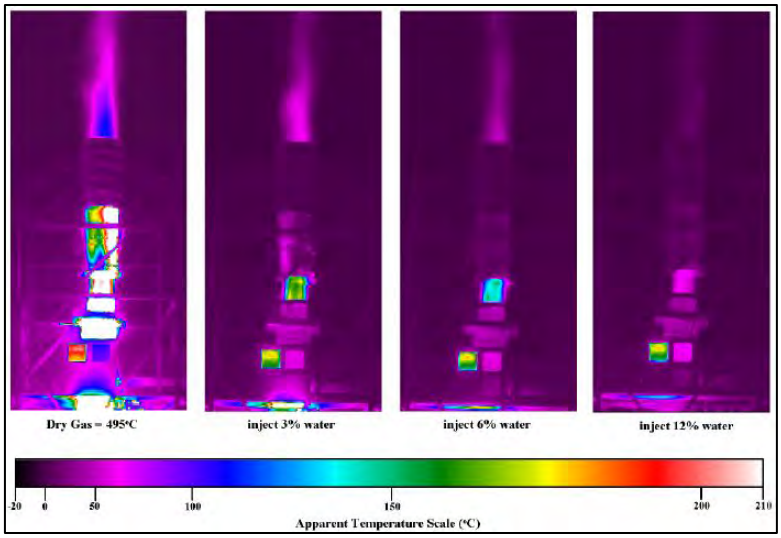
Detalle diferentes sistemas pasivos de enfriamiento de gases de exhaustación, [2]

En la actualidad, la firma Davis Engineering Ltd. se encuentra probando la solución denominada SWI (*"Sea Water Injection"*). Se trata de un prototipo *"híbrido"* consistente en añadir rociadores de agua de mar al sistema de enfriamiento tradicional (pasivo) mediante *"eductor/difusor"*. Según el propio fabricante, con el sistema SWI se conseguirá rebajar la temperatura del penacho de gases por debajo de 150 C, alcanzándose de esta forma el nivel IRSS IV - *"stealth"* en buques con nivel IRSS III (la mayoría de buques de guerra actuales) [4]:



Sistema híbrido de enfriamiento de gases de exhaustación, [4]

Si bien el empleo de agua de mar para la refrigeración de los gases de exhaustación presenta inconvenientes (necesidad de empleo de materiales resistentes a la corrosión, protección galvánica, instalación de imbornales para evacuar el agua no vaporizada, etc.), la adopción de sistemas híbridos de enfriamiento para gases de exhaustación marcará la dirección a seguir en el desarrollo de sistemas de supresión de firma IR en los buques de guerra durante los próximos años [4]:



Infrared Images of Prototype Hybrid System, [4]

Bibliografía consultada

[1] Casanova Rivas, E., (2009) El Buque de Guerra, 2ª ed., Fondo Editorial de Ingeniería Naval, Madrid, ISBN 978-84-933198-8-5.
[2] Vílchez, F., Sierra, H., (1999) Detectabilidad de Buques de Combate, Instituto Panamericano de Ingeniería Naval, Colombia.
[3] Ab-Rahman, M. S., Hassan M. R., (2009) Analytical Analysis of Lock-on Range of Infrared Heat seeker Missile, Australian journal of Basic and Applied Sciences, ISSN 1991-8178.
[4] Hiscoke, B., (2000) IR Suppression – Exhaust Gas Cooling by Water Injection, Davis Engineering Ltd., Ottawa - Ontario – Canadá.
[5] Thompson, J., Vaitekunas, D., (2000) IR Signature Suppression of Modern Naval Ships, Davis Engineering Ltd., Ottawa - Ontario – Canadá.

Buques de guerra ¿del gris al verde?

CF (CIA) Indalecio Seijo Jordán
Arsenal de Ferrol

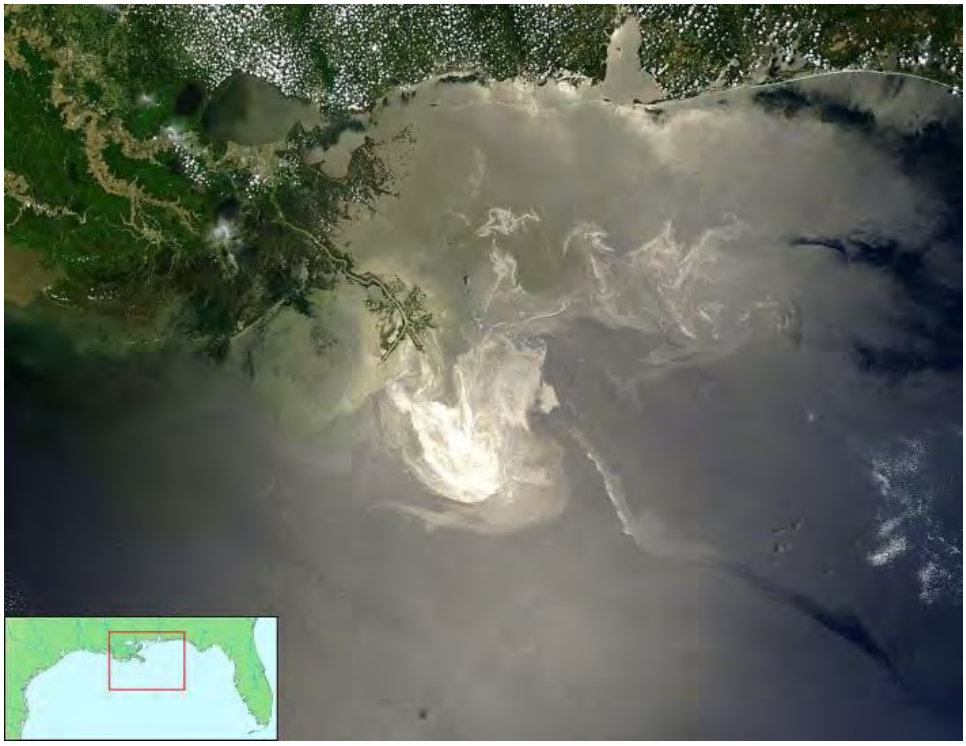
Introducción

Las tecnologías verdes están revolucionando las operaciones navales. La generalización de la conciencia medioambiental está propiciando el desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión y combustibles menos contaminantes. En la foto se ve el submarino alemán tipo V212A con su sistema AIP que convierte la energía química en energía eléctrica. El consumo de la célula energética de litio AIP es sólo la mitad de cualquier otro sistema competitivo actual.

La precaria condición del medio ambiente global es un tema extremadamente importante para las armadas del mundo. Los barcos de guerra pueden navegar a través del 70% de la superficie del mundo. Los buzos y submarinos de la armada pueden alcanzar algunas de las mayores profundidades de la tierra. Con ayuda de las tecnologías verdes, las flotas navales tienen asignado un papel clave para asegurar que los océanos y mares permanezcan limpios, libres de excesivo ruido y contaminación y bien provistos de una abundante vida marina.

Además cualquier Armada moderna debe poder prestar ayuda después de desastres naturales o causados por el hombre.

Cuando la plataforma perforadora “DEEPWATER HORIZON” sufrió una catastrófica explosión el 20 de abril de 2010 que causó 11 muertos y el hundimiento de la plataforma, la Armada de Los Estados Unidos desempeñó un trascendental papel en la recuperación. En respuesta a esta catástrofe la US Navy desplegó numerosos medios materiales y humanos en la zona. Estos medios llegaron a la escena el 29 de abril.



De esta manera, el 9 de Junio se había desplegado una línea de 19.263 metros para contener el petróleo. El personal de la Armada permaneció en el Golfo de México hasta el 4 de Octubre en tareas de limpieza. En total se desplegaron 100 tráileres, más de 300 personas, se usaron 4 barcos de aprovisionamiento "offshore", y se desplegaron 29.260 metros de barreras de contención del crudo y más de 60 sistemas de aspiración.

El control de la contaminación

Además de prestar ayuda en las operaciones de recuperación que siguen a un derrame de petróleo, existen otras tareas importantes. La Armada Danesa ha sido pionera en este aspecto y posee 7 buques de protección medioambiental. El Gobierno Danés transfirió las misiones marítimas de monitorización y control de la contaminación medioambiental a la Armada en el año 2000. En particular, la Armada es responsable de la aplicación de la ley danesa para la protección del medio ambiente marítimo. En ejecución de sus misiones de anticontaminación, la Armada trabaja en conjunto con la Fuerza Aérea Danesa, que lleva a cabo el seguimiento aéreo de la contaminación en el mar. Para ello, los buques mencionados anteriormente están equipados con bombas y recolectores “skimmers” para contener el petróleo y aspirarlo de la superficie del mar.

Protección de la pesca

La protección contra la sobrepesca es otra misión importante. La Armada del Reino Unido tiene una gran experiencia en este aspecto, protegiendo decenas de miles de kilómetros cuadrados de agua, que pueden extenderse 320 km mar adentro para operaciones contra la pesca ilegal. La protección pesquera es llevada a cabo por las naves del escuadrón de protección pesquera (FPS), que comprende los OPV's de la clase "River", además de un OPV equipado para operaciones con helicópteros con base en las Islas Malvinas.

Estos buques no sólo pueden llevar a cabo misiones de protección de pesquerías, sino que gracias a su diseño versátil efectúan trabajos de control de la contaminación, tráfico antinarcóticos y misiones antiterroristas.

Pero las armadas actuales, además de llevar a cabo la protección del medioambiente, al mismo tiempo deben dar ejemplo minimizando su propia huella. En este sentido se puede constatar fácilmente que se están llevando a cabo numerosas iniciativas en todo el mundo, incluyendo por ejemplo la limitación del impacto del sonar en los mamíferos marinos, la reducción del consumo de fuel de buques y aeronaves, la limitación de la basura generada por los barcos o el incrementando del uso de materiales reciclables en la construcción de un buque de guerra.

El sonar y las ballenas

El uso del sonar naval ha sido tema de controversia para los ecologistas y ha sido acusado de causar la muerte (o al menos la desorientación) de mamíferos marinos tales como las ballenas. Algunas organizaciones ecologistas dicen que incluso a distancias superiores a 480 km las ondas de sonar pueden seguir produciendo más de 140 decibelios.

En particular acusan a la frecuencia media de los sonares navales de causar que las ballenas y delfines acaben varados en las playas de las Islas Canarias, Grecia, Hawái o las Islas Vírgenes, por citar cuatro localizaciones. Algunos de los estudios que presentan indican que las heridas observadas en los mamíferos incluyen hemorragias alrededor del cerebro y los oídos, y burbujas en sus órganos, síntomas similares a la enfermedad de descompresión que afecta a los buceadores. Se piensa que las ballenas se quedan varadas por la pérdida de su habilidad de eco localización interna. Entonces los animales son incapaces de juzgar de forma precisa la profundidad y pueden subir a la superficie demasiado rápido, causándoles la enfermedad de descompresión de forma parecida a los buceadores humanos.

El hecho es que todo este tema ha desencadenado una serie de juicios en los EEUU. También ha ocasionado la redacción de guías explicando como el impacto de los sonares navales en los mamíferos marinos puede reducirse. Esto incluye abstenerse de utilizar el sonar por la noche o en áreas donde la población de mamíferos marinos es especialmente alta.

El uso del sonar naval y su impacto en los mamíferos marinos es un asunto difícil y controvertido. Es evidente que nadie desea causar estrés innecesario o sufrimiento a los delfines, ballenas y marsopas, pero el sonar representa los oídos y los ojos de la guerra anti-submarina (ASW) y es vital asegurar que las capacidades de los operadores de sistemas sonar conserven su agudeza en los períodos de paz.

La fragata canadiense HMCS “Ottawa” realizó una serie de ejercicios en la costa sur de Victoria, British Colombia, en el océano Pacífico. Durante los ejercicios, la fragata usó su sonar de casco, sonar de profundidad variable y un AN/SQR-501 CANTASS para las operaciones de guerra antisubmarina.

Durante estas operaciones se tomaron todas las precauciones para asegurar que ningún mamífero marino estuviese a 3 km del barco mientras el sonar estaba siendo usado.

La política de protección de mamíferos marinos canadienses ordena apagar el sonar inmediatamente si un animal es detectado a menos de 3.000 m alrededor del barco. Algunos barcos de guerra han sido también provistos con un sistema de escaneado para detectar mamíferos marinos. Éste equipamiento especial usa sonares pasivos para detectar acústicamente un mamífero marino.

La Unidad de Investigación de Mamíferos del Mar ("The Sea Mammal Research Unit") de la Universidad St. Andrews en Escocia ha jugado un papel decisivo en el desarrollo de estos sistemas.

Reducción de basura

Todos los buques, y por tanto los de guerra también, deben mantener una estricta vigilancia de la cantidad de residuos que se vierten al mar. La vida diaria de un barco de guerra puede crear toneladas de basura, que necesita ser eliminada de una manera segura y medioambientalmente amiga. Ya no se acepta el arrojado de basuras por la borda. Por esta razón los esfuerzos en I+D están examinando maneras por las cuales la mayor parte posible de la basura de un barco puede ser reducida y reciclada.

La US Navy's ha desarrollado el sistema de "Micro Auto Gasification" (MAGS), diseñado para disponer de residuos sólidos calentando la basura a una temperatura mayor de 750 ºC, la cual reduce el contenido carbónico en el residuo, y así el tamaño físico de la basura. Cualquier residuo que contenga material orgánico como el papel, cartón, madera, e incluso plástico y ropa, por no mencionar residuos de comida, puede ser reducido usando este método, y el gas que resulta de este proceso es considerado inerte.

Motores diésel

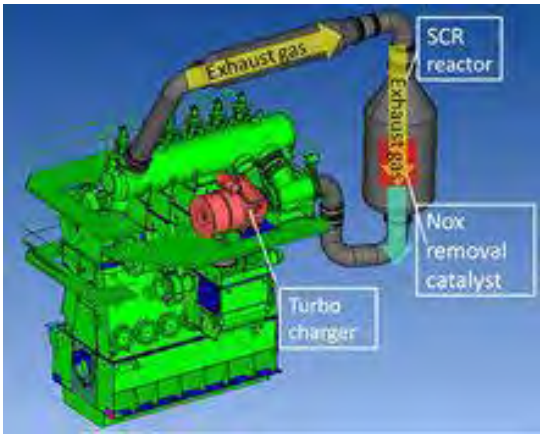
Los motores diésel están destinados a ser una solución más verde una vez que las restricciones de la Organización Marítima Internacional (OMI) entren en vigor. La OMI definió los límites de emisión (nivel 2 y nivel 3) para las emisiones de NOx de motores diésel de potencia mayor de 130 kW. Estos contemplan aproximadamente un 20% menos de emisión de gases nitrogenados para nivel 2 y 80% menos en nivel 3.

Aunque no son de obligado cumplimiento, muchas Armadas y Guardias Costeras ya cumplen o tienen intención de cumplir con la última regulación de emisiones.

Se están investigando varias tecnologías de motores para cumplir estos nuevos requisitos. Los planteamientos retan no solo a los fabricantes de motores sino también a los diseñadores de buques. Así, estamos empezando a oír hablar de tecnologías para lograr los límites de emisión que afectan a la inyección de combustible, turbo-alimentación, gestión de motor, análisis mecánico y termodinámico, y dispositivos de post-tratamiento de gases de escape.

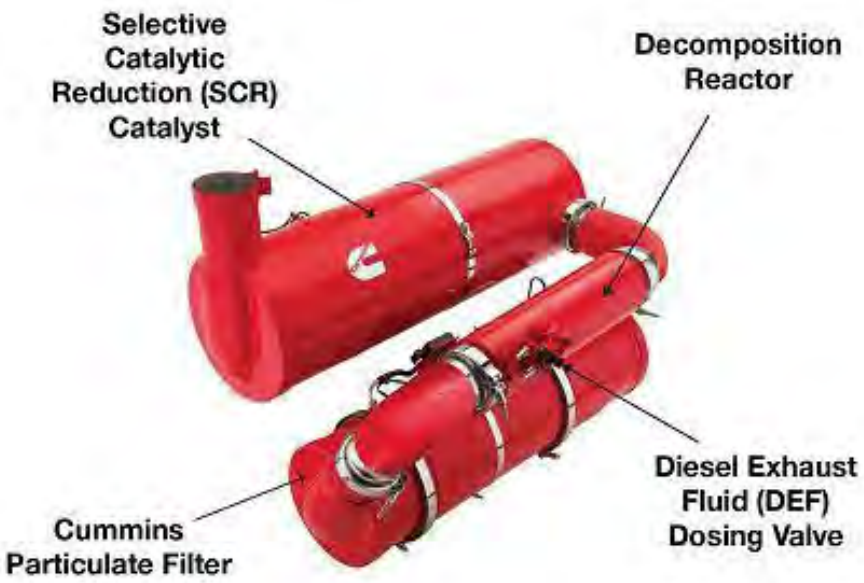
MTU ha sido el primer fabricante en ofrecer inyección de combustible "Comon rail" en un motor no terrestre, y se trabaja actualmente en sistemas con presiones de inyección por encima de 2.000 bar. Las nuevas tecnologías permitirán múltiples inyecciones. Esto no solo tendrá un efecto positivo en las emisiones (incluyendo el hollín visible) sino que también puede ser beneficioso para las firmas de los buques de guerra.

Otros sistemas que está probado MUT son los sistemas de recirculación de gases de escape "exhaust gas recirculación (EGR) y el ciclo de "Miller". Este ciclo representa un método muy efectivo de reducir las temperaturas de combustión (que son las principales culpables de la formación de gases nitrosos), sin incrementar el consumo de combustible.



Las reducciones de óxidos nitrosos se pueden lograr también a través de válvulas EGR, donde parte de los gases de escape se redireccionan al cilindro contribuyendo a una menor temperatura de combustión, y por lo tanto llevando a cabo una combustión más limpia que produce muy pocas cantidades de óxido nitroso.

También se puede usar un reactor selectivo de reducción catalítica (SCR) para la reducción de óxidos nitrosos en el motor. La reacción química del amoniaco con los gases nitrosos en los escapes produce nitrógeno, dióxido de carbono y agua. Esta solución está actualmente considerada como la solución técnica actual más eficiente para cumplir con la normativa IMO3 de requisitos de emisiones. A pesar de ser usados en la industria automovilística, estos sistemas aún deben demostrar su eficiencia en las aplicaciones navales.



Se dice que los sistemas MAGS (micro auto gasification system), son capaces de reducir en un elevado porcentaje los residuos sólidos. Este sistema está actualmente siendo sometido a una prueba en la base del cuerpo de los marines en la isla de Oahu en Hawái.

Eco-diseño

Los buques anfibios franceses de la clase “Mistral”, construidos por la DCN francesa, están equipados con centros de reciclado de residuos. Este astillero ha dado un enfoque al proyecto al que ha denominado “eco-diseño”. De acuerdo con la documentación oficial del astillero, la estrategia de eco-diseño tiene en mente las consideraciones medioambientales a lo largo de cada fase del ciclo de vida del buque (de la cuna a la tumba), así como un examen del impacto medioambiental durante su construcción, servicio y desguace.

Además la DCN anuncia una minimización del uso de materiales tóxicos durante la construcción de los buques y asegura que gran parte del buque será reciclado una vez haya alcanzado el final de su vida.

Método Avanzado de Optimización de Firmas Magnéticas Basado en Algoritmos Genéticos

CF (CIA) D. Antonio Villalba Madrid
Arsenal de Cartagena

***Abstract*. We have implemented an efficient technique for the magnetic compensation of a ship, when it is moving in the Earth's magnetic field. The compensation uses a degaussing system, composed of several coils distributed along the ship. A DC current is applied to each coil for compensating the magnetic field. By changing the value of the currents to each coil, and the number of turns, a minimum magnetic field can be obtained. In this paper a technique based on Genetic Algorithms (GAs) is proposed for implementing the optimization mechanism. Different selection algorithms, objective function strategies and scaled methods are revised in this paper. Results show that GAs can be efficiently used to reduce drastically the magnetic field levels of real practical ships.**

1. Introducción.

La compensación de la firma magnética de buques es una actividad muy importante para obtener el silencio electromagnético del buque. Todo material con propiedades ferromagnéticas produce una modificación o perturbación en el campo magnético terrestre en el entorno de su posición. Dicha anomalía hace que el buque sea detectable por cualquier sensor magnético situado en las inmediaciones del mismo. Uno de los sistemas que se utilizan para conseguir esa discreción magnética es el Sistema de Degaussing o de Calibración Magnética [1].

Un Sistema de Degaussing (*SDG*) está compuesto por varias bobinas distribuidas a lo largo del buque. Cuando se hace circular una corriente continua por las bobinas, se produce un campo magnético que compensa la perturbación magnética producida por las magnetizaciones del buque. En general, el proceso de optimización para reducir el campo magnético total se realiza mediante la modificación de la corriente y número de espiras de cada una de las bobinas de dicho sistema [2]. En los polígonos tipo *open range* el procedimiento de compensación magnética es iterativo [3]. En primer lugar, se parte de una medida del campo magnético total en el buque y de los efectos de cada una de las bobinas del *SDG*. A continuación se eligen los valores de las corrientes y número de espiras que deben tener las bobinas para lograr disminuir el campo magnético total, actuando sobre el *SDG*. El procedimiento iterativo continua con una nueva selección de los parámetros (corrientes y número de espiras), hasta obtener un campo magnético lo más pequeño posible y similar al terrestre en esa zona. Aunque sigue siendo habitual que dichos valores se introduzcan manualmente según la experiencia del personal técnico de las Estaciones de Medida, debido al aumento de la complejidad de los *SDG* (30 bobinas o más por buque), se están utilizando cada vez más los algoritmos avanzados de cálculo para su optimización.

En este trabajo presentamos un método nuevo basado en *GAs* para el cálculo de los parámetros (corriente y espiras) necesarios en la compensación magnética de buques, dentro del procedimiento iterativo descrito.

La técnica de minimización de *GAs* se ha venido aplicando a diversos problemas en electromagnetismo, desde el diseño de circuitos magnetostáticos hasta la optimización de arrays de antenas y otros circuitos complejos de Radiofrecuencia [4][5]. Para el propósito de este trabajo se han probado diferentes mecanismos de selección de la población, diferentes funciones objetivo, así como diferentes técnicas de escalado, y se propone como novedad una nueva función objetivo específica diseñada para este tipo de problemas, que llamamos Función de Contorno. La nueva función objetivo fundamenta su efectividad en minimizar los valores de pico en el contorno, en lugar de minimizar la energía generada por una perturbación de campo magnético, de manera que se evite crear un rizado en el entorno de la solución y minimizar no sólo los niveles de la perturbación sino también el gradiente de la misma. Este aspecto es también im-

portante porque los sistemas de detección no sólo actúan por nivel de pico sino por variaciones importantes del campo magnético.

2. Sistema de compensación magnética o Degaussing

En general, el campo magnético de un buque puede descomponerse en tres componentes según los ejes principales del barco. Se suelen denominar estas componentes como longitudinal, vertical y transversal según se muestra en la Figura 1.a. Además hay que tener en cuenta que la magnetización puede ser de dos tipos diferentes, la permanente y la inducida. Las componentes del campo magnético permanente no cambian de dirección con respecto de los ejes de referencia locales mostrados en la Figura 1.a. Pero estos materiales ferromagnéticos inducen otras componentes de campo magnético debido a la orientación del buque dentro del campo magnético terrestre.

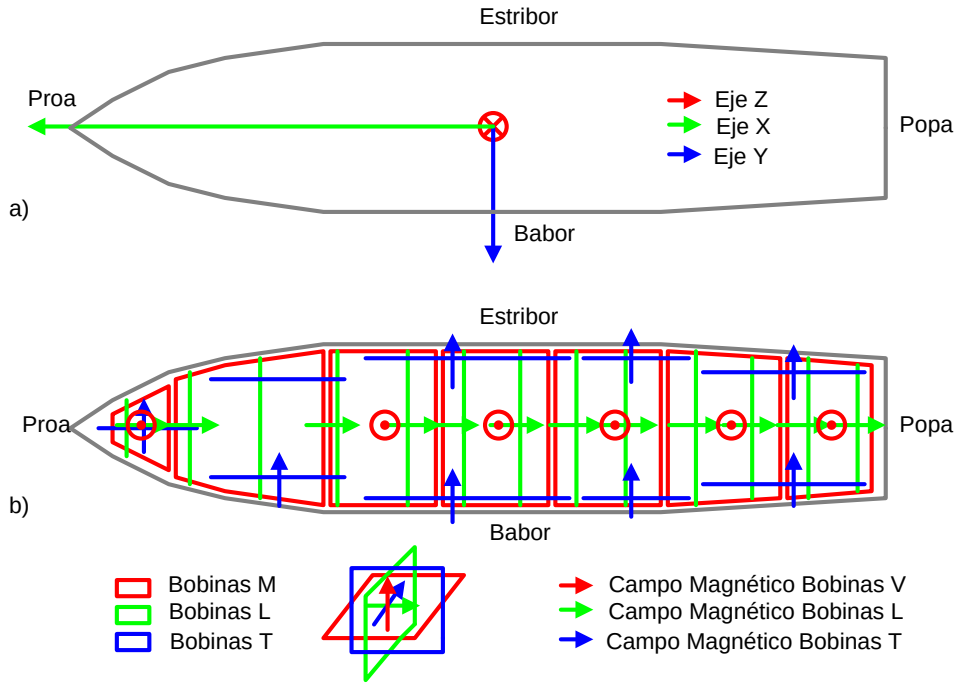


Figura 1. *a) Sentido positivo del campo magnético producido por un buque.*
b) Disposición de las bobinas de un Sistema de Degaussing.

Estas componentes de campo son las inducidas, y estas sí que cambian de orientación, siendo diferentes según el rumbo del barco. Debido a esta compleja estructura del campo magnético, el sistema de compensación lleva dos juegos distintos de espiras, cada uno de ellos conteniendo bobinas orientadas según los tres ejes locales del buque (ver Figura 1.b). Uno de los juegos de espiras se ocupará de compensar la magnetización permanente, mientras que el otro se ocupa de compensar la magnetización inducida. En cualquier caso la compensación magnética se logra aplicando las corrientes adecuadas a cada una de las bobinas del sistema, junto con la elección apropiada del número de espiras en cada bobina.

3. Método de compensación basado en algoritmos genéticos

Los *GAs* basan su funcionamiento en el mecanismo de la evolución natural que partiendo de una población inicial de individuos (individuos = diferentes soluciones), generada mediante técnicas aleatorias evoluciona atendiendo a tres operaciones principales, que son la selección, el cruce y la mutación [4]. El

operador selección escoge los individuos (mejores soluciones) que han de producir la generación siguiente en la cadena evolutiva. La operación de cruce permite intercambiar cierto código genético (parte de cada solución) entre los individuos de la siguiente generación. Finalmente la mutación permite modificar alguno de los genes de los individuos (representación binaria de cada variable). En general la probabilidad de mutación siempre es menor que la probabilidad de cruce. Ambos operadores se usan para cambiar los cromosomas (variables de nuestro problema = valor de las corrientes que pasan por las espiras del *SDG*), produciendo individuos nuevos (soluciones) que van a reemplazar a los viejos en la renovación de la población.

El algoritmo continúa produciendo poblaciones o soluciones nuevas hasta encontrar una que se adapta a los objetivos planteados. Normalmente esta situación se detecta con algún criterio de convergencia.

Una de las dificultades primeras con la que nos encontramos a la hora de implementar un sistema de algoritmos genéticos, es decidir la estructura de las variables que van a representar los valores de los parámetros que intervienen en el proceso de optimización. En nuestro caso estos parámetros son los valores de las corrientes y el número de espiras de cada una de las bobinas. Para representar estos valores, hemos usado en este trabajo la estrategia de codificación binaria [4] del valor de las corrientes y el número de espiras de cada bobina, utilizado un alfabeto binario de longitud finita.

La longitud en bits de cada variable se fija atendiendo a los valores máximo y mínimo que puede tomar cada parámetro, junto con la precisión que se desea para representar su valor.

En este trabajo se han probado dos procesos de selección conocidos en la literatura como *roulette wheel* y *tournament* [6]. En el método de *roulette wheel* cada individuo tiene una probabilidad para adaptarse al entorno (*calidad* del individuo) que depende de la *calidad* del conjunto de la población:

$$\mathrm{P}(I_i) = \frac{\varphi(I_i)}{\sum_{j=1}^{n} \varphi(I_i)} \tag{1}$$

donde $\varphi(I_i)$ es la adaptabilidad del individuo (I_i), mientras que el denominador de (1) representa la adaptabilidad de toda la población (de los *n* individuos). Para aplicar el método de selección se genera un valor de probabilidad aleatoria (P_{random}). Un individuo de la población (I_{r-1}) es seleccionado como *padre* de la siguiente generación cuando se cumple la siguiente condición:

$$\sum_{j=1}^{r-1} \mathrm{P}(I_i) \leq \mathrm{P}_{random} \leq \sum_{j=1}^{r} \mathrm{P}(I_i) \tag{2}$$

Por su parte el método de selección llamado *tournament* está basado en el anterior. Ahora, sin embargo, se usa el algoritmo hasta encontrar dos individuos consecutivos que cumplan la condición (2). De los dos individuos escogidos, se seleccionará el mejor de entre ellos, rechazando definitivamente al peor.

Una vez hemos seleccionado los individuos padres, hay que producir los individuos de la nueva generación. Esto lo conseguimos aplicando los procedimientos de cruce y mutación. En la operación de cruce los padres intercambian entre ellos su código genético (reproducción). En este trabajo hemos utilizado la técnica de cruce por un solo punto, descrita en [4]. Por otro lado, el mecanismo de mutación produce la variación de un *gen* en particular, en los individuos de la población. En este trabajo hemos utilizamos un parámetro de mutación que permite alterar siempre un único *gen* de cada cromosoma, y en cada generación [4].

Una vez hemos generado la nueva población, es necesario repetir el proceso de selección de individuos para generar la siguiente. Para evaluar la calidad o adaptabilidad al entorno de cada individuo, usualmente se ha utilizado el algoritmo de mínimos cuadrados [7]:

$$\Phi(I_i) = \sum_{m=1}^{N_m} \left| B_{d,m} - B_{c,m}^{(i)} \right|^2 \tag{3}$$

donde $\Phi(I_i)$ es la adaptabilidad del individuo (I_i) que aparece en la ecuación (1). En este caso hemos llamado $B_{d,m}$ al valor de la curva objetivo en el punto (m), y $B_{c,m}^{(i)}$ al valor de la curva calculada en el punto (m), utilizando el individuo (I_i). N_m es el número total de puntos en la curva. Usando la ecuación (3) podemos obtener la adaptabilidad de cada individuo de la población, para posteriormente aplicar el método de selección dado por las ecuaciones (1)(2).

Hemos notado que usando esta técnica la convergencia es lenta, produciéndose un rizado en la solución seleccionada. Para solventar este problema se ha utilizado otro método durante el cálculo de la adaptabilidad utilizando una función definida con Función de Contorno. Este nuevo método está basado en el cálculo de los valores de pico o máximas distancias entre los valores obtenidos y deseados. Usando una notación similar a la anterior, el cálculo de la adaptabilidad quedaría como sigue:

$$\Phi(I_i) = \sum_{m=1}^{N_m} \left| B_{c,m}^{(i)} \subset B_{d,m} \right| \tag{4}$$

Para implementar esta expresión calculamos para cada punto de la función *(m)* y para cada individuo *(i)* la siguiente constante:

$$\alpha_m^{(i)} = \frac{B_{d,m}}{B_{c,m}^{(i)}} \tag{5}$$

De todos los valores obtenidos nos quedaremos con el máximo, y lo usaremos para multiplicar todos los genes de cada individuo en la población por $\alpha_m^{(i)}$. De esta forma nos aseguramos que la función calculada permanecerá siempre por debajo de la función objetivo (ecuación (4)). Además con esta técnica se consigue una convergencia muy suave hacia el resultado óptimo, eliminando el rizado que produce el uso de la expresión (3).

La última consideración a tener en cuenta es que existe la posibilidad de usar una función de escalado parar aumentar la rapidez en la convergencia del método de GAS. Los métodos de escalado evitan que se produzcan grandes diferencias entre los individuos de una población. Las funciones de escalado que se han probado para el problema que nos ocupa son las llamadas lineal, exponencial y truncada sigma [6]. Con todas ellas se han obtenido muy buenos resultados.

4. Resultados y conclusiones

El método descrito en este trabajo, basado en *GAs*, ha sido utilizado con éxito en las simulaciones de la calibración de firmas magnéticas de buques. Para los resultados que presentamos en esta sección, el campo magnético del buque y de las bobinas de compensación se ha calculado mediante un modelo magnético [8] basado en dipolos discretos y líneas finitas de corriente.

Inicialmente el sistema de compensación se encuentra apagado, de forma que el punto de partida es el campo magnético natural que produce el barco, y que deseamos compensar con el *SDG*.
Los resultados que presentamos corresponden a los obtenidos simulando un sensor vertical, mientras el barco sigue un rumbo de norte a sur magnético (no geográficos). Con un sensor vertical, junto con el rumbo elegido, no podremos medir la componente transversal de la magnetización inducida.

Además, si utilizamos la firma de quilla, la componente transversal de la magnetización permanente será cero. Con el sensor vertical podremos obtener el resto de componentes de las magnetizaciones inducidas y permanentes. Para compensar todas estas componentes, podremos separar el problema en dos partes. Primero aplicaremos la técnica desarrollada con *GAs* para la compensación de la componente vertical de las magnetizaciones verticales permanentes e inducidas, junto con la componente longitudinal de la magnetización permanente. A continuación podremos realizar la compensación para componente longitudinal de la magnetización inducida. Los algoritmos que vamos a presentar corresponden a las etapas de compensación para la primera etapa. El comportamiento de los algoritmos de compensación para el segundo caso es muy similar, y por ello no se han incluido en este trabajo.

En primer lugar vamos a mostrar la utilidad de la nueva técnica que hemos propuesto para el cálculo de la adaptabilidad (calidad) de cada individuo (ecuación (4)). En la Fig. 2 presentamos los resultados de convergencia obtenidos durante la compensación magnética del barco. Se observa claramente que la convergencia es mucho más rápida cuando se emplea el nuevo método propuesto basado en el contorno, con respecto a la convergencia obtenida usando el criterio tradicional de mínimos cuadrados. Los resultados muestran no solo una mayor rapidez en la convergencia, sino también muestran que la solución final obtenida con la nueva técnica basada en el contorno es mejor en más de un 50% con respecto de la solución obtenida empleando mínimos cuadrados.

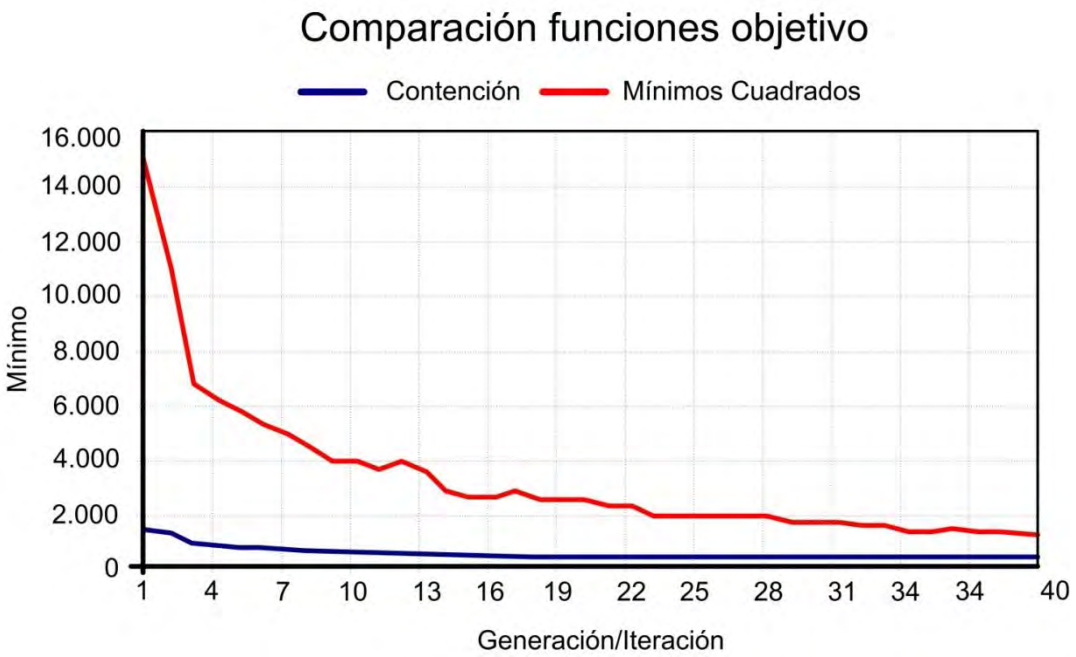


Figura 2. *Error relativo obtenido durante la compensación magnética del barco. Se compara el error obtenido usando el criterio de mínimos cuadrados y el nuevo criterio basado con la función de Contorno.*

Este resultado muestra que se pueden lograr mejoras considerables en la compensación magnética de barcos cuando se emplea el nuevo criterio de la función objetivo presentado en este trabajo. Para este test numérico se ha utilizado el método de selección de *tournament* con el método de escalado de truncado sigma. Aunque esta combinación ha resultado ser la más eficaz desde el punto de vista de la convergen-

cia, se han obtenido resultados parecidos con los otros mecanismos de selección y de escalado inverso comentados anteriormente.

A continuación presentamos el error obtenido en la compensación magnética del barco, en función del número de poblaciones generadas por el método de GAs. La Figura 3 presenta una comparación del error cuando se emplean los dos mecanismos de selección comentados, y para diferentes funciones de escalado.

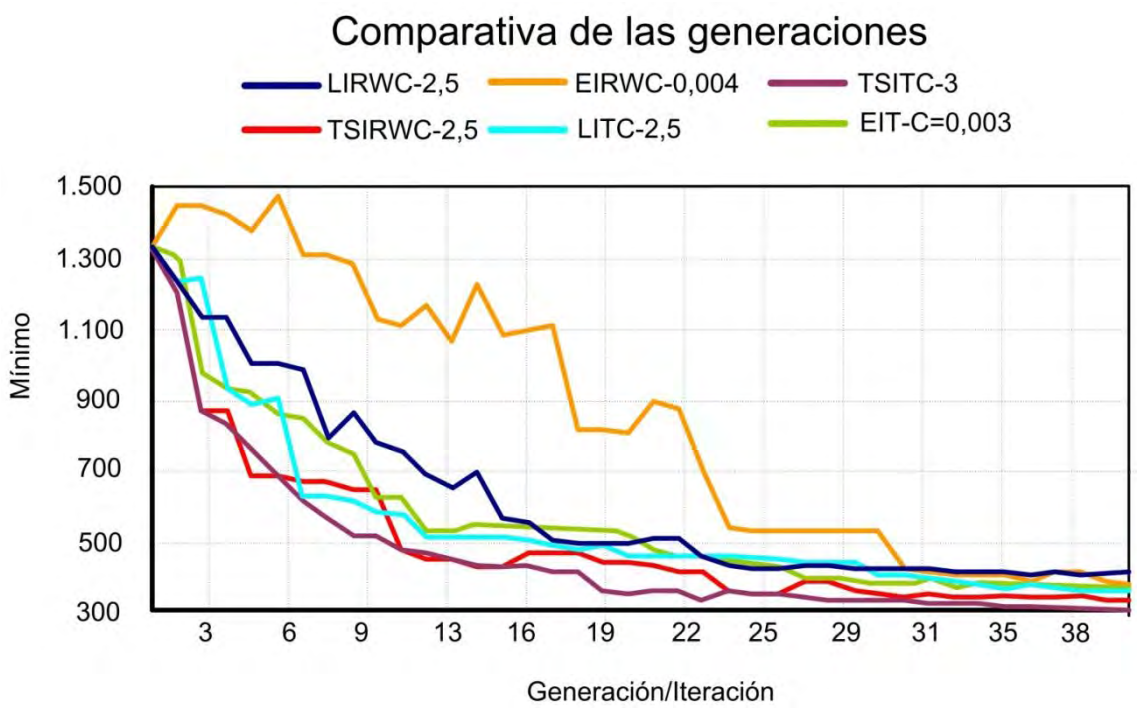


Figura 3. *Error relativo obtenido en la compensación magnética para diferentes mecanismos de selección.*

De los resultados mostrados podemos observar que se logra una buena convergencia con menos de cuarenta generaciones. Sin embargo, tal y como dijimos anteriormente, los mejores resultados se han obtenido utilizando el método de *tournament* para la selección, y el sigma truncado para el escalado (curva TSITC-3 en la Fig. 3).

Finalmente, presentamos en la Fig. 4 el flujo de campo magnético inicial y el campo magnético total después del proceso de compensación utilizando GAs con el nuevo método de contorno y con el tradicional de mínimos cuadrados.

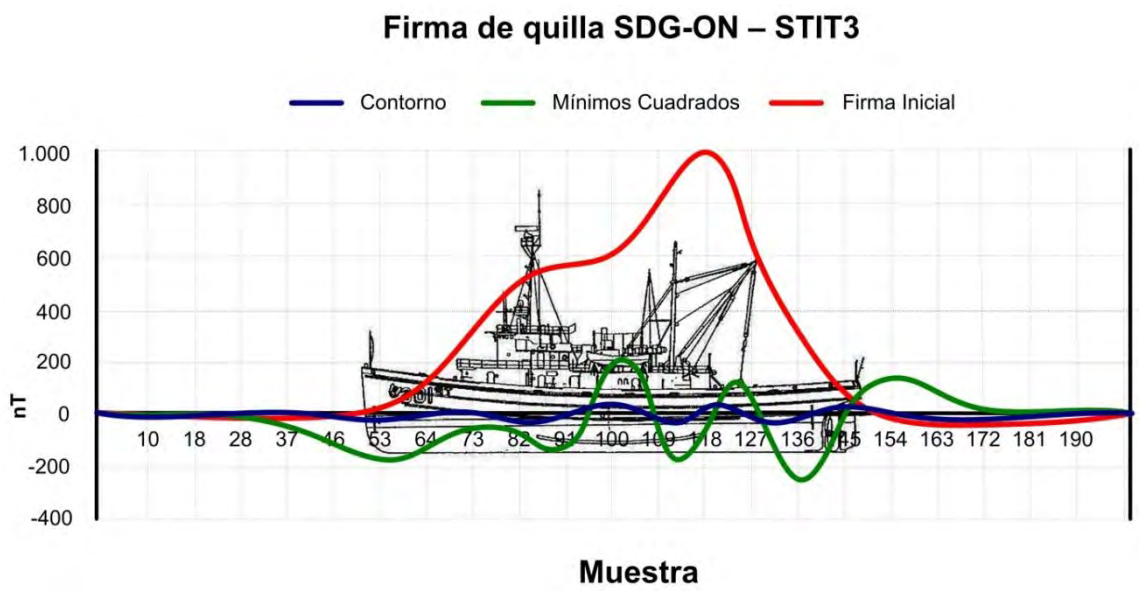


Figura 4. *Campo magnético inicial del barco, y campo magnético final obtenido después del proceso de compensación.*

Los resultados se han obtenido después de 40 generaciones de los GAs. Se observa una reducción del 80% cuando se combina los GAs con el método de mínimos cuadrados. Esta mejoría llega a ser del 96% cuando combinamos los GAs con el nuevo método de Contorno. Como se ve en la figura 4, los valores iniciales de pico para el campo magnético eran de unos 1010 nanoTeslas. Después de la compensación magnética, el valor máximo del campo apenas es de unos 35 nanoTeslas.

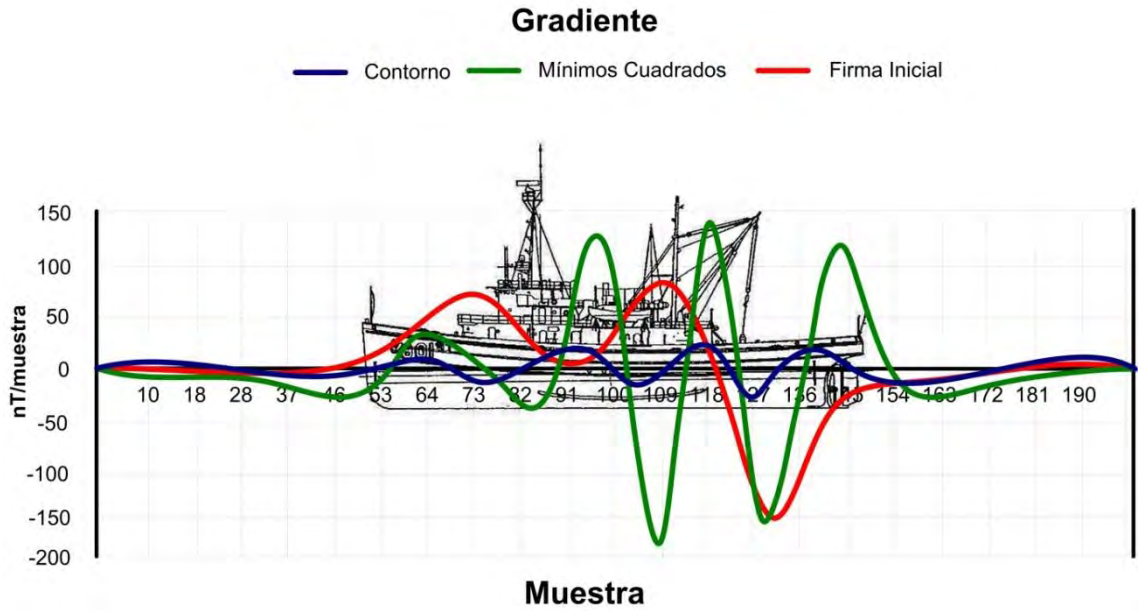


Figura 5. *Comparación entre el gradiente del campo magnético medido en quilla para la firma inicial y los resultados de optimización mediante GA usando la función objetivo de mínimos cuadrados y contorno después de 40 generaciones.*

Como dijimos anteriormente al mismo tiempo que reducimos el nivel de campo magnético se produce una disminución importante del gradiente. En la figura 5 se muestran los gradientes de la firma magnética inicial, después de la compensación utilizando mínimos cuadrados y después de la compensación

utilizando la nueva función objetivo de Contorno. Se observa claramente que el método de mínimos cuadrados no reduce prácticamente el gradiente, siendo en algunos casos superior. La reducción del gradiente por el método de Contorno es de un 60% del original que presenta el buque. Otra de las características de esta reducción a lo largo del buque es la uniformidad del rizado ya que no presenta picos que puedan representar la presencia de componentes magnéticos del buque como pueden ser los motores principales.

REFERENCIAS

[1] A.Villalba, "La magnetización de un buque y su medida", *Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada*, nº 4, pp. 15-24, Julio 2013.

[2] F. L. Dorze, J. Bongiraud, J. Coulomb, P. Labie, and X. Brunote, "Modeling of degaussing coils effects in ships by the method of reduced scalar potential jump", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, pp. 2477-2480, September 1998.

[3] F. Thollon and N. Burais, "Geometrical optimization of sensors for eddy currents non destructive testing and evaluation", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, pp. 2026-2031, May 1995.

[4] D. Weile and E. Michielssen, "Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, pp. 343-353, March 1997.

[5] C. Xudong, Q. Jingen, N. Guangzheng, Y. Shiyou, and Z. Mingliu, "An improved genetic algorithm for global optimization of electromagnetic problems", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, pp. 3579-3583, September 2001.

[6] D. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, "Optimization and Machine Learning"*, ch. 3, pp. 60-88, Addison-Wesley, 1989.

[7] C.-S. K. G. Fuat Üler, O.A. Mohammed, "Utilizing genetic algorithms for the optimal design of electromagnetic devices", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, pp. 4296-4298, November 1994.

[8] D. Rogers, P. Leonard, and H. Lai, "Surface elements for modelling 3d fields around thin iron sheets", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, pp. 1483-1486, March 1993.

Modelado acústico del sistema de eliminación de CO_2 de la planta AIP de un submarino

CC (CIA) Pedro Antonio Casas Alcaide
Doctor Ingeniero Naval por la UPM

Resumen.- El objetivo de este documento es presentar, a un nivel lo más general y sencillo posible, la arquitectura básica de los sistemas de eliminación de CO_2 que mejor se adaptan al uso a bordo de submarinos, una descripción de las principales fuentes de ruido en submarinos y la manera de modelar el comportamiento acústico de los componentes que forman los sistemas de eliminación arriba mencionados.

1.- Introducción

El alcance de los equipos de escucha pasivos utilizados por las diferentes marinas de guerra ha ido aumentando de manera espectacular gracias a los avances conseguidos en una serie de campos importantes:

- Introducción de técnicas de procesado de señal de tipo digital basadas en el uso masivo de ordenadores, debido a lo cual se puede trabajar con señales de una relación de potencia señal /ruido extremadamente baja, tanto en banda ancha como en banda estrecha.
- Aumento en la capacidad de procesamiento de señales de muy baja frecuencia (la atenuación de ondas acústicas propagándose en el agua es tanto mayor cuanto más alta es la frecuencia de las mismas).
- Reducción del ruido de fondo en el que opera el equipo de escucha mediante el diseño de plataformas mucho más silenciosas.
- Reducción del ruido de fondo en el que opera el equipo de escucha mediante el empleo de sonares remolcados alejados de las fuentes de ruido propias de la plataforma.
- Uso de técnicas de cancelación activa para atenuar el efecto que produce la vibración de las estructuras de la plataforma en los sensores acústicos.

Ante la amenaza constituida por los avances en detección pasiva arriba indicados, los submarinos han sufrido una evolución paralela pero en sentido inverso, siendo actualmente plataformas enormemente silenciosas gracias a los avances conseguidos en una serie de campos importantes:

- Diseño de hélices especiales de baja firma acústica
- Uso de formas exteriores en el diseño del submarino especialmente optimizadas para reducir el ruido de origen hidrodinámico
- Instalación de equipos y sistemas en el interior del casco resistente de bajo nivel de emisión acústica
- Uso generalizado de montajes elásticos para desacoplar las frecuencias propias de la estructura del submarino de las frecuencias de excitación de los diferentes equipos instalados a bordo

En un submarino navegando en régimen de patrulla silenciosa a baja velocidad, la fuente de ruido más importante (con gran diferencia respecto a las demás) es la constituida por la emisión acústica de los equipos instalados a bordo, lo que pone de manifiesto la enorme importancia que tiene el comportamiento como fuentes de emisión de ruido de dichos equipos.

Teniendo en cuenta que las plantas AIP actuales están pensadas para funcionar principalmente en navegación a régimen de patrulla silenciosa a baja velocidad, se ve inmediatamente que el nivel de ruido ge-

nerado por el funcionamiento de sus sistemas auxiliares resulta crítico, siendo necesario reducirlo todo lo que sea posible.

En este sentido, el modelado acústico de los sistemas de eliminación del CO_2 que produce la planta AIP de un submarinos, ya sea de cara a la determinación de valores de emisión exactos o a la realización de estudios comparativos en relación con varias alternativas, resulta del máximo interés en aplicaciones militares, sobre todo dada la falta de datos experimentales disponibles actualmente en relación con este tema.

El objetivo de este documento es presentar, a un nivel lo más general y sencillo posible:

- La arquitectura básica del sistema de eliminación de CO_2 que mejor se adapta al uso a bordo de submarinos.
- Una descripción de las principales fuentes de ruido en submarinos.
- Una serie de reflexiones sobre el modelado acústico de los componentes que forman el sistema de eliminación de CO_2 arriba mencionado.

Tabla 1.- Nomenclatura

d	Desplazamiento de la estructura en su punto de unión al soportado elástico (m)
F	Fuerza (N)
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
k	Constante elástica o rigidez modal (N/m)
m	Masa o masa modal (kg)
t	Tiempo (s)
z	Desplazamiento del equipo según el modo de vibración considerado (m)
ΔL	Longitud en reposo del soportado elástico (m)
***Subíndice* 0**	Soportado elástico
Subíndice e	Equipo soportado
Subíndice H	Fenómeno asociado a la interacción fluido-estructura
Subíndice R	Disipación
Subíndice s	Estructura del submarino

2.- Sistemas de eliminación de CO_2

Actualmente, hay varias alternativas para eliminar el CO_2 que produce la planta AIP de un submarino, pudiendo considerarse la representada en la figura 1 como la más ventajosa.

Observación 1.- *Aunque existen otras alternativas para eliminar el CO_2 que produce la planta AIP de un submarino, tal y como puede verse en la tesis doctoral del autor (ver referencia 1) y en uno de los artículos técnicos elaborados a partir de la misma (ver referencia 4), la opción de la figura 1 presenta una serie de características especialmente atractivas de cara a su instalación a bordo de submarinos, constituyendo el proceso de identificación de dichas características uno de los principales resultados de la citada tesis.*

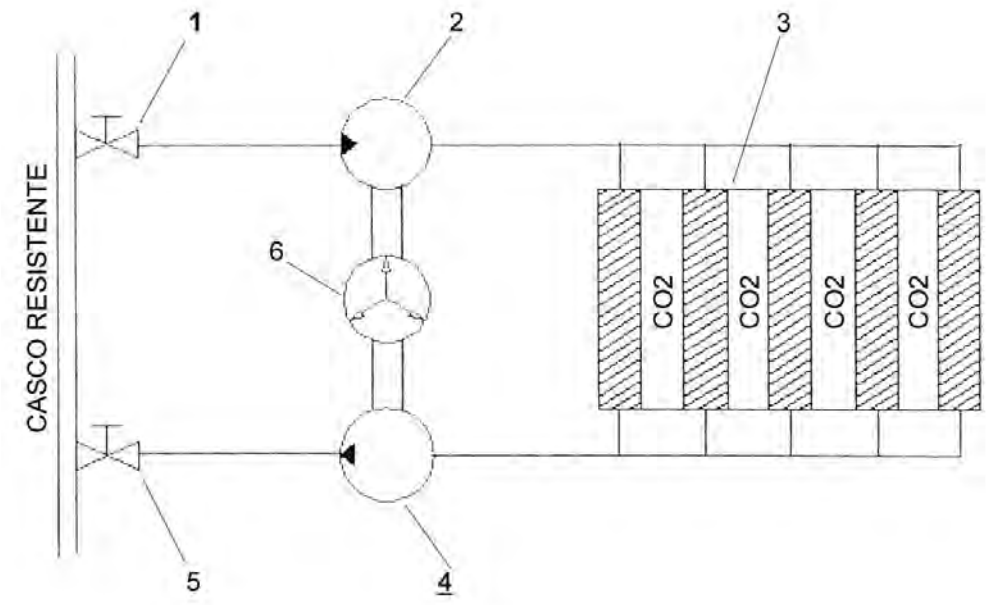


Fig. 1.- Sistema de eliminación de CO_2 (1.- Toma de mar, 2.- Motor hidráulico, 3.- Módulo de disolución de CO_2, 4.- Bomba hidráulica, 5.- Descarga al mar, 6.- Motor eléctrico)

En dicha alternativa, el esquema general de funcionamiento es el siguiente:

- El agua que entra por la toma de mar (1) baja de presión al circular a través de un motor hidráulico (2), en donde la energía hidrostática contenida en el agua exterior se convierte en energía mecánica en el eje de salida de dicho motor.
- El agua que sale del motor hidráulico (2) entra en el módulo de disolución (3), en donde el CO_2 producido por la planta AIP se elimina mediante su difusión al agua a través de una batería de membranas micro-porosas.
- El agua saturada de CO_2 que abandona el módulo de disolución (3) se hace circular por la bomba hidráulica (4), en donde la energía mecánica en el eje de entrada se transforma en la energía hidrostática necesaria para elevar la presión del agua.
- Finalmente, el agua saturada de CO_2 abandona el submarino a través de la descarga al mar (5).

Se hace notar que el eje de salida del motor hidráulico (2) se acopla directamente al eje de entrada de la bomba (4), al objeto de permitir la transmisión de energía mecánica entre ambos. El motor eléctrico (6) acoplado al eje común sirve únicamente para compensar las pérdidas de carga que se producen en la circuitería hidráulica.

Evidentemente, tanto la máquina hidráulica que actúa de motor como la que actúa de bomba pueden ser de tipo centrífugo o de desplazamiento positivo, siendo estas últimas las más adecuadas para su instalación a bordo de un submarino por los siguientes motivos:

- Desacoplan el caudal de la presión, lo cual permite un control mucho más sencillo de ambos parámetros.
- Presentan normalmente un rendimiento más alto que las máquinas centrífugas.
- Su funcionamiento se adapta mejor a las grandes variaciones de presión externa que se pueden producir durante la navegación en inmersión de un submarino.

Para describir el modelado acústico del sistema de eliminación presentado en este punto, se va a dividir el mismo en dos partes claramente diferenciadas:

- Módulo de recuperación de energía: conjunto formado por las dos máquinas hidráulicas (bomba y motor) que aparecen en la figura 1, cuya función es permitir la circulación de agua sin un consumo de potencia excesivo.
- Módulo de disolución de CO_2: conjunto formado por la batería de membranas micro-porosas que aparece en la figura 1, cuya función es disolver el CO_2 producido por la planta AIP en un flujo de agua a la presión existente en el interior del submarino.

3.- Generación de ruido a bordo de submarinos

En el diseño de un submarino moderno deben considerarse, desde el inicio del proyecto, dos factores básicos relacionados con la capacidad de supervivencia bajo los niveles de amenaza previsibles:

- DETECTABILIDAD (probabilidad que tiene un submarino de ser detectado): debe ser lo más reducida posible, de manera que se distorsione lo menos posible el entorno físico en el que opera. En este sentido, la minimización de las diferentes firmas constituye un objetivo de diseño fundamental.
- VULNERABILIDAD (probabilidad que tiene un submarino de sufrir daños por la acción de las armas enemigas): debe ser lo más baja posible, lo cual se consigue fundamentalmente de dos modos: diseñando las estructuras y los equipos de a bordo para soportar los niveles de choque esperables y usando el concepto de redundancia en los sistemas críticos.

En relación con la DETECTABILIDAD, y más en concreto con la firma acústica, cabe decir que las fuentes de ruido en un submarino pueden clasificarse según los dos tipos siguientes:

- De tipo estructural: tiene su origen fundamentalmente en el interior del caso resistente, y es debido al funcionamiento de los diferentes sistemas de a bordo (desequilibrio en sistemas rotativos, cavitación en válvulas, flujo turbulento en tuberías, fricción entre elementos deslizantes, contacto discontinuo típico de engranajes de reducción, etc.). Algunas de estas fuentes de ruido presentan espectros continuos mientras que otras concentran la mayor parte de la energía en ciertas bandas de frecuencia (armónicos).
- De tipo hidrodinámico: se origina fundamentalmente por el flujo del agua alrededor de la carena del submarino (y sus apéndices) y por el giro de la hélice (la entrada en cavitación de la hélice constituye una condición acústica que debe evitarse a toda costa). Análogamente al caso anterior, el ruido hidrodinámico puede presentar un espectro continuo junto con armónicos muy definidos.

A su vez, el ruido de tipo estructural que se acaba de mencionar puede clasificarse en tres tipos básicos según sea la vía de transmisión al exterior del submarino:

TIPO A.- Ruido aéreo transmitido a través de las planchas del casco resistente

Este ruido se transmite a través de la cámara de máquinas que alberga al sistema en estudio, y es debido fundamentalmente a:

- I.- Las vibraciones que produce la evolución en el tiempo de la presión existente en el interior del equipo combinada con la flexibilidad estructural del propio equipo.

- II.- El rozamiento/contacto que se produce entre las diferentes partes móviles del sistema.
- III.- La circulación de fluidos en el interior del sistema (fundamentalmente en régimen turbulento).
- IV.- La circulación de fluidos en el exterior del sistema (principalmente en régimen turbulento), producido en su mayor parte por el sistema de ventilación.

La forma más eficaz de reducir el nivel de ruido transmitido por esta vía pasa por dos tipos de soluciones básicas:

- Reducir el ruido producido por los propios equipos (aumentando su rigidez estructural, por ejemplo)
- Instalando aislamiento acústico, ya sea sobre los equipos origen del ruido o sobre las planchas del casco que forman parte de la cámara de máquinas donde se ubican dichos equipos

TIPO B.- Vibraciones mecánicas transmitidas a través del polín de anclaje y de las estructuras de soporte

Este ruido se transmite básicamente al exterior a través de las cuadernas y bulárcamas pertenecientes al reforzado transversal del submarino, siendo debido fundamentalmente a:

- I.- Desequilibrios dinámicos existentes en las partes móviles del sistema
- II.- Las vibraciones que produce la evolución en el tiempo de la presión existente en el interior del equipo combinada con la flexibilidad estructural del propio equipo

La forma más eficaz de reducir el nivel de ruido transmitido por esta vía pasa por dos tipos de soluciones básicas

- Reducir el ruido producido por los propios equipos (disminuyendo la masa de las partes móviles, por ejemplo)
- Instalando un soportado elástico bajo el sistema al objeto desacoplar las frecuencias de excitación de las frecuencias propias de la estructura del submarino.

TIPO C.- Ruido transmitido por las conducciones hidráulicas en contacto directo con el exterior del submarino

El ruido radiado al exterior a través de esta vía (fluido de trabajo que circula por el interior del sistema) tiene un origen muy similar al transmitido vía aérea, siendo debido fundamentalmente a:

- I.- La evolución en el tiempo de la presión existente en el interior del equipo.
- II.- El rozamiento/contacto que se produce entre las diferentes partes móviles del sistema.
- III.- La circulación de fluidos en el interior del sistema (principalmente en régimen turbulento).
- IV.- La irregularidad del caudal existente en los puertos de conexión en contacto con el exterior del submarino.

Es evidente que este tipo de transmisión únicamente ocurrirá en sistemas con circulación de agua exterior, siendo 4 las formas más eficaces de reducirlo:

- Reducir el ruido producido por los propios equipos (reduciendo la velocidad de circulación del fluido, por ejemplo)

- Instalando filtros acústicos que impidan la transmisión del sonido a través de la circuitería hidráulica del sistema.
- Funcionar en régimen estacionario, impidiendo de este modo las irregularidades de caudal asociadas al movimiento de columnas líquidas oscilatorias
- Variar el número de cilindros (en máquinas de desplazamiento positivo) para reducir la irregularidad del caudal en los puertos de conexión externos.

4.- Modelado acústico del módulo de recuperación de energía

El funcionamiento de estos sistemas bajo conmutaciones de presión de valor elevado (recuérdese que los submarinos actuales pueden bajar a centenares de metros de profundidad) presenta una serie de características acústicas específicas cuando se trata de máquinas de desplazamiento positivo:

- El ruido tipo A.I es normalmente muy superior al resto de ruidos tipo A, debido a la existencia de conmutaciones bruscas entre la presión de inmersión y la presión existente en el interior del submarino (esta circunstancia es intrínseca al funcionamiento de estos equipos, no existiendo medidas directas para reducir el ruido correspondiente)
- El ruido tipo B.I suele predominar sobre el B.II en sistemas con masas de movimiento alternativo, pudiendo limitarse bastante mediante el correcto equilibrado del sistema y la disposición de un soportado elástico bien diseñado.
- Los ruidos tipo C.I y C.IV son normalmente muy superiores al resto de ruidos tipo C, debido nuevamente a la existencia de conmutaciones bruscas entre la presión de inmersión y la presión existente en el interior del submarino y a las irregularidades de caudal que se producen en la mayoría de las máquinas de desplazamiento positivo.

Todo lo que sigue se va a centrar en el modelado de ruidos tipo A.I, B.I, C.I y C.IV, que como se acaba de ver, constituyen la contribución más importante a la firma acústica del submarino.

<u>Ruido tipo A.I</u>

El tratamiento teórico del ruido tipo A.I exige la introducción de 3 modelos distintos:

- Modelo correspondiente al comportamiento del fluido en el interior del equipo.
- Modelo correspondiente al comportamiento de la carcasa del equipo
- Modelo correspondiente a la transmisión acústica en el interior de la cámara de máquinas y a través de las planchas del casco resistente (responsable directo del ruido radiado al exterior del submarino)

***Observación 2**.- El último de los modelos arriba indicados podría subdividirse en dos: aire en cámara de máquinas y planchas del casco resistente. No obstante, el planteamiento conceptual sería el mismo, habiéndose preferido el modelo combinado por comodidad de exposición.*

La resolución directa del sistema formado por los 3 modelos arriba indicados (incluyendo las posibles interacciones entre los mismos) presenta un grado de complejidad elevado, requiriendo un esfuerzo desproporcionado en relación con la exactitud de los resultados obtenidos.

Un enfoque alternativo (con una relación esfuerzo/exactitud aceptable) consiste en despreciar las interacciones existentes entre los 3 modelos arriba indicados, lo cual puede asumirse sin cometer errores apreciables debido a lo siguiente:

- La flexibilidad estructural del propio equipo es normalmente mucho menor que la compresibilidad del fluido de trabajo, lo que permite suponer que la evolución dinámica del fluido va a ser independiente de las deformaciones de la carcasa del equipo
- La flexibilidad estructural del propio equipo también es normalmente mucho menor que la compresibilidad del aire existente en la cámara de máquinas, lo que permite suponer que la evolución dinámica de la carcasa del equipo va a ser independiente de la evolución dinámica del entorno formado por el aire de la cámara de máquinas.

Lo anterior constituye un grado de simplificación apreciable respecto al enfoque directo, pues permite dividir el problema en pasos independientes:

- **Paso 1**: se modela el comportamiento del fluido interno del equipo suponiendo este último formado por una serie de sólidos rígidos (los modelos matemáticos que aparecen en la tesis de la referencia 1 son un ejemplo de esta forma de proceder)
- **Paso 2**: el comportamiento dinámico determinado en el paso anterior se introduce como excitación del modelo correspondiente al comportamiento estructural del equipo, el cual a su vez se considera independiente de la evolución dinámica de aire existente en la cámara de máquinas.
- **Paso 3**: el comportamiento dinámico del equipo determinado en el paso anterior se introduce como excitación del modelo correspondiente al aire existente en la cámara de máquinas (y las planchas del casco resistente), obteniéndose finalmente el ruido aéreo que se transmite al exterior del submarino.

El paso 2 arriba indicado exige la elaboración de un modelo estructural de la carcasa del equipo, lo cual puede llevarse a cabo mediante herramientas numéricas (métodos de elementos finitos por ejemplo) si se desea mantener un grado de detalle elevado.

Sin embargo, cuando se trata de obtener datos para la realización de estudios comparativos, es posible introducir modelos analíticos sencillos para la estructura del equipo. Así por ejemplo, el modelado estructural de una máquina de desplazamiento positivo podría reducirse al modelado de uno de los cilindros que conforman la misma.

Una vez ejecutados los tres pasos arriba descritos para cada uno de los equipos existentes en el interior de una cámara de máquinas, el espectro de ruido aéreo total puede obtenerse como suma de los obtenidos de forma independiente para cada uno de ellos asumiendo que el aire de la cámara de máquinas constituye un sistema lineal a efectos acústicos (hipótesis bastante usual, al menos en una primera aproximación).

<u>Ruido tipo B.I</u>

El ruido tipo B.I está asociado a la dinámica estructural del propio casco resistente del submarino, presentado una problemática especial cuyo tratamiento se va a describir de forma esquemática y para el caso más sencillo posible: un solo modo de vibración.

El tratamiento teórico del ruido tipo B.I exige la introducción de 2 modelos distintos:

- Modelo correspondiente al comportamiento dinámico del propio equipo (en relación con el movimiento de sus partes móviles), de su montaje elástico y de la zona estructural del submarino que lo soporta.
- Modelo correspondiente a la radiación acústica, hacia el exterior, inducida por la vibración de la estructura del submarino.

El primero de ellos puede subdividirse en otros tres, los cuales se definirán mediante las 3 ecuaciones que aparecen a continuación:

Suponiendo al sistema en estudio como un cuerpo rígido de masa constante sometido a una fuerza de excitación conocida (F_e), la ecuación del equilibrio dinámico responde a la expresión siguiente:

$$m_e \frac{d^2 z}{dt^2} = -m_e g + F_e(t) + F_{e0} \tag{1}$$

En donde "*z*" es la coordenada generalizada (un desplazamiento en el caso considerado) que define el movimiento del equipo según el modo de vibración considerado para la estructura.

Por otro lado, la ecuación del equilibrio dinámico correspondiente al modo de vibración considerado para la zona estructural del submarino que soporta el equipo puede describirse de la forma siguiente:

$$m_s \frac{d^2 d}{dt^2} + k_s d = -F_{s0} + F_H \tag{2}$$

En donde "*d*" es la coordenada generalizada (un desplazamiento en el caso considerado) que define el desplazamiento de la estructura en el punto situado justo bajo el soportado elástico del equipo.

***Observación 3**.- Cuando se tienen en cuentas simultáneamente varios modos de vibración, la ecuación (2) anterior pasa de ser escalar a matricial. No obstante, y a pesar de la simplificación que representa, el uso de un solo modo de vibración (el fundamental) suele dar resultados bastante aceptables, al menos de cara a la ejecución de estudios preliminares.*

Para cerrar el sistema formado por las dos ecuaciones anteriores, únicamente queda por definir el comportamiento del sistema de soportado elástico, el cual puede describirse mediante la expresión siguiente:

$$F_{e0} = F_{s0} = k_0 \left(\frac{d - z}{\Delta L} - 1 \right) + F_R \tag{3}$$

En donde:

- El comportamiento elástico se ha supuesto lineal.
- Se han despreciado los efectos inerciales debidos al propio soportado elástico ($F_{e0} = F_{s0}$).
- La forma que adopta la fuerza de disipación en el soportado (F_R) no se ha especificado, dejando abierta la opción de considerar modelos no lineales.

En relación con la ecuación (2), hay una serie de aspectos importantes sobre los que conviene llamar la atención:

En primer lugar, hay que decir que la masa y rigidez modales incluidas en la misma (m_s y k_s) suelen calcularse mediante el método de los elementos finitos (FEM), aunque en ciertos casos sencillos pueden estimarse por métodos analíticos.

Por otro lado, la fuerza "F_H" asociada a la interacción fluido-estructura (originada por la existencia de ruido radiado al agua) es normalmente una función de la variable "*d*" y de sus derivadas temporales, y suele estimarse mediante el uso de técnicas numéricas basadas en la mecánica de fluidos computacional

(CFD). Debe observarse que cuanto la expresión de "F_H" presente no linealidades, será necesario trabajar en el dominio del tiempo.

En relación con el comportamiento lineal considerado para la estructura del submarino, cabe decir que constituye una hipótesis perfectamente aceptable en la mayoría de los casos debido a lo siguiente:

- Los desplazamientos/deformaciones de la estructura producidos en la transmisión acústica son muy pequeños.
- El material trabaja muy por debajo de su límite elástico (en submarinos, el material es normalmente acero de alta resistencia)
- Las frecuencias involucradas son muy bajas, por lo que la estructura molecular del material no llega a mostrar efectos no lineales de origen dinámico.

Otro aspecto importante es el hecho de haber despreciado por completo la disipación de energía que se produce durante la deformación de la propia estructura del submarino, ya que deja como únicas formas de disipación energética posibles la amortiguación en el soportado elástico y la radiación de ruido al agua exterior. Aunque lo anterior puede aceptarse como una primera aproximación, hay situaciones donde la disipación de energía en la estructura puede llegar a ser un factor importante.

La resolución del sistema formado por las ecuaciones (1), (2) y (3) puede llevarse a cabo según 2 alternativas: de forma simultánea (enfoque directo) o despreciando las interacciones existentes (enfoque simplificado). Para aplicar este último basta con introducir las siguientes aproximaciones:

- El valor de "d" se supone muy inferior al de "z".
- El valor de "F_H" se supone muy inferior al de "F_{s0}".

Lo anterior permite dividir el problema en pasos independientes:

- **Paso 1**: Se resuelve la ecuación (1) para determinar la evolución temporal de "z" (Obsérvese que con la primera de las aproximaciones arriba indicadas "F_{e0}" va a depender únicamente de "z").
- **Paso 2**: Usando el resultado hallado en el paso anterior (y despreciando la contribución de "F_H"), se resuelve la ecuación (2) para determinar la evolución temporal de "d".
- **Paso 3**: La evolución temporal de "d" hallada en el paso anterior se usa como excitación del modelo correspondiente a la radiación acústica hacia el exterior, alcanzándose finalmente el resultado buscado.

En cuanto a la determinación del ruido de origen vibratorio radiado por el submarino a nivel global, suelen obtenerse resultados aceptables a un coste computacional bajo mediante el procedimiento aproximado siguiente:

- Aplicar el enfoque simplificado a cada una de las fuentes de ruido en estudio
- Sumar los espectros de ruido radiado obtenidos por separado para cada una de las fuentes arriba citadas.

En relación con esto último, cabe decir que cuando los fenómenos de interacción no lineal entre las diversas fuentes de ruido tengan una contribución apreciable, resultará necesario considerar toda la estructura excitada simultáneamente en varios puntos (uno por cada fuente de vibración) y calcular directamente el espectro global de ruido radiado al agua, lo que exigirá el uso de herramientas numéricas (FEM, CFD, etc.).

Ruido tipos C.I y C.IV

Dada la naturaleza de los ruidos tipo C.I y C.IV, resulta necesario modelarlos de forma conjunta si se quieren alcanzar resultados razonablemente exactos, pues la cinemática de las columnas líquidas en el interior de los sistemas de recuperación considerados suele estar intrínsecamente unida a los efectos dinámicos de tipo inercial que se derivan de la misma .

Dicho esto, el tratamiento teórico de estos dos tipos de ruido exige la introducción de 2 modelos distintos:

- Modelo correspondiente al comportamiento del fluido en el interior del equipo.
- Modelo correspondiente a la radiación acústica hacia el exterior que se produce en las conexiones al mar.

***Observación 4**.- El modelo correspondiente al comportamiento de la carcasa del equipo no se ha tenido en cuenta, habiéndose considerado la misma como un sólido rígido. Esto es así porque la flexibilidad estructural de la citada carcasa es normalmente mucho menor que la compresibilidad del fluido de trabajo, lo que permite desacoplar la evolución dinámica de ambos y despreciar las interacciones correspondientes.*

De igual modo, el modelo correspondiente a la circuitería hidráulica tampoco se ha tenido en cuenta, lo cual puede interpretarse de dos formas:

- *Se supone que su contribución es irrelevante (hipótesis muy usada cuando se trata de llevar a cabo estudios comparativos entre diferentes sistemas).*
- *Se supone incluido en el modelo correspondiente al comportamiento del fluido en el interior del equipo.*

El planteamiento conceptual en ambos casos sería el mismo, bastando en el último de ellos con incluir los elementos correspondientes a las conducciones como si formasen parte del propio equipo.

Análogamente a lo que sucede con el ruido tipo A.I, la resolución directa del sistema formado por los 2 modelos arriba indicados presenta un grado de complejidad elevado. En este caso, también resulta posible despreciar las interacciones existentes entre dichos modelos gracias a lo siguiente:

El océano constituye un volumen prácticamente infinito en relación con el volumen del submarino, lo que impone un valor de la presión en las conexiones al mar prácticamente constante (recuérdese las condiciones de contorno correspondientes a la descarga libre de un fluido a un entorno abierto en régimen subsónico). Esto permite suponer sin cometer errores excesivos que la evolución dinámica del fluido en el interior del equipo va a ser independiente de la evolución dinámica del fluido en el exterior de las conexiones al mar.

Lo anterior permite dividir el problema en pasos independientes:

- **Paso 1**: se modela el comportamiento del fluido interno del equipo suponiendo este último formado por una serie de sólidos rígidos (tal y como ya se ha dicho, los modelos que aparecen en la tesis de la referencia 1 son un ejemplo de esta forma de proceder)
- **Paso 2**: el comportamiento dinámico determinado en el paso anterior se introduce como excitación del modelo correspondiente a la radiación acústica que se produce en las conexiones al mar del equipo.

El paso 2 arriba indicado exige la elaboración de un modelo específico para el comportamiento acústico que presenta una conexión directa al mar, lo cual puede hacerse mediante herramientas numéricas (mecánica de fluidos computacional) si se desea mantener un grado de detalle elevado.

Sin embargo, cuando se trata de obtener datos para la realización de estudios comparativos, es posible introducir modelos analíticos sencillos de naturaleza lineal y trabajar por tanto en el dominio de la frecuencia. Así por ejemplo, la condición de radiación en una toma de mar podría deducirse aproximando la impedancia acústica en el extremo abierto con la impedancia de un oscilador esférico de diámetro igual al diámetro de la toma de mar considerada.

5.- Modelado acústico del módulo de disolución de CO_2

Los sistemas de disolución de CO_2 basados en membranas micro-porosas funcionando en régimen de difusión presentan una serie de características acústicas muy diferentes de los sistemas de recuperación de energía, a saber:

- El ruido tipo A.I, A.II y A.IV son completamente inexistentes, pues funcionan a presión constante, no tienen partes móviles y no necesitan de sistemas de ventilación. Lo anterior significa que el único ruido generado va a ser del tipo A.III, el cual puede reducirse en gran medida limitando la velocidad de circulación del fluido por el interior del sistema.
- El ruido tipo B (tanto I como II) es totalmente inexistente, pues funcionan a presión constante y no tienen partes móviles (esta circunstancia simplifica enormemente el diseño del soportado elástico, el cual únicamente deberá contemplar los efectos de choque producidos por las explosiones submarinas)
- El ruido tipo C.I, C.II y C.IV son completamente inexistentes, pues funcionan a presión constante, no tienen partes móviles y no producen ningún tipo de irregularidad en el caudal que circula a través de los mismos. Lo anterior significa que el único ruido generado va a ser del tipo C.III, el cual, análogamente al tipo A.III, puede reducirse en gran medida limitando la velocidad de circulación del fluido por el interior del sistema.

De lo anterior se desprende que la generación de ruido en el módulo de disolución de CO_2 presentado en este documento (ver punto 2) va a ser totalmente despreciable en comparación con el módulo de recuperación de energía, no siendo necesario proceder a su modelado acústico al menos en una primera aproximación.

6.- Conclusiones y comentarios finales

De las dos partes en que puede dividirse el sistema de eliminación de CO_2 descrito en este documento, únicamente resulta necesario modelar el comportamiento acústico del módulo de recuperación de energía, ya que la generación de ruido en el módulo de disolución resulta despreciable en comparación con el anterior.

Por otro lado, la generación de ruido en el módulo de recuperación de energía se debe fundamentalmente a las siguientes causas:

- Ruido aéreo transmitido a través de las planchas del casco resistente, inducido por las vibraciones que produce la evolución en el tiempo de la presión existente en el interior del equipo combinada con la flexibilidad estructural del propio equipo
- Vibraciones mecánicas transmitidas a través del polín de anclaje y de las estructuras de soporte, inducidas por desequilibrios dinámicos existentes en las partes móviles del equipo
- Ruido transmitido por las conducciones hidráulicas en contacto directo con el exterior del submarino, inducido tanto por las pulsaciones que produce la evolución en el tiempo de la presión existente en el interior del equipo como por las irregularidades del caudal existente en los puertos de conexión externos.

En relación con lo anterior, una descripción exhaustiva del comportamiento acústico del módulo de recuperación de energía exigiría el desarrollo de los siguientes modelos matemáticos específicos (independientes en una primera aproximación):

- Modelo correspondiente al comportamiento del fluido en el interior del equipo
- Modelo correspondiente al comportamiento de la carcasa del equipo sometida a pulsaciones de presión internas
- Modelo correspondiente a la transmisión acústica en el interior de la cámara de máquinas y a través de las planchas del casco resistente
- Modelo correspondiente al comportamiento dinámico del propio equipo (en relación con el movimiento de sus partes móviles), de su montaje elástico y de la zona estructural del submarino que lo soporta.
- Modelo correspondiente a la radiación acústica, hacia el exterior, inducida por la vibración de la estructura del submarino.
- Modelo correspondiente a la radiación acústica, hacia el exterior, que se produce en las conexiones al mar.

Finalmente, puede decirse que hay bastante bibliografía disponible para abordar el desarrollo de los modelos arriba citados salvo para el primero de ellos, en donde las únicas fuentes de información conocidas por el autor son su propia tesis doctoral (ver referencia 1) y algunos de los artículos técnicos elaborados a partir de la misma (ver referencias 2 y 3).

En dicha tesis se desarrollan modelos matemáticos detallados que permiten caracterizar el comportamiento del fluido en el interior de una serie de sistemas de recuperación de energía alternativos teniendo en cuenta los aspectos más relevantes:

- Ondas de choque (golpes de ariete)
- Cavitación (flujo bifásico) y fenómenos de bloqueo asociados
- Fluidos con varias especies químicas (disoluciones de CO_2 en agua)
- Fluctuaciones de la presión externa por cambios de cota del submarino
- Fenómenos de resonancia hidrodinámica

Además, y usando como punto de partida los modelos desarrollados en la propia tesis, se presenta una serie de simulaciones numéricas al objeto, entre otras cosas, de obtener una descripción del comportamiento acústico de los diferentes sistemas de recuperación considerados (Un resumen de los resultados obtenidos en este sentido puede encontrarse en el documento de referencia 2).

7.- Referencias

1 **Casas P.A.,** 2012, Eliminación de dióxido de carbono en la propulsión de submarinos
UPM.- ETSIN.- Tesis doctoral

2 **Casas P.A., Martínez I.,** 2012, Gestión energética: eliminación de CO_2 en submarinos
Boletín de Observación Tecnológica en Defensa nº35

3 **Martinez I., Casas P.A.,** 2012, Choked flow in water/CO_2 solutions on air-independent propulsion systems
Journal of Marine Science and Technology, Volume 17, Number 4

4 **Martinez I., Casas P.A.,** 2012, Simple model for CO_2 absorption in a bubbling water column
Brazilian Journal of Chemical Engineering, Volume 29, Number 01

Refresco tecnológico frente obsolescencia

CC (CIA) José Manuel Martínez Ruiz
Subdirección General de Personal

Introducción.

Actualmente, nos encontramos en momentos de penuria financiera, especialmente en todo lo relacionado con el presupuesto del Ministerio de Defensa; debiendo plantearse medidas y políticas que sean capaces de gestionar, de manera eficiente, el dilema producido entre la escasez de recursos y la revolución tecnológica.

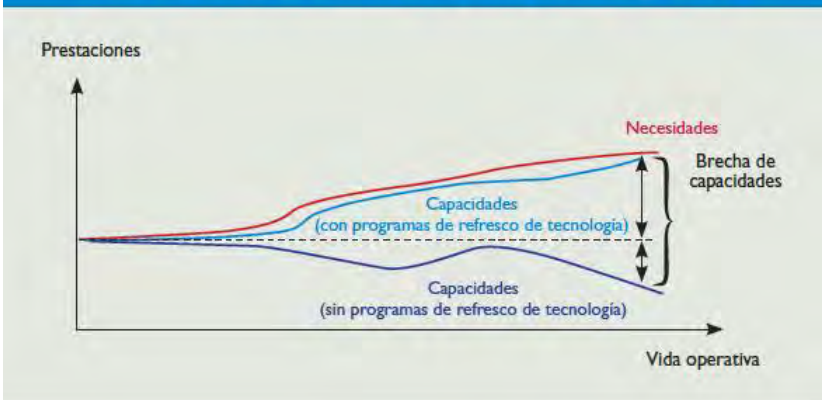
En general, el Ministerio de Defensa regula el proceso de obtención de los recursos materiales de armamento y material, de infraestructura y de sistemas de información y telecomunicaciones desde una perspectiva integral, con el fin de obtener soluciones integrales en alcance y plazo; tomando en consideración el coste y los condicionantes que se deriven de su ciclo de vida. Se entiende el coste como el directo vinculado a su adquisición o a la investigación, diseño y su posterior producción, construcción o desarrollo; así como a la operación, mantenimiento y baja al final de su vida en servicio.

Los sistemas complejos, especialmente los de defensa, con largos ciclos de adquisición y vida operativa (entre 20 y 40 años), van perdiendo capacidades no solamente por el uso y la degradación natural de sus componentes sino, también, por las obsolescencias tecnológicas e insuficiencias funcionales derivadas de la evolución de las necesidades del usuario. Como consecuencia de lo anterior, se genera una brecha de capacidades (ver figura I).

Asimismo, cada vez más, cobra especial relevancia lograr una correcta operatividad de los sistemas mediante desembolsos homogéneamente programados durante todo su ciclo de vida, evitando, de esta forma, puntas presupuestarias producidas al hacer frente a los importantes costes que requieren los programas de modernización. Este método muestra, no sólo ser ineficaz en cuanto al mantenimiento en el tiempo de las características del sistema sino que provoca un endeudamiento a largo plazo; que impide, especialmente en situaciones de restricciones presupuestarias, la posibilidad de poder hacer frente a nuevas adquisiciones o tecnologías más avanzadas.

Así, para asegurar una eficaz ejecución del sistema durante toda la vida operativa y reducir, en lo posible, la brecha de capacidades con la mayor relación efectividad/coste, aparecen los *Programas de Refresco de Tecnología* (PRT). Este refresco implica el reemplazo continuo de elementos de un sistema, en especial los elementos disponibles comercialmente conocidos como Commercial off-the-Shelf (COTS), para asegurar una eficaz sostenibilidad del sistema. En la "*Figura I*" se puede observar su efecto mitigador durante el ciclo de vida de un sistema.

Figura I. La brecha de capacidades y el efecto mitigador de los PRT



Indudablemente, cualquier PRT estará compuesto por un conjunto de actividades de refresco de tecnología derivadas de un exhaustivo análisis técnico-económico sobre la mejor alternativa de mantenimiento durante la vida operativa del sistema. Estas tareas pueden ser *actualizaciones*, incorporando o sustituyendo elementos para mantener actualizadas las capacidades del sistema; *mejoras*, incorporando una nueva generación o actualización que mejora la efectividad del sistema, o *inserciones de tecnología*, que incorporan un nuevo producto y, con ello, aumenten una nueva capacidad al sistema.

Finalmente, debería implementarse una metodología para medir y valorar las actualizaciones, mejoras e inserciones de tecnología, con el fin de obtener una lista priorizada que permita, de una forma eficaz, efectuar una toma de decisiones. Además, sería necesario organizar y programar la ejecución eficaz las referidas actividades de refresco de tecnología.

Metodología.

Con el fin de establecer y ejecutar eficazmente un PRT se evalúan, básicamente, tres aspectos:

- La identificación de necesidades u oportunidades de refresco de tecnología.
- La valoración de las actividades de refresco de tecnología identificadas y su adecuación a las prioridades y/o misiones del sistema.
- La elaboración y actualización de la lista priorizada de actividades de refresco de tecnología para la toma de decisiones.

Este proceso tendrá en cuenta las limitaciones tanto económicas como de tiempos o plazos para efectuar su aplicación.

En cualquier sistema, el PRT será efectivo si se realiza una buena gestión, de tal forma que se asegure la integridad del control de la *configuración del sistema* a lo largo de todo su ciclo de vida. Por tanto, sería conveniente la existencia de un grupo de trabajo o comité, integrado por el cliente y el suministrador-mantenedor, que establezca o identifique las posibles obsolescencias e identifique posibles estrategias de mitigación.

Normalmente, las actividades de refresco tecnológico surgen para dar respuesta a las necesidades producidas, bien por obsolescencias de mercado (componentes del sistema que, por su antigüedad, ya no pueden adquirirse en el mercado), bien para cubrir nuevos requisitos no solicitados inicialmente al sistema o porque se detecta una oportunidad tecnológica que nos parezca interesante tomar en consideración. Estas deberán ser filtradas para sólo tener en cuenta aquellas alineadas con los objetivos básicos del sistema a aplicar.

Seguidamente, cada actividad de refresco tecnológico, cuantitativamente, será valorada respecto a los siguientes aspectos: riesgo, mejora generada en el sistema, coste y plazo o tiempo de ejecución. El conjunto de factores y la escala utilizada para la cuantificación de cada uno de los aspectos anteriores serán determinados como consecuencia del análisis técnico-económico del sistema.

Como herramienta de apoyo, sería recomendable indicar una estimación del esfuerzo que conlleva implementar una actividad de refresco tecnológico en términos de cantidad de elementos de configuración con los que se interaccionará y el tipo e intensidad de interacción que haya con ellos. En suma, este índice sirve para dar una idea cualitativa del esfuerzo requerido en la actividad de refresco tecnológico e incluso nos puede arrojar luz sobre las diferencias de coste entre éstas.

Finalmente, señalar que cualquier implementación técnica, como es un PRT, debe ser soportada por su viabilidad económica. Por tanto, cualquier PRT debería estar asociado a un contrato de mantenimiento marco, de tal forma que las partes implicadas tuvieran un marco de actuación claro y estable para su ejecución.

Conclusiones.

Es evidente que la toma de decisiones sobre la implementación de un Programa de Refresco de Tecnología (PRT) es un asunto complejo que requiere tomar en consideración múltiples factores de carácter tanto técnico como económico para estimar la ganancia o mejora global que se puede obtener con ello. No obstante, cuando se trata de sistemas complejos o con alto componente tecnológico, es indudable su beneficio y necesidad.

Cualquier actividad de refresco tecnológico, por atractiva y necesaria que parezca para mantener la efectividad del sistema, debe ser detalladamente analizada y comparada a fin de determinar aquella más conveniente tanto desde la perspectiva técnica, como desde la económica.

En cualquier PRT es ineludible la participación y los contactos con la industria al objeto de conocer las posibilidades que ofrece la tecnología y determinar los factores esenciales y necesarios para cuantificar cada actividad de refresco tecnológico.

BIBLIOGRAFÍA

- Herald, T., *Technology Refreshment Strategy and Plan for Application in Military Systems*-A "How-To Systems Development Process" and Linkage with CAIV. IEEE 2000, pp. 729-736.

- Haines, L., "*Technology Refreshment within DoD. Information Technology"*, March- April 2001, pp. 22-27.

- Sandborn, P., *Optimum Technology Insertion into Systems Based on the Assessment of Viability.* IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 26, No. 4, pp. 734-738, December 2003.

- A. Sols, I. Fernández, A. Molero., "*El diseño de sistemas y los programas de refresco de tecnología".* Anales de mecánica y electricidad, Mayo-Junio 2010, pp. 2-5.

- Instrucción 67/2011, de 15 de septiembre, del Secretario de Estado de Defensa, por la que se regula el *Proceso de Obtención de Recursos Materiales* (BOD nº 189).

- J. Romero, A. Sols. *Nuevas estrategias en el apoyo al ciclo de vida de los buques militares.* Ingeniería Naval, Marzo 2011, pp. 85-89.

INNOVACIONES EN EL AMARRE Y FONDEO

TN (CIA) Raúl Villa Caro
Inspector de Nuevas Construcciones del Arsenal de Ferrol

Inspección automatizada de cadenas de amarre

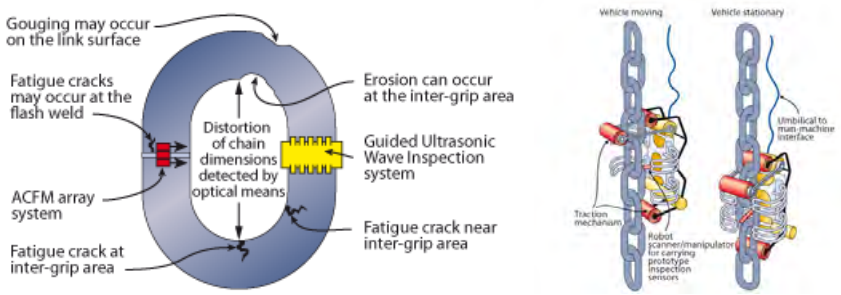
Una estructura flotante típica como puede ser una plataforma petrolífera (FPSO) puede tener hasta 14 cadenas de amarre, que podrían suponer cerca de 10 Kilómetros de cadena.

Estas cadenas de amarre sufren cargas cíclicas por los golpes de mar y, por lo tanto, fatiga. La fatiga puede dar lugar a la propagación de grietas, lo que puede provocar que una cadena pueda romper muy por debajo de la resistencia de la rotura del material. La existencia de múltiples fallos de amarre podría causar la deriva de una plataforma.

Los principales reglamentos, como la DNV en 'Certificación de la Cadena amarre en alta mar', requieren que las cadenas deben ser inspeccionadas para detectar grietas en la superficie y cerca de la misma, así como la inspección visual para detectar la corrosión y la distorsión. Todas estas técnicas requieren que la cadena se suba sobre cubierta para ser inspeccionada.

El sistema robótico "ChainTest" tiene como objetivo que las pruebas se realicen más a menudo y por lo tanto aumente la probabilidad de detección de grietas, mediante el empleo de técnicas de END (ensayos no destructivos). Este sistema propone diseñar un vehículo robótico capaz de subir por la cadena e ir provisto a la vez de END y equipos de limpieza. En cada eslabón, el robot se detendrá, realizará la limpieza, realizará END y enviará datos al operador en la estructura offshore para el análisis y la grabación. Se espera aumentar la fiabilidad de la inspección de la cadena. El sistema de pruebas del robot envía una onda de ultrasonidos de baja frecuencia a través del eslabón de la cadena y detecta daños tales como grietas, corrosión o erosión. El sistema se podría utilizar específicamente para detectar grietas de soldadura.

Figura 1: Posibles fallos y funcionamiento de la inspección



Ganchos de liberación rápida

Estos enganches permiten liberar las líneas de amarre rápida y fácilmente, incluso en condiciones de plena carga.

Existen varias opciones de montaje para este mecanismo dependiendo de si se quiere actualizar un sistema ya existente o montarlo de nuevo.

Cada gancho está diseñado de forma que se impida que en ninguna circunstancia pueda impactar en el suelo. El sistema está elaborado para poder ser liberado por un operador cuando la línea está conectada, incluso a plena carga.

Todos los ganchos están disponibles en modelo individual o múltiple y pueden ser equipados con todo tipo de opciones a la hora de la liberación, que tanto puede ser a través de un circuito neumático como a través de un circuito hidráulico.

Los ganchos se prueban hidráulicamente a 3.000 KN y son sometidos a todos los reglamentos de las sociedades de clasificación.

La construcción está hecha de acero de alta calidad y diseñada para ser utilizada en casi todas las circunstancias.

Sus rangos de trabajo oscilan entre 15 y 200 toneladas.

Figura 2: Ganchos de liberación rápida.

Ganchos en alta mar de liberación rápida

Los ganchos en alta mar de liberación rápida están diseñados para el amarre seguro de los buques de transporte de FPSO, FLNG, etc. y de gama estándar desde 60 hasta 150 toneladas de carga de trabajo.

Algunas empresas suministran gancho, unidades individuales, dobles, triples y cuádruples de liberación rápida para la ubicación de las aplicaciones de amarre desde el costado del barco.

Cuando por ejemplo un petrolero sufre una emergencia, la cisterna de transporte puede ser liberada por el gancho de liberación rápida manualmente por medio de una palanca de liberación u opcionalmente eléctricamente o hidráulicamente desde un panel de control local o de forma remota desde un panel de control remoto o sistema informático.

La unidad de gancho de liberación rápida puede ser atornillada directamente a la cubierta de acero o a un soporte y este a su vez soldado a la cubierta de acero.

Figura 3: Ganchos de liberación rápida

Entre las ventajas de este tipo de ganchos de amarre se podrían destacar las siguientes:

- Diseñados para bajos costes de fabricación.
- Se fabrican de placas de acero certificado.

- Todos los ganchos de amarre pueden liberarse manualmente con el 100% de la carga máxima de seguridad, con un esfuerzo manual mínimo (máx. fuerza 10 a 20 kg).
- Una simple acción de un hombre puede restablecer el gancho.
- Estos ganchos de amarre cumplen las normas ISO.
- Los ganchos son estándar y diseñados para operar 180 grados en horizontal y 45 grados en vertical.
- Pueden ser totalmente desmontados con herramientas manuales estándar.
- Todas las partes móviles pueden ser fácilmente engrasadas.
- Puede ser suministrados con certificado de clasificación de cualquier autoridad de clasificación tal como ABS, LR, BV, DNV, etc.
- Dotados de características opcionales como cabrestante Integral, sistema de control remoto y sistema de amarre con control de carga.

Figura 4: Ganchos de liberación rápida

Pivote semiautomático

Con la finalizad de reducir el personal necesario en el muelle durante las operaciones de amarre se ha diseñado un sistema para operar con un pivote telescópico movible que puede ser inclinado hacia el casco del buque.

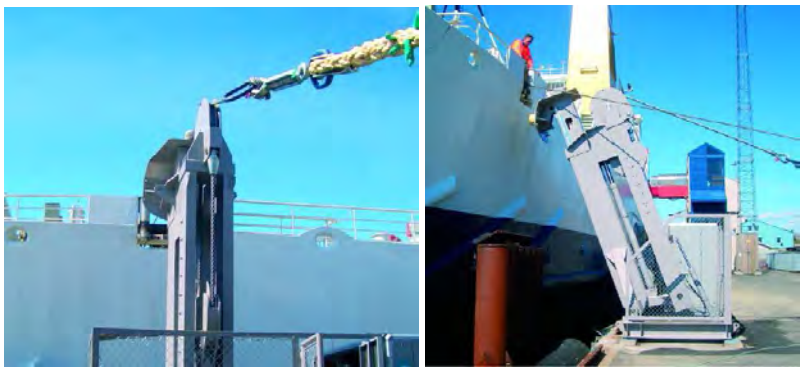


Figura 5: Pivote semiautomático

El sistema consta de los siguientes componentes erigidos en una estructura de acero:

- Brazo telescópico vertical de accionamiento hidráulico con un cilindro y pivote inclinable.
- Sistema de control eléctrico
- Sistema hidráulico
- Panel de control

El pivote está controlado en remoto por radio frecuencia desde el muelle o desde el puente del buque (únicamente en la salida).

El procedimiento de uso consiste en que una vez que el buque está en posición, el operador activa en sistema con el control remoto. El pivote se inclina hacia el casco del buque y la gaza del cable es conectada al pivote.

A continuación el sistema vuelve a su posición original y el cable es tensado desde el muelle, lo que completa el amarre. El sistema mantiene la tensión del cable automáticamente.

Para desatracar, el operador quita el freno de la máquina y activa el botón por radio control para inclinar el pivote, lo que hace que se libere el cable. En ese momento el buque está listo para partir.

Amarre automático basado en agarre

Este sistema consiste en un vagón que incluye un cilindro hidráulico, un sistema de control electrónico, y un panel de control. Puede ser diseñado con una fuerza de amarre variable dependiendo de los requerimientos el cliente.

El sistema necesita un pivote y un hueco en el casco del buque. Finalmente se instala fácilmente un panel de operaciones con función de alarma en el puente del buque.

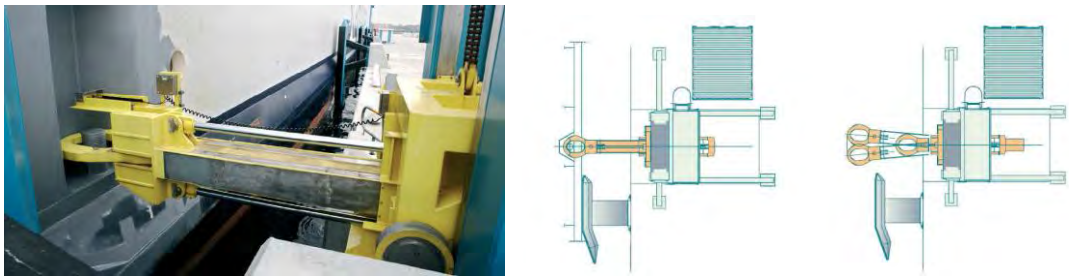


Figura 6: Vagón de amarre.

Shoretension

Shoretension es, de todos los nuevos sistemas de amarre, el más económico. Es la solución idónea para amarres en condiciones severas. Este sistema fue desarrollado por la empresa KRVE en colaboración con la autoridad portuaria de Rotterdam.

Shoretension es un sistema utilizado para amarrar buques. El motivo de su desarrollo fueron las pérdidas económicas que se crearon en un número de puertos causados por la deriva de grandes buques petroleros. Así, la autoridad portuaria de Rotterdam exigió innovaciones ya que su puerto tiene que tratar con enormes buques con grandes superficies laterales. Además debido al cambio climático, el mundo se enfrenta a condiciones climáticas más extremas. Existe un problema de seguridad cuando no están todas las estachas sometidas a la misma tensión. Éste es el fenómeno que combate este sistema; se encarga de igualar todas estas tensiones.

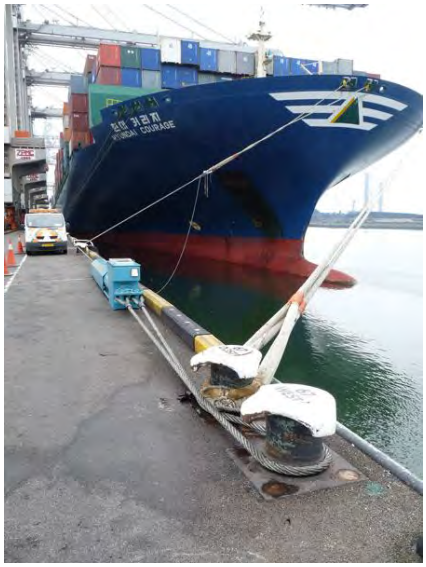
Su funcionamiento consiste en un sistema hidráulico de amarre que mantiene automáticamente los cables de amarre en tensión, en condiciones severas, como por ejemplo en el momento en el que un buque pasa cerca de otro que se encuentra atracado. Evita también la rotura de los cables en el caso de diferencias de altura entre el estado del buque cargado y descargado, o por las mareas.

El sistema está emplazado en el muelle entre dos bolardos. Un extremo se fija al bolardo mientras que la línea del buque se conecta a la parte móvil del sistema. Un segundo bolardo se utiliza para guiar la estacha que vuelve al buque.

Únicamente tiene que ser activado una vez mediante un sistema hidráulico. Después de eso, todas las funciones se realizan sin aplicación externa de energía. Esta característica hace que la instalación sea posible en cualquier punto del muelle.

El sistema, mediante el reparto de tensiones, evita que se generen picos de tensión que excedan los puntos de rotura de las líneas. Haciendo esto el sistema compensa el movimiento del buque y absorbe la energía. Cuando los picos de tensión cesan, el sistema vira de la línea y vuelve a la posición inicial.

Figura 7: Shoretension a la proa de un portacontenedores.



Entre las ventajas existentes con el uso de este sistema se podrían destacar las siguientes:

- Evita la rotura de las líneas (menos accidentes laborales)
- Menos accidentes amarrando, lo que teóricamente conlleva menores costes de seguro.
- Mejora la estabilidad del buque mientras se está amarrando.
- Incrementa la velocidad y seguridad en la carga y descarga.
- Es muy versátil y puede instalarse en prácticamente cualquier muelle (en el puerto de Ferrol se han realizado pruebas de este sistema).
- Es capaz de ejercer una tensión constante de 60 toneladas métricas de fuerza (600KN).
- Posee una carga de trabajo segura de hasta 150 toneladas (1500KN)
- Tiene sensores que registran las cargas en las estachas.
- Esta información estará disponible para el capitán, el puerto y los operarios de la terminal.
- La información será archivada en los archivos del puerto.
- Puede establecerse un sistema de alarma para avisar cuando se exceda de los límites de fuerza o desplazamiento.
- El sistema está certificado por Lloyd's Register para operar en las condiciones antes mencionadas.
- Actualmente está en desarrollo una versión vertical del sistema; lo cual hará el diseño mucho más compacto.

Bibliografía

[1] http://www.shoretension.nl/

INGENIEROS EN LA HISTORIA

MIGUEL RECHEA HERNÁNDEZ

Por Alejandro DeCinti

Miguel Rechea Hernández nació en 1856 e inició una vida militar como alférez alumno en 1880. Acabada su carrera en 1882 con su nombramiento como Ingeniero de 2ª clase, completó su formación académica licenciándose en Ciencias Exactas en 1910. Ocupó su primer destino en el arsenal de Ferrol como Ingeniero auxiliar, siendo el año siguiente, profesor de la Escuela de Maestranza.

Comisionado a Francia para inspeccionar los materiales y equipos del acorazado *Pelayo*, fue nombrado a su vuelta en 1885, Subdirector de la Academia de Ampliación de la Armada.

En 1889, ya como Ingeniero Jefe en 2ª clase, se hizo cargo de los trabajos de inspección y reconocimiento de materiales de los tres cruceros que en aquellos momentos se estaban construyendo en Astilleros de Nervión de la ría de Bilbao.

En 1907 fue nombrado comandante de Ingenieros del Apostadero de Cádiz y Jefe del Ramo en el Arsenal de la Carraca, siendo comisionado a Londres para negociar la construcción de tres nuevos acorzados. En 1910 pasó, como supernumerario, a la Sociedad Española de Construcción Naval, creada para la ejecución del Plan de Escuadra Ferrandiz-Maura,, dirigiendo las construcciones de los buques y emprendiendo, a la vez, la reconstrucción del apostadero de Ferrol.

En 1915 obtuvo su retiro como Coronel de Ingenieros e Ingeniero Inspector de 2ª, después de treinta y cinco años de servicio y ocho en el empleo de coronel. Fue condecorado con la Medalla al Mérito Naval de 2ª clase blanca y la Cruz y Placa de San Hermenegildo.

Participó activamente en la reforma y gestión de los tres arsenales militares, siendo un referente importante en la construcción naval española, con su especial estudio y dedicación a las botaduras. Alguien dijo que “media escuadra española se había construido en astilleros por él dirigidos”.

Por sus trabajos en el *España*, primero de la última serie de acorzados construidos en nuestra Armada, fue nombrado en 1913, hijo predilecto de Tudela, localidad en que hasta 1933 hubo una calle con el nombre de “D. Miguel Rechea”.

En 1930, la Asociación de Ingenieros Navales le eligió como su primer Presidente y como tal, y tras el cierre de la Academia de Ingenieros de Ferrol, se enfrentó con las necesidades de crear una Escuela Especial de Ingenieros Navales al estilo de las existentes en España para otras ramas de la ingeniería en aquellos momentos. La tarea no fue fácil pero supo imprimir un sello particular a las negociaciones y supo obtener del Presidente del Consejo de Ministros la promesa de su creación, fuera ya del ámbito de la marina militar.

Murió en agosto de 1933, después de una dilatada y fructífera vida profesional como aquel “viejecito jovial y simpático” que dirigió la Asociación de Ingenieros Navales con esa capacidad incansable en el trabajo, infatigable ante las dificultades y que puso en marcha una asociación civil formada mayoritariamente por ingenieros navales de la armada.