BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA

Diciembre 2014
Número 7

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

FELICITACIÓN Pág. 1

HOMENAJE Pág. 3

GESTIÓN DE INCERTIDUMBRES EN EL CRONOGRAMA DEL PROYECTO Pág. 4
CF (CIA) Francisco Antón Brage

LÍMITES DE RUIDO AÉREO EN LAS NUEVAS CONSTRUCCIONES Pág. 13
CF (CIA) Luis de la Puente del Pozo

PROGRAMACIÓN HEURÍSTICA. REDES DE MANHATTAN Pág. 19
CF (CIA) Enrique Barrios Bueno

METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DE REQUISITOS TÉCNICOS DE SEGURIDAD PARA SUBMARINOS Pág. 25
CC (CIA) Pedro Antonio Casas Alcaide

PILOTOS AUTOMÁTICOS PARA BUQUES DE SUPERFICIE: EL MODELO NOMOTO Pág. 41
TN (CIA) Juan Manuel de Santiago Collada

EQUIPOS DE AMARRE DE LOS BUQUES. CARGAS DE DISEÑO, RESISTENCIA Y FACTORES DE SEGURIDAD Pág. 60
TN (CIA) Raúl Villa Caro

LA ACÚSTICA EN LA ARMADA Pág. 63
AN (CIA) Mª CONCEPCIÓN MAZÓN HERRERA

CON LOS MEJORES DESEOS DE PAZ Y FELICIDAD PARA ESTAS FIESTAS DE NAVIDAD, Y PROSPERIDAD PARA TODOS EN EL PRÓXIMO AÑO

EL COMANDANTE-DIRECTOR DE LA ETSIAN

.

HOMENAJE A

FRANCESCO SABATINI

Nació en Palermo (Sicilia), que entonces formaba parte del reino de Nápoles y Sicilia, el 5 de marzo de 1721 y falleció en Madrid, en 1797.

Desarrolló, prácticamente la totalidad de su trabajo en España, al servicio de la Casa Real.

Su estilo, era de carácter barroco clasista, cercano al Renacimiento, ya que hasta que apareció Juan de Villanueva, no se puede hablar de un estilo neoclásico puro.

Estudió arquitectura en Roma, y sus primeros contactos con la monarquía española, se remontan a su participación, bajo la dirección de su suegro Luigi Vanvitelli, en la construcción del Palacio Real de Caserta, para el entonces rey de Nápoles, Carlos VII, futuro rey de España, como Carlos III.

Cuando Carlos III accedió al trono de España, le llamó a Madrid, en 1760, y lo puso por encima de los arquitectos españoles de época. Se le nombró Maestro Mayor de las Obras Reales, con el rango de teniente coronel del Cuerpo de Ingenieros, a la vez que se le nombraba académico honorífico de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

Su innegable talento, unido a los favores del rey, le reportaron numerosos encargos y trabajos. Gracias a su trayectoria profesional, fue ascendido a teniente general del Cuerpo de Ingenieros, y se le otorgó el hábito de Caballero de la Orden de Santiago, además, pertenecía al grupo de confianza del rey, al ser nombrado Gentilhombre de Cámara.

Gestión de incertidumbres en el cronograma del proyecto

CF (CIA-EOF) Francisco Antón Brage
Arsenal de Ferrol

Introducción.

Creo que casi todo el mundo que haya tenido alguna relación con un cronograma ha pasado por la experiencia de ver cómo se incumplía lo que estaba planificado.
Desde mi punto de vista, en muchas ocasiones se realiza una aproximación en la que se consideran como ciertas unas predicciones sobre actividades futuras sin considerar las incertidumbres asociadas a las mismas.

El PMBOK (Project Management Body of Knowledge) establece la "gestión del tiempo" como una de las áreas de conocimiento en el ámbito de la gestión de proyectos, definiendo los siguientes procesos:

1. Planificar la gestión del cronograma.
2. Definir las actividades.
3. Secuenciar las actividades.
4. Estimar los recursos de las actividades.
5. Estimar la duración de las actividades.
6. Desarrollar el cronograma.

Si bien pueden existir riesgos en los procesos iniciales, para el desarrollo de este artículo se parte de un escenario en el que las actividades están perfectamente definidas, se han secuenciado las mismas correctamente y se han estimado los recursos adecuadamente.

El siguiente paso lo constituye el proceso de estimar la duración de las actividades. Entra dentro de lo que podría considerarse habitual que dichas estimaciones estén basadas en datos históricos, en analogías con proyectos similares o en datos paramétricos. Con estas entradas al proceso, en muchas ocasiones se establece como duración de la actividad un valor determinista, obviando en cierto modo la incertidumbre asociada a dichas estimaciones.

En el artículo se presenta la opción de tratar dichas incertidumbres desde una aproximación probabilística y su implementación en el desarrollo del cronograma.

De la estimación determinista a la estimación probabilística de la duración de actividades.

La duración de un proyecto está sujeta a la duración de las actividades en las que se desglosa así como a la secuencia de las mismas.

A finales de los años 50 se desarrolla el Método del Camino Crítico (Critical Path Method), que es empleado de forma extensiva para determinar el tiempo mínimo necesario para finalizar un proyecto. En este modelo, la duración de actividades tiene un valor determinista por lo que se estaría trabajando bajo la hipótesis de que se conoce con certeza el tiempo asociado con cada actividad, lo cual no siempre es posible.

Es también a finales de los años 50 cuando se desarrolla el modelo conocido como PERT (Project Evaluation and Review Technique) con el que se avanza en la cuantificación de la incertidumbre relativa a la duración de las actividades. En él se asume que la duración de las actividades es una variable aleatoria que tiene una distribución de probabilidades BETA particularizada. Esta distribución está caracterizada por cuatro parámetros: los puntos inicial y final (a y b) y dos coeficientes de forma (α y β).

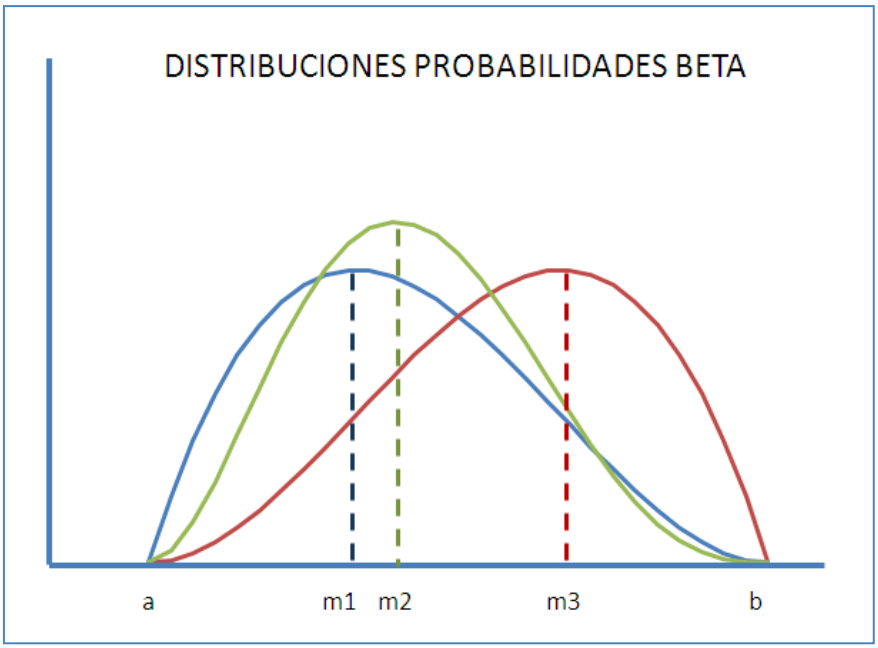


Figura 1.- Varias distribuciones de probabilidades BETA. Mismos parámetros "a" y "b". Diferentes coeficientes de forma "p" y "q"

En el método PERT se realizan una serie de aproximaciones con objeto de definir la distribución BETA mediante las estimaciones de tres parámetros en lugar de los cuatro antes mencionados. Evidentemente no se obtienen los mismos resultados que en el caso de una aproximación matemática pero simplifica los cálculos, aspecto importante en un momento en el que no se contaba con las herramientas informáticas que se disponen en la actualidad. Estos parámetros son:

To: Tiempo optimista (menor duración de una actividad)=a
Tp : Tiempo pesimista (mayor duración de una actividad)=b
Tm: Tiempo más probable de duración de una actividad (moda) = m

El valor del Tiempo estimado (Te) se obtendría mediante la fórmula:

$$Te = \frac{To + 4 + Tm + Tp}{6}$$

La varianza del tiempo de finalización de una actividad se obtiene mediante la fórmula:

$$\sigma^2 = \left(\frac{Tp - To}{6}\right)^2$$

Otra de las aproximaciones del método PERT es suponer que la duración total del proyecto es una variable aleatoria que tiene una distribución de probabilidades normal, con una media que vendría dada por el sumatorio de los tiempos estimados de las actividades que se encuentran en el camino crítico.

$$\mu = \sum_i Te_i$$

La desviación estándar de la distribución normal sería:

$$\sigma = \sqrt{\sum_i \sigma_i{}^2}$$

Siendo $\sigma_i{}^2$ la varianza de cada actividad en el camino crítico.

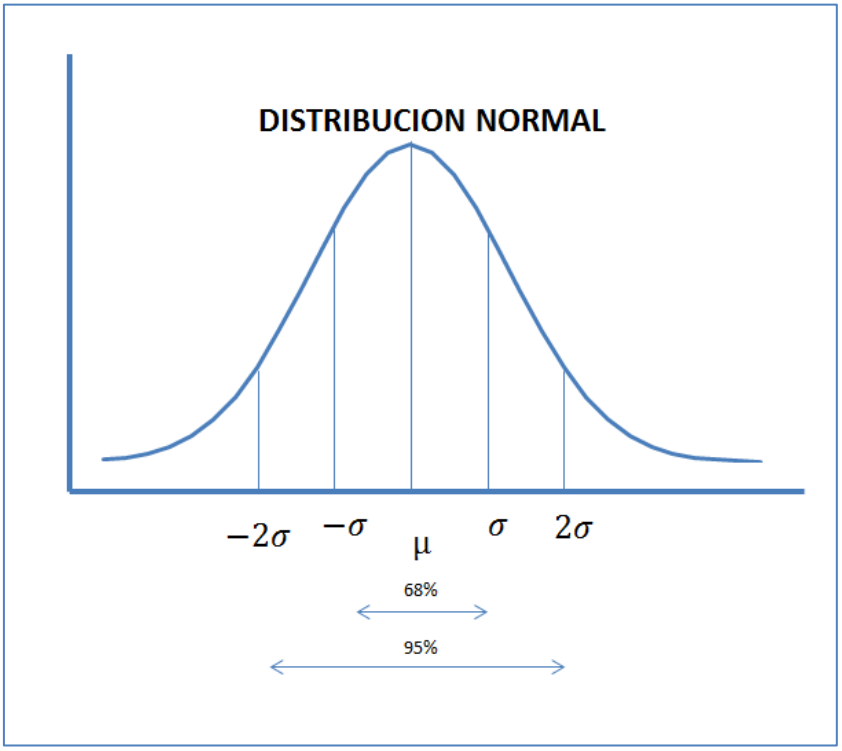


Figura 2.- Distribución de probabilidades NORMAL.

El uso extensivo de ordenadores así como el incremento de capacidades de los mismos, han permitido el desarrollo de otras metodologías. Surge así la simulación Montecarlo.

En su aplicación a la gestión del tiempo en proyectos, se trata de considerar la duración de cada actividad como una variable aleatoria que adopta una cierta distribución de probabilidades (continua o discreta). Una vez establecida la secuencia de las actividades, se realiza la simulación de los posibles escenarios que resultan de los diferentes valores aleatorios que pueden tomar las variables (duración de la actividad) en función de su distribución de probabilidades y de las combinaciones gobernadas por las relaciones de precedencia.

La distribución de probabilidades de cada actividad se puede obtener mediante datos históricos o bien se puede elegir en función del comportamiento esperado de la variable.

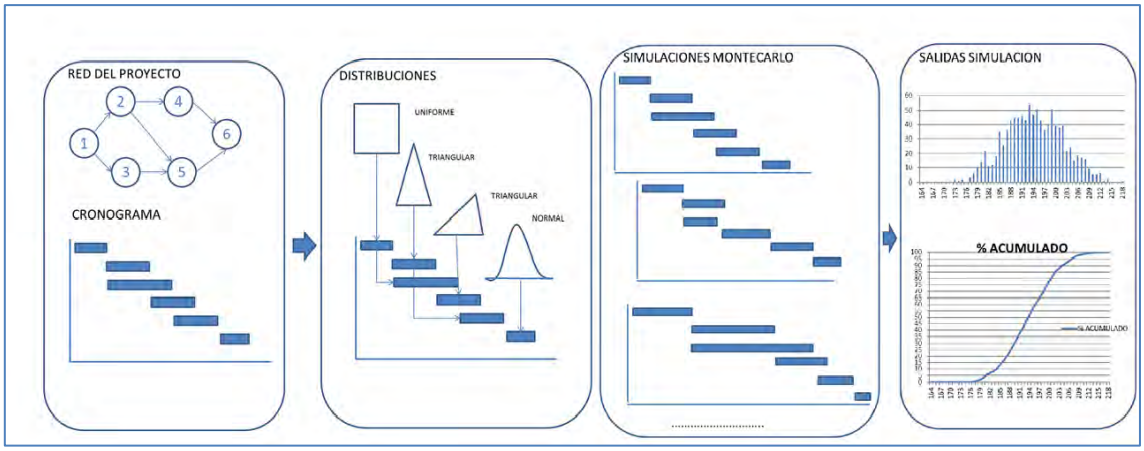


Figura 3.- Esquema de aplicación de la simulación Montecarlo

Como salida al proceso se obtendría el histograma de los valores obtenidos en las diferentes iteraciones y la función de distribución acumulada

De la teoría a la práctica.

Se trata ahora de aplicar lo establecido en el punto anterior a un ejemplo sencillo.

Para ello, se va a considerar un proyecto compuesto de cuatro actividades que conforman el camino crítico.

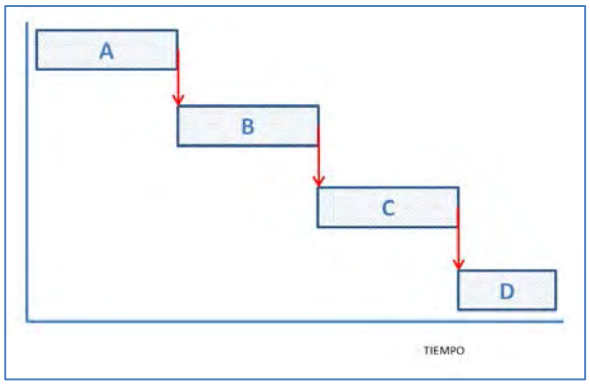


Figura 4.- Esquema del proyecto

Método del camino crítico

La duración de actividades es determinístico. En este caso, las actividades tienen la siguiente duración (en días).

ACTIVIDAD	T
A	51
B	61
C	56
D	21

Esto llevaría a que la duración total del proyecto sería de 189 días. Este valor sería cierto en tanto en cuanto no hubiese incertidumbre en la duración de las actividades.

PERT

Para la aplicación de la metodología PERT se parte de un escenario (preparado para obtener unos valores comparables al caso anterior) en el que existe una incertidumbre en la duración de las actividades, estimándose los siguientes parámetros:

ACTIVIDAD	To	Tm	Tp
A	45	50	60
B	55	60	70
C	50	55	65
D	18	20	25

Con las expresiones antes expuestas se obtendrían los siguientes valores:

ACTIVIDAD	Te[1]	σ^2
A	51	6.25
B	61	6.25
C	56	6.25
D	21	1.36

La duración del proyecto tendría una distribución normal con una media $\mu = 189\ días$ y una desviación estándar $\sigma = 4{,}48$.

De acuerdo con las características de la distribución normal, la duración del proyecto tiene un 68% de probabilidades de estar comprendida entre en el rango [189- σ ,189+ σ] días y un 95% de probabilidades de estar comprendida entre en el rango [189- 2σ ,189+ 2σ] días.

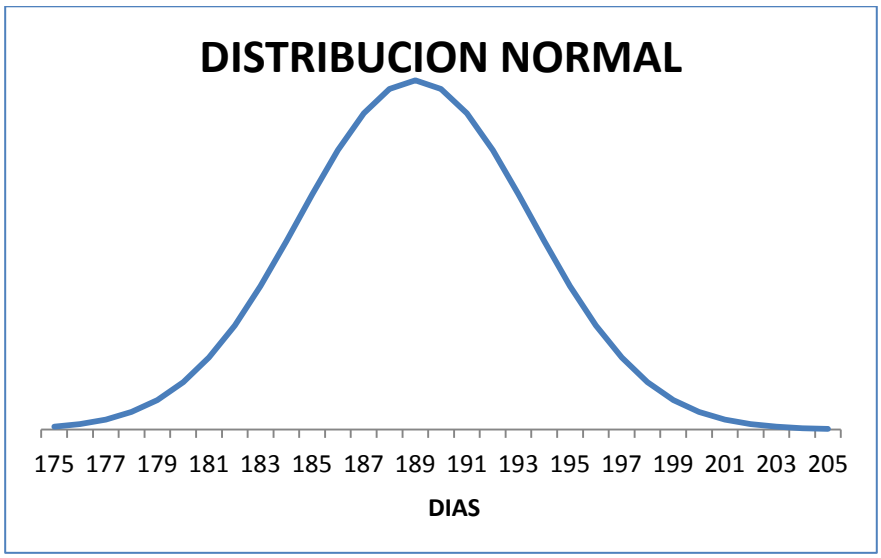


Figura 5.- Distribución probabilidades normal (PERT)

[1] Los valores están redondeados a la unidad

Se podría determinar cuál sería la probabilidad de finalizar el proyecto en un cierto número de días (Tx). Para ello se calcula el parámetro:

$$z = \frac{Tx - \mu}{\sigma}$$

¿Cuál sería la probabilidad de finalizar el proyecto en 189 días?. En este caso Tx=μ por lo que Z=0. Con este valor se entra en la tabla de distribución normal obteniéndose un valor de 0,50000, lo que representa que existe una probabilidad del 50% de finalizar el proyecto en 189 días.

Simulación Montecarlo

Se van a desarrollar dos escenarios. En el primero se supone que todas las actividades tienen una distribución de probabilidades BETA y en el segundo se supone que tienen una distribución de probabilidades UNIFORME. Insisto en que se trata de un ejemplo ilustrativo. En la realidad, cada actividad podría tener una distribución diferente.

En ambos casos se realizan 1000 iteraciones empleando las capacidades de las hojas de cálculo EXCEL. En caso de escenarios complejos habría que emplear aplicaciones específicas en la aplicación de simulaciones Montecarlo (@RISK,Primavera Risk Analysys…).

<u>ESCENARIO 1</u>

Parámetros

ACTIVIDAD	α	β	a	b
A	2	3	45	60
B	2	3	55	70
C	2	3	50	65
D	1,3	1,8	18	25

Los coeficientes α y β se ha escogido de forma que se obtengan resultados comparables a los obtenidos en el método PERT.

Se obtendrían las siguientes salidas:

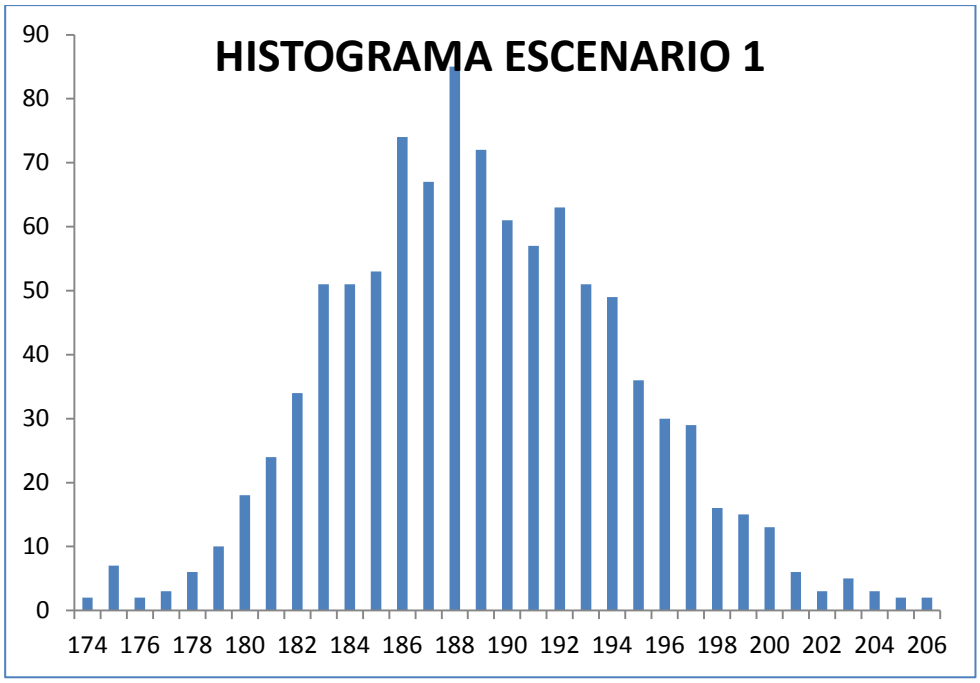


Figura 6.- Histograma Escenario 1

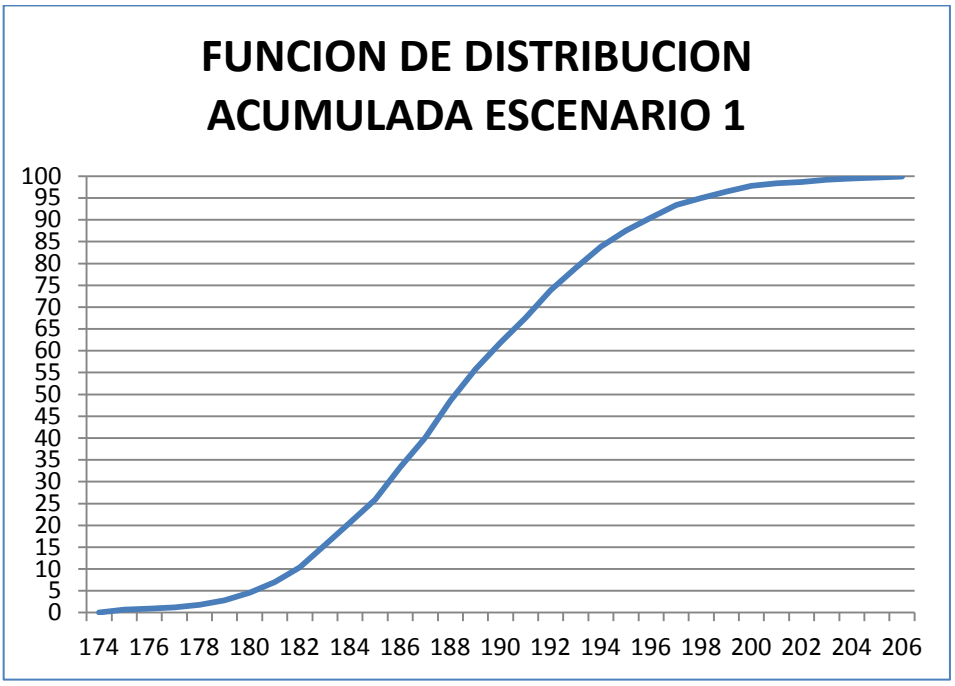


Figura 8.- Función de distribución acumulada Escenario 1

Comparando con los modelos anteriores, se observa que en este escenario existe una probabilidad del 56% de finalizar el proyecto en 189 días.

En el caso de que se quisiese determinar la duración del proyecto con un mayor grado de fiabilidad, como por ejemplo el 85% de probabilidades, entonces la duración prevista sería de 194 días.

ESCENARIO 2

En este escenario, todos los valores dentro del rango establecido tienen la misma probabilidad. Se toman los parámetros a y b de inicio y fin del rango:

ACTIVIDAD	a	b
A	45	60
B	55	70
C	50	65
D	18	25

Se obtendrían las siguientes salidas:

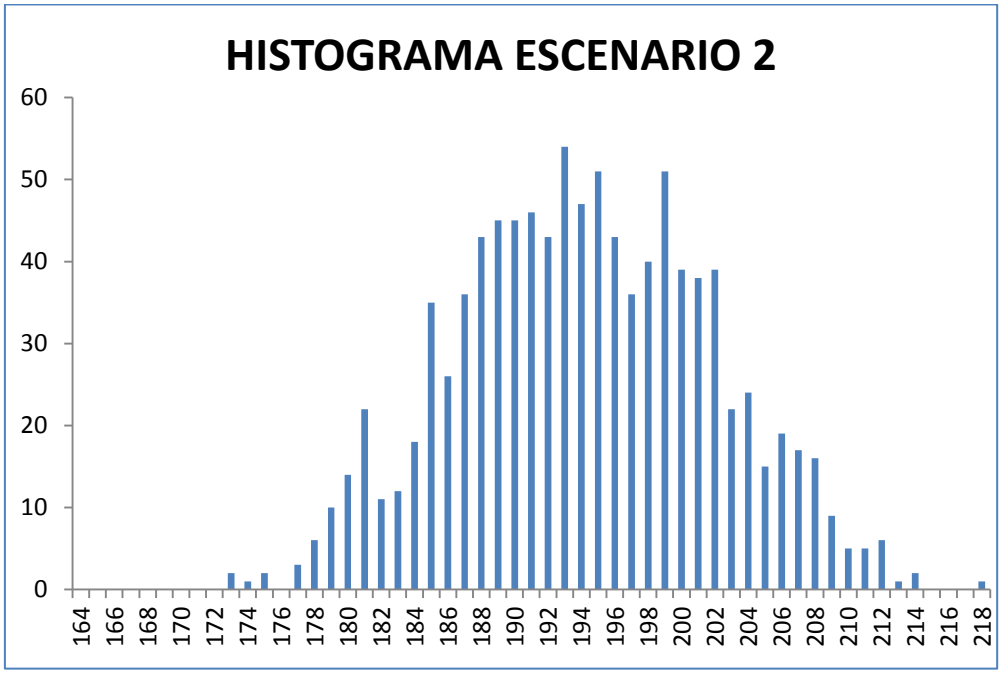


Figura 8.- Histograma Escenario 1

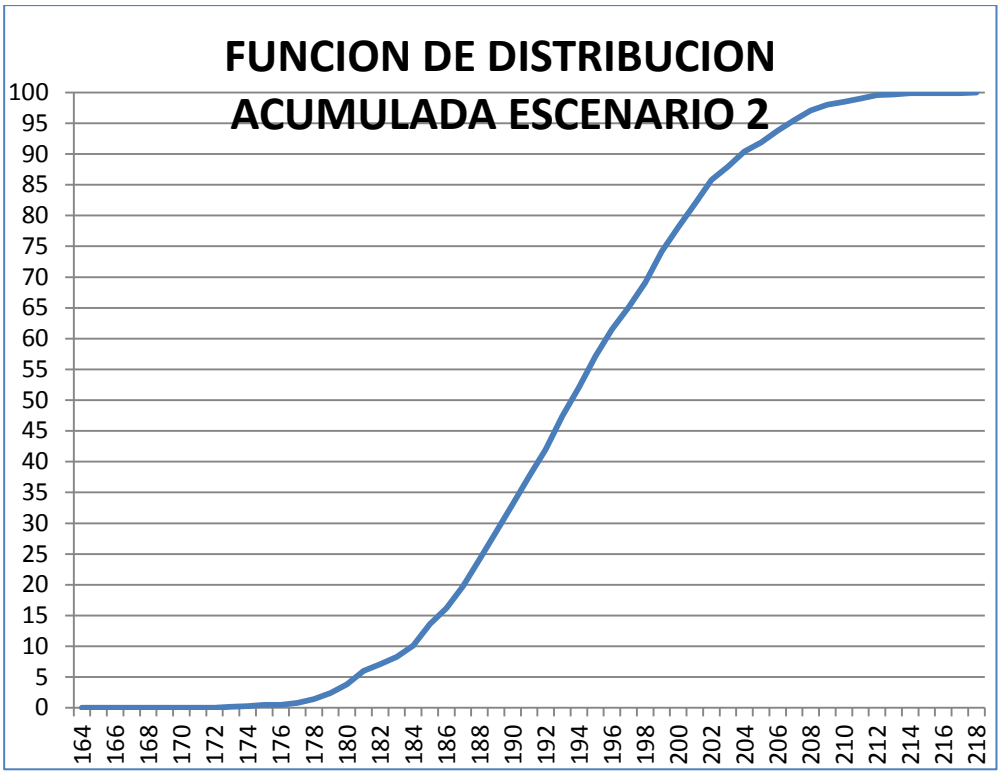


Figura 9.- Función de distribución acumulada Escenario 2

En este escenario existe una probabilidad del 29 % de finalizar el proyecto en 189 días.

Como en el caso anterior, si se quisiese determinar la duración del proyecto con un mayor grado de fiabilidad, como por ejemplo el 85% de probabilidades, entonces la duración sería de 202 días.

4.- Conclusiones

Mediante este artículo se ha pretendido presentar una breve introducción sobre posibles aproximaciones que se pueden hacer cuando se desarrolla el cronograma de un proyecto.

Se puede realizar un planteamiento determinista si se trata de actividades en las que se conoce con exactitud la duración de las mismas. Pero en aquellos casos en los que el escenario no sea el anteriormente descrito, el tratamiento probabilístico de la duración de las actividades supone una aproximación más realista, que refleja las incertidumbres asociadas al cronograma.

Las medidas de contingencia frente a dichas incertidumbres se centran en el establecimiento en el cronograma de las denominadas reservas de tiempo o “colchones”, pero eso es otra historia.

5.- Bibliografía

- Project Management Body of Knowledge (PMBOK) 5th Edition
- An analytical study of the PERT assumptions.- K.R MacCrimmon, C.A Ryavec
- The basics of Montecarlo simulation:a tutorial.- S. Kandaswamy
- Stochastic scheduling.- E.Elbetagi

Límites de ruido aéreo en las nuevas construcciones.

CF (CIA-EOF) Luis de la Puente del Pozo
RTPN-JAL

1.- Introducción.

Los límites del ruido aéreo para los diferentes compartimentos en las Nuevas Construcciones de la Armada se definen en el apartado 073 de la Especificación de Contrato.

Para estos niveles máximos de ruido existen diferentes normativas de aplicación, se usan fundamentalmente los valores establecidos en la publicación STANAG 4293: "Guidelines for the Accoustical Environment in NATO Surface Ships" y en la Resolución IMO A 468(XII) "Código sobre Niveles de Ruido a Bordo de Buques".

Si bien la Normativa de la Organización Marítima Internacional- OMI (IMO en inglés) excluye los Buques de Guerra, a la hora de estudiar su aplicación debemos valorar que lo normal es que sus regulaciones acaben trasladándose a todos los ámbitos de las Administraciones marítimas al convertirse en estándares.

El Ingeniero Naval D. Publio Beltrán Palomo advertía recientemente en su Curso sobre Ruidos impartido en JAL de cambios importantes en la normativa OMI que con motivo del curso de doctorado en la ETSIAN he tenido que abordar.

El objeto de este artículo es analizar las repercusiones que el nuevo "Código sobre Niveles de Ruido a Bordo de Buques" de la OMI va a tener en las futuras construcciones de la Armada y aclarar la aplicación de las diferentes normativas civiles y militares evitando confusiones o penalizar el diseño.

2. – El nuevo código sobre niveles de ruido a bordo.

La OMI es la agencia de la ONU responsable de la protección y seguridad de los buques y prevención de la contaminación marítima, consta de un Consejo, una Asamblea y los Comités que emiten recomendaciones, códigos, convenios, protocolos y enmiendas.

El Comité de Seguridad Marítima vela por la aplicación del Convenio de Seguridad de la Vida Humana en la Mar SOLAS de 1974 con su Protocolo de 1978. En materia de control de ruido, hasta ahora, el Convenio SOLAS Capítulo II-1 Parte C Regla 36 establecía que la Administración debía adoptar medidas para reducción de ruido.

Posteriormente, en la Resolución A.468 (XII), la Asamblea de la OMI adoptó el "Código sobre Niveles de Ruido a Bordo de Buques". Su propósito fue orientar a las Administraciones en cuanto a los niveles máximos de ruido y a los límites de exposición al ruido como un intento de establecer uniformidad en el plano internacional.

En Julio de 2014 ha entrado en vigor la resolución MSC.337(91) del Comité que dispone:

- La necesidad de establecer los límites de nivel de ruido como **de obligado cumplimiento.**
- El nuevo "Código sobre Niveles de Ruido a Bordo de Buques", Código de Ruidos, que reemplaza al anterior de 1981 y contiene límites más restrictivos.
- Modifica el convenio SOLAS para disponer que los buques deberán ser construidos para reducir el ruido a bordo.

Las resoluciones van a afectar a las Nuevas Construcciones de la Armada ya que factores comunes que afectan a buques militares y civiles quedan al final incluidos en nuestros propios estándares.

3.- Normativas relacionadas con los límites de ruido

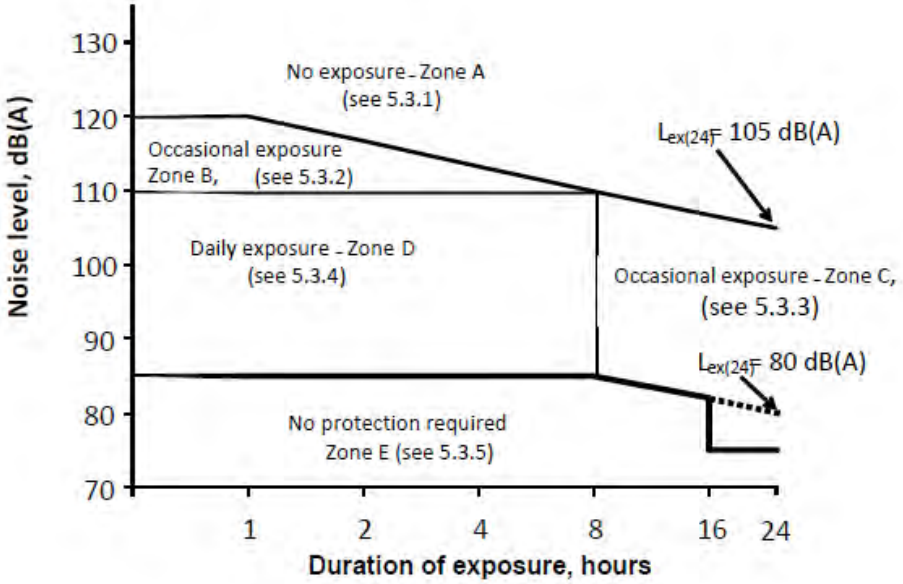
3.1.-OMI

Los límites aceptables de ruido que establece la OMI están basados en los principios de:

- Proporcionar condiciones de trabajo que ofrezcan seguridad tomando en consideración la necesidad de comunicación hablada, audición de alarmas acústicas, y crear un ambiente en el que sea posible la toma de decisiones en los puestos de mando, espacios de gobierno y de radiocomunicaciones y espacios de máquinas con dotación.
- Proteger a las personas contra niveles de ruido excesivos que puedan dar lugar a disminución de la facultad auditiva.
- Proporcionar comodidad suficiente en los espacios destinados al descanso y al recreo.

Esta filosofía queda reflejada en las divisiones de espacios del Código de Ruidos y en las restantes normativas que regulan estos límites.

El Capítulo 5 del Código presenta los Límites de Exposición a los Ruidos, que quedan reflejados en la curva de la figura**. Las exposiciones fuera de la Zona E, más de 85 db(A), requieren protección auditiva.**



3.2.- Las Sociedades de Clasificación (SSCC)

La actividad fundamental de las SSCC es la clasificación de buques, la asignación al buque de una clase que asegure que el buque está diseñado, construido, equipado y mantenido de acuerdo con las Reglas de la Sociedad, extendiendo, a tal efecto, Certificados que acreditan esta condición.

Con respecto a los ruidos, hasta ahora, por no ser la IMO A.468 (XII) de obligado cumplimiento las SSCC se limitan a introducir una Notación Adicional, las denominadas “Comfort Class” como Notación de Clase.

La Asociación Internacional de Sociedades de Clasificación (IACS), con sede en Londres, representa a las nueve SSCC más importantes del mundo. IACS es un órgano consultivo de la Organización Marítima In-

ternacional (OMI) y permanece como la única organización no gubernamental con título de observador que está autorizada a desarrollar y aplicar reglas.

Por otra parte las SSCC poseen gran experiencia en buques comerciales, actúan como tercera parte independiente en los contratos y son desde hace tiempo usadas en diversos sistemas de construcciones militares. Así, el UK Ministry of Defense fue el primero que implementó el proceso de certificación de buques de combate usando su SC nacional: Lloyd's Register (LR) como agente. Lloyds desarrolló las "LR Naval Ship Rules" (1999). Inmediatamente le siguieron el resto de países con SC propia.

Permitir que la SC realice el trabajo de certificación en elementos de plataforma militares con gran volumen de pruebas y que son de bajo riesgo técnico permite a las Armadas centrar sus recursos de ingeniería en áreas de alto riesgo técnico y específicamente militares: Choque, Firmas, Integración del Sistema de Combate…

Siguiendo este proceso se estableció la INSA (International Naval Safety Association para desarrollar y mantener el ANEP-77 "Naval Ship Code" se considera el equivalente al convenio SOLAS dentro de la OTAN.

Como integrantes de la INSA se encuentran las SSCC que, como ya se ha descrito, actúan como organizaciones no gubernamentales asesoras que establecen y mantienen los "Technical Standards" para la construcción de los buques, en este caso en lo relativo a Buques de Guerra. Las Sociedades también validan de acuerdo con estos estándares y efectúan inspecciones para buques en servicio para asegurar su cumplimiento. Existe pues un paralelismo entre: IACS – INSA; SOLAS - ANEPP-77; misión de las SSCC en buques comerciales - militares y lógicamente en los estándares de ambos.

Con respecto a los ruidos las SSCC han introducido también en las "Naval Ship Rules" como Notación Adicional las denominadas "Comfort Class".

La Armada ha trabajado en sus últimas construcciones con Bureau Veritas (BV) cuya clasificación COMF-NOISE se encuentra en la Pt E, Cap 6, Secc1 de sus "Naval Vessel Rules", disponibles en Internet.

3.3.- Armadas.

El Estado Mayor de la Armada en la Publicación "Estándares de Habitabilidad" punto 4 publica como referencia unos límites de ruido, basados en experiencias operativas y revisables, según los tipos de espacio y la categoría del ruido:

- A-12/60 db(A): Espacios en que la comunicación hablada debe ser entendida ocupados permanentemente.
- A-3/70 db(A): Espacios en que la comunicación hablada debe ser entendida no ocupados permanentemente.
- B/75 db(A): Espacios donde el Confort del personal es prioritario.
- C/65 db(A): Espacios donde es prioritario condiciones especiales de tranquilidad.
- D-12/90 db(A): Espacios donde no son importantes las comunicaciones por voz y la pérdida auditiva puede ser importante ocupados normalmente
- D-3/110 db(A): Espacios donde no son importantes las comunicaciones por voz y la pérdida auditiva puede ser importante no ocupados normalmente
- E/75 db(A): Áreas con alto nivel de ruido donde la comunicación por voz supone un alto esfuerzo y emplea mecanismos de comunicación.

La Armada Norteamericana por su parte establece los límites de ruido aéreo en los espacios en la MIL-STD-1472G "Design Criteria Standard Human Engineering "que debido a su filosofía común en la distribución de espacios con nuestra doctrina, así como por su número de buques y apoyo de ABS es una referencia de

gran calidad. Especialmente en la distribución de espacios sigue la definida en el Código de Ruidos de OMI añadiendo espacios propios de Buques de Guerra.

La OTAN establece los límites del ruido aéreo en los compartimentos en la STANAG-4293: "Guidelines for Acoustical Enviroment in NATO Surface Ships".

3.4.- Comparativa

Para ilustrar las diferencias en los valores límites en dB(A) de niveles de ruido requeridos en los diferentes criterios se muestran las tablas anexas. La primera Tabla corresponde con la traducción de los espacios tomando como referencia la clasificación de locales de la Resolución A.468(XII), la segunda Tabla muestra la comparativa de los criterios, en rojo los que merecen comentarios, en el siguiente orden:
NOISE CODE/A.468(XII)/BV COMF-NOISE/ EMA/ MIL-STD-1472/STANAG 4293

4.- Comentarios

- Línea 1: Los Espacios de Maquinas con dotación permanente no se consideran diferentes en el nuevo Código de otros lugares de trabajo; esto implica que el Límite de Ruido Aéreo pasa a ser de 85 db(A) en todos los Espacios de Trabajo con dotación permanente. BV remite a IMO en estos locales por lo que ocurre lo mismo para la cota COMFORT- NOISE.
- Línea 3: La Normativa OMI pide para los Controles de Máquinas 75 db(A) y las militares 70db(A), la norma MIL hace la distinción entre Controles de Máquinas (75) y Control de Máquinas que sirva también de Oficina (70) lo que contribuye aclarar el porqué es más restrictiva la normativa militar.
- Línea 4: Es importante observar que para garantizar la legalidad de no usar auriculares de protección la Armada Americana pide 84 db es decir, por debajo, no iguales a 85 db .
- Líneas 8 y 9: En general en la normativa militar no está clara la diferenciación de Locales Operativos, Local Radio, Locales de Equipos Radar, Talleres Electrónicos…

5.- Conclusiones

1. En los Espacios Operativos los Límites no vienen marcados por salud auditiva sino por las necesidades de Comunicación que establezca la Armada, debe estudiarse cada caso.
2. El nuevo Código de Ruidos de la IMO es de obligado cumplimiento, rebaja a 85 db(A) los Límites Máximos en Espacios de Trabajo y obligará a actualizarse el resto de las normativas.
3. La Clase COMF-NOISE tiene, en general, los límites más exigentes.
4. La publicación EMA "Estándares de Habitabilidad" es una buena guía para el empleo de los espacios y su operatividad pero algunos de los Límites no son aplicables en una Nueva Construcción.
5. La MIL-STD-1472G es una guía excelente y reduce los límites de 85 a 84 db(A) en las Especificaciones.
6. La STANAG-4293 no se diferencia gran cosa de las anteriores y sirve también para la determinación de los límites en el uso operativo de los espacios.
7. **Como comentario final: Intentar conseguir una Clase Comfort Noise, con un máximo de 84 db(A) en Espacios de Trabajo con dotación permanente y usar como referencias para la clasificación de espacios los Estándares de Habitabilidad y MIL-STD-1472G podría ser una ruta inicial de trabajo para los requisitos de ruido en compartimentos de Nuevas Construcciones.**

TABLA I: ESPACIOS DEFINIDOS EN NORMATIVA OMI

	Work Spaces	**Espacios de Trabajo**
1	Machinery Spaces (continuously manned)	Espacios de Máquinas (con dotación permanente)
2	Machinery Spaces (not continuously manned)	Espacios de Máquinas (sin dotación permanente)
3	Machinery Control Rooms	Cámaras de Mando de Máquinas/Cámaras de Control de Plataforma
4	Workshops	Talleres
5	Non-specifed work spaces	Espacios de trabajo no especificados
	Navigation Spaces	
6	Navigation Bridge and Chartroom	Puente de Navegación y Derrota
7	Look-out Post including Navigation Bridge wings and windows	Puesto de Serviolas incluidos Alerones y ventanas del Puente de Navegación
8	Radio rooms(equipment operating but not producing audio signals)	Local de Radio (equipo funcionando sin emisión de señales acústicas)
9	Radar Rooms	Cuartos de Radar
	Accommodation spaces	**Espacios de Alojamiento**
10	Cabins and Hospitals	Camarotes y Enfermería
11	Mess rooms	Comedores
12	Recreation rooms	Salas de Recreo
13	Open Recreation areas	Zonas de Recreo al aire libre
14	Offices	Oficinas
	Service Spaces	**Espacios de Servicio**
15	Galleys without food processing equipment operating	Cocinas, con el equipo de elaboración de alimentos sin operar
16	Serveries and Pantries	Oficios
	Normally unoccupied spaces	**Espacios no ocupados habitualmente**
17	Spaces not specified	Espacios no especificados

TABLA II: EQUIVALENCIAS ENTRE NORMATIVAS

LOCAL NUM.	NOISE CODE	IMO A.468	BV COMF-NOISE	HAB. EMA	MILSTD 1472G	STANAG 4293
1	----	90	IMO	D12-90	90	90
2	110	110	IMO	D3-110	110	110
3	75	75	70	A3-70	75/70	70
4	85	85	80	B-75	84	80
5	85	90	IMO	NO APL.	95	NO APL.
6	65	65	65	A12-60	65	60
7	70	70	IMO	E-75	70	70
8	60	60	60	A3-70	60	60
9	65	65	60	A12-60	65	60
10	60	60	60	C-65	60	60
11	65	65	65	B-75	65	65
12	65	65	65	B-75	65	75
13	75	75	IMO	E-75	84	75
14	65	65	65	A3-70	65	65
15	75	75	75	B-75	75	75
16	75	75	80	B-75	84	75
17	90	90	IMO	NO APL.	90	NO APL.

Programación Heurística
Redes de Manhattan

heurístico
(Del griego *heurisko*, hallar.)
Que sirve como una ayuda en el aprendizaje, para descubrir o resolver problemas mediante técnicas exploratorias basadas en la experimentación y los métodos de ensayo y error.

CF (CIA-EOF) D. Enrique Barrios Bueno
Jefe del OCEPIT

Introducción

La heurística es el arte de inventar. Se dice que un algoritmo es heurístico cuando la solución no se determina en forma directa, sino mediante ensayos, pruebas, errores y vuelta a ensayar, todo de manera cíclica.

Muchos problemas de optimización no pueden ser abordados por métodos exactos, ya sea, por su alto grado combinatorio o por la dificultad de generar un modelo basado en programación matemática que represente exactamente una situación real.

Para situaciones de ésta naturaleza se han venido generando desde la década de los sesenta métodos conocidos como heurísticos, capaces de encontrar soluciones de buena calidad pero en muchos casos aproximada a la solución óptima. En un primer tiempo se generaron métodos orientados específicamente a la resolución de problema en particular, gran parte de estos métodos fueron generados inspirándose en la resolución de problemas de fácil representación pero de muy difícil solución como por ejemplo: el Problema del Vendedor Viajero; el Problema de la Mochila; el Problema del taxista; etc. Por la naturaleza diferente de estos problemas los métodos que se generaron eran útiles apenas para el problema en el cual habían sido inspirados, sin embargo a partir de la década de los 80 se han generado una familia de métodos conocidos como meta-heurísticos que ahora tienen la capacidad de ser aplicables a problemas de diversa naturaleza. Es decir, una misma plantilla algorítmica puede ser utilizada para resolver problemas que provienen de diversos sectores.

La Programación Heurística ha venido a significar el uso del conocimiento específico del dominio para cubrir esta explosión de posibilidades guiando la búsqueda por las direcciones más prometedoras. Se puede definir como aquel tipo de programación que aplica, para la resolución de problemas, reglas de buena lógica, denominadas heurísticas, las cuales proporcionan entre varias opciones posibles una que pueda ser la más prometedora, pero no garantiza necesariamente que dicha opción sea la más efectiva.

La Programación Heurística implica una forma de modelizar el problema en lo que respecta a la representación de su estructura, estrategias de búsqueda y métodos de resolución. Este tipo de programación se aplica con mayor intensidad en el campo de la Inteligencia Artificial (IA), y en especial, en el de la Ingeniería del Conocimiento, dado que el ser humano opera la mayor parte de las veces utilizando heurísticas, al ser ésta la conclusión del razonamiento humano basado en el conocimiento y su experiencia en un dominio específico.

El método, en este caso, consiste en generar rutas de soluciones posibles de acuerdo a un patrón dado; luego las rutas son sometidas a pruebas de acuerdo a un criterio que caracteriza a la solución. Si una ruta no es aceptada, se genera otra; y los pasos dados con la ruta anterior no se consideran. Es decir, existe inherentemente una vuelta atrás, para comenzar a generar una nueva ruta; por esta razón, este tipo de algoritmo también se denomina "con vuelta atrás" (backtracking en inglés).

En este caso en particular se va a analizar una red, que adopta una estructura reticular cuadrada, del tipo conocido como red de Manhattan, llamada así por el problema del taxista que vive en Manhattan y

que debe ir de un sitio a otro en el menor tiempo posible, con el menor coste, etc. Así pues se trata de encontrar el camino óptimo según los requisitos del problema.

Problema usando el método de redes de Manhattan

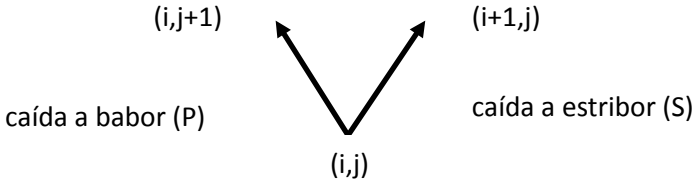
Imagen obtenida de Internet

Desarrollo

Un submarino debe salir de su base atravesando un campo de minas submarinas (M) desplegadas aleatoriamente por el enemigo. Se sabe por inteligencia la posición estimada de las minas. El camino ha sido reticulado y el submarino debe salir del nodo O (Origen) al nodo D (Destino), moviéndose de nodo a nodo (Punto a Punto), siempre avante (Forward) y cayendo a estribor (Starboard) o babor (Port).

Para ello asignamos una coordenada a cada nodo (i,j) en donde i denota la abscisa y j la ordenada. Definimos por M(i,j) el número de minas que hay desde el origen O hasta ése nodo. Llamamos a S(i,j) al número de minas que hay desde el nodo (i-1,j), al nodo (i,j), si sólo se le puede llegar cayendo a estribor (Starboard) desde el nodo (i-1,j), y llamamos a P(i,j) al número de minas que hay desde el nodo (i,j-1), al nodo (i,j), si sólo se le puede llegar cayendo a babor (Port) desde el nodo (i,j-1).

Las caídas (movimiento) a babor (hacia la izquierda) o estribor (hacia la derecha) serían:



Se trata de obtener la mejor derrota (camino) del submarino en donde se encuentre el menor número de minas.

El derrota que debe realizar el submarino para evitar el número máximo de minas, o encontrarse el número mínimo de minas, entre el nodo O(0,0) y el nodo M(m,n) lo dividiremos en m+n etapas, para una red de Manhattan, de dimensión mxm. La variable de estado X_k asociada a la fase k tomará como argumentos todos los vértices o nodos (i,j) tales que i+j=k, lo que indica que en la fase k habremos recorrido k etapas

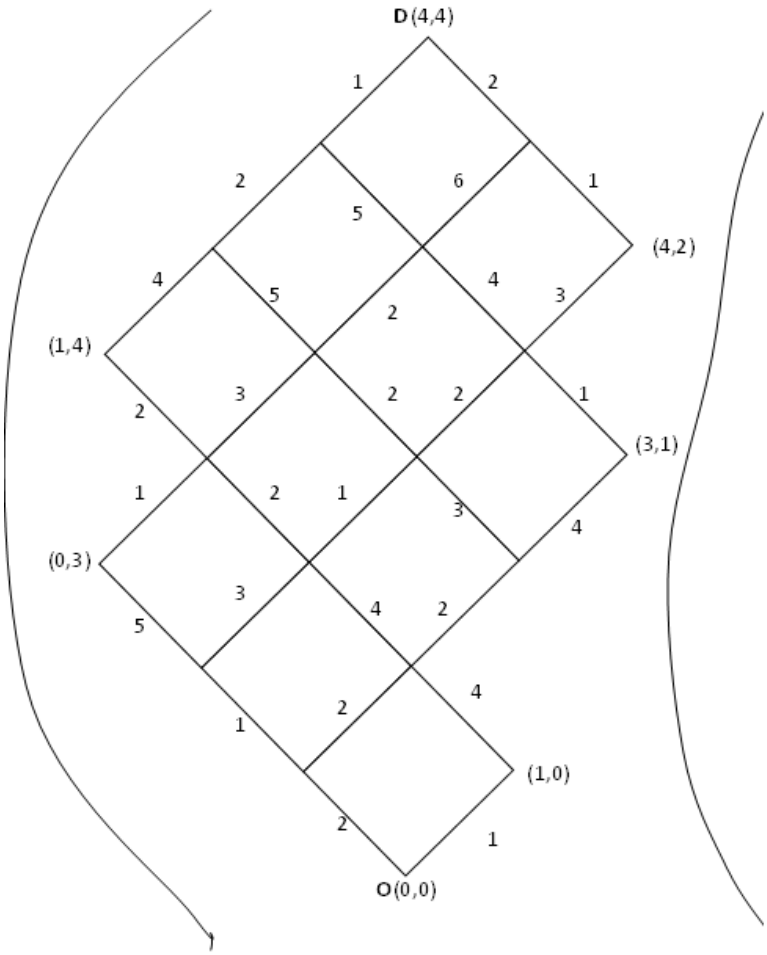
El algoritmo recurrente que nos conduce al óptimo se define para la etapa k (en la que se supone que ya ha sido aplicado en las k-1 etapas anteriores) como:

$$\underset{i+j=k}{M(i,j)} = \begin{cases} Min\left[M(i-1,j)+S(i,j), m(i,j-1)+P(i,j)\right], i \neq 0, j \neq 0 \\ M(i-1,j)+S(i,j), \text{ si j=0} \\ M(i,j-1)+P(i,j), \text{ si i=0} \end{cases}$$

Con la condición inicial evidente que M(0,0)=0

Para cada fase y para cada nodo de la misma tal que $i \neq 0, j \neq 0$ la decisión a tomar es si se debe navegar desde el nodo (i-1,j), decisión que representaremos por una S de estribor, o desde el nodo (i,j-1) decisión que representaremos por una P de babor. Para los nodos en los que i=0 y j=0 la decisión viene forzada por P o S respectivamente.

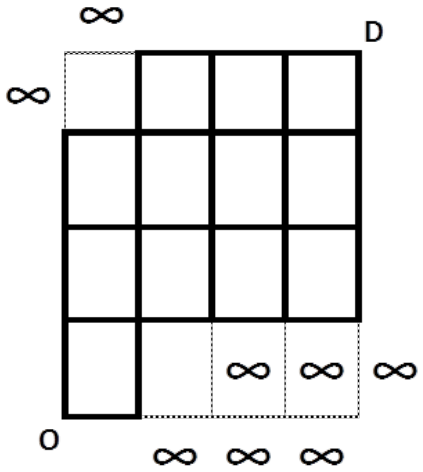
El algoritmo debe ser evaluado en todos los nodos de la red, y en el caso de que fuese rectangular sería (m+1)x(n+1)-1 exceptuando el nodo O.



Posición estimada de las minas en la Canal.

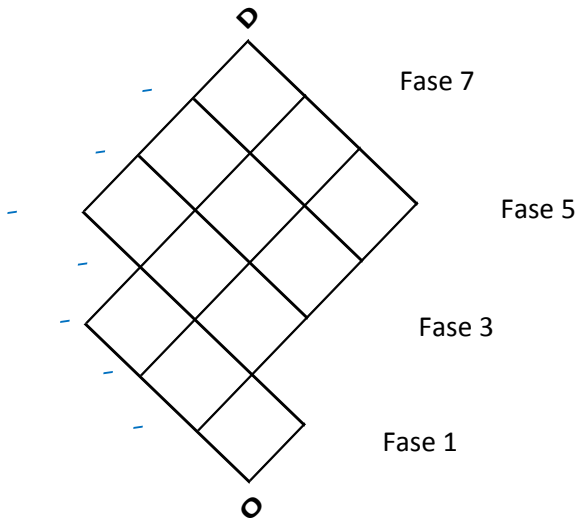
La resolución de las redes de Manhattan se hace sobre una red rectangular, sin embargo, en el ejemplo que nos concierne la red está limitada por el contorno de la canal en la que debe moverse el submarino. Girando la red 45º a la derecha y rellenando los huecos de los nodos que faltan, vemos claramente que equivale también a un cuadrado de dimensión 4x4, por cuanto se pueden considerar los nodos que

faltan y las minas que hay entre, hacia y desde los mismos como si hubiese infinitas minas, y de esta manera quedarían eliminados de facto esas rutas.



Red de Manhattan equivalente deshaciendo el giro de 45º.

La aplicación del algoritmo a las sucesivas fases, entendidas como aquellas líneas imaginarias que unen los nodos que son alcanzados en el mismo número de movimientos, como se indica en la siguiente figura, se hace sumando en el nodo de cada fase el mínimo valor del nodo en la anterior fase.



Indicación de las fases de la Red de Manhattan.

Lo que nos conduce a los siguientes resultados,

Fase 1: nodo	M(i,j)	decisión
(0,1)	2	P
(1,0)	1	S

Fase 2: nodo	M(i,j)	decisión
(0,2)	3	P desde (0,1)
(1,1)	4	S desde (0,1)
(1,1)	5	P desde (1,0)

Fase 3: nodo	M(i,j)	decisión
(0,3)	8	P desde (0,2)
(1,2)	6	S desde (0,2)
(1,2)	8	P desde (1,1)
(2,1)	6	S desde (1,1)

Fase 4: nodo	M(i,j)	decisión
(1,3)	8	P desde (1,2)
(1,3)	9	S desde (0,3)
(2,2)	9	P desde (2,1)
(2,2)	7	S desde (1,2)
(3,1)	10	S desde (2,1)

Fase 5: nodo	M(i,j)	decisión
(1,4)	10	P desde (1,3)
(2,3)	9	P desde (2,2)
(2,3)	11	S desde (1,3)
(3,2)	11	P desde (3,1)
(3,2)	9	S desde (2,2)

Fase 6: nodo	M(i,j)	decisión
(2,4)	14	P desde (2,3)
(2,4)	14	S desde (1,4)
(3,3)	13	P desde (3,2)
(3,3)	11	S desde (2,3)
(4,2)	12	S desde (3,2)

Fase 7: nodo	M(i,j)	decisión
(3,4)	16	P desde (3,3)
(3,4)	16	S desde (2,4)
(4,3)	13	P desde (4,2)
(4,3)	17	S desde (3,3)

Fase 8: nodo	M(i,j)	decisión
(4,4)	15	P desde (4,3)
(4,4)	17	P desde (3,4)

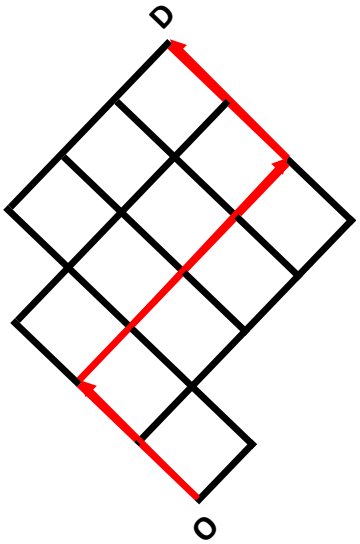
La derrota buscada se obtiene ahora analizando las decisiones óptimas desde el final al principio. Al nodo D(4,4) se accede desde el (4,3), éste desde el (4,2), éste desde el nodo (3,2), éste desde el nodo (2,2), éste desde el nodo (1,2), éste desde el nodo (0,2) y a éste nodo se le alcanza desde el (0,1) y por último el origen O(0,0).

Solución

La derrota óptima en donde el submarino se encontraría con el menor número de minas, comenzando en el nodo (0,0) correspondiente al origen, hasta el destino en (4,4) sería la siguiente:

(0,0) → (0,1) → (0,2) → (1,2) → (2,2) → (3,2) → (4,2) → (4,3) → (4,4)

Aquí se representa en rojo la ruta óptima que debería seguir el submarino si quiere encontrarse con el menor número de minas.



Derrota óptima por la que debe navegar el submarino por la canal.

Vemos una aplicación práctica al ámbito militar de una herramienta matemática heurística (red de Manhattan), en donde hemos cambiado la búsqueda de la ruta más económica por el de derrota con menor número de minas.

Evidentemente las aplicaciones son numerosas pues el límite lo pone el ingenio.

Metodología de generación de requisitos técnicos de seguridad para submarinos

CC (CIA-OF) Pedro Antonio Casas Alcaide
Doctor Ingeniero Naval por la UPM
JAL-DIC

Resumen.- En este documento se persiguen dos objetivos básicos: presentar una metodología para generar requerimientos técnicos de seguridad aplicables a submarinos y un procedimiento para clasificar los sistemas involucrados en la seguridad según su nivel de criticidad mediante el uso de diagramas de fallo. Lo anterior se lleva a cabo teniendo en cuenta las prácticas habituales sobre análisis de riesgos en el ámbito naval.

1.- Introducción

Los submarinos militares actuales son plataformas complejas en donde conseguir un nivel de seguridad aceptable durante el ciclo de vida de las mismas resulta de la máxima importancia.

Actualmente existen varias maneras de alcanzar este objetivo, estando basadas todas ellas en el establecimiento de requisitos técnicos de seguridad más o menos detallados que, cubriendo los aspectos más importantes (diseño/proyecto, construcción, operación, mantenimiento e inspección/prueba), posibiliten un comportamiento libre de eventos catastróficos en una medida que se juzgue satisfactoria.

Los requisitos técnicos de seguridad arriba mencionados pueden ser generados bajo multitud de puntos de vista, como por ejemplo:

- Según las exigencias del usuario
- Según las necesidades del astillero responsable del diseño/proyecto y/o construcción
- Para aplicación específica a un proyecto concreto
- De manera que sean aplicables con carácter general (reglamentos de marinas de guerra, de sociedades de clasificación, etc.)
- Siguiendo un enfoque prescriptivo
- Siguiendo un enfoque basado en metas
- Según el aspecto del ciclo de vida que se pretende cubrir (diseño/proyecto, construcción, operación, mantenimiento o inspección/prueba)

Este documento surge como fruto de la experiencia adquirida por el autor sobre generación de requerimientos técnicos de seguridad aplicables a submarinos, y tiene como objetivo presentar un procedimiento sistemático para la generación de dichos requerimientos bajo los condicionantes encontrados normalmente en una marina de guerra pequeña y aplicable en principio a cualquiera de los aspectos del ciclo de vida arriba indicados.

En lo que respecta a este tipo de usuarios (marinas de guerra pequeñas) puede decirse que el proceso de generación de requisitos va a ser llevado a cabo normalmente bajo una serie de condicionantes específicos que deben tenerse muy en cuenta al elegir la correspondiente metodología de desarrollo:

- **Condicionante 1**: La información disponible, aunque posiblemente abundante, no estará organizada normalmente de forma sistemática en base a criterios de gestión de riesgos, por lo que deberá adaptarse a los objetivos perseguidos para que resulte útil.

- **Condicionante 2**: Los recursos internos disponibles al efecto, tanto humanos como materiales, suelen ser escasos dado que el tamaño de la flota submarina no justifica inversiones excesivas en este sentido.
- **Condicionante 3**: La capacidad para influir en la estructura técnico/organizativa del astillero encargado del diseño/proyecto y/o construcción (sistema de gestión de calidad, estándares de materiales, etc.) es muy pequeña, dado que el reducido tamaño de los pedidos (series de 3 o 4 buques como mucho) no justifica los gastos en los que habría que incurrir ante exigencias demasiado concretas en este sentido.

Teniendo en cuenta los condicionantes arriba indicados, el autor propone el uso de una metodología de generación de requisitos capaz de aprovechar la información existente y alcanzar los siguientes objetivos:

- **Objetivo 1**: Generación sistematizada de requisitos técnicos capaz de asegurar que no se han dejado aspectos sin cubrir (compacidad) y que no existen contradicciones entre los mismos (coherencia).
- **Objetivo 2**: Estructuración modular de la información para facilitar un aumento gradual del nivel de detalle en aquellos aspectos que se juzguen necesarios en un momento dado, así como para facilitar la actualización de la misma mediante la incorporación de lecciones aprendidas.
- **Objetivo 3**: Flexibilidad para ser aplicable con carácter general o, en caso necesario, adaptarse a las circunstancias concretas de un proyecto ya iniciado (con cierto grado de avance).

La consecución de estos objetivos bajo los condicionantes arriba indicados conduce casi inevitablemente al uso de un enfoque basado en metas así como a la necesidad de clasificar los diferentes requisitos técnicos por niveles de criticidad, permitiendo de este modo centrar los esfuerzos en aquellos aspectos que resulten más influyentes en la seguridad del submarino.

En relación con esto último, el autor propone en este documento el uso de un procedimiento de asignación de niveles de criticidad que presenta una relación sencillez/eficacia bastante satisfactoria, ilustrándolo con el desarrollo de un ejemplo de aplicación que permita:

- Entender la estructura lógica de los procesos que pueden dar lugar a la pérdida de un submarino relacionados con la estanqueidad del mismo (emergencia por vía de agua)
- Clasificar los sistemas del submarino relacionados con la estanqueidad del mismo según su nivel de criticidad.

Finalmente, cabe decir que la metodología presentada en este documento ha sido desarrollada ante la imposibilidad de encontrar en la bibliografía existente procedimientos capaces de adaptarse de forma directa a los condicionantes y objetivos arriba mencionados.

2.- Generación sistemática de requerimientos técnicos de seguridad para submarinos

Desde el punto de vista del grado de detalle existente en la información disponible, la ejecución de análisis de riesgos puede llevarse a cabo según dos grandes líneas de actuación:

LINEA 1.- Descripción cuantitativa de los riesgos asociados a un sistema mediante la división del mismo en componentes básicos hasta el nivel que sea necesario para poder asignar un valor numérico definido a la probabilidad de fallo de cada uno de los citados componentes.

Esta opción constituye la forma más rigurosa y exhaustiva de ejecutar análisis de riesgos, pero exige disponer de datos estadísticos detallados sobre los posibles modos de fallo de una serie de componentes (subsistemas) bastante amplia, los cuales suelen obtenerse de dos formas distintas:

- Mediante regresiones efectuadas sobre datos tomados de la experiencia acumulada en el uso de los componentes del sistema
- Mediante la ejecución de pruebas de caracterización para conocer de forma directa la fiabilidad de los componentes del sistema

La referencia [4] constituye un buen ejemplo de esta línea de actuación, pudiendo encontrarse en la misma un procedimiento basado en datos recopilados por la U.S. NAVY sobre sistemas mecánicos mediante alguna de las dos formas arriba indicadas.

LINEA 2.- Acotación de los riesgos asociados a un sistema mediante la comparación del mismo con un "diseño de referencia" del que no hay información numérica sobre las probabilidades asociadas a los diferentes modos de fallo, pero que en la práctica ha demostrado un nivel de seguridad satisfactorio

En esta opción el "diseño de referencia" se divide también en componentes básicos, los cuales pueden usarse de dos maneras distintas (y a menudo complementarias):

- **Alternativa A**: Como patrones de comparación para validar diferentes soluciones técnicas (cuanto más se asemeje la solución técnica al "diseño de referencia", más parecido será el nivel de seguridad de ambos)
- **Alternativa B**: Como modelos para obtener reglas de diseño conceptuales a partir de sus características (el uso de estas reglas de diseño en el desarrollo de una solución técnica garantiza un nivel de seguridad similar al del "diseño de referencia" utilizado)

La metodología presentada en esta parte del documento se ha desarrollado siguiendo esta última alternativa, habiéndose considerado en todo lo que sigue que la información disponible al respecto en una marina de guerra podrá incluirse en alguno de los tres grupos siguientes:

- **G1**.-Documentación técnica (especificaciones de diseño, planos, esquemas, etc.) de los submarinos que han prestado servicio hasta la fecha
- **G2**.- Experiencia adquirida durante el ciclo de vida de los submarinos arriba citados
- **G3**.- Referencias bibliográficas externas, tanto de acceso público como restringido (normas de diseño de otras marinas, reglamentos de sociedades de clasificación, etc.).

2.1.- Descripción básica del método propuesto

Descrita de forma esquemática, la metodología propuesta se basa en la aplicación de 5 etapas consecutivas:

ETAPA 1.- Identificación de los aspectos funcionales del sistema cuya seguridad se desea garantizar así como de las condiciones operativas de dicho sistema.

Aunque podrían definirse algunas más según el punto de vista usado, puede decirse que las condiciones operativas básicas de un submarino son tres: navegación en superficie, "snorkel" e inmersión. Por otro lado, los aspectos funcionales a cubrir pueden ser de muy distinta naturaleza, centrándose la experiencia del autor principalmente en la generación de requisitos de seguridad relativos a la estanqueidad y resistencia estructural asociada.

ETAPA 2.- Identificación a nivel conceptual de los sistemas/equipos involucrados en los aspectos funcionales mencionados en la etapa 1 y clasificación formal de los mismos, llevando a cabo al efecto un análisis detallado de la información incluida en G1, es decir, de la arquitectura (configuración) física de los submarinos que han prestado servicio de manera satisfactoria.

Si se dispone de información sobre varios diseños de referencia, lo ideal sería hacer uso de todos ellos. En la práctica, se usa únicamente un diseño de referencia (el más reciente), dado que lo contrario aumenta considerablemente la carga de trabajo y que en el ámbito de una marina de guerra pequeña no suele haber más de una opción donde elegir.

ETAPA 3.- Identificación conceptual de los peligros a los que previsiblemente van a estar sometidos los sistemas/equipos identificados en la etapa 2 y clasificación formal de los mismos, llevando a cabo al efecto un análisis detallado de la información incluida en G2.

En esta etapa, la información contenida en G2 puede complementarse con la incluida en G3, de manera que esta última sirva como contraste de las conclusiones alcanzadas mediante el análisis de la experiencia disponible en la propia marina de guerra.

ETAPA 4.- Identificación conceptual de las medidas disponibles para mitigar los riesgos asociados a los peligros obtenidos en la etapa 3 y clasificación formal de las mismas, llevando a cabo al efecto un análisis detallado de la información incluida principalmente en G1.

Análogamente a lo que sucede en la etapa anterior, la información contenida en G1 puede complementarse con la incluida tanto en G2 como en G3, de manera que la experiencia disponible tanto a nivel interno como externo sirva para contrastar las medidas de mitigación identificadas a partir del diseño de referencia elegido.

ETAPA 5.- Cruce de los resultados obtenidos en las 3 etapas anteriores para generar de manera sistemática los requisitos técnicos de seguridad, llevando a cabo al efecto un análisis detallado de la información incluida en G1, G2 y G3.

Esta etapa constituye el núcleo de la metodología propuesta, correspondiendo a la misma la mayor parte de la carga de trabajo asociada al proceso. Para completarla, deben seguirse los tres pasos siguientes:

- **PASO 1**.- Evaluación de las soluciones de diseño específicas contenidas en G1 para cada punto de cruce sistema/peligro/medida de mitigación, al objeto de identificar las características más relevantes en relación con dicho punto de cruce.
- **PASO 2**.- Uso de las características identificadas en el paso anterior para obtener requisitos de seguridad de tipo conceptual, capaces de adaptarse en la mayor medida posible a los avances técnico/científicos previsibles.
- **PASO 3**.- Uso de la información contenida en G2 y G3 para contrastar las requisitos de seguridad conceptuales obtenidos en el paso anterior, mejorando de esa manera el resultado final gracias a la experiencia disponible tanto a nivel interno como externo.

Antes de finalizar este punto, y una vez descritas todas las etapas de las que consta el método propuesto, hay una serie de aspectos importantes sobre los que conviene llamar la atención del lector:

- Las etapas 2 a 5 no son estrictamente consecutivas en realidad, sino más bien iterativas, ya que los resultados obtenidos en cada una de ellas deberán servir para realimentar el proceso hasta alcanzar la solución definitiva.

- El proceso descrito (en concreto las etapas 2 a 5) deberá repetirse para todas y cada una de las condiciones operativas identificadas en la etapa 1, siendo el objetivo final elaborar un conjunto de requisitos técnicos de seguridad para cada una de las condiciones operativas citadas.
- En etapas posteriores no contempladas en el presente documento (en el seno de cada proyecto concreto), se deberá definir de manera exhaustiva la arquitectura física del submarino con el nivel de detalle necesario para poder verificar el estricto cumplimiento de todos los requisitos técnicos de seguridad generados en la etapa 5. Dada la naturaleza de este proceso de identificación así como la escasez de recursos disponibles por parte del usuario, lo normal será asignarlo al astillero encargado del diseño/proyecto del submarino.
- Finalmente, cabe decir que el equipo de trabajo responsable de completar cada una de las cinco etapas citadas debería ser multidisciplinar, incluyendo en el mismo tanto ingenieros como personal operativo.

2.2.- Niveles de criticidad

Una característica muy importante del método presentado es la capacidad de facilitar la asignación de los recursos disponibles de manera racional, focalizándolos en aquellos aspectos que resulten más críticos de cara a la seguridad de la plataforma submarina. Esto resulta especialmente interesante en la ejecución de la etapa 5, tanto en relación con el esfuerzo necesario para sintetizar los requisitos como con el alcance de las exigencias incluidas en los mismos relativas a cada uno de los elementos que conforman la arquitectura física de la plataforma.

La característica arriba indicada se puede conseguir mediante el uso de niveles de criticidad, que tal y como se verá en la parte 3, no son más que una medida de la contribución que tiene cada uno de los elementos que conforman la arquitectura física del sistema en la seguridad del mismo.

Sin entrar todavía en la opción elegida para definir los diferentes niveles de criticidad (lo cual se verá en la parte 3), la forma de proceder en el método aquí presentado sería como sigue:

Tras efectuar una (o a los sumo dos) iteraciones se obtiene una primera aproximación de la arquitectura física del sistema así como de las interacciones existentes entre los elementos que la conforman, y partiendo de esta aproximación, se aplica el procedimiento descrito en la parte 3 para obtener como resultado una clasificación de los elementos incluidos en la citada arquitectura física según la importancia de su contribución a la seguridad de la plataforma.

Una vez conocido el nivel de criticidad de cada elemento, se define:

- La política de asignación de recursos a la obtención de cada uno de los requisitos técnicos objeto de la etapa 5.
- El alcance que deben tener las exigencias contenidas en dichos requisitos técnicos según el elemento al que corresponden.

Finalmente, se repite el proceso (etapas 2 a 5) llevando a cabo las iteraciones que sean necesarias hasta alcanzar el resultado definitivo. Si las elecciones efectuadas han sido correctas, las actualizaciones a realizar sobre los niveles de criticidad, políticas de asignación y alcance de los requisitos deberían ser mínimas, constituyendo esta circunstancia una manera de contrastar la bondad de todo el proceso.

En usuarios con gran disponibilidad de recursos, la característica citada al inicio de este punto puede ser obviada en cierta medida (por ejemplo, la referencia [1] no establece nivel de criticidad alguno en relación con los sistemas/elementos físicos contemplados en la misma). Sin embargo, en marinas de guerra pequeñas donde los recursos disponibles son escasos, puede ser de gran ayuda en la consecución de resultados satisfactorios con un coste asumible.

2.3.- Compacidad y coherencia de los requisitos de seguridad obtenidos

La estructura "arquitectura física-peligros-medidas de mitigación" establecida mediante las Etapas 2, 3 y 4 da lugar a niveles de clasificación de requisitos técnicos perfectamente homogéneos, lo que constituye una ventaja muy importante en relación con otras metodologías, pues permite tener un nivel de confianza alto (y de forma directa dada la naturaleza del proceso seguido en la Etapa 5) en la compacidad y coherencia de los requisitos obtenidos.

Conviene indicar que no hay criterios definidos para fijar el nivel de detalle alcanzado en las etapas 2, 3 y 4, el cual normalmente se establecerá en base al punto de equilibrio que se elija entre la extensión del trabajo a realizar en la etapa 5 y el nivel de compacidad de los requisitos técnicos de seguridad obtenidos. Es evidente que cuanto mayor sea el número de peligros, medidas de mitigación y componentes físicos, menor será la probabilidad de dejar aspectos importantes sin cubrir, a cambio de lo cual aumentará el número de cruces a analizar, y por tanto la carga de trabajo.

2.4.- Nivel de detalle de los requisitos de seguridad obtenidos

Los condicionantes y objetivos indicados en la introducción conducen de manera casi inevitable al uso de una filosofía de redacción basada en el cumplimiento de metas genéricas de seguridad, lo cual presenta dos ventajas adicionales importantes: deja libertad al astillero encargado del diseño/proyecto para introducir soluciones técnicas innovadoras y confiere a los requisitos obtenidos en la Etapa 5 mayor resistencia frente a la obsolescencia que inevitablemente produce el paso del tiempo.

Bajo el punto de vista con el que se ha desarrollado el método aquí descrito, no es tan importante cumplir unos requisitos de seguridad altamente detallados como la capacidad de demostrar, en un momento dado, que las alternativas propuestas por el astillero presentan un nivel de riesgo aceptable. En este contexto, la ejecución de estudios justificativos (mediante la aplicación de técnicas de análisis de riesgos) por parte del astillero constituirá la forma de proceder habitual, debiendo quedar soportado el contenido de los mismos mediante una combinación de las opciones siguientes:

- **A**.- Cálculo directo basado en principios físicos, ya sea mediante simulación numérica o mediante procedimientos analíticos
- **B**.- Ejecución de pruebas de caracterización, ya sea en el astillero o en instalaciones de suministradores externos al mismo
- **C**.- Aplicación de normas y estándares técnicos de validez contrastada: reglamentos de sociedades de clasificación, etc.

Dada su relación coste/beneficio, la opción C se considera preferible a las otras dos, siendo recomendable su uso siempre que las circunstancias lo permitan. Conviene observar que los estándares generados por el propio astillero no constituyen a priori normativa de validez contrastada, motivo por el cual su contenido debe ser trazable hasta un soporte documental adecuado, a saber:

- Referencias técnicas de validez contrastada
- Experiencia previa formalmente documentada
- Información suministrada por socios tecnológicos (formalmente documentada)

2.5.- Política de análisis de riesgos implícita en el método propuesto

En el método que se propone en este documento se usa la definición de peligros, medidas de mitigación y arquitecturas físicas como vehículo para organizar de manera sistemática la información/experiencia disponible sobre sistemas que han demostrado un nivel de seguridad satisfactorio durante muchos años de servicio, lo cual permite un tratamiento muy simplificado de dichos conceptos en relación con lo exigido en las normas encontradas habitualmente (como por ejemplo en [6]), en las que el análisis detallado de los mismos constituye el objetivo principal. En el caso que nos ocupa:

- El tratamiento de los peligros identificados ha sido cualitativo, no existiendo una evaluación cuantitativa de los riesgos asociados a los mismos en relación con su probabilidad de ocurrencia y/o con su impacto en el funcionamiento del sistema
- El tratamiento de las medidas de mitigación identificadas ha sido cualitativo, no habiéndose cuantificado la reducción esperable en los riesgos arriba citados.
- La arquitectura física del sistema se establece únicamente a nivel conceptual, sin entrar en detalles específicos sobre la implementación considerada en cada caso concreto.

En esencia, el objetivo de la metodología descrita es establecer una serie de requisitos técnicos de aplicación al diseño de sistemas genéricos (submarinos) cuyo uso permita garantizar un grado de seguridad aceptable en dichos sistemas, sea cual sea su configuración final. Simplemente se asume que el nivel de seguridad alcanzado por el sistema mediante la aplicación de los requisitos técnicos arriba citados debe ser análogo al de los sistemas utilizados como base para elaborar dichos requisitos.

2.6.- Comparación entre el método propuesto y el usado para la elaboración de [1]

Tal y como se indica al final de la introducción, la metodología aquí presentada constituye un desarrollo original, no obstante lo cual se ha hecho uso de ciertos conceptos de [5] y [7].

A la vista de lo anterior, puede resultar curioso el hecho de no haber usado el enfoque conceptual de [1], ya que esta última se considera como una de las referencias más prestigiosas en el ámbito de la seguridad a bordo de submarinos (concretamente en relación con la estanqueidad y resistencia estructural asociada). El motivo es que, a pesar de contener información de detalle altamente interesante, el planteamiento seguido para su redacción no se adapta en absoluto a los condicionantes y objetivos presentados en la introducción.

Profundizar algo más en este sentido puede resultar muy ilustrativo en relación con ciertos aspectos que muchas veces no resultan evidentes a pesar de su importancia, por lo que a continuación se va a presentar un breve ejercicio de comparación entre el método propuesto por el autor y el usado en la elaboración de [1].

En primer lugar, el enfoque usado en la redacción de [1] puede considerarse totalmente prescriptivo mientras que el enfoque propuesto en este documento se basa en el cumplimiento de metas genéricas de seguridad establecidas mediante la aplicación de técnicas de análisis de riesgos.

Lo anterior trae como consecuencia que en [1] aparezca, bien de forma explícita o mediante referencia a otra normativa técnica:

- Una definición muy detallada de la arquitectura física del submarino
- Casi toda la información de bajo nivel necesaria en el proceso de certificación (requisitos específicos de prueba, trazabilidad de materiales, formatos aplicables a los documentos exigidos en el proceso de certificación, etc.)

Mientras que por su parte, el método aquí propuesto permite:

- Transferir al astillero la mayor parte del esfuerzo necesario para desarrollar, y actualizar, la información de detalle (bajo nivel) arriba citada
- Una gestión mucho más flexible de los posibles incumplimientos
- La introducción de soluciones técnicas innovadoras de forma controlada por parte del astillero encargado del diseño/proyecto.

En segundo lugar, la estructuración modular de la información que se persigue en el método del autor mediante su triple clasificación por elementos de la arquitectura física, peligros y medidas de mitigación permite una integración de la experiencia acumulada (lecciones aprendidas) más racional y sistemática que en [1].

Finalmente, cabe decir que cualquier código de seguridad desarrollado en base al método aquí propuesto se adaptaría muy fácilmente a cualquier soporte industrial disponible, mientras que los requerimientos contenidos en [1] resultan muy difíciles de aplicar fuera del entorno técnico/industrial norteamericano.

2.7.- Ejemplo de aplicación

Se va a ilustrar lo dicho hasta el momento aplicándolo de manera muy simplificada a la generación de requisitos de seguridad relacionados con la estanqueidad y resistencia estructural asociada de un submarino navegando en inmersión.

ETAPA 1.- Los resultados de esta etapa se derivan directamente del enunciado propuesto (arriba indicado) para este ejemplo de aplicación:

- **Aspectos funcionales a cubrir**: estanqueidad y resistencia estructural asociada
- **Condiciones operativas a tener en cuenta**: inmersión

ETAPA 2.- Un análisis rápido de la arquitectura física de los submarinos serie 70 (los cuales han prestado servicio de manera satisfactoria en la Armada Española durante muchos años) permite establecer la siguiente clasificación conceptual de los diferentes sistemas/equipos involucrados en la estanqueidad de un submarino navegando en inmersión (incluyendo la reacción en emergencia por vía de agua):

A1	Casco resistente
A2	Aberturas del casco resistente y elementos de cierre asociados (escotillas, esclusas, sistema de inducción, etc.)
A3	Válvulas de casco en conducciones dotadas de una sola barrera de estanqueidad
A4	Conducciones penetrantes al casco resistente con dos barreras de estanqueidad
A5	Mástiles y ejes huecos penetrantes al casco resistente
A6	Conducciones penetrantes al casco resistente con una sola barrera de estanqueidad
A7	Sistema de maniobra en emergencia de válvulas de casco
A8	Sistema de alarma por entrada incontrolada de agua a bordo
A9	Sistema de soplado en emergencia de tanques de lastre
A10	Sistema de propulsión
A11	Sistema de gobierno
A12	Sistema de achique

ETAPA 3.- Un análisis rápido de la bibliografía disponible (ver por ejemplo referencias [5] y [7]) permite establecer la siguiente clasificación conceptual de los peligros a los que previsiblemente va a estar sometida la arquitectura física identificada en la etapa anterior:

P1 Efecto hidrostático
P2 Efecto hidrodinámico
P3 Fallo de origen mecánico.
P4 Corrosión/ataque químico
P5 Incendio
P6 Fatiga
P7 Impactos externos (varadas, colisiones con otros buques, etc.).
P8 Falsas maniobras por parte de la dotación
P9 Movimientos excesivos de la plataforma (escora, asiento longitudinal, etc.)

La relación anterior incluye únicamente peligros inductores (capaces de dar lugar a la pérdida funcional de cualquiera de los sistemas/equipos incluidos en la arquitectura física) asociados a la operación normal de un submarino.

ETAPA 4.- En base a la experiencia personal del autor (sin necesidad de recurrir a referencias bibliográficas específicas) puede establecerse la siguiente clasificación conceptual de las medidas disponibles para mitigar los riesgos asociados a los peligros obtenidos en la etapa anterior:

M1 Coeficientes de sobredimensionamiento
M2 Redundancia
M3 Concepto FAIL-SAFE
M4 Prevención de fallos de causa común, incluida la propagación en cascada

La relación anterior incluye únicamente reglas de diseño, y por tanto, medidas de mitigación de tipo preventivo (aquellas cuya implementación tiene por objeto impedir la materialización de cualquiera de los peligros considerados).

ETAPA 5.- Finalmente, analizando un diseño de referencia que la experiencia en servicio haya demostrado satisfactorio (como por ejemplo el de la serie 70) en relación con cada uno de los 432 puntos de cruce (12x9x4) que se derivan de los tres listados arriba indicados, y asumiendo que de media va a corresponder un requisito por cada punto de cruce, sería posible generar 432 requisitos de seguridad relativos a la estanqueidad a bordo de submarinos de una manera altamente sistemática, y por tanto, capaz de garantizar niveles aceptables de compacidad y coherencia en los resultados obtenidos.

3.- Clasificación de sistemas según su nivel de criticidad mediante diagramas de fallo

Los diagramas de fallo son representaciones lógicas de la manera en que puede fallar un sistema complejo (formado por diversos subsistemas) basadas en la definición de una serie de componentes simples cuyos fallos (denominados eventos de inicio) se combinan mediante puertas lógicas organizadas según la estructura interna del sistema bajo estudio.

Dichos diagramas constituyen una herramienta muy utilizada en el campo del análisis de riesgos, siendo posible hacer uso de la misma modulando a voluntad el grado de detalle al que se desea bajar en la definición conceptual del sistema a analizar.

En esta parte del documento se presenta un método de asignación de niveles de criticidad basado en

el uso de diagramas de fallo, ilustrándolo mediante el desarrollo de un ejemplo de aplicación sencillo: la clasificación de los elementos relacionados con la estanqueidad a bordo de un submarino.

Dicho método también ha sido aplicado a los ejemplos que aparecen en [2], pudiendo decirse que ha dado resultados totalmente coherentes con la información contenida en la citada referencia.

3.1.- Descripción básica del método propuesto

El nivel de criticidad (NC) de un elemento puede definirse de una manera genérica como la contribución que tiene el fallo de dicho elemento (evento de inicio) en el fallo global del sistema al que pertenece el citado elemento.

Hay muchas formas de establecer un valor numérico para el NC de los elementos componentes de un sistema (ver referencia [2]), pudiendo clasificarse en dos grandes grupos: determinísticos y probabilísticos.

Los métodos determinísticos asignan valores al NC basándose únicamente en la estructura lógica de los diagramas de fallo desarrollados al efecto, siendo su principal inconveniente que exigen normalmente la elaboración de tablas lógicas cuyo tamaño crece exponencialmente con el número de eventos de inicio considerado. Por su parte, los métodos probabilísticos asignan valores al NC teniendo en cuenta también la probabilidad de ocurrencia asociada a los eventos de inicio incluidos en los diagramas de fallo desarrollados al efecto, siendo en este caso su principal inconveniente que exigen disponer de datos estadísticos para poder determinar de manera fiable las probabilidades mencionadas.

El método aquí propuesto pertenece al tipo determinístico, a pesar de lo cual se ha diseñado específicamente para evitar la elaboración de tablas lógicas de tamaño exponencialmente creciente, y tiene por objeto establecer los NC asociados a los eventos de inicio incluidos en los diagramas de fallo correspondientes a los diferentes escenarios bajo los que puede encontrase un sistema, pudiendo definirse un escenario como una situación caracterizada por el nivel de severidad máxima que conllevaría la materialización de cierto tipo (a definir en cada caso concreto) de cadenas de eventos.

En esencia, el método arriba citado consta de tres etapas:

- **Etapa 1**: Establecer la cadena de eventos mínima asociada a cada uno de los escenarios considerados mediante el uso directo de las reglas del álgebra de Boole.
- **Etapa 2**: Extraer de cada una de las cadenas mínimas establecidas en la etapa anterior un valor numérico para los factores de valoración de eventos (FV) definidos al efecto.
- **Etapa 3**: Combinar los valores numéricos obtenidos en la etapa anterior para establecer el nivel de criticidad (NC) asociado a cada uno de los eventos de inicio considerados.

El número de factores de valoración de eventos necesarios para completar la segunda etapa se ha fijado en dos, respondiendo cada uno de ellos a las definiciones que aparecen a continuación:

- **FV 1**: Inverso del número de multiplicandos que tiene el eslabón más pequeño donde aparece el evento.
- **FV 2**: Número de eslabones en los que interviene el evento

Cuando FV2 sea igual a cero, se asignará a FV1 el mismo valor (Es evidente que en estos casos el evento resulta superfluo para el escenario considerado, puesto que no interviene en el mismo).

En cuanto al proceso de combinación necesario para completar la etapa 3, se procederá como sigue:

- **Paso 1**: Se asigna a cada evento el mayor valor de FV1 de entre los establecidos para los diferentes escenarios (en caso de igualdad, se usará el mayor valor de FV2 como criterio de asignación)
- **Paso 2**: Se asigna un número de orden a cada evento usando al efecto los valores arriba mencionados (de mayor a menor) y teniendo en cuenta que FV1 tiene preferencia sobre FV2.
- **Paso 3**: Finalmente se halla el inverso del número de orden arriba indicado para establecer los valores de NC buscados.

Es evidente que a mayores valores tanto de FV1 como de FV2 corresponderán igualmente mayores valores de NC, y por otro lado, que el máximo valor alcanzable por NC es la unidad.

3.2.- Ejemplo de aplicación.

HIPÓTESIS DE PARTIDA

Para la ejecución del ejemplo de aplicación elegido se supondrá al submarino en inmersión así como la validez de las hipótesis que aparecen a continuación:

H1.- Únicamente se consideran los eventos de inicio siguientes:

E1	Pérdida de estanqueidad del casco resistente
E2	Pérdida de estanqueidad de aberturas del casco resistente y elementos de cierre asociados
E3	Pérdida de estanqueidad de válvulas de casco en circuitos dotados de una sola barrera de estanqueidad
E4Ext	Pérdida de estanqueidad de la barrera de estanqueidad exterior en conducciones penetrantes al casco resistente dotadas de dos barreras de estanqueidad
E4Int	Pérdida de estanqueidad de la barrera de estanqueidad interior en conducciones penetrantes al casco resistente dotadas de dos barreras de estanqueidad
E5Ext	Pérdida de estanqueidad de la barrera de estanqueidad exterior en mástiles y ejes huecos penetrantes al casco resistente
E5Int	Pérdida de estanqueidad de la barrera de estanqueidad interior en mástiles y ejes huecos penetrantes al casco resistente
E6	Pérdida de estanqueidad de conducciones penetrantes al casco resistente dotadas de una sola barrera de estanqueidad
F1	Fallo del sistema de maniobra en emergencia de válvulas de casco
F2	Fallo del sistema de alarma por entrada incontrolada de agua a bordo (inundación de sentinas, etc.)
F3	Fallo del sistema de soplado en emergencia de tanques de lastre
F4	Fallo del sistema de propulsión
F5	Fallo del sistema de gobierno
F6	Fallo del sistema de achique

En relación con el listado arriba indicado, conviene aclarar lo siguiente:

- Incluye, a un nivel conceptual, la práctica totalidad de los eventos de inicio posibles relacionados con la aparición y/o reacción ante una emergencia por vía de agua.
- El fallo de los elementos de cierre internos de válvulas de casco no ha sido incluido de manera explícita, habiéndose considerado conjuntamente con el fallo del sistema de maniobra en emergencia de válvulas de casco (evento F1)

- Se ha supuesto que todas las conducciones penetrantes para fluidos distintos al agua de mar, así como todos los mástiles y ejes huecos penetrantes, disponen de dos barreras de estanqueidad redundantes: una exterior y otra interior.

H2.- Se asume que el sistema de propulsión resulta inútil si el sistema de gobierno se encuentra inoperativo, y viceversa.

H3.- Se asume que el sistema de soplado de tanques de lastre puede cumplir su cometido a pesar de que el sistema de gobierno y/o el sistema de propulsión se encuentren inoperativos.

H4.- Se supone que los sistemas relacionados con la estanqueidad del submarino han sido diseñados para impedir la aparición de fallos de causa común (fallo simultáneo de diferentes sistemas originado por la materialización de un mismo peligro), al menos en una medida similar a los diseños que han prestado servicio durante el último cuarto del siglo XX.

En relación con esta última hipótesis, cabe decir lo siguiente:

- Gracias a la misma, los eventos de inicio indicados en H1 van a poder ser considerados independientes unos de otros
- Los fallos de causa común a nivel interno (en elementos, redundantes o no, dentro de un mismo sistema) no han sido contemplados de manera explícita, habiendo recibido los sistemas objeto de este documento un tratamiento puramente conceptual, sin entrar en el detalle de su configuración interna.

ESCENARIOS Y DIAGRAMAS DE FALLO ASOCIADOS

Según puede verse en H1, únicamente se han considerado dos tipos de eventos: pérdidas de estanqueidad (E) y fallos de sistemas necesarios para reaccionar en emergencia por vía de agua (F).

En relación con las pérdidas de estanqueidad, pueden dar lugar a situaciones con un nivel de severidad muy variado según sean las circunstancias en que se produzcan. En esta parte del documento se va a utilizar un enfoque simplificado en el que únicamente se contemplarán los dos escenarios que aparecen a continuación:

- **Escenario 1**: Se supone que cualquier cadena de eventos que conduzca a una vía de agua NO CERRABLE permitirá alcanzar la superficie siempre que los medios dispuestos al efecto presenten un nivel de operatividad adecuado.
- **Escenario 2**: Se supone que cualquier cadena de eventos que conduzca a una vía de agua NO CERRABLE conducirá a una situación catastrófica que dará lugar a la pérdida del buque siempre.

Los diagramas de fallo asociados a los dos escenarios arriba definidos se presentan en las figuras 3.1 y 3.2 respectivamente.

En relación al contenido de este punto, hay varios aspectos sobre los que conviene llamar la atención del lector:

- La estructura de los diagramas de fallo que aparecen en las figuras 3.1 y 3.2 responde a la experiencia acumulada por el autor en diseño de submarinos, coincidiendo básicamente con la práctica habitual en la industria naval española.

- Los niveles de severidad considerados se han reducido a dos, según sea la magnitud de la vía de agua originada.
- En el escenario nº2 aparece una situación específica (Aumento de peso no corregible) para tener en cuenta que en este caso una vía de agua, aun siendo CERRABLE, exigirá el uso de los sistemas de soplado de tanques de lastre, gobierno y propulsión para contrarrestar el aumento de peso originado por el agua embarcada antes de poder cerrar las correspondientes válvulas de casco.

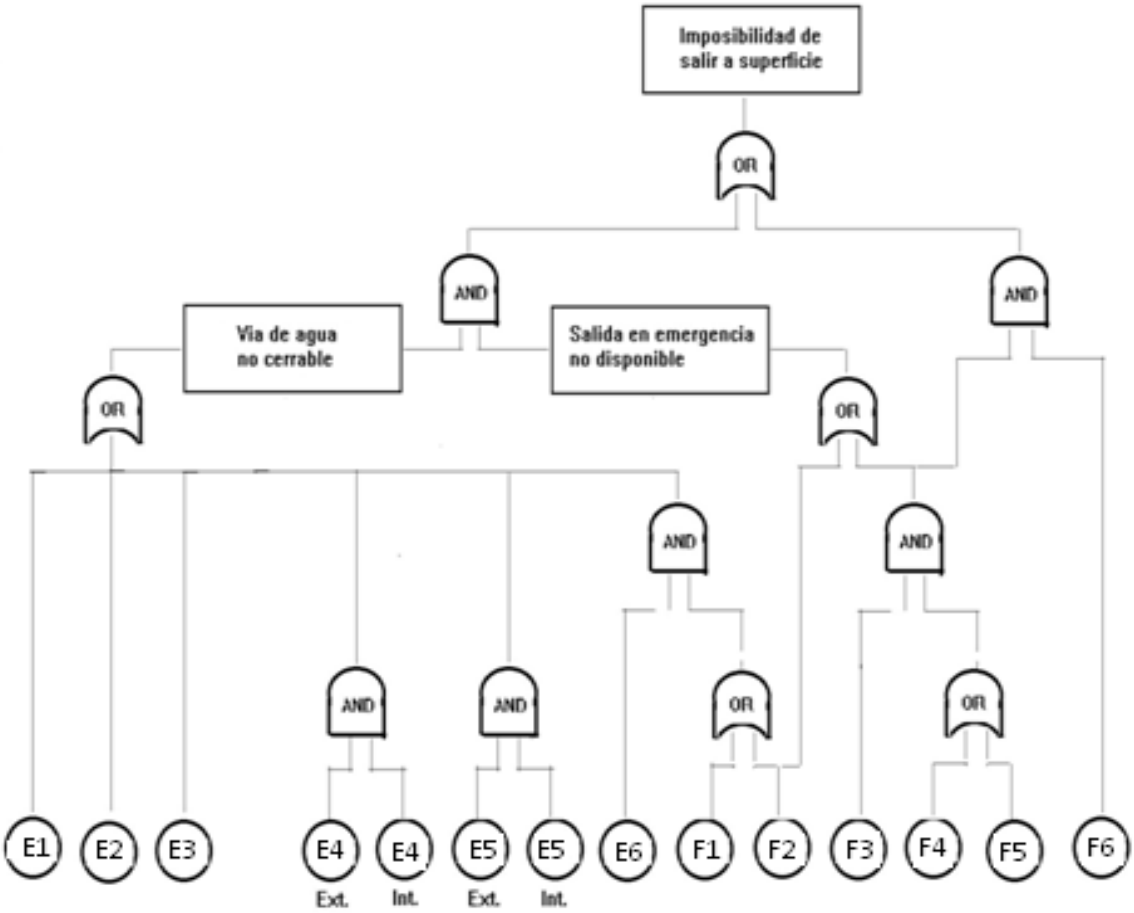


Fig. 3.1.- Diagrama de fallo asociado al escenario nº1

NIVELES DE CRITICIDAD

La ejecución de la etapa 1 a partir de los diagramas de fallo que aparecen en las figuras 3.1 y 3.2 permite establecer las dos cadenas de eventos de tamaño mínimo (CETM) siguientes:

CETM (Escenario 1) *= E1·F2 + E2·F2 + E3·F2 + E4·F2 + E5·F2 + E6·F2 + E1·F3·F4 + E2·F3·F4 + E3·F3·F4 + E4·F3·F4 + E5·F3·F4 + E1·F3·F5 + E2·F3·F5 + E3·F3·F5 + E4·F3·F5 + E5·F3·F5 + F3·F4·F6 + F3·F5·F6 + E6·F1·F3·F4 + E6·F1·F3·F5*

CETM (Escenario 2) *= E1 + E2 + E3 + E4 + E5 + E6·F1 + E6·F2 + E6·F3·F4 + E6·F3·F5 + F3·F4·F6 + F3·F5·F6*

En donde, por simplicidad, se ha hecho uso de las expresiones siguientes:

E4 *= E4Ext·E4Int*

E5 *= E5Ext·E5Int*

Una vez establecida la cadena de eventos mínima para cada uno de los dos escenarios considerados, la ejecución consecutiva de las etapas 2 y 3 permite alcanzar los resultados que aparecen en la tabla 3.1, en donde los valores asignados a cada evento en el paso 1 de la última etapa aparecen remarcados en negrita y sombreados en color gris claro (Obsérvese que para el evento F6 los valores asignados son independientes del escenario considerado).

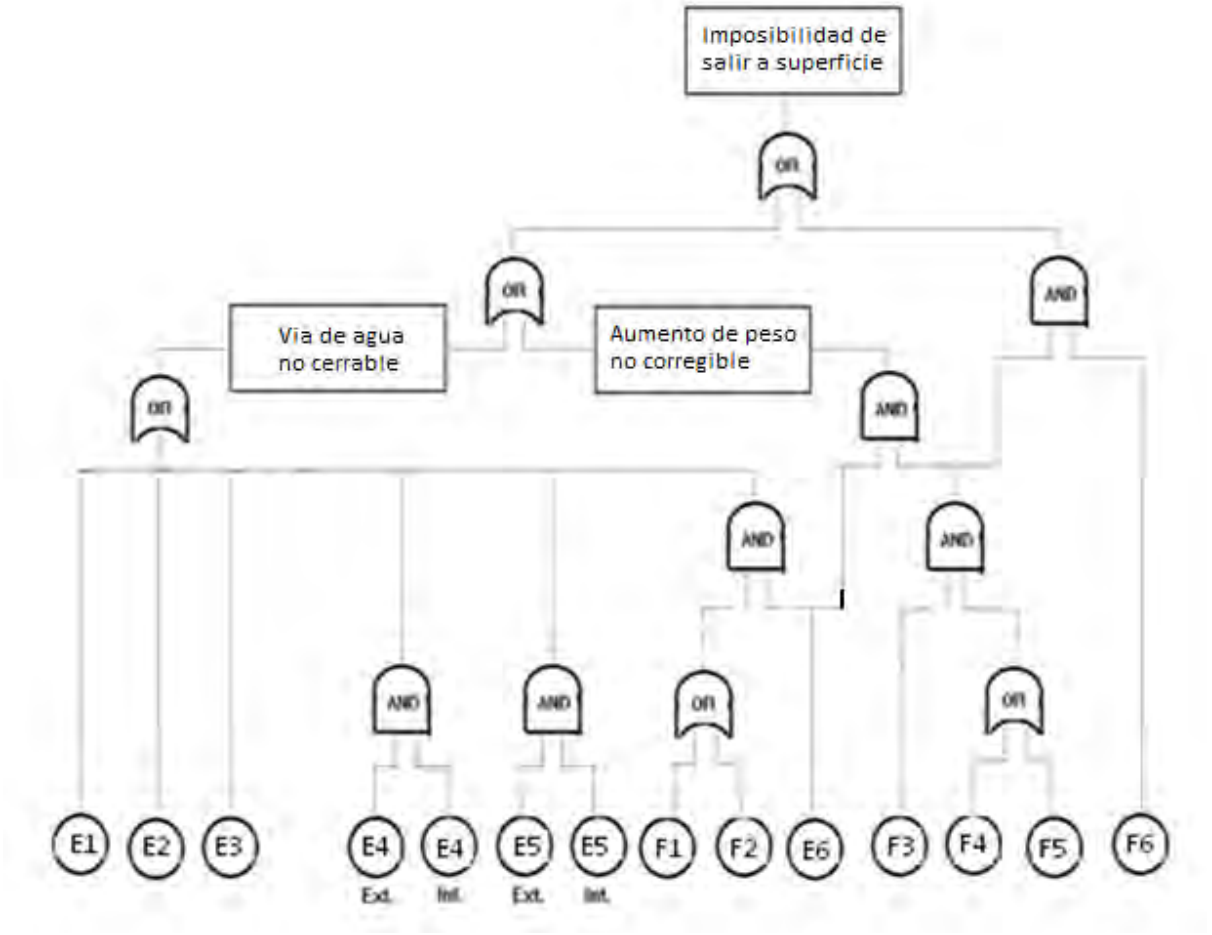


Fig. 3.2.- Diagrama de fallo asociado al escenario nº2

De la información contenida en la última columna de la tabla 3.1 se derivan 7 niveles de criticidad (NC) distintos, a saber:

- Los eventos más críticos han resultado ser los relativos a la pérdida de estanqueidad del casco resistente, elementos de cierre de aberturas practicadas al mismo y válvulas de casco (E1, E2 y E3)
- En segundo lugar aparece el fallo del sistema de alarma (F2)
- El siguiente evento en criticidad es la pérdida de estanqueidad de circuitos penetrantes al casco dotados de una sola barrera (E6)

- A continuación aparece la pérdida de estanqueidad de mástiles, ejes huecos y circuitos penetrantes al casco dotados de dos barreras (E4 y E5) compartiendo el mismo nivel de criticidad que el fallo de la maniobra en emergencia de las válvulas de casco (F1)
- En quinto lugar aparece el fallo del sistema de soplado en emergencia de los tanques de lastre (F3)
- El sexto lugar corresponde al fallo de los sistemas de gobierno y propulsión (F4 y F5)
- Finalmente en último lugar aparece el fallo del sistema de achique (F6)

Tabla 3.1.- Factores de valoración (FV1 y FV2) y nivel de criticidad (NC) asociado a los diferentes eventos de inicio

		Escenario 1		Escenario 2		NC
		FV1	FV2	FV1	FV2	
E1		1/2	3	**1**	**1**	1
E2		1/2	3	**1**	**1**	1
E3		1/2	3	**1**	**1**	1
E4Ext		1/3	3	**1/2**	**1**	1/4
E4Int		1/3	3	**1/2**	**1**	1/4
E5Ext		1/3	3	**1/2**	**1**	1/4
E5Int		1/3	3	**1/2**	**1**	1/4
E6		1/2	3	**1/2**	**4**	1/3
F1		1/4	2	**1/2**	**1**	1/4
F2		**1/2**	**6**	1/2	1	1/2
F3		**1/3**	**14**	1/3	4	1/5
F4		**1/3**	**7**	1/3	2	1/6
F5		**1/3**	**7**	1/3	2	1/6
F6		**1/3**	**2**	**1/3**	**2**	1/7

Es interesante observar que, a excepción del casco resistente y elementos directamente relacionados con la estanqueidad del mismo, el sistema de alarma ha resultado ser el más crítico, por encima de elementos tan relevantes como puedan ser las conducciones penetrantes al casco, el cierre en emergencia de válvulas de casco y el soplado de tanques de lastre.

3.3.- Elementos primarios y secundarios

En base a los NC indicados en la tabla 3.1 sería posible definir una política racional de asignación de recursos a la obtención de cada uno de los requisitos técnicos objeto de la etapa 5 (ver punto 2.2) así como el alcance que deben tener las exigencias contenidas en dichos requisitos técnicos en relación con los sistemas/elementos indicados en la hipótesis H1.

En este sentido, y según la experiencia del autor, resulta aconsejable en aras de la simplicidad refundir los NC obtenidos en un máximo de dos, o a lo sumo, tres. Así, en el ejemplo de aplicación aquí presentado, el proceso de refundido podría dar lugar a los dos niveles siguientes: los elementos PRIMARIOS coincidirían con los que tienen asignado un NC igual a 1(ver tabla 3.1) mientras que los SECUNDARIOS serían todos los demás.

Si se analiza con detenimiento esta elección a la luz del significado físico que tienen los dos FV usados (definidos en el punto 3.1) se verá que presenta una naturaleza especialmente interesante en relación con la seguridad de plataformas submarinas, pudiendo reescribirse de un modo alternativo tal y como sigue:

- **PRIMARIOS**: Todos aquellos elementos para los que exista al menos un escenario en el que un solo fallo de los mismos conlleve la pérdida del buque.
- **SECUNDARIOS**: Todos aquellos elementos para los cuales no haya sido posible identificar ningún escenario en el que un solo fallo de los mismos conlleve la pérdida del buque.

4.- Referenciasbibliográficas

1 **US Navy**, 2000, Submarine safety (SUBSAFE) requirements manual, NAVSEA 0924-062-0010 (Rev. C)

2 **Andrews J.**, 2012, Introduction to fault tree analysis, 2012 AR&MS Tutorial Notes

3 **Warleta J.**, 1973, Fiabilidad. Bases teóricas y prácticas, INTA

4 **US Navy**, 2011, Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment, NSWC-CD

5 **IMO**, 2007, Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process, MSC 83/INF.2 (ANNEX)

6 **U.S. Department of Defense**, 2012, Standard practice. System Safety, MIL-STD-882E

7 **IMCA**, 2002, Guidance on failure modes and effects analyses (FMEA), IMCA M 166

Pilotos automáticos para buques de superficie: el modelo de Nomoto

TN (CIA-EOF) Juan Manuel de Santiago Collada
DIMAN

La maniobrabilidad se encuentra entre las áreas técnicas que aumentan la complejidad del diseño del buque, precisando que los esfuerzos del proyectista pasen por establecer procedimientos y criterios tal que el buque sea capaz de operar eficazmente y con seguridad en diferentes condiciones operativas.

Los modelos matemáticos intervinientes en la definición del comportamiento del buque derivan de la aplicación de la Segunda Ley de Newton a cuerpos rígidos, donde las ecuaciones diferenciales lineales tienen un alcance de actuación limitada. Los simuladores avanzados de maniobra emplean modelos generalmente no lineales, como los de Abkowitz, Norrbin o Blake, revelándose como eficientes herramientas en el desarrollo y evaluación de proyectos, además de permitir el adiestramiento de las dotaciones a un coste económico y recurso humano muy inferiores del que acarrearía realizarlo en la mar. No obstante, el empleo de la regulación en el diseño de sistemas de control de gobierno de un buque permite el uso de modelos dinámicos lineales. De este modo, tanto el planteamiento del problema como su solución disminuyen en complicación. Mientras en contrapartida será preciso renunciar en exactitud. La validez del modelo escogido quedará de manifiesto en tanto reproduzca de forma suficientemente fiel las características de los movimientos reales del buque. Kallstrom introdujo una variante del modelo lineal de Nomoto, en el que se le adiciona no linealidades para aumentar su intervalo de validez.

Presentaremos y justificaremos el modelo de Nomoto, mediante el desarrollo del marco teórico de los movimientos del buque de superficie en la mar, para así asentar las bases de una mejor comprensión del funcionamiento y provecho de los pilotos automáticos clásicos y de los simuladores de maniobra.

Movimiento del buque en superficie

Dinámicamente un buque se puede entender como un sólido rígido sobre el que actúan gran cantidad de fuerzas debidas a olas, vientos, corrientes, propulsión, timón, etc., con grandes acoplamientos entre ellos, que generalmente varían con el tiempo, originando movimientos en los seis posibles grados de libertad.

Para el estudio de dichos movimientos se supone el buque en tres ejes que pasan por su centro de gravedad sobre el que actúan las fuerzas. Es precisamente esta la primera simplificación a la que recurrimos. Sin embargo, para buques de formas ordinarias y ángulos moderados, se puede considerar sin gran error, que los movimientos ocurren alrededor del centro de gravedad.

Los ejes fijos que pasan por el centro de gravedad del buque serían:

- Eje longitudinal (dirección proa-popa)
- Eje transversal (dirección babor-estribor)
- Eje vertical (dirección quilla-cubierta)

El buque, en principio, va a poder girar y trasladarse según cada uno de estos ejes, con lo que en total tendremos los seis movimientos correspondientes a un cuerpo que se mueve en el espacio.

La denominación de cada uno de estos movimientos, es la siguiente:

Traslaciones:

- Deriva longitudinal (paralela al eje longitudinal del buque): «avance/surge».
- Deriva transversal (paralela al eje- transversal):«abatimiento/sway»
- Ascenso y descenso vertical (paralela al eje vertical): «alteada, arfada/heave»

Rotaciones:

- Rotación respecto al eje longitudinal del buque: «balance/roll»
- Rotación respecto al eje transversal del buque: «cabezada/pitch»
- Rotación respecto al eje vertical del buque: «guiñada/yaw»

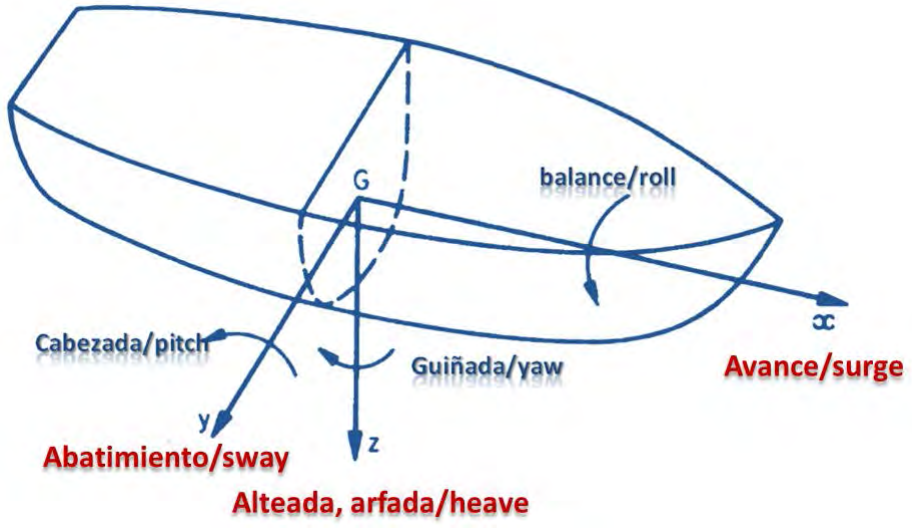


Figura 1. Movimientos del buque (6-DOF)

Modelo Matemático

Las ecuaciones básicas del movimiento en el plano horizontal pueden ser expresadas con respecto a un sistema fijo en el cuerpo y las trayectorias pueden ser referidas a un sistema inercial. La Figura 1 muestra el sistema de referencia fijo en el buque.

Como segunda simplificación adoptada para la resolución del problema, y motivado porque el objeto del estudio de este trabajo se limita al buque en superficie, de los 6 grados de libertad posibles, se van a despreciar 3, considerando únicamente los movimientos de *avance, deriva* y *guiñada* (Tabla 1).

Conviene aclarar que el concepto de guiñada, en el contexto del lenguaje marino, es más bien un movimiento brusco de vaivén sobre el eje vertical, frecuente cuando hay mala mar y el barco se halle en la cresta de una ola. Sin embargo será corriente encontrar como equivalente semántica a cualquier movimiento con tal de que sea de rotación sobre el eje vertical. Del mismo modo ocurrirá con las palabras deriva y abatimiento, que aunque de orígenes diferentes, se referirán ambas a movimientos transversales.

El rumbo del buque es definido por la trayectoria de su centro de gravedad G respecto al eje χ. El ángulo de incidencia o rumbo ψ se refiere a la orientación del eje longitudinal del buque con respecto al eje longitudinal del sistema inercial χ. La suma resultante de los vectores velocidad de avance $\vec{u}$ y velocidad de abatimiento $\vec{v}$ es la velocidad efectiva del buque $\vec{U}$.

$$\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} \qquad \textbf{(1)}$$

,siendo $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$ los vectores unitarios definidos en el eje longitudinal $_x$ y transversal $_y$ respectivamente. El ángulo formado por el eje que marca la proa del buque y su rumbo efectivo será entonces el ángulo de deriva. Además, puesto que los movimientos del buque ocurren únicamente en el plano horizontal, se establece la siguiente equivalencia de la velocidad de *variación de rumbo* o *de guiñada*:

$$r \equiv \dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt} \tag{2}$$

Tabla 1. Notación de (SNAME, 1950) para vehículos marinos

Movimientos en la dirección x [avance/surge]	X	u	x
Movimientos en la dirección y [abatimieto, deriva/sway]	Y	v	y
Movimientos en la dirección z [Alteada, arfada/heave]	Z	w	z
	Momentos	**Velocidades angulares**	**Ángulos de Euler**
Rotación torno al eje x [balance, escora/roll, heel]	K	p	ϕ
Rotación torno al eje y [cabezada, asiento/pitch, trim]	M	q	θ
Rotación torno al eje z [guiñada/yaw]	N	r	ψ

Si consideramos $\vec{k}$ el vector unitario de rotación y teniendo en cuenta que $\vec{k} \times \vec{\imath} = \vec{\jmath}$ y $\vec{k} \times \vec{\jmath} = -\vec{\imath}$:

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{r} \times \vec{i} = \frac{d\Psi}{dt}\vec{k} \times \vec{i} = \frac{d\Psi}{dt}\vec{j} \tag{3}$$

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = \vec{r} \times \vec{j} = \frac{d\Psi}{dt}\vec{k} \times \vec{j} = -\frac{d\Psi}{dt}\vec{i} \tag{4}$$

Derivando (1):

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{du}{dt}\vec{i} + u\frac{d\vec{i}}{dt} + \frac{dv}{dt}\vec{j} + v\frac{d\vec{j}}{dt} = \left(\frac{du}{dt} - v\frac{d\Psi}{dt}\right)\vec{i} + \left(\frac{dv}{dt} + u\frac{d\Psi}{dt}\right)\vec{j} \tag{5}$$

Sustituyendo obtenemos la definición del sistema:

$$\left.\begin{aligned} X &= m(\dot{u} - vr) \\ Y &= m(\dot{v} + ur) \\ N &= I_{zz}\dot{r} = J\ddot{\Psi} \end{aligned}\right\} \qquad \textbf{(6)}$$

, en el cual:

- m desplazamiento del buque
- X fuerza en el eje longitudinal
- Y fuerza en el eje transversal
- N par de fuerzas generadas por el cambio de rumbo
- $J = I_{zz}$ momento de inercia respecto al eje vertical de giro (pasa por G)

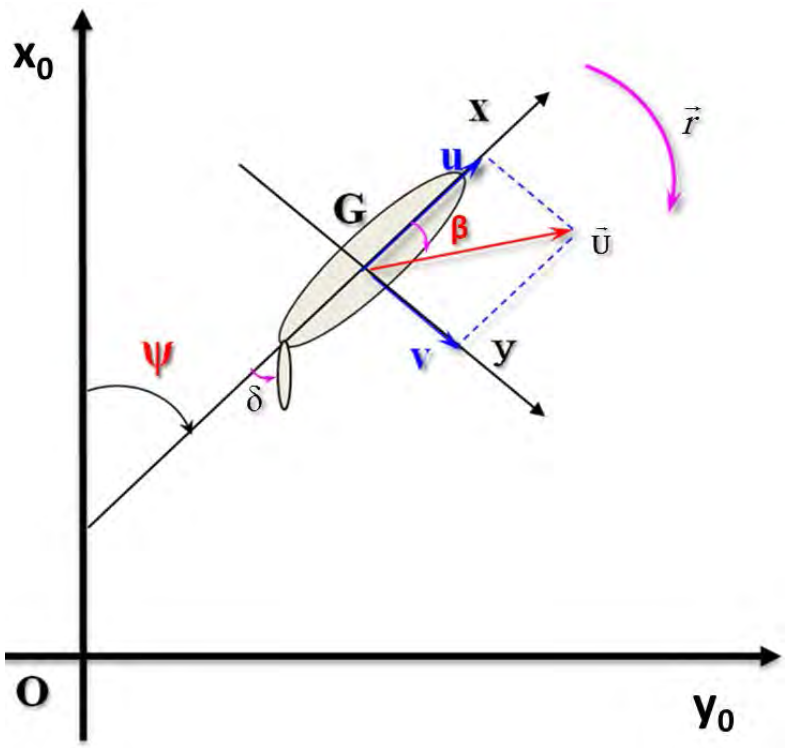


Figura 2. Movimientos del buque (3-DOF)

Este sistema de ecuaciones (6) representan los movimientos horizontales de avance, abatimiento y guiñada, respectivamente, descritos por dos de traslación acoplados entre sí y uno de rotación desacoplado. Los puntos sobre las variables anteriores denotan derivadas respecto al tiempo. En dicho sistema se ha desconsiderando el movimiento de balance (roll), cabezada (pitch) y arfada (heave), cuya influencia casi nunca es decisiva, mientras que su inclusión complicaría excesivamente su estudio.

Una tercera simplificación consiste en la linealización de las ecuaciones del sistema X, Y, N, mediante su expansión en series de Taylor a cada ecuación estimando obtener resultados con errores suficientemente despreciables truncando la serie en su primer orden. Para ello se fijan las dependencias convenidas de las fuerzas y momentos hidrodinámicos:

$$\tau_{RB} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f\left(u(t), \dot{u}(t)\right) \\ f\left(v(t), r(t), \dot{v}(t), \dot{r}(t), \delta(t)\right) \\ f\left(v(t), r(t), \dot{v}(t), \dot{r}(t), \delta(t)\right) \end{pmatrix} \quad \textbf{(7)}$$

La correspondiente expansión para daría como resultado:

$$\begin{aligned} Y &\approx Y\left(0\right) + \frac{\partial Y}{\partial v} v + \frac{\partial Y}{\partial r} \mathrm{r} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{r}} \dot{\mathrm{r}} + \frac{\partial Y}{\partial \delta} \delta = \\ &= \mathrm{Y}_0 + Y_v \cdot v + Y_r \cdot r + Y_{\dot{v}} \cdot \dot{v} + Y_{\dot{r}} \cdot \dot{r} + Y_\delta \cdot \delta \end{aligned} \quad \textbf{(8)}$$

, y así, linealizando las variables de (7) en torno a $v = r = \delta = 0$ queda:

$$\left.\begin{aligned} X &= X_u \cdot u + X_{\dot{u}} \cdot \dot{u} \\ Y &= Y_v \cdot v + Y_{\dot{v}} \cdot \dot{v} + Y_r \cdot r + Y_{\dot{r}} \cdot \dot{r} + Y_\delta \cdot \delta \\ N &= N_v \cdot v + N_{\dot{v}} \cdot \dot{v} + N_r \cdot r + N_{\dot{r}} \cdot \dot{r} + N_\delta \cdot \delta \end{aligned}\right\} \quad \textbf{(9)}$$

La identificación de las derivadas o coeficientes hidrodinámicos se efectúan mediante simulación por ordenador o con ensayos en canales como el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, de titularidad del Ministerio de Defensa. Un notabilísimo avance en la facilitación de la obtención de valores muy aproximados, sin recurrir a infraestructuras, es debido al Capitán de Corbeta Jesús Ibarz, el cual presenta un método analítico denominado potencial-viscoso, basado en el conocimiento de la geometría del cuerpo en inmersión (Ibarz Fernández, 2003). Los resultados han sido corroborados por la experiencia, habiéndose aplicado exitosamente a un catamarán submarino en activo.

Persiguiendo facilitar la resolución del sistema asumiremos la cuarta simplificación consistente en tomar la velocidad transversal como despreciable y la velocidad longitudinal invariable $\mathrm{u} \approx \mathrm{U}$.

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u \quad \textbf{(10)}$$

Por la primera ecuación de (11) se deduce tanto su desacople del resto del sistema, como la inexistencia de fuerzas externas que perturbe la imposición $u = U$:

$$\left.\begin{aligned} X &= m\dot{u} = 0 \\ Y &= m\dot{v} + m\,\mathrm{U}\mathrm{r} \\ N &= I_{zz}\dot{r} = J\ddot{\Psi} \end{aligned}\right\} \quad \textbf{(11)}$$

Operando (9) (9) y (11) quedan 3 ecuaciones. La primera se correspondería con la solución del subsistema de velocidad longitudinal que imprime al buque un movimiento de velocidad constante, mientras

que las dos últimas, conformando el subsistema de gobierno (acción del timón δ), concernirán al movimiento lateral y de guiñada, respectivamente:

$$\left.\begin{aligned} u &= U \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} &= Y_v \cdot v + (Y_r - m\,\mathrm{U})r + Y_{\dot{r}} \cdot \dot{r} + Y_\delta \cdot \delta \\ (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} &= N_v \cdot v + N_{\dot{v}} \cdot \dot{v} + N_r \cdot r + N_\delta \cdot \delta \end{aligned}\right\} \qquad \textbf{(12)}$$

Del sistema (12), los coeficientes hidrodinámicos $-X_{\dot{u}}$ y $-Y_{\dot{v}}$ representan masas añadidas virtuales, y $-N$ el momento de inercia añadido virtual, entendidos como el efecto surgido del desplazamiento de las masas de agua en el avance del buque, y X_u , Y_v … los coeficientes lineales de amortiguamiento. Es posible expresar el subsistema de gobierno más conveniente en forma matricial, donde la Mes la matriz de inercias del buque, N la matriz de amortiguaciones y B las fuerzas hidrodinámicas generadas por la acción de la metida del timón:

$$\begin{gathered} \begin{pmatrix} m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -Y_v & m\,\mathrm{U} - Y_r \\ -N_v & -N_r \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{pmatrix}\delta \\ M\dot{\upsilon} + N\upsilon = b\delta \end{gathered} \qquad \textbf{(13)}$$

Resulta habitual encontrar la representación de los sistemas en el espacio de estados. Así, la siguiente expresión (14) que recuperaremos más adelante es equivalente al subsistema de gobierno que nos ocupa (13), el cual deriva de las transformaciones $A = -M^{-1}N$ y $B = M^{-1}b$:

$$\dot{\upsilon} = A\upsilon + B\delta \qquad \textbf{(14)}$$

Sistemas de control automático

Aunque en este campo se han acometido progresos espectaculares, la resolución primitiva del problema del gobierno automático del rumbo de un buque en superficie se aborda desde las técnicas de control clásico. Dicho enfoque, con sus peculiaridades, es idéntico al que podría hacerse en otro tipo de sistemas de lo más dispares, como la dirección de tiro de un montaje de artillería, el túnel de lavado de una gasolinera, el sistema de llenado de una cisterna de un cuarto de baño, o el termostato de una estufa eléctrica. Tanto es así, que cabe la posibilidad de que las mismas ecuaciones rijan el comportamiento de muy diferentes procesos físicos. Dependiendo de si existe una variable realimentada o no se puede desglosar en dos grandes familias:

- **Sistemas en bucle/lazo abierto:**

La señal de entrada interviene directamente sobre el actuador del sistema. Su inconveniente principal radica en que no responde frente a perturbaciones. Un ejemplo clarificador sería la estufa eléctrica mencionada. La señal de entrada sería el accionamiento del interruptor, el cual cierra el circuito eléctrico, y dando como salida un elemento radiante a una temperatura. Una perturbación como el aumento indeseado de la tensión en la resistencia, no es controlada, y podría causar daños al mismo sistema o a su entorno (un incendio por ejemplo). Además, el sistema no tiene en cuenta haber alcanzado la temperatura deseada, funcionando ininterrumpidamente. Estos sistemas son poco eficientes por lo general.

- **Sistemas en bucle/lazo cerrado:**

En estos sistemas la señal de entrada es comparada con la variable realimentada, generando una señal de error, es decir, la diferencia entre el valor actual de la variable a controlar, y el deseado. Como principal ventaja de los sistemas en bucle cerrado, cabría destacar que permite rechazar cualquier perturbación que haga que la variable se separe del valor deseado o consigna. Un sistema de control realimentado es esencial para mantener precisión de la variable controlada.

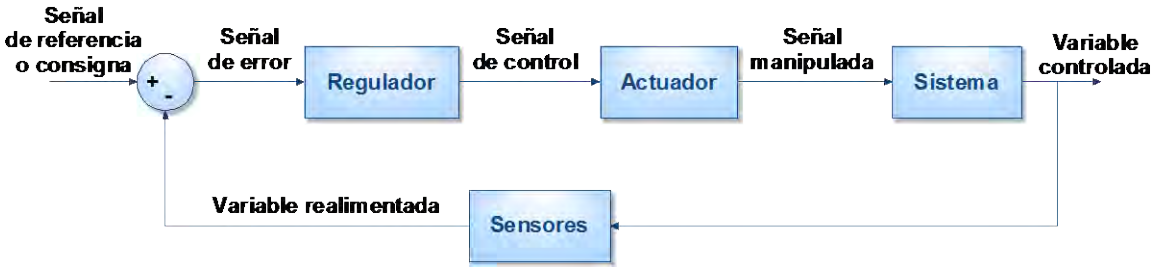


Figura 3. Sistema en bucle cerrado

En la Figura 3 queda reflejado el flujo y las etapas intervinientes en los sistemas en bucle cerrado. La complejidad de esta clase de sistemas es muy dispar, pudiendo citarse en el caso más sencillo el del sistema de llenado de la cisterna del cuarto de baño, hasta el otro extremo, como el sistema de gobierno de un submarino en inmersión, pasando por un caso particular de éste: el control de rumbo de un buque de superficie.

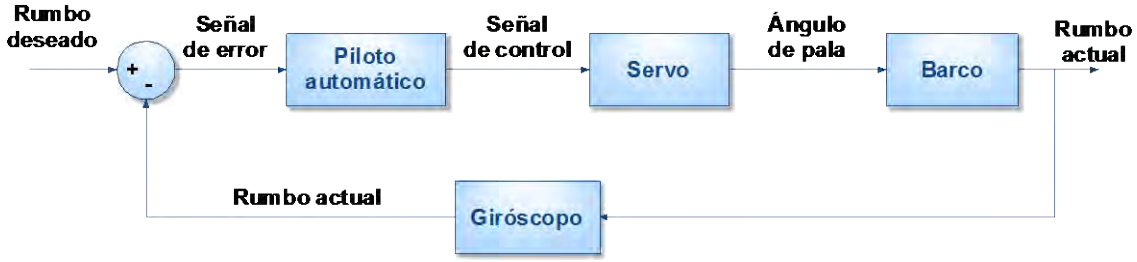


Figura 4. Sistema clásico de control de rumbo de un buque de superficie

Descripción del sistema

El procedimiento empleado para describir un sistema que modele el comportamiento de un buque en superficie, bajo la acción del timón, es la llamada función de transferencia. Su conocimiento nos permitirá obtener la información necesaria para determinar la controlabilidad del sistema. Aquello será especialmente útil en el diseño de sus reguladores. En el caso del buque, el responsable de dicha regulación será el piloto automático.

De la necesidad de modelar matemáticamente el comportamiento del buque, ha surgido la elaboración de diversos modelos. Comúnmente, y en tanto aspiran a ser comprensivas del mayor número de grados de libertad posibles, presentan formulaciones extensas, farragosas y difícilmente manejables. En nuestro caso vamos a desconsiderar todos los posibles movimientos, dejando únicamente los propios de un buque navegando en superficie ya citadas y en aguas tranquilas (sin perturbaciones externas).

De entre todos, el de Nomoto es el modelo más aceptado por combinar sencillez y aproximación admisibles. Únicamente contiene una variable de entrada y otra de salida, ó single-input and single-output (SISO):

- δ ángulo de metida de timón (variable de entrada)
- ψ caída de rumbo del buque (variable de salida)

Figura 5. Variables de entrada y salida en el modelo de Nomoto

El sistema, que quedará explicado y justificado más adelante, viene definido por una ecuación diferencial de segundo orden:

$$K_T \delta(t) = J \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} + K_F \frac{d\Psi}{dt} \qquad \textbf{(15)}$$

, en la que:

- K_T constante que representa la resistencia que presenta el timón al caer de rumbo, dependiente principalmente del área de la pala.
- $K_T \delta(t)$ par que se aplica al buque al meter caña.
- K_F constante relacionada con la resistencia que presenta el buque al cambio de rumbo, con efecto amortiguador.

Nos encontramos ante un sistema físico lineal continuo, excitado por acciones hidrodinámicas generadas por el efecto de metida del timón. Así, resulta muy útil para su tratamiento emplear la metodología de transformación de Laplace. De esta manera obtenemos un modelo algebraico, cuya formulación permite una más fácil identificación de las características del sistema, y que siendo de por sí mucho más manejable, logra la sustitución de la diferenciación por la multiplicación de la variable transformada s y la integración por su división, siempre que las condiciones iniciales sean nulas. Esta razón explica que al factor $1/s$ se le denomine «integrador». Puesto que de entre las propiedades de las transformadas de Laplace encontramos que para condiciones iniciales nulas:

$$r(s) \equiv \dot{\Psi}(s) = s\Psi(s) \qquad \textbf{(16)}$$

$$\dot{r}(s) \equiv \ddot{\Psi}(s) = s^2\Psi(s) \qquad \textbf{(17)}$$

, procedemos a la transformación de (15):

$$\mathcal{L}\{J\ddot{\Psi}(t) + K_F\dot{\Psi}(t)\} = \mathcal{L}\{K_T\delta(t)\}$$
$$(Js^2 + K_F s)\Psi(s) = K_T\delta(s)$$

, para finalmente obtener la función de transferencia del sistema:

$$G(s) = \frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K_T}{Js^2 + K_F s} \qquad \textbf{(18)}$$

A partir de (18) se puede transformar según conveniencia:

- Como sistema de primer orden con integrador:

$$G(s) = \frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K_T}{s\left(Js + K_F\right)} \qquad \textbf{(19)}$$

- Estableciendo una ganancia relacionada con la constante de tiempo:

$$G(s) = \frac{K_T}{s\left(Js + K_F\right)}\frac{J}{J} = \frac{K_T/J}{s\left(s + K_F/J\right)} = \frac{A}{s\left(s + a\right)} \qquad \textbf{(20)}$$

$$\frac{K_T}{J} = A \qquad \frac{K_F}{j} = a$$

- En forma canónica:

$$G(s) = \frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K_T/K_F}{s\left(\frac{Js}{K_F} + 1\right)} = \frac{K}{s(Ts+1)} \qquad \textbf{(21)}$$

$$\frac{K_T}{K_F} = K \qquad \frac{J}{K_F} = T$$

De (21) se puede identificar K como ganancia del sistema y T como constante de tiempo. Ante cualquier ángulo de timón puede resolverse la ecuación (19). No obstante podrá ser que en otras ocasiones resulte más conveniente realizar alguna otra de las transformaciones expuestas. Iniciando el tránsito de (21) se arriba al modelo de Nomoto de primer orden, en cualquiera de las dos expresiones equivalentes (22) y (23). El orden queda determinado por la relación de $r(s)$ con $\delta(s)$. Refiriéndonos a $\Psi(s)$, el orden aumenta en 1.

$$T\ddot{\Psi} + \dot{\Psi} = K\delta \qquad \textbf{(22)}$$

$$T\dot{r} + r = K\delta \tag{23}$$

Hemos abordado, hasta ahora, el problema del movimiento del buque, partiendo de una ecuación diferencial en el dominio del tiempo (t) (15) y su equivalente transformado al dominio de Laplace (s) (21), en la suposición de su validez. Disponemos de los elementos necesarios para su resolución partiendo de su modelo de estado (14) . Con $\dot{\upsilon} = A\upsilon + B\delta$ y A y B:

$$\begin{aligned}
A &= -M^{-1}N = -\begin{pmatrix} m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -Y_v & mU - Y_r \\ -N_v & -N_r \end{pmatrix} == \\
&= \frac{1}{|M|}\begin{pmatrix} I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} -Y_v & mU - Y_r \\ -N_v & -N_r \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{(m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_{\dot{r}})}\begin{pmatrix} -(I_{zz} - N_{\dot{r}})Y_v & (I_{zz} - N_{\dot{r}})(mU - Y_r) \\ -(m - Y_{\dot{v}})N_v & -(m - Y_{\dot{v}})N_r \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B &= M^{-1}b = \begin{pmatrix} m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{pmatrix} = \\
&= \frac{1}{|M|}\begin{pmatrix} I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{pmatrix} = \frac{1}{(m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_{\dot{r}})}\begin{pmatrix} (I_{zz} - N_{\dot{r}})Y_\delta \\ (m - Y_{\dot{v}})N_\delta \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{24}$$

Empleando las propiedades expuestas despejamos $\upsilon(s)$, que alberga el movimiento transversal y de rotación en el plano horizontal del buque:

$$\begin{aligned}
s\upsilon(s) &= A\upsilon(s) + B\delta(s) \\
(sI - A)\upsilon(s) &= B\delta(s) \\
\upsilon(s) &= (sI - A)^{-1}B\delta(s)
\end{aligned} \tag{25}$$

Sustituyendo y simplificando, llegamos a la solución del sistema:

$$\upsilon(s)=\begin{pmatrix} v(s) \\ r(s) \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} s-a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & s-a_{22} \end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{pmatrix}\delta(s)=$$

$$=\frac{\begin{pmatrix} s-a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & s-a_{11} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{pmatrix}\delta(s)}{(s-a_{11})(s-a_{22})-(a_{12}a_{21})}=\frac{\begin{pmatrix} (s-a_{22})b_{11}+a_{12}b_{21} \\ a_{21}b_{11}+(s-a_{11})b_{21} \end{pmatrix}\delta(s)}{s^2+(-a_{11}-a_{22})s+(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})}= \quad \textbf{(26)}$$

$$=\frac{\begin{pmatrix} b_{11}s+a_{12}b_{21}-a_{22}b_{11} \\ b_{21}s+a_{21}b_{11}-a_{11}b_{21} \end{pmatrix}\delta(s)}{s^2+(-a_{11}-a_{22})s+(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})}=\frac{\begin{pmatrix} c_1s+c_2 \\ b_1s+b_2 \end{pmatrix}\delta(s)}{s^2+a_1s+a_2}$$

Recordando que para nuestro sistema $r \equiv \dot{\Psi}$ por describir movimientos restringidos al plano horizontal, de (26), en demanda de la forma canónica similar a (21) se extrae su función de transferencia, llamada modelo de Nomoto de segundo orden:

$$\frac{\dot{\Psi}(s)}{\delta(s)}=\frac{s\Psi(s)}{\delta(s)}=\frac{b_1s+b_2}{s^2+a_1s+a_2}=\frac{K(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)}$$

$$\frac{\Psi(s)}{\delta(s)}=\frac{K(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad \textbf{(27)}$$

, o expresado en el dominio del tiempo, operando de (27):

$$T_1T_2\dddot{\Psi}+(T_1+T_2)\ddot{\Psi}+\dot{\Psi}=K\left(\delta+T_3\dot{\delta}\right) \quad \textbf{(28)}$$

Análogamente a lo realizado con $r\,(s)$ (26) se emplea para obtener el movimiento transversal $v\,(s)$ de respuesta del sistema a una excitación $\delta\,(s)$. En la práctica, una metida de timón de más de 25º no tiene efectos adicionales en la excitación, no siendo en nada beneficioso. De hecho es frecuente encontrar en los pilotos automáticos un limitador de metida de caña. Igualmente práctica es la consideración de que el cero $(1+T_3s)$ y el polo $(1+T_2s)$ se cancelan mutuamente puesto que las pruebas de mar conducen a que $T_2 \cong T_3$, y sus valores son además mucho menos significativos que los de T_1, de manera que (27) puede reducirse de orden tomando la aproximación propuesta $T = T_1 + (T_2 - T_3)$, coincidiendo con la expresión (31), que habíamos presentado en (21) sin haber entonces demostrado su origen.

$$\frac{\Psi(s)}{\delta(s)}=\frac{K}{s(1+Ts)} \quad \textbf{(29)}$$

Análisis temporal del sistema

Para la realización del análisis temporal del sistema, usaremos la función de transferencia mostrada en (19), pasando el integrador al otro miembro:

$$s\frac{\Psi(s)}{\delta(s)}=\frac{K_T}{Js+K_F} \quad \textbf{(30)}$$

, quedando como variable de salida y de entrada la velocidad de variación de rumbo y el ángulo de metida, respectivamente:

$$\frac{\dot{\Psi}(s)}{\delta(s)} = \frac{K_T}{Js + K_F} \tag{31}$$

Además de la mayor simplicidad del tratamiento desde el punto de vista matemático en los sistemas de primer orden, la consideración del rumbo como variable de salida, implica la presencia de un «integrador» en la función de transferencia, lo cual contribuye a la inestabilidad del sistema, al aparecer un polo en la frontera del semieje negativo. Al contrario, los sistemas de primer orden son siempre estables, pues cumplen la condición de poseer una única raíz $s = -K_F / J$ real y negativa en el denominador (polo). Si tomamos (19) y dividimos numerador y denominador por J :

$$\frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{\frac{K_T}{J}}{s\left(s + \frac{K_F}{J}\right)} = \frac{K_1}{s} + \frac{K_2}{s + \frac{K_F}{J}} \Rightarrow K_1\left(s + \frac{K_F}{J}\right) + sK_2 = \frac{K_T}{J} \tag{32}$$

, y anulamos cada término podemos obtener el valor de las constantes:

$$\begin{aligned} K_1\left(\frac{K_F}{J}\right) = \frac{K_T}{J} &\Rightarrow K_1 = \frac{K_T}{K_F} \\ -\frac{K_F}{J}K_2 = \frac{K_T}{J} &\Rightarrow K_2 = -\frac{K_T}{K_F} \end{aligned} \tag{33}$$

, llegamos a:

$$\frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{\frac{K_T}{K_F}}{s} + \frac{-\frac{K_T}{K_F}}{s + \frac{K_F}{J}} = \frac{K_T}{K_F}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{K_F}{J}}\right) \tag{34}$$

La ecuación obtenida en (34) es una función de transferencia en el dominio de variable compleja s . Podemos llegar a su equivalente en el dominio temporal mediante el empleo de la transformada inversa de Laplace $\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\}$. Haremos uso de las siguientes propiedades de las transformadas de Laplace:

$$\mathcal{L}\{k\, f(t)\} = k\, F(s) \tag{35}$$

$$\mathcal{L}\{f_1(t) \pm f_2(t)\} = F_1(s) \pm F_2(s) \tag{36}$$

$$\mathcal{L}\{e^{-at}\} = \frac{1}{s + a} \tag{37}$$

$$\mathcal{L}\{u(t)\} = \frac{1}{s} \tag{38}$$

Si tomamos la variable de entrada como un escalón unitario (metida de caña) obtenemos la variable de respuesta en el dominio del tiempo; la velocidad de caída:

$$\dot{\Psi}(t) = \frac{K_T}{K_F}\left(1 - e^{-\frac{K_F}{J}t}\right) = K\delta_0\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \tag{39}$$

La ecuación (39) es una función exponencial en la que:

- $K\delta_0 = K_T / K_F$ ganancia del sistema
- $T = J / K_F$ constante de tiempo

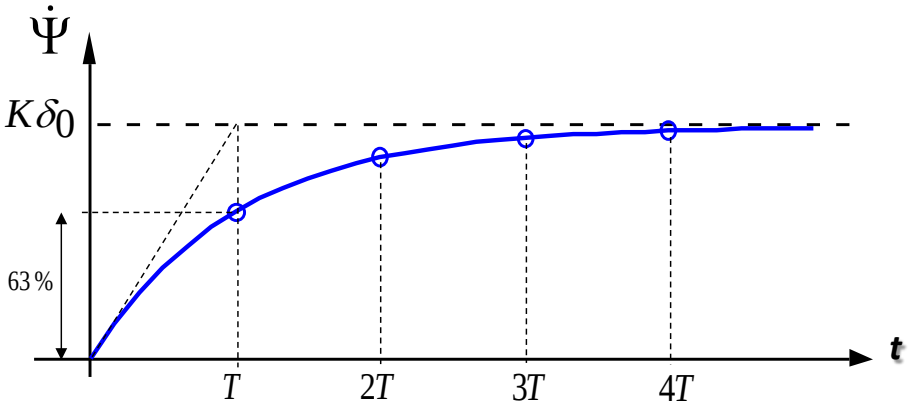


Figura 5. Variación temporal de la velocidad de caída

El significado físico de (39) plasmado en la Figura 6, correspondiente a una ecuación diferencial de primer orden, puede entenderse como la respuesta temporal ante la metida de timón un ángulo dado a una banda, partiendo de una situación de equilibrio (caña a la vía). El buque comenzará a caer, con una velocidad angular ψ hasta alcanzar un valor estacionario asintótico $\psi = K\delta_0$, proporcional al ángulo de metida δ_0 de la pala. Al mismo resultado, y más sencillamente se podría haber llegado a través de (19) aplicando el teorema del valor final.

$$f(\infty) = \lim_{s\to 0} sG(s) = \lim_{s\to 0} s\frac{K_T}{s(Js + K_F)} = \frac{K_T}{K_F} = K\delta_0$$

Se considera por convención, que el régimen permanente se posiciona en $t = 5T$ debido a que en ese momento, el error es indiscernible. A partir de entonces, y con el timón, que continúa metido a una banda (variable de entrada), trazará círculos sobre el mismo centro, indefinidamente, generando la denominada «curva de evolución». La Tabla 2 muestra los valores obtenidos de la diferencia existente entre la consigna y el tanto por uno alcanzado de dicho valor, en función del tiempo.

Tabla 2. Relación entre el error y la constante de tiempo

$$1-e^{-\frac{t}{T}} \approx \begin{cases} 0.63 & si \quad t=T \\ 0.86 & si \quad t=2T \\ 0.95 & si \quad t=3T \\ 0.98 & si \quad t=4T \end{cases}$$

En la Figura 7, por el par de ilustraciones del lado izquierdo, se pone de manifiesto que si:

- K aumenta: el barco llega antes al régimen permanente debido al elevado valor de la ganancia.
- T disminuye: provoca una respuesta rápida de la acción del timón, lo cual implica una gran capacidad de maniobrabilidad.

Por el contrario y fijándonos de nuevo en el par de ilustraciones del lado derecho de la Figura 7, es fácil comprobar que al contrario:

- K disminuye: lleva más tiempo alcanzar el régimen permanente.
- T aumenta: falta de respuesta de la acción del timón. Respuesta lenta.

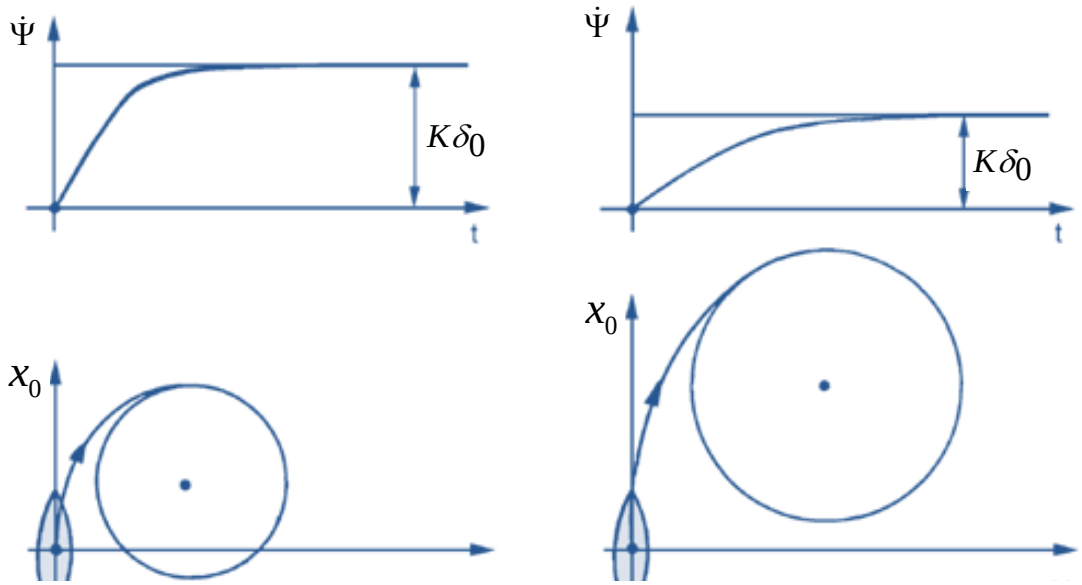


Figura 6. Efecto en la derrota según la variación de valores de constantes T y K

Tal y como se ha indicado, el primer caso es preferible al segundo, correspondiéndose con lo que suele denominarse «buque maniobrero». No siempre el valor de las constantes se va a poder controlar como fuera deseable. Así, los buques con gran capacidad de carga tienden a tener unos valores relativamente grandes de K y T.

De las pruebas de mar, la de la curva de evolución, y con el solo empleo de una unidad giroscópica es posible obtener la velocidad de guiñada del buque y de ahí, los índices correspondientes a la ganancia K, la constante de tiempo T. Siempre que quede asegurado la exactitud, precisión y tiempo de muestreo sufi-

cientes, resulta igualmente válido y más práctico emplear un GPS conectado mediante un puerto serie a un ordenador con un software de adquisición de datos.

Generalmente no va a existir una relación lineal entre el ángulo de metida del timón, la velocidad del buque y su velocidad de caída, debido a que el comportamiento del buque no es lineal y las fuerzas intervinientes generan un notable acoplamiento. Sin embargo es factible emplear una aproximación valiéndose de la adimensionalización de las variables (SNAME, 1950). Así, K y T pueden convertirse en invariantes respecto a la eslora L y la velocidad de avance U, estableciendo:

$$K' = \frac{L}{U}K \qquad T' = \frac{U}{L}T \qquad \delta' = \delta \tag{40}$$

Con este proceder, aunque en la práctica es de una validez limitada, obteniendo las constantes para una velocidad, los resultados son directamente extrapolables para cualquier otra. El modelo de Nomoto de primer orden (22) quedaría modificado:

$$\left(\frac{L}{U}\right)T'\ddot{\Psi} + \dot{\Psi} = \left(\frac{U}{L}\right)K'\delta \tag{41}$$

Representación del sistema por diagrama de bloques

Las funciones de transferencia representan modelos algebraicos representables por bloques. Resulta posible asociar gráficamente los distintos bloques (subsistemas) constituyentes, para generar modelos equivalentes. Se verifica que para bloques en serie, la ganancia $Y(s)/X\ (s) = G_1(s)G_2(s)$, mientras que para bloques en paralelo $Y(s)/X\ (s) = G_1(s) + G_2(s)$. En la Figura 8 quedan representadas respectivamente las anteriores asociaciones, que por ser visualmente esclarecedoras, resultarán especialmente útiles para un más rápido reconocimiento de los sistemas.

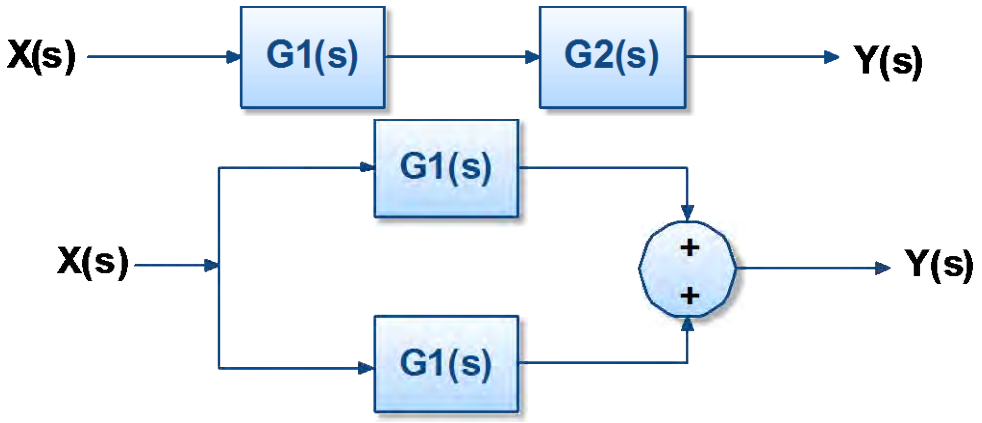


Figura 7. Bloques en serie y en paralelo

Debido a la similitud con el sistema clásico de control de rumbo de un buque de superficie, representado en la Figura 4, resulta de especial importancia la comprensión del diagrama mostrado en la Figura 9. El empleo de $R(s)$ en lugar $X(s)$ de denota que la señal de entrada lo es para un sistema en lazo cerrado. Siendo $H(s)$ la función de realimentación, en el caso que nos ocupa, se trataría del sensor de rumbo (el

giróscopo por lo general). Puesto que la entrada y la salida tiene que ser la misma (el rumbo del buque) podemos concluir que la realimentación es unitaria ($H(s) = 1$).

$$Y(s) = G(s)E(s) \tag{42}$$

$$E(s) = R(s) - H(s)Y(s) = R(s) - H(s)G(s)E(s) \tag{43}$$

$$\frac{Y(s)}{G(s)} = R(s) - H(s)Y(s) = G(s) - \frac{G(s)H(s)Y(s)}{R(s)} \Rightarrow$$
$$\frac{Y(s)}{R(s)} + \frac{G(s)H(s)Y(s)}{R(s)} = G(s) \Rightarrow \frac{Y(s)}{R(s)}\left(1 + G(s)H(s)\right) = G(s) \Rightarrow \tag{44}$$
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

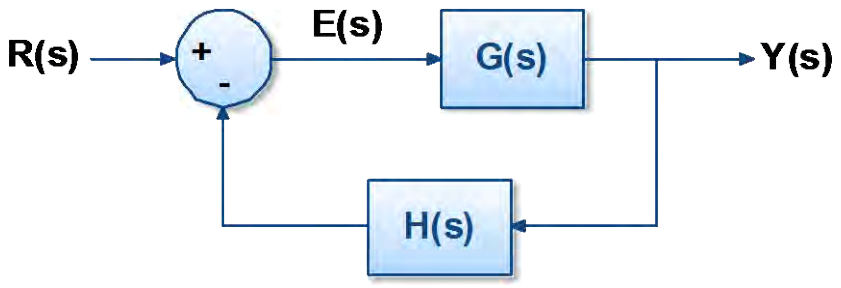


Figura 8. Diagrama de bloques de un sistema con realimentación.

En la Figura 10 se muestra el modelo que nos servirá para el estudio de la dinámica del sistema buque-piloto automático. La señal de error $E(s) = K\delta_0(\psi_d - \psi)$ resulta de la comparación entre el rumbo deseado y el rumbo actual del buque. En cuanto a la señal de error, para su más fácil tratamiento y dando por sentado que se trata de un sistema de control en tiempo continuo, se precisa que ambos sean expresados en la misma unidad y que su función sea lineal y continuo en todo su dominio ($0 \leq \psi \leq 2\pi\, rad$). $G_1(s)$ teniendo como variable de entrada $E(s)$ y como salida el ángulo de pala de timón δ , es el conjunto compuesto por el piloto automático (regulador) más el servo (actuador). Aunque convendrá la implementación de un regulador, inicialmente asumiremos que éste no va a modificar la señal de entrada ($G_1(s) = 1$). $G_2(s)$ constituye la dinámica del buque ya mencionada e ilustrada en la Figura 5. Así, obtendremos un rumbo actual ψ, al que el sistema persigue igualar a la consigna definida por el rumbo deseado Ψ_d .

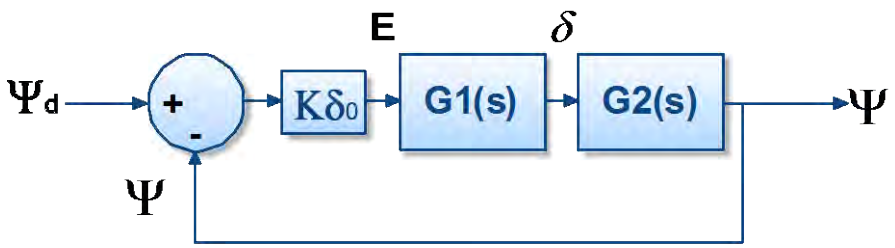


Figura 9. Diagrama de bloques del modelo del sistema barco-piloto automático

Teniendo en cuenta (30) y (39) llegamos al siguiente sistema de segundo orden, esto es, la función de transferencia tiene dos polos (su denominador es un polinomio de segundo grado):

$$\frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K\,\delta_0}{s(Ts+1)} \qquad \textbf{(45)}$$

Recordando que habíamos determinado inicialmente $G_1\,(s) = 1$ (sin regulación) y $H(s) = 1$ (realimentación unitaria), justificado por (44), tenemos:

$$\frac{\Psi(s)}{\Psi_d(s)} = \frac{\dfrac{K\,\delta_0}{s(Ts+1)}}{1+\dfrac{K\,\delta_0}{s(Ts+1)}} = \frac{K\,\delta_0}{s(Ts+1)+K\,\delta_0} = \frac{K\,\delta_0}{Ts^2+s+K\,\delta_0} \qquad \textbf{(46)}$$

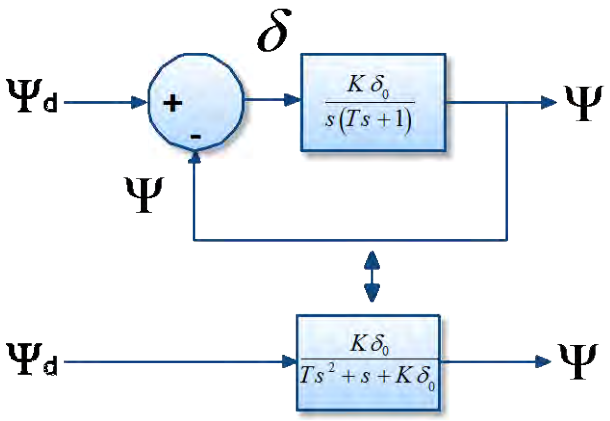


Figura 10. Diagramas de bloques equivalentes del modelo del sistema barco-piloto automático

La Figura 11 muestra el mismo modelo redibujado, que permitirá introducir señales de consigna (impulso, escalón, rampa, etc.), verificando así su respuesta temporal. Para ello identificaremos las características que determinan la frecuencia natural ω_n y el amortiguamiento del sistema ζ, empleando una función de particular interés (47) que define un sistema lineal con dos polos y sin ceros finitos (estable). Para enlazarlo a nuestra función de transferencia se ha dividido por ambos términos y e igualado $1/T = 2\zeta\omega_n$ y $\omega_n^2 = K\delta_0/T$, por lo que $\omega_n = 2\zeta K\delta_0$

$$\frac{\Psi(s)}{\Psi_d(s)} = \frac{K\,\delta_0}{Ts^2 + s + K\,\delta_0} = \frac{\dfrac{K\,\delta_0}{T}}{s^2 + \dfrac{1}{T}s + \dfrac{K\,\delta_0}{T}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \qquad \textbf{(47)}$$

Los 2 polos del sistema vienen determinados por las raíces del denominador:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \Rightarrow$$

$$s = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{4\zeta^2\omega_n^2 - 4\omega_n^2}}{2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} = -\zeta\omega_n \pm j\sqrt{1-\zeta^2}\,\omega_n \qquad \textbf{(48)}$$

El posible valor del amortiguamiento del sistema ζ será el responsable de su estabilidad temporal. Dada la variable compleja $s = \sigma + j\omega$, la estabilidad queda garantizada puesto que sus polos se encuentran siempre en el semiplano izquierdo complejo (la parte real es negativa $(-\zeta\omega_n)$). Puede aun así darse cuatro circunstancias motivadas por el valor de ζ:

- $\zeta = 0$ Subcrítico (sin amortiguamiento). La respuesta es senoidal. El rumbo del buque oscila en torno al rumbo deseado sin converger en él.
- $0 < \zeta < 1$ Subcrítico (con amortiguamiento). La respuesta tiene un componente oscilatorio más otro exponencial decreciente. Disminuye la tanto la amplitud como la frecuencia en torno al rumbo deseado.
- $\zeta = 1$ Crítico (con amortiguamiento). Desaparece el componente oscilatorio. Existe solo una sobreelongación, por lo que el rumbo del buque se aproxima al deseado sin sobrepasarlo.
- $\zeta > 1$ Sobreamortiguado. Ídem del anterior. El tiempo en alcanzar el rumbo deseado aumenta.

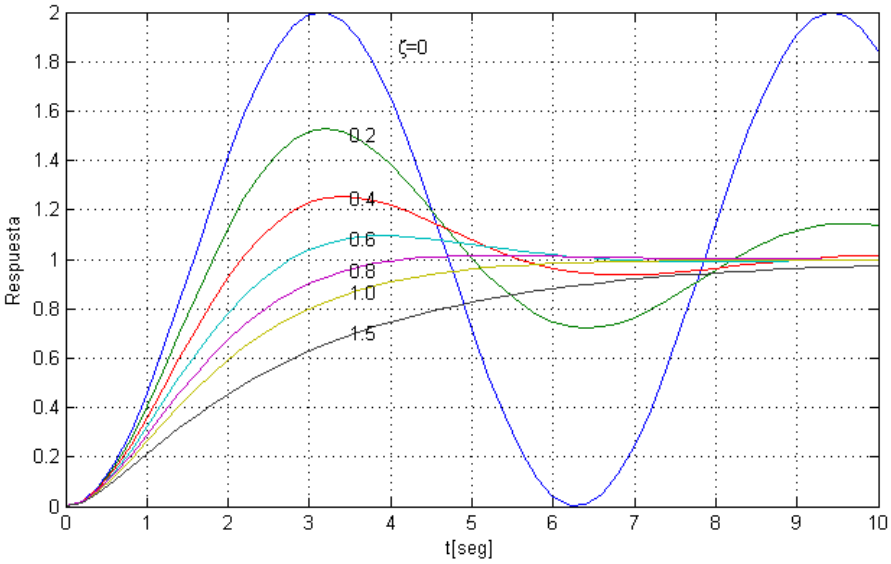


Figura 11. Respuesta de un sistema de segundo orden con realimentación unitaria a una entrada de escalón unitario

Una vez sentadas las bases teóricas del movimiento del buque en superficie se antoja necesario abordar dos tareas para el diseño del piloto automático clásico, que se escapan de este texto. La primera será la deducción de las características de maniobrabilidad del buque, por medio de los resultados de pruebas de mar, como la de la maniobra de giro o curva de evolución. La segunda labor primordial consistirá en el diseño de un regulador que amortigüe la respuesta del sistema en el ajuste del rumbo al deseado (Figura 12).

Referencias bibliográficas:

Abkowitz, M. A., 1964. Lectures on Ship Hydrodynamics-Steering and Manoeuvrability. s.l.:s.n.
Aláez Zazurca, J. A., 1982. Teoría del Buque I. Madrid: ETSIN.
Bourg, D. M., 2006. Excel. Aplicaciones científicas y de ingeniería. Madrid: Anaya-O'Reilly.
Casanova Rivas, E., 2009. El Buque de Guerra como Aplicación más Avanzada de la Tecnología Naval. Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos.
Fossen, T. I., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Trondheim: Wiley and Sons.
Fossen, T. I., 2011. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Trondheim: Wiley and Sons.
Gamboa, M., 1967. Nociones de Arquitectura Naval. Teoría del Buque.. Madrid: Editorial Naval.
Ibarz Fernández, J., 2003. Modelo de Simulación y Control Dinámico para un Catamarán Submarino con Seis Grados de Libertad. El Ferrol: Universidad de la Coruña.
Iseki, T., 2004. Ship Manoeuvrability. Theory and Assessment., Tokyo: Tokyo University of Marine Science and Technology.
Mayo Rodríguez, J. L., 1994. Apuntes de las asignaturas Automática I y Automática II. Gijón: ESMC.
Nguyen, H., 2005. Basic Control Theory. Newnham: Australian Maritime College.
Nomoto, K., 1957. On the steering Qualities of Ships. Technical Report. s.l.:International Shipbuilding Progress.
Ogata, K., 2003. Ingeniería de Control Moderna 4Ed. s.l.:Pearson.
Rawson, K. & Tupper, E., 2001. Basic Ship Theory. Volume 2. Ship Dynamics and Design. Oxford: Butterworth.
SNAME, 1950. Nomenclature for Treating the Motion of Submerged Body Through a Fluid. s.l.:Engineers, Techical and Research Bulletin.
Tupper, E. C., 2004. Introduction to Naval Architecture. Burlington: Elsevier.
Velasco, F., 2004. Modelos Matemáticos para el Control de Gobierno de Buques. Santander: Universidad de Cantabria.

Equipos de amarre de los buques. Cargas de diseño, resistencia y factores de seguridad

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

En lo referente a la construcción naval, y a pesar de que todo lo relativo al "amarre y fondeo" parece que suele ir de "la mano", las Sociedades de Clasificación, por ejemplo, nos marcan muchas exigencias para el diseño de los equipos de fondeo, pero prácticamente ninguna para los equipos de amarre. En lo correspondiente al equipo de fondeo nos indican requerimientos para el molinete, la cadena, el escobén y la caja de cadenas, pero respecto al de amarre, apenas nos fijan exigencias sobre las estachas, calculadas a partir del "número de equipo", y que son bastante generales.

Por lo tanto para el diseño de todos los equipos de amarre tendremos que apoyarnos en otras normativas y en la experiencia de los Astilleros. Para la definición del diseño de bitas, chigres, cornamusas y roletes guía-cabos, entre otros elementos de amarre, podremos apoyarnos en las normas ISO, UNE, y UNE-EN, que nos ayudarán a calcular las cargas que deben soportar los citados elementos.

La normativa internacional sobre el amarre de buques es muy escasa y poco exigente. No parece que los organismos competentes en lo que se refiere a la construcción, armamento y explotación del buque hayan dado una gran importancia a esta fase de la vida del buque. No existen normas ajustadas y obligatorias que, como en otros aspectos, y basándose en unos cálculos de cierta precisión, determinen las características del equipo o estructura a instalar. Los astilleros y armadores fijan las condiciones del equipo de amarre en función de la experiencia o de normas internas, sin unas directrices externas fiables.

El resultado que emana de este proceso es el de un buque orientado para la navegación en alta mar y, normalmente, preparado para el fondeo, pero muchas veces, poco adecuado técnicamente para la estancia en puerto.

El problema es fundamentalmente de competencias: ¿Quién debe fijar las normas sobre el equipo de amarre, la maniobra, la disposición de amarras y defensas, etc.? No acaba de estar claro si son las Sociedades de Clasificación, los armadores, los astilleros, los puertos o los Capitanes. Probablemente todos tienen mucho que decir, y se hace necesario un acuerdo sobre el tema.

Es indudable que de plasmarse ese acuerdo los resultados económicos mejorarían para todos, tanto evitando accidentes como aumentando la rentabilidad de buques y puertos. Igualmente se debería comprobar por medio de inspecciones visuales y pruebas de resistencia, periódicas e incidentales, el estado de conservación y resistencia estructural del equipo de la maniobra.

Una de las instituciones más importantes dentro de la reglamentación de buques es la Sociedad de Clasificación. Los organismos de este tipo emiten directrices que afectan a gran cantidad de aspectos de la construcción y armamento del buque, con el objetivo prioritario de la seguridad. Los buques que cumplen con tales requisitos reciben la certificación de la Sociedad en cuestión y son asegurados gracias a esa clasificación.

Hasta el momento, los Reglamentos de las Sociedades de Clasificación de Buques se limitan a dar recomendaciones no obligatorias sobre el equipo de amarre. Pero además, tales orientaciones resultan insuficientes.

General

Se podrían definir unas directrices dirigidas a ingenieros navales, marinos y operadores de los sistemas de amarre del buque, para que se fijen las cargas de seguridad en todos los elementos que conforman los sistemas de amarre.

El equipo de amarre debe estar dirigido a soportar las cargas generadas a bordo, cuando el buque se encuentre amarrado temporalmente a un noray de un muelle, a otro buque o a instalaciones en alta mar.

El equipo de amarre incluye bitas, cabrestantes, molinetes, estopores, guía-cabos y chigres de amarre. El equipo de fondeo no está incluido en este grupo ya que, como ya se ha comentado, los elementos de fondeo están cubiertos adecuadamente en las normas de las Sociedades de Clasificación.

Para definir la resistencia que deben soportar los equipos que componen el sistema, deben asumirse o conocerse los siguientes factores:

- La magnitud, posición y dirección de la mayor fuerza aplicada, que definirá la carga de seguridad de trabajo (SWL, Safe Working Load), también denominada "carga nominal" del equipo.
- El factor de seguridad asociado a la carga aplicada.
- Las especificaciones básicas de diseño del equipo.

La carga de seguridad es la carga máxima que normalmente se aplica en condiciones de servicio. Las especificaciones básicas de los equipos proporcionan también un margen de seguridad adicional para prevenir la rotura de cualquier pieza o parte del equipo. Los niveles máximos de resistencia soportados por los componentes de los equipos están calculados para sobrepasar la SWL, sin partir ni deformarse, y representan un punto en el cual se supera el límite mínimo de elasticidad del material.

Figura – Marca de SWL (75 t) de un guíacabos-rolete, tipo pedestal, en la proa del buque "Arklow Meadow"

El factor de seguridad estará definido en base al límite elástico, teniendo en cuenta que ese límite del material representa el punto, que si se sobrepasa, el material presentará una deformación permanente. Esta definición es de aplicación para aquellos elementos como estachas sintéticas o cables en los que el límite elástico es difícil de establecer. Los factores de seguridad deben tener en cuenta el efecto producido por cargas dinámicas, por deformación, desgaste o corrosión en los elementos, así como por el posible empleo de materiales de menor calidad que los exigidos.

La cuantificación del factor de seguridad se verá también condicionada por la necesidad de evitar fallos y accidentes. Por ejemplo, los factores de seguridad que afecten a elementos de sujeción del personal, deben ser altos, para evitar posibles accidentes.

El punto de aplicación y dirección de la carga de una línea de amarre en combinación con la propia de la línea sobre un elemento, determinará la carga total y la resistencia a soportar por el citado elemento. Una línea de amarre que realice un giro de 180º sobre una bita o sobre un guía-cabos de pedestal, provocará una carga doble sobre el elemento. De la misma manera que si la línea está dispuesta en la parte superior de una bita, provocará mayor carga que si estuviera ubicada en su base.

Conclusiones

Los elementos de unión del buque con el puerto son, como ya es de sobra conocido, la estacha sintética o el cable, y ambos cuentan con un punto de rotura específico, el cual debe estar relacionado con el del equipamiento dispuesto a bordo para el movimiento u operación de estos elementos de amarre.

En la práctica, la industria no es ni clara ni eficaz a la hora de establecer los criterios adecuados para el establecimiento de las cargas de rotura de los elementos de cubierta. Algunos ingenieros navales basan la resistencia de los equipos o elementos de cubierta en la máxima carga que se producirá en la línea de amarre, para unos criterios establecidos de condiciones meteorológicas adversas, mientras que otros basan el criterio de resistencia en sus equipos en el punto de carga de rotura exigido para las líneas de amarre. Pero ninguno de estos criterios de resistencia es adecuado si el elemento o equipo ha sufrido algún tipo de daño o desperfecto. Por cierto, algo que se debe evitar. Podría llegar a ocurrir que equipos sometidos a grandes cargas se dañaran, mientras que las líneas de amarre pudieran permanecer intactas. Un elemento deformado puede convertirse en inservible, pero pudiera no resultar visible este problema hasta que se produzca la avería.

En términos de reparación, el daño producido a elementos de cubierta suele ser más problemático y caro que el daño o rotura de una de las líneas de amarre.

Por tanto, el estándar de resistencia recomendado para el equipamiento de amarre de cubierta debe ser tal que estos sean capaces de resistir, como mínimo, cargas equivalentes a la resistencia de cargas de rotura de las líneas de amarre, sin que se produzca deformación aparente en las mismas.

Adicionalmente se debe revisar el estado de los elementos siguientes: alimentación eléctrica y cables eléctricos (que no están pelados), motor o motores eléctricos, sistemas hidráulicos (perdidas de aceite p.ej.), cuadros de mando local y a distancia, sistemas de seguridad, estructura fija y móvil, chigres y cilindros hidráulicos, firmes y polines, cables y retornos. En especial, se debe prestar atención a la rotura, corrosión, grietas, cortes de profundidad mayor del 20% del diámetro, y deformaciones de alargamiento superiores al 10%.

Bibliografía:

- OCIMF “Mooring Equipment Guidelines” 3rd Edition
- OCIMF “Mooring Equipment Guidelines” 2nd Edition
- “Bulkcarrier Practice” – Captain Jack Isbester

La acústica en la Armada

AN (CIA-MO-ET) Dª Mª CONCEPCIÓN MAZÓN HERRERA
ETSIAN

Hace unos años recalé en la ETSIAN, una Escuela dedicada a la formación de Ingenieros de Armas Navales, y comencé a interesarme por la Acústica Submarina. Actualmente soy profesora de dicha asignatura, e imparto las prácticas que se realizan en el laboratorio de acústica submarina de esta escuela.

El pasado año tuvo lugar en la misma unas Jornadas de Acústica Submarina, de las que destacaría un par de aspectos, el primero el desconocimiento total y absoluto que se tiene en general sobre la Acústica en la Armada, y el escaso conocimiento de la ETSIAN, su misión y existencia, para una gran parte de la Armada.

En este artículo pretendo dar a conocer el excelente trabajo que aquí realiza un grupo de personas cuyos esfuerzos e ilusión hacen que los alumnos tengan nuevas metas y amplíen sus horizontes laborales dentro de la Armada.

La ETSIAN dispone de una infraestructura única en la Armada que consiste en un tanque de agua de dimensiones (3,90 x 4,90 x 3,50 metros) en el que se realizan clases de laboratorio y pruebas prácticas con el objeto de complementar los desarrollos teóricos contemplados en el temario de la asignatura de Acústica Submarina que se imparte en esta escuela.

A pesar de las limitaciones impuestas por las dimensiones del tanque de agua, se dispone de unos equipos de última generación, adquiridos el pasado año a la empresa Álava Ingenieros, con los que se puede simular un campo libre de propagación del sonido, en el que las condiciones serían ideales, es decir, los efectos de las fronteras del tanque (paredes, techo y superficie), sean insignificantes para las frecuencias de interés.

Se realizan diversos montajes en el tanque de agua, para lo cual existe una grúa con capacidad para desplazar un blanco (en principio un cilindro metálico hueco) hasta el centro del tanque, y sumergirlo hasta el fondo con la finalidad de comprobar visualmente en los equipos los ecos que generaría ese blanco en el tanque al introducir en el mismo una señal acústica generada con otro de los equipos de reciente adquisición, el SOUNDBOOK, que es un analizador de señal, que además posee funcionalidades para generar ondas sinusoidales, triangulares, pulsos, ráfagas…etc.

Otra de las características innovadoras del SOUNDBOOK es la posibilidad del análisis de la señal en tiempo real, que sumado al post-procesado en el domino del tiempo y la frecuencia (FFT, convoluciones, correlaciones cruzadas de señal…) y las múltiples opciones de visualización de gráficos que posee, hacen que sus posibilidades didácticas y de investigación sean elevadas y adecuadas a las necesidades que tienen nuestros alumnos, tanto los que realizan el curso de Armas Navales, como los doctorandos del Master de Armas Navales.

Del mismo modo se adquirió un amplificador de potencia, un mini-hidrófono de RESON, y cuatro amplificadores de carga para renovar la equipación del laboratorio y aumentar sus capacidades.

Entre las prácticas de Acústica Submarina que se realizan habitualmente en esta Escuela se encuentran, por ejemplo, la medición de la velocidad del sonido en el agua mediante la detección de los ecos de un blanco sumergido en el centro del tanque, y la calibración de hidrófonos en el aire mediante un pistófono y el analizador de señal SOUNDBOOK.

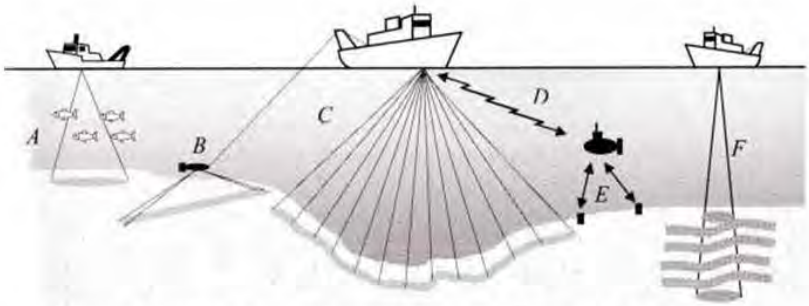
Un ejemplo de lo que se visualiza en el SOUNDBOOK lo constituyen las siguientes pantallas:

Después de dichas Jornadas considero cumplidos un par de objetivos: Potenciar el conocimiento en general de la Acústica en la Armada, y dar a conocer las capacidades del laboratorio de la ETSIAN, y abrir la Escuela a colaboraciones con Universidades, empresas, o como viene dándose en la actualidad, a doctorandos realizando sus tesis doctorales.

Sin llegar a ser mi intención que este artículo se convierta en una clase de Acústica, pretendo exponer algunos conceptos básicos de Acústica Submarina.

El uso más claro del sonido en el agua es mediante el SONAR (SOUND NAVIGATION AND RANGING). Y su funcionamiento básico sería:

1. Se emite un pulso, el cual se refleja en el objetivo y más tarde es percibido en el mismo punto de emisión. De acuerdo a la intensidad de la señal recibida se determina la distancia al objetivo (SONAR Activo).
2. El SONAR Pasivo escucha el ruido radiado por un objetivo. La señal se detecta sobre el ruido de fondo y el ruido auto inducido por el sistema de montaje receptor.



Examples of civilian applications: bathymetry or fishery sounder (*A*); sidescan sonar (*B*); multibeam sounder (*C*); data transmission system (*D*); acoustic positioning system (*E*); sediment profiler (*F*).

Sound parameters in air

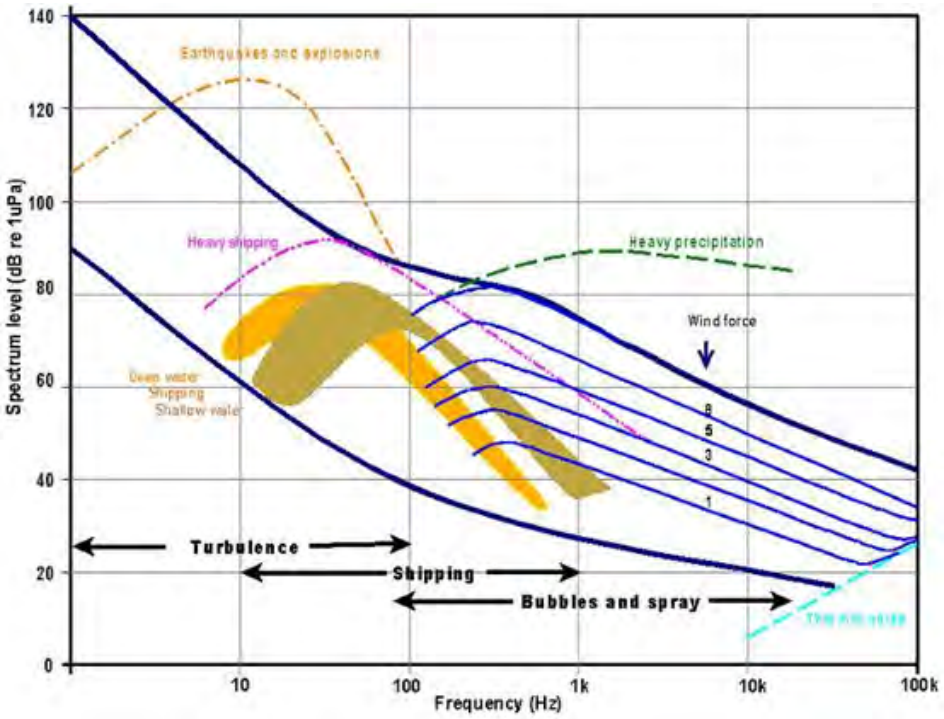
SOUND IN AIR $\rho c = 415\ \mathrm{kg\,m^{-2}\,s^{-1}}$				
Sound level	Intensity I (W/m^2)	Pressure p (N/m^2)	Particle velocity u (m/s)	Particle displacement u/ω (m at 800 Hz)
Threshold of hearing 0 dB re 20 μPa	10^{-12}	2×10^{-5}	5×10^{-8}	10^{-11}
Conversation 60 dB re 20 μPa	10^{-6}	2×10^{-2}	5×10^{-5}	10^{-8}
Threshold of pain 120 dB re 20 μPa	1	20	5×10^{-2}	10^{-5}

Sound parameters in sea water

UNDERWATER SOUND $\rho c = 1.5 \times 10^6\ \mathrm{kg\,m^{-2}\,s^{-1}}$				
Sound level	Intensity I (W/m^2)	Pressure p (N/m^2)	Particle velocity u (m/s)	Particle displacement u/ω (m at 10 Hz)
DSS2 at 10 kHz 40 dB re 1 μPa	0.67×10^{-14}	10^{-4}	6.7×10^{-11}	1.1×10^{-15}
Typical reverb at 2 km range 120 dB re 1 μPa	0.67×10^{-6}	1	6.7×10^{-7}	1.1×10^{-11}
Array: source level 220 dB re 1 μPa	0.67×10^{4}	10^{5} (1 atm)	6.7×10^{-2}	1.1×10^{-6}

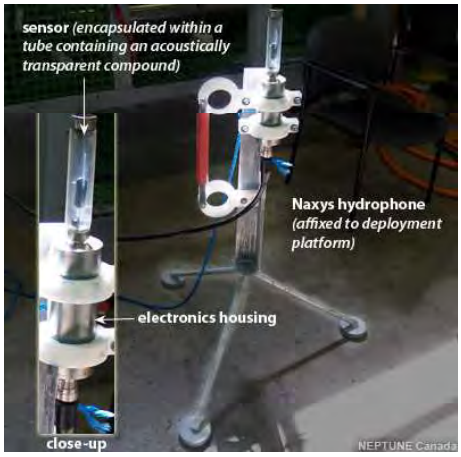
Note: it is interesting that 1.1×10^{-15} is only 3 millionths of the diameter of a hydrogen molecule (0.28 nm)

Las fuentes de ruido submarino más importantes están esquematizadas en el siguiente esquema:



En mediciones de acústica ambiental (en el aire) se utilizan sonómetros, los que poseen como transductor un micrófono (figura de la izquierda).

En mediciones de acústica submarina se utilizan los sistemas de SONAR, que poseen como transductor un hidrófono (figura de la derecha).

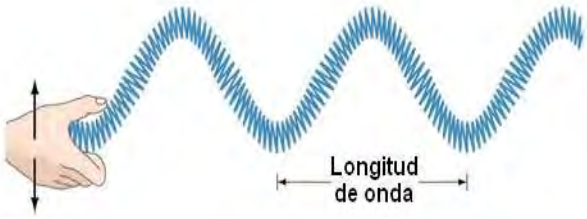


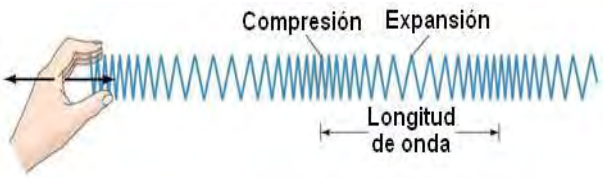
TC4032 on the left and TC4042 on the right.

Se debe utilizar un hidrófono adecuado para captar las diversas fuentes de ruido.

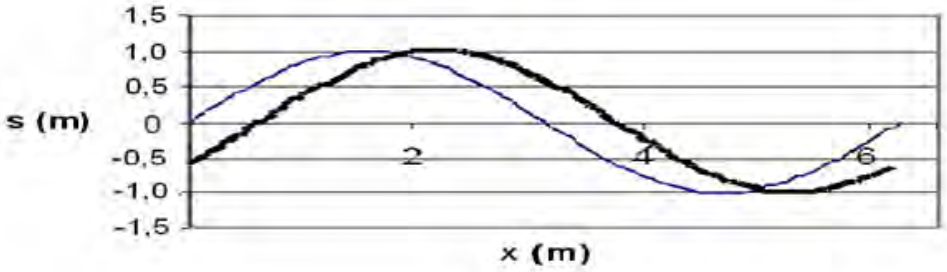
Model	Usable Bandwidth	Receive Sensitivity	Transmit Sensitivity at resonance	Depth rating	
Hydrophones without internal pre-amplifiers					
TC4013	1 Hz to 180 kHz	-211dB re. 1V/µPa	135dB re. 1µPa/V	700 m	
TC4033	1 Hz to 160 kHz	-203dB re. 1V/µPa	145dB re. 1µPa/V	900 m	
TC4040	1 Hz to 120 kHz	-206dB re. 1V/µPa	138dB re. 1µPa/V	400 m	

El sonido es una onda mecánica longitudinal, es decir, las partículas se propagan en paralelo a la dirección de propagación.





Una onda que se desplaza en un medio tendrá la siguiente forma:
Donde ***c*** corresponde a la "**velocidad de fase**": velocidad de propagación de la onda en un fluido.



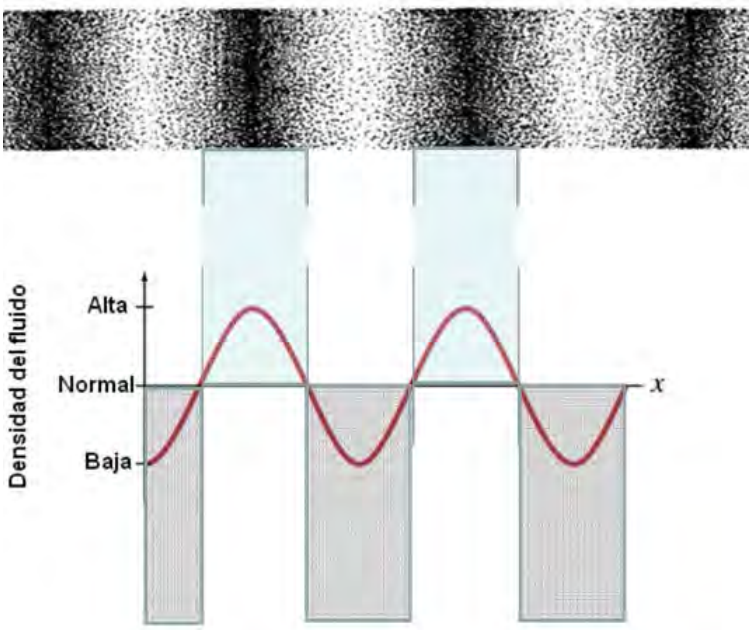
$$c = \frac{Distancia\ de\ desplazamiento\ en\ un\ ciclo}{Tiempo\ requerido\ para\ un\ ciclo} = \frac{\lambda}{\mathrm{T}} = f\lambda$$

$$s(x,t) = s_o\, sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}\, x - \frac{2\pi}{T}\, t\right] \qquad s(x,t) = s_0\, \sin[kx - \omega t]$$

Número de onda k $\quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda\ \pi 2}{2\,T} = \frac{\omega}{K}$$

En fluidos el sonido viaja en dirección longitudinal



La ecuación de onda es la ecuación que caracteriza cualquier onda sonora y se obtiene de la combinación las 3 ecuaciones siguientes:

Ecuación de onda: deducción

- Segunda Ley de Newton/Conversación de masa

$$\frac{\partial p_a}{\partial x} = -\rho\left(\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}\right)$$

- Ecuación de estado/Conversación de masa

$$p_a = -B\,\frac{\partial s}{\partial x}$$

- Ecuación de onda

$$\frac{\partial^2 s}{x^2} = \frac{(\rho)\,\partial^2 s}{B\;t^2}$$

Ecuación de onda: deducción

- Si se define: $c^2 = \frac{B}{\rho}$

- Entonces la ecuación de onda para el campo de desplazamiento:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

- Si c y ρ depende sólo de espacio, entonces el campo de presión también cumple con la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2\left[\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right]$$

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2}\,\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0$$

Soluciones a la ecuación de onda

- Proponer una solución.
- Ensayarla en la ecuación diferencial.
- Determinar si existen restricciones asociadas.
- Utilizar las condiciones iniciales o condiciones de contorno para hallar la solución particular.
- Se propone:

$$s\,(x.t) = s.\sin(kx - \omega t) \qquad \frac{\partial^2 s}{x^2} = \frac{(\rho)\,\partial s^2}{B\;\;t^2}$$

Soluciones a la ecuación de onda

- Algunas soluciones alternativas:

$$s(x,t) = s_0 \cos(kx \pm \omega t)$$

$$s(x.t) = s_0 \exp[j\,(kx - \omega t)]$$

$$s(x,t) = s_0 \exp\left[\left(\frac{kx - \omega t^2}{\omega \tau}\right)\right]$$

Velocidad del sonido

	Aire	Agua de mar	Agua dulce
Módulo de elasticidad	1,42 x 10^5 Pa	2,28 x 10^9 Pa	2,21 x 10^9 Pa
Densidad	1,21 kg/m^3	1.026 kg/m^3	998 kg/m^3
Velocidad	343 m/s	1.500 m/s	1.481 m/s

Variación con la temperatura

Aire $\boldsymbol{v \approx (331 + 0.60T)\frac{m}{s}}$

$$c = \sqrt{\frac{Módulo\ de\ Elasticidad}{Densidad}} = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Agua de mar (Medwin, para profundidades < 1.000 m)

Fórmula de Mackenzie (1981)

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z$$

• Válida para Temperaturas 0 a 30 ºC, Salinidad 30 a 40 ‰ y profundidades de 0 a 8000 m

Ondas acústicas: impedancia acústica

- Relaciona las características de una onda acústica con las propiedades del medio en donde se propaga.
- Por analogía:

$$Z_{eléctrica} = \frac{V}{I}$$

$$z = \frac{p\ (x,t)}{u\ (x,t)}$$

- Para el caso de ondas planas (campo lejano):

$$z = \frac{p(x,t)}{u(x,t)} = \frac{-\partial\ c^2\ s_0\ k\ \cos(kx-wt)}{-s_0\ c\ k\ \cos(kx-wt)} = \partial\ c$$

Ondas acústicas: impedancia acústica

- Valores típicos:

	Aire	Agua de mar	Agua dulce
Módulo de elasticidad	1,42 x 10^5 Pa	2,28 x 10^9 Pa	2,21 x 10^9 Pa
Densidad	1,21 kg/m^3	1.026 kg/m^3	998 kg/m^3
Velocidad	343 m/s	1.500 m/s	1.481 m/s
Z [Pa s/m]	415,03	1.539 x 10^6	1.478 x 10^6

Presión e intensidad RMS

- Para el caso de funciones seno y coseno:

$$p_a^2 = p_{rms} = \frac{p_{max}}{2}$$

$$I = \frac{p_{max}^2}{2c} = \frac{p_{rms}^2}{c}$$

Nivel de Presión y Nivel de Intensidad Sonora

- En general se hablará de Nivel de Intensidad Sonora (también citado como Nivel de Fuente SL).

$$NPS = 20\ log\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

$$L_1 = SL = 10log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Y por último vamos a presentar las ecuaciones de un sónar activo y de un sonar pasivo.

Ecuación del sonar pasivo

UD =NF – PT – (NR – ID)

DT = (SL - TL) – (AN – DI)

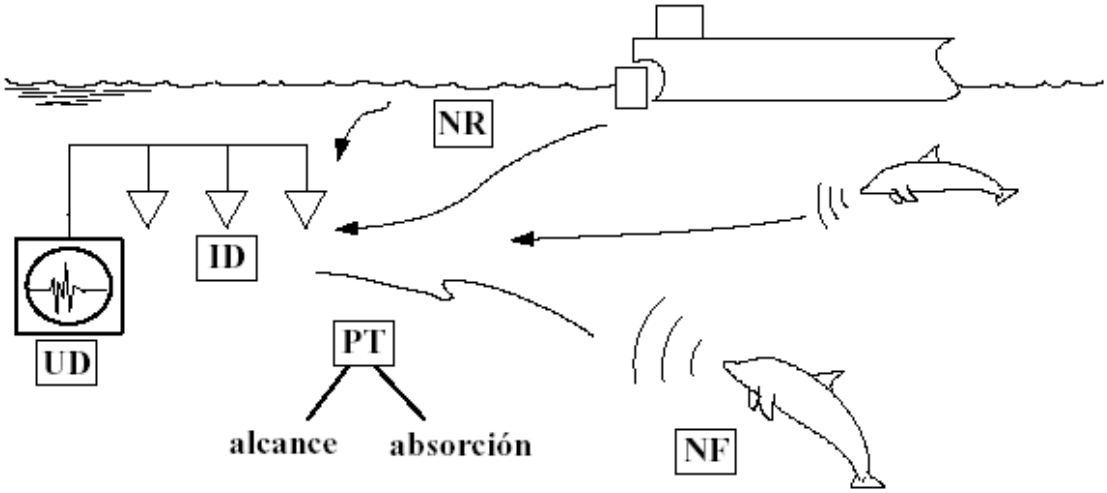


Figura de Mérito (FOM):

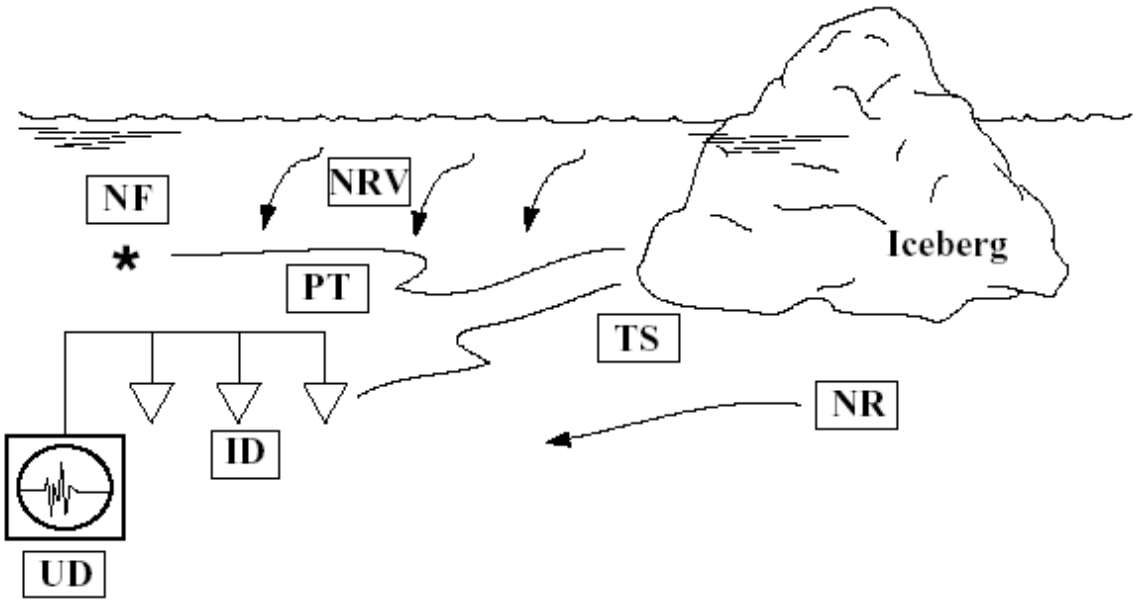
Este es el valor máximo de pérdidas que puede sufrir una señal y aún tener un 50% de probabilidades de ser detectada.

FOM = SL – (AN – DI) – DT

Ecuación del sonar activo:

$$NF - 2PT + TS - \left(\begin{matrix} NR - ID \\ NRV \end{matrix} \right) = UD$$

SE = SL + TS – 2TL – (AN – DI) – DT



- **SNR:** relación señal ruido del receptor.
- **NF:** nivel de emisión del transmisor, es la cantidad de energía suministrada por el transmisor al medio.(SL)
- **PT:** pérdida de energía en el camino, debidas a atenuación y divergencia. Dobles por el camino de ida y vuelta (TL)
- **NB:** nivel del blanco, es la relación entre la energía incidente y la reflejada en el blanco. Depende de su geometría, absorción y reflectividad. Si el objeto está en movimiento, las características geométricas son variables.(TS)
- **NR:** nivel de ruido en el escenario acústico. Puede deberse a ruido, siempre constante, o reverberación, que decae con el alcance.(AN)
- **ID:** índice de directividad del sistema.(DI)
- **UD:** Umbral de detección (DT)
- **TS:** Target Strength (fuerza del blanco)

$$TL = 20\log R + \propto R10^{-3}$$

Factor de ventaja

En el juego táctico buque-submarino se emplea el "factor de ventaja" como figura de mérito del submarino frente al buque de superficie en el entorno

FOMP = SLP – (AN – DI) – DT

FOMA = 2PL = SLA + TS – (AN – DI) – DT

FACTOR de VENTAJA= FOMP – FOMA

Definiciones de los parámetros:

- **NF** = nivel de ruido de la fuente.
- **PT** = pérdida de transmisión.
- **NR** = nivel de ruido.
- **ID** = índice de directividad del sistema.
- **NRV** = nivel de reverberación.
- **TS (Target Strength)** = fuerza del blanco.
- **UD** = umbral de detección.

$$\mathrm{TS} = 10\log\frac{I_{\mathrm{dif}}}{I_{\mathrm{inc}}}\Big|_{r=r_{\mathrm{ref}}}$$

- Fuerza de blanco de una esfera (r_0 = radio, supone r_0 >> L):
  - $\mathrm{TS} = 10\log\frac{r_0^2}{4}$

- Fuerza de blanco de un cilindro: (a una incidencia normal, a = radio, L = longitud):
  - $\mathrm{TS} = 10 \log \frac{aL^2}{2\lambda}$

Inteligencia acústica:

Es aquella obtenida mediante el SONAR.

Existen varios tipos de equipos para obtener la inteligencia de unidades navales: SOSUS (SOund SUrveillance System), TACTAS (TACtical Towed Array Sonar) y SURTASS (SURveillande Towed Array Sensos System), El SOSUS consiste en gigantescas "orejas" sonar pasivas sumergidas en el fondo del mar. El TACTAS es un sonar pasivo remolcado, consiste en un tubo muy fino, de flotabilidad neutra, de 1,8 km o más, lleno de hidrófonos (sonares pasivos), Los SURTASS son una variante del SOSUS aplicada utilizando los TACTASS. Consiste en un pequeño catamarán de unos 50 metros y motores eléctricos, que está dotado de un modelo muy refinado del TACTASS, del sonar remolcado, Disponen de comunicaciones vía satélite y comunican a una base en la costa la información que recogen.

El periscopio, el principal de ellos para la clasificación e identificación, tiene un alcance limitado, se vuelve prácticamente nulo para ese fin de noche o con baja visibilidad, aferra al submarino a navegar próximo a la superficie y, especialmente, lo obliga a ser indiscreto.

Estas razones hacen necesario desarrollar la posibilidad de clasificar y eventualmente identificar los contactos analizando los rumores que generan, tarea realizada por los sonaristas mediante la comparación aural. El logro de buenos resultados usando este método requiere que el rumor tenga características perceptibles al oído que posibiliten clasificarlo, además de un prolongado y meticuloso adiestramiento de los operadores del sonar.

Consideraciones sobre la clasificación de firmas acústicas

Entendemos por **firma acústica** al conjunto de características de un ruido que permite obtener información acerca de la fuente que lo generó. El análisis de esos atributos se lleva a cabo básicamente en los dominios del tiempo (variación temporal de la amplitud) y de la frecuencia (estudio de los componente de frecuencia presentes). La conversión del dominio del tiempo al de la frecuencia se logra en la práctica por medio del algoritmo matemático denominado Transformación Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform-FFT) y su resultado es una representación amplitud-frecuencia denominada habitualmente espectro de frecuencias.

La resolución del problema de la clasificación e identificación de una firma acústica por medio de la informática forma parte de una disciplina denominada genéricamente reconocimiento de patrones (pattern **recognition).**

Un sistema de reconocimiento de patrones consiste en un sensor que recoge las observaciones a clasificar, un sistema de extracción de características que transforma una parte de la información observada en valores numéricos o simbólicos y un sistema de clasificación o descripción que, basado en las características extraídas, clasifica la medición. Conviene acotar que la clave de la efectividad de un sistema de clasificación reside más en el diseño del extractor de características que en el dispositivo de clasificación en sí.

Podemos definir el término fuente como todo fenómeno natural o artificial que genera sonidos captados por el sonar pasivo, como por ejemplo buques, submarinos, torpedos, ruidos biológicos, ruidos de costa, etc. Se entiende por clasificar una firma acústica a la determinación del tipo de fuente que la generó por medio de su comparación con datos almacenados, cuyas fuentes fueron identificadas con anterioridad.

Lograr un sistema que clasifique automáticamente una firma acústica y sea capaz de funcionar a bordo, en tiempo real y con un grado de certeza tal que brinde información útil es de por sí complejo. Los factores que influyen son numerosos y variados. Veamos cuáles son los más significativos.

Un buque navegando genera una cantidad significativa de sonidos diferentes debido a muchas variables que intervienen y que se interrelacionan: velocidad (ya sea estable o variable), auxiliares en uso, estado de carga, estado de suciedad del casco y hélice, remolques, fallas o averías en sus ejes y hélices, etc. Las combinaciones de estas variables pueden hacer que un buque determinado, en diferentes circunstancias, genere sonidos que sean similares a los de otras clases de buques.

La porción del espectro más rica en información para la clasificación asistida por computadora y donde a su vez es menor la pérdida por transmisión y la influencia del ruido ambiente es la de las bajas frecuencias. Los submarinos convencionales modernos, diseñados para mantener bajos los niveles del ruido propio y con sonares de arreglo lateral (flank array), son los mejor dotados para esta tarea.

Las bases de datos

La utilidad de un sistema automático de clasificación de firmas acústicas estará condicionada por la cantidad y variedad de fuentes diferentes contenidas en su base de datos. Las características de variabilidad de las firmas que puede emitir una misma fuente hace necesario almacenar mucha información para poder caracterizarla.

Una propiedad importante que debe tener la base de datos usada en la clasificación es que la información de una fuente determinada mantenga tanto coherencia interna (que los datos tengan un grado de similitud entre sí), como una diferenciación de las demás fuentes que haga posible discriminar una de otra. Esta característica, a la que llamamos “consistencia” de la base de datos, ayuda especialmente a prevenir errores al clasificar un nuevo rumor desconocido.

Las posibilidades que brinda el empleo de redes neuronales pueden ser incrementadas por medio del uso de otros recursos aplicables a la clasificación tales como la lógica difusa (fuzzy logic), que permite encontrar soluciones a problemas en los que los parámetros considerados son imprecisos.

A las consideraciones sobre la clasificación de firmas acústicas ya planteadas deben sumarse los requerimientos propios de un submarino dentro de un teatro de operaciones moderno. Múltiples contactos, muchos de ellos no reconocidos previamente, mejores capacidades antisubmarinas por parte de los medios aéreos y navales oponentes que obligan al sigilo, así como la necesidad de emplear armas a distancias cada vez mayores dentro de un marco legal restringido que vuelve impensables las consecuencias del ataque a un blanco equivocado, son sólo algunas de las circunstancias que potencian la necesidad de contar con un sistema de este tipo pero que también inciden decisivamente en la efectividad que debe poseer.

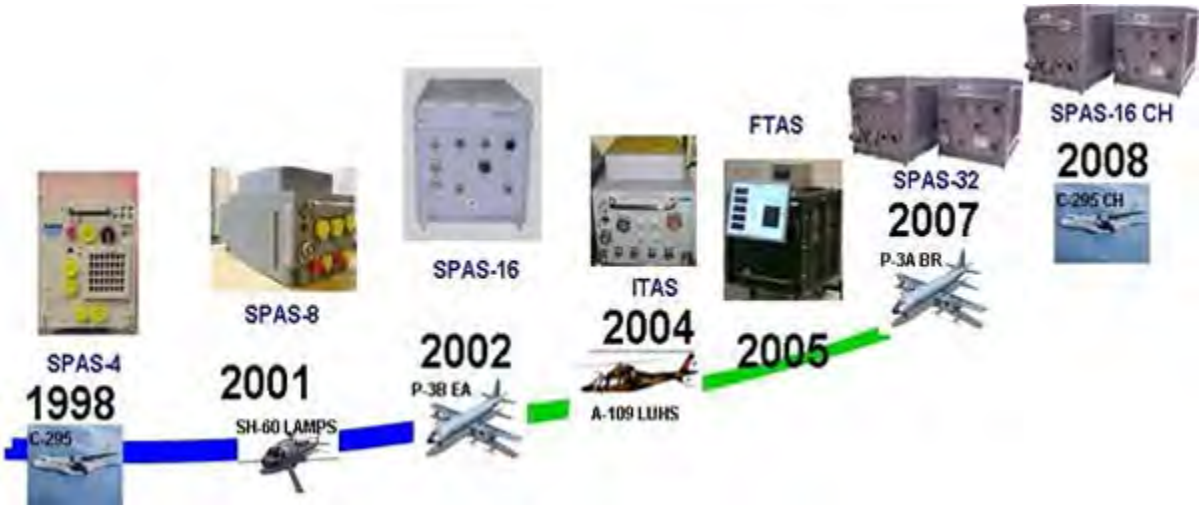
Es muy probable que los sistemas de sonar pasivo para submarinos que se ofrezcan en el futuro cercano cuenten con clasificadores automáticos de contactos. A pesar de ello esta no es la única alternativa para disponer de un sistema de este tipo. Los recursos que se vuelcan a la investigación y desarrollo en el campo militar también pueden incidir favorablemente para disponer de una alternativa nacional basada en la tecnología comercial disponible. Este es sólo uno de los tantos problemas posibles de resolver en el área de la defensa y también un desafío para los investigadores.

SPAS, el nuevo Sistema de Análisis Acústico de SAEs

SAES ha conseguido integrar el **Procesador Acústico SPAS** con los equipos Receptor de Sonoboyas, Radio UHF, Sistema OTPI, Sistema Grabador Digital, y Sistema Data Link (datos, video y audio), con lo que ha conseguido conformar un Subsistema Acústico completo de la aeronave, que con el nombre de **Subsis-**

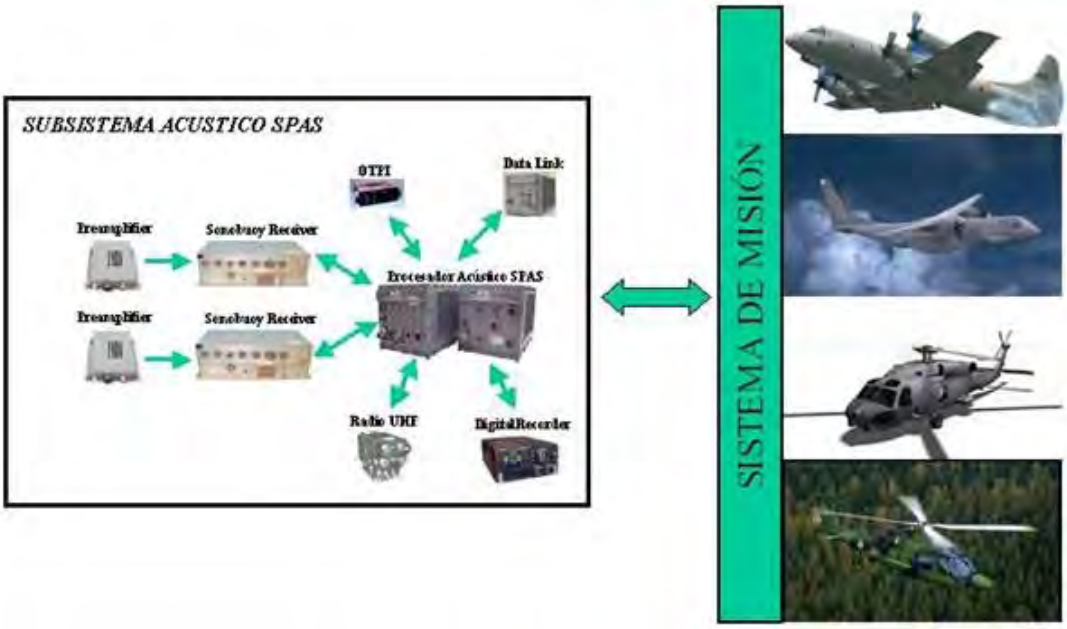
tema Acústico SPAS, puede ser instalado en modo "*Stand Alone*" o integrado con el "*Sistema de Misión*" tanto en aviones como helicópteros.

En la actualidad, el Subsistema Acústico SPAS se encuentra plenamente operativo a bordo tanto de aviones de patrulla marítima (P3-Orion, C-295) como de helicópteros (SH-60B, Agusta Westland A109-LUHS).



Los aviones de patrulla marítima (MPA) utilizan habitualmente en operaciones del tipo ASW sensores acústicos consistentes en sonoboyas pasivas y activas, y otros no acústicos que pueden se pasivos (ESM, FLIR, MAD) o visuales activos (Radar), con el objetivo de detectar, localizar, clasificar, seguir y atacar submarinos.

En los últimos 12 años, SAES ha desarrollado una familia de procesadores acústicos de sonoboyas (SPAS) capaces de procesar desde 4 (SPAS-4) hasta 32 (SPAS-32), que tienen la característica de ser pasivas y activas simultáneamente.



Basándose en el análisis de las señales acústicas adquiridas por las sonoboyas desplegadas, el Subsistema Acústico SPAS proporciona los medios para detectar, localizar, clasificar, y seguir submarinos y buques de superficie.

NOTA: Se ampliará la información sobre el sistema Acústico SPAS en el siguiente número de la revista.

INGENIEROS EN LA HISTORIA

NARCISO MONTURIOL

Por Óscar Villalón

Inventor español, precursor del submarino, nacido en Figueras (Gerona) en 1819 y fallecido en San Martín de Provençals (Barcelona) en 1885.

Su afición a los temas científico-técnicos le llevó a concebir en 1855 un submarino para pescar coral; tratando después de avalar la idea científicamente y comenzando a pensar en su posible utilización militar.

En 1859 botó en Barcelona su primer prototipo, el *Ictíneo I*, a cuyas pruebas asistió en 1861, el ministro de Marina, Juan de Zabala. El invento necesitaba muchas mejoras y grandes inversiones de capital, por lo que la incertidumbre sobre la rentabilidad del proyecto y la falta de apoyo oficial hicieron que se interrumpieran los experimentos, tras la fabricación del segundo prototipo.

De los avances de Monturiol, enmarcados en múltiples intentos paralelos de ingenieros europeos y norteamericanos sólo quedó su descripción en un *Ensayo sobre el arte de navegar debajo del agua* (1891).

El *Ictíneo I* medía 7 metros de eslora, 2.5 de manga y 3,5 de puntal. El casco interior era esférico y tenía una capacidad de 7 metros cúbicos; el casco exterior tenía forma de pez con una sección elíptica inspirada en el prototipo de Wilhelm Bauer que navegó en 1851. Entre el casco interior y el exterior había unos tanques de flotación, un tanque que suministraba oxígeno para la respiración y la iluminación, y un tanque de hidrógeno que alimentaba una lámpara para iluminar las profundidades marinas. El *Ictíneo I* tenía un propulsor de aleta accionado por una tripulación de dos hombres. La inmersión se conseguía mediante una hélice horizontal que podía girar en ambas sentidos, disponiendo de bombas para inundación y achique; que aseguraban la estabilidad y la flotación. Estaba equipado con una serie de herramientas específicas para la pesca del coral.

Con el *Ictíneo II* pretendía alcanzar mayor potencia mediante el incremento del número de tripulantes –propulsores, lo que le hacía resultar más lento. Tenía 14 metros de eslora, 2 de manga y 3 de puntal. Fue construido con madera de olivo y refuerzos de noble con una capa de 2 milímetros de cobre. En la parte superior tenía una cubierta de 1,3 metros de ancho, con tres ojos de buey con cristales de 10 centímetros de espesor. Desde la torreta se controlaba el timón mediante un engranaje sin fin. Cuatro compartimentos estancos de 8 metros cúbicos, repartidos de forma simétrica a ambos costados, garantizaban la flotabilidad. Podían inundarse mediante una bomba. Un peso, que se desplazaba longitudinalmente a través de un rail, intentaba mantener la horizontalidad durante la navegación submarina. Este mecanismo estaba controlado por el timonel. Otro mecanismo permitía soltar lastre y emerger en caso de emergencia.

Ante el fracaso de la propulsión humana encargó a su yerno el diseño de una caldera de vapor adecuada para ser utilizada en la embarcación cerrada herméticamente. El motor utilizaba un compuesto químico de magnesio, peróxido, cinc y clorato potásico cuya reacción generaba el calor necesario para la producción de vapor de agua produciendo, a la vez oxígeno que, recogido en tanques, era utilizado para la respiración de los tripulantes y para la iluminación interior.