

**"HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE LA COMPATIBILIDAD  
ELECTROMAGNÉTICA (EMC) EN DISEÑO DE BUQUES NAVALES"**

Marrugo L Lorente. Stefany, smarrugo@cotecmar.com; Jiménez González. Víctor Hugo,  
vjimenez@cotecmar.com *División de Electricidad y Electrónica, Dirección de I+D+I COTECMAR*  
Colombia.

**Abstract:** *This paper presents a short review of documents related with electromagnetic compatibility, the design process of EE Systems for ships, standards and rules that should be taken into account and main general characteristics that differentiate the electrical systems installed on naval surface ships, from electrical systems used on ground. It mentions some rules and standards used by Cotecmar's design office and show sections from them.*

**Resumen:** *Este artículo presenta una revisión de documentos relacionados con compatibilidad electromagnética y la gestión de diseño de sistemas eléctricos y electrónicos de buques, las normas y los estándares a tener en cuenta y de las características generales principales que diferencian los sistemas eléctricos instalados a bordo de buques navales, de los sistemas eléctricos usados en la industria. Menciona algunas de las normas y estándares empleadas por la oficina de diseño de Cotecmar y muestra apartes de ellas.*

**Keywords:** compatibilidad electromagnética, diseño de buques, equipos electrónicos sensibles, EMC.

## **I. Introducción.**

La Compatibilidad Electromagnética - EMC de los dispositivos y equipos eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones es hoy en día, a escala mundial, una de las principales exigencias de calidad. La Unión Europea por ejemplo, ha establecido la denominada directiva 89/336/EEC sobre EMC, de obligatorio cumplimiento desde 1996, que cubre un gran conjunto de sistemas y equipos eléctricos y electrónicos comercializados en su territorio. Por otra parte, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, impone restricciones a las emisiones radiadas y conducidas de los dispositivos digitales que sean comercializados en dicho país.

Para que la EMC de un dispositivo o equipo sea efectiva y económicamente factible, debe involucrarse desde las primeras etapas de diseño, teniendo en cuenta que este debe operar adecuadamente en un entorno electromagnético específico.

Es importante resaltar que tanto diseñadores como consumidores deben someterse a las normas de EMC, para obtener altos estándares de calidad en procesos que involucren dispositivos y equipos eléctricos y electrónicos.

En un buque, garantizar EMC es complicado, puesto que se deben involucrar todas las etapas de diseño del(los) sistema(s) y por consiguiente de los equipos que lo(s) constituyen, lo cual no resulta ser tarea fácil. Por ello se tienen en cuenta ciertas recomendaciones, normativas y/o estándares a la hora de realizar diseñar, instalar y evaluar el funcionamiento de sistemas en este tipo de superestructuras.

## **II. EMC en buques.**

Para un país como Colombia, cobra relevancia el desarrollo de esfuerzos de caracterización de las condiciones electromagnéticas particulares del medio.

La caracterización del entorno electromagnético, que debe efectuarse desde puntos de vista espacio-temporales y estadísticos, constituye la base tanto para elaborar los métodos de prueba de la susceptibilidad<sup>1</sup> e inmunidad<sup>2</sup> de los sistemas como para sentar una discusión fundamentada con respecto a sí, para cada tópico específico, deben desarrollarse normas propias o adoptarse las de carácter internacional.

Expuesto lo anterior y después de una cuidadosa revisión realizada a algunos trabajos investigativos relacionados con la temática "Compatibilidad Electromagnética en buques", se encontró:

En primer término, el trabajo titulado "*The electric field induced in the human body when exposed to electromagnetic fields at 1-30 MHz on shipboard*", fue de gran ayuda para la documentación del paper. Este trabajo fue realizado por Ronold W. P. King. Para el IEEE.

Dentro de sus principales aportes, tanto para el presente paper, como para el medio en que se desarrolló, están:

- El estudio analítico de las condiciones para las cuales se inducen corrientes y campos electromagnéticos en el cuerpo humano, teniendo como entorno físico embarcaciones Navales
- Modelamiento del fenómeno a partir de la solución de la ecuación integral para la corriente total inducida en un conductor (conociendo su longitud media y radio), cuando es expuesto a un campo eléctrico incidente, paralelo al cilindro .

Como conclusión significativa de este trabajo se determinaron analíticamente la corriente axial total, la densidad de corriente y el campo eléctrico axial inducido en cualquier sección transversal de un hombre que permanece de pie cerca de una antena vertical, en la cubierta metálica de un buque. Se presentan valores

<sup>1</sup> La susceptibilidad está definida como la capacidad de un dispositivo o equipo eléctrico o electrónico para generar una respuesta no deseada cuando es sometido a una perturbación electromagnética.

<sup>2</sup> La inmunidad se define como la capacidad de un sistema para continuar operando satisfactoriamente al estar sometido a perturbaciones electromagnéticas

numéricos para los aspectos mencionados, específicamente cuando el hombre está descalzo y se encuentra a una distancia de 3 m de un monopolo vertical que mantiene un campo eléctrico de 10 V/m en ese lugar, así como también se determina que el valor numérico de la corriente axial total para un hombre que utilice botas con suela de goma de 2 cm de espesor, se podrá obtener a partir de la corriente calculada para el hombre descalzo, multiplicada por un factor (comprendido entre 0.697 y 0.636) teniendo en cuenta la frecuencia. El autor resalta que todos los cálculos y formulas presentadas en su investigación son válidas para frecuencias entre 1 – 30 MHz., igualmente manifiesta que los diversos tipos de antena a bordo del buque estudiado fueron representadas como aproximaciones a monopolos equivalentes, por lo cual la magnitud de los resultados es proporcional y no cuantitativamente igual a las reales, sin embargo, son de gran utilidad a la investigación biomédica, ya que muestran los posibles efectos biológicos que representa para las personas a bordo de estas naves, la exposición a estos campos eléctricos.

En segundo lugar, el trabajo titulado "*Expert system using electromagnetic interference and electromagnetic compatibility based criteria for ship design, weapon selection and evaluation*", realizado por Manoj Tayal y Vikram Waman Karve, para el Institute of armament technology, India.

Dentro de sus principales aportes, tanto para el presente paper, como para el medio en que se desarrolló, están:

- La proposición de selección de nuevas armas y evaluación de paradigmas usando técnicas AHP en modelos 3D.
- El diseño de embarcaciones, cuyo proceso se basa en la técnica de modelamiento de k-sistemas, donde el modelo de anticipación y percepción son desarrollados dependiendo los requerimientos de operación.

Como conclusión significativa de este trabajo se expone la consecución del diseño de embarcaciones a partir de un modelo tridimensional, se plantea entonces un cubo cuyos ejes indican un criterio de evaluación. Con el fin de evaluar la totalidad de los equipos, los criterios adecuados para evaluar, según los

autores son: necesidades operacionales, interferencia electromagnética/compatibilidad electromagnética, costo de construcción, requerimientos tecnológicos, riesgos de la radiación electromagnética en el personal, riesgos de la radiación electromagnética en el combustible y riesgos de la radiación electromagnética en los artefactos. Para abarcar estos aspectos es necesario construir al menos 3 cubos y evaluar la pertinencia y viabilidad de lo concluido a partir de ellos, respecto al proyecto en desarrollo. El modelo generado por los autores se basa en la estructura de jerarquía de k-sistemas es una representación general de un sistema cibernético inteligente. Los k-sistemas forman un sistema retroalimentado junto con un objeto externo en el entorno que es de interés para quienes desarrollan el estudio, de esta forma el sistema se visiona como un repertorio de modelos de percepción (representaciones de los objetos externos existentes), anticipación (prototipos del objeto deseado y elaboración de directrices para la construcción del nuevo objeto) y requerimiento de operación para el sujeto actuante. Lo anterior constituye un modelo experto que se ha construido a partir del conocimiento de modelos más sencillos.

En tercer lugar, el Standard Militar 59-411 titulado "*Electromagnetic compatibility Part 2: Managemen and planning*", fue de gran ayuda para la documentación del presente paper. Este documento fue publicado por el Ministerio de defensa de UK.

Dentro de sus principales aportes, tanto para el presente paper, como para el medio en que se desarrolló, están:

- La presentación del estándar 59-411 Parte 2, el cual describe la forma en que debe ser elaborado un plan de control electromagnético (contenidos y pruebas sobre el mismo) en el diseño de sistemas que involucren equipos eléctricos y electrónicos.
- Las responsabilidades típicas que debe asumir el coordinador y su grupo de trabajo, durante el diseño y ejecución de un plan de control electromagnético.

Como conclusión significativa de este trabajo se expone que su finalidad principal es

estandarizar los procedimientos de control y gestión electromagnética, los métodos y límites de la compatibilidad electromagnética y proporcionar orientación en el diseño electromagnético sobre cualquier procedimiento de defensa que se desarrollen en UK. En este contexto, el plan de control electromagnético define los requerimientos necesarios para implementar un control electromagnético estratégico, puesto que permite demostrar y entender los riesgos a los que se podría llegar a estar expuesto en caso de presentarse cualquier especificación inadecuada. En términos generales, el plan de control electromagnético, según el estándar 59-411 (Parte 2) del ministerio de defensa de UK, debe contener los siguientes aspectos:

- Aplicabilidad: es necesario declarar cual es la aplicación del plan, por ejemplo, especificar si el plan está subordinado a otro plan de control o si es aplicable solo a cierta parte del ciclo del contrato.
- Requerimientos: en esta sección se deben incluir los documentos de requisición del usuario y los documentos de requisición del sistema (URD y SRD respectivamente), también conocidos como documentos de licitación o de presentación del proyecto.
- Administración y organización: definir las declaraciones administrativas del proyecto y la organización necesaria para implementar un control electromagnético efectivo
- Documentación: definir los estándares o cualquier otro documento que sea necesario para conocer los requerimientos electromagnéticos del contrato.
- Políticas de diseño: la definición de las políticas de diseño debe incluir una evaluación de los riesgos electromagnéticos y una propuesta de solución para la contingencia de los mismos.

- Verificación electromagnética: definir el programa demostración y garantía de rendimiento electromagnético.
- Programa de aseguramiento (garantía) de calidad.
- Glosario de definiciones de las abreviaciones usadas en el plan de control.

En cuarta instancia, el documento titulado *“Understanding electromagnetic fields and antenna radiation takes (almost) no math”*, realizado por Ron Schmitt.

Dentro de sus principales aportes, tanto para el presente paper, como para el medio en que se desarrolló, están:

- La explicación de campos electromagnéticos en forma didáctica y casi sin emplear expresiones matemáticas, basándose en imágenes y situaciones cotidianas que recrean los fenómenos de interés.
- La caracterización de los campos cercanos y lejanos (reactivos y radiados, respectivamente) teniendo en cuenta algunos criterios tales como energía, longevidad, interacción y señal de impedancia, entre otros.

Como conclusión significativa de este trabajo se expone que las cargas estacionarias y las cargas que se mueven con velocidad constante producen campos reactivos, mientras que las cargas aceleradas producen además campos radiantes. Las fuentes DC causan un desplazamiento constante de las cargas, y por lo tanto producen campos reactivos; por su parte las fuentes AC causan una aceleración en las cargas y produce campos reactivos y radiantes. Los campos radiantes llevan la energía lejos de la fuente independientemente de si existe un circuito receptor o antena. En ausencia de otro circuito, los campos reactivos almacenan energía capacitiva, inductiva o ambas. En presencia de otro circuito, los campos reactivos pueden transferir energía a través de acoplamientos inductivos o capacitivos. En general, las radiaciones incrementan con la frecuencia y la longitud de la

antena. Igualmente, la radiación y los efectos de una línea de transmisión suelen ser despreciables cuando los cables son mucho más cortos que una longitud de onda. Las características de los campos reactivos dependen en gran parte del circuito de la fuente. Las características de los campos radiantes, como su señal de impedancia, son independientes de la fuente.

En quinto lugar, el artículo titulado *“Campos eléctrico y magnético en estaciones radioeléctricas de buques”*, elaborado por los ingenieros Rugiere Suárez Cabrera y Sergio Ortiz Gómez, para el instituto de Medicina del trabajo y publicado en la revista Cubana de Higiene y epidemiología.

Dentro de sus principales aportes, tanto para el presente paper, como para el medio en que se desarrolló, están:

- La presentación de los resultados de la medición de la intensidad de los campos eléctrico y magnético en 21 estaciones radioeléctricas de buques, donde se encontraron valores de intensidad que superan los niveles que fueron tomados como referencia.
- El planteamiento de un método de estudio para este tipo de situaciones, consistente en la utilización de un instrumento NFM-1 para medir E y H, tomando como punto de medición el sitio que ocupa el operador frente al transmisor principal. Las observaciones fueron realizadas para los rangos de frecuencias: 410-512 kHz y 4-25 MHz, al nivel de la cabeza, tórax y pelvis del operador en posición sentado, con el transmisor principal transmitiendo de forma continua y una corriente eléctrica de salida máxima (full), excepto en la Flota Cubana de Pesca donde no se controló la corriente de salida. Se realizaron mediciones en algunos casos a 2 m de la antena en el área del sobre puente que constituye una zona de paso.

Como conclusión significativa de este trabajo se

expone que después de realizar el estudio en 21 barcos pertenecientes a las Flotas de Navegación Mambisa, Atunera y Cubana de Pesca y a partir de las pautas trazadas por el "International Comitee of Radiation Protection Association/Internacional Non-Ionizaing Radiation Comité" (IRPA/INCIRC) afirman que en 10 de esos buques se encontraron valores de E y/o H no permisibles, por lo que los radiotelegrafistas pueden estar expuestos a intensidades de campo eléctrico que superen durante la etapa de navegación los valores recomendados y en menor grado a valores de intensidad de campo magnético. Esta situación pudiera variar con la introducción de técnicas más modernas de comunicación marítima. Así mismo, realizaron algunas comprobaciones con la corriente intermedia (salida del transmisor en "median") y obtuvieron una disminución apreciable en la intensidad de los campos generados, lo que resulta un aspecto importante, pues al operar el transmisor con la corriente de salida lo menor posible no sólo disminuye la intensidad de los campos generados sino que permite una explotación más eficiente del equipo. Las mediciones de E y H demuestran que pueden ser generados CEM con intensidades de interés para la higiene ocupacional en las estaciones radioeléctricas de los barcos.

En sexto lugar, el artículo titulado "*Challenges of the naval electromagnetic environment for the EMC engineer*", elaborado por K.R RAGHU, para el IEEE en el 2003.

En el documento se tratan aspectos como la singularidad del entorno en el que instituciones, como la Armada, tienen que poner a funcionar su arsenal sofisticado de armamento y equipos de comunicación, y en el cual se propone tener en cuenta la compatibilidad electromagnética entre sistemas en todas las etapas de diseño y construcción de la embarcación.

En séptimo lugar, el artículo titulado "*Electromagnetic evironmental effects modeling, simulation & test validation for cosite mitigation – an overview*", elaborado por R. PIRICH, C. BASANEZ y P. ANUMOLU, para el IEEE en el 2008.

En el documento se proponen dos posibles soluciones a los efectos que tiene el entorno metálico de plataformas como barcos, aviones, naves espaciales, entre otras, para el

modelado, la simulación y la validación de arreglos de antenas en dichas superficies. Dentro de las soluciones se propone aislar físicamente las antenas emisoras de las receptoras y, como otra solución se tiene la manipulación de una frecuencia, que permita mitigar los efectos del entorno en los estudios de validación y simulación de sus patrones de radiación.

En octavo lugar, el artículo titulado "The error cause analysis in EM simulation of ship", elaborado por Nan, Wu; Song-gao, Huang; Ding-e, Wen y Chun, Wang, publicado por el IEEE en 2008.

Dentro de sus principales aportes, tanto para el presente paper, como para el medio en que se desarrolló, están:

- El análisis del error en simulaciones electromagnéticas teniendo en cuenta dos aspectos: errores en el modelo de simulación y errores causados por el método de análisis.
- Dentro del primer aspecto mencionado anteriormente, se hacen dos subdivisiones: error causado por defectos en la geometría de la figura (relacionado con el modelamiento aproximado de la forma de la estructura) ó error causado por defectos de carácter físico (relacionado con las características asignadas a los materiales de la estructura en el software).
- El segundo aspecto mencionado inicialmente presenta también dos subdivisiones: método de emparejamiento de error y método de solución del error.

Como conclusión significativa de este trabajo se expone que actualmente, algunos métodos estándar como FDTD, FEM, MOM, TLM y SBR han sido adecuadamente verificados en simulación de campos EM, y sus ventajas han sido completamente exteriorizadas. Sin embargo, estos métodos no pueden arrojar resultados absolutamente correctos. La función correspondiente al método para proyectar problemas y la exactitud del modelo EM son causas críticas de error. Adicionalmente, algunos métodos optimizados y combinados pueden causar errores en la simulación. La identificación de las fuentes de error en las simulaciones EM de buques y el

establecimiento de reglas de operación para las simulaciones EM de buques resultan ser factores muy importantes para la exactitud, estabilidad y practicidad de una simulación.

### III. Normas y Estándares empleados para el Diseño y la Construcción de Sistemas Eléctricos y electrónicos a bordo.

Con el fin de minimizar el impacto de los sistemas eléctricos y electrónicos sobre la operación de otros ubicados en el buque, desde el punto de vista de la EMC, se tienen en cuenta algunos estándares y normativas internacionales, algunos de ellos se mencionan a continuación.

**MIL-STD 59-411:** *“Electromagnetic compatibility Part 5: code of practice for tri-service design and installation”*, publicado por el Ministerio de defensa de UK en enero de 2007.

Proporciona orientación a los directores de proyectos y sus equipos de trabajo en cuanto a diseño (desde su fase inicial hasta su mantenimiento y modificación) e instalación de instrumentos electromagnéticos en plataformas aéreas, vehículos terrestres, buques o submarinos, teniendo en cuenta criterios de compatibilidad electromagnética.

**IEEE 45-2002:** *“IEEE Recommended practice for electrical installations on shipboard”*, aprobado por el IEEE en septiembre del 2002.

Proporciona recomendaciones para el diseño, selección e instalación de equipos en buques comerciales, siempre que sean con aparatos eléctricos de alumbrado, señalización, comunicación, energía y propulsión.

**IEC 60533:** *“Electrical and electronic installations in ships – Electromagnetic Compatibility”*. Publicado en 1999 por la IEC (International Electrotechnical Commission).

Estándar internacional que especifica los requerimientos mínimos de emisión, inmunidad y criterios de desempeño respecto a EMC de equipos eléctricos y electrónicos para buques. Además, provee una guía y recomendaciones sobre las medidas para lograr EMC en las instalaciones eléctricas y electrónicas de los diferentes grupos de equipos (equipos de navegación y radiocomunicaciones, equipos de

generación y conversión, sistemas de control, equipos de intercomunicación y procesamiento de señales, equipos y piezas no eléctricas y sistemas integrados).

**MIL-STD 1310G:** *“Standard practice for shipboard bonding, grounding and other techniques for electromagnetic compatibility and safety”*. Publicado por el ministerio de defensa de USA en junio de 1996.

Este documento especifica los requerimientos de desempeño para puestas a tierra, uniones entre superficies y apantallamiento; identifica los requisitos para el control de generación de EMI producida por el casco y equipos, EMI por penetraciones del casco y cables y la reflexión/obstrucción de la superestructura; además especifica requerimientos para la protección del personal contra descargas eléctricas e identifica los requisitos aplicables a la medida de la efectividad de los controles de EMI y las medidas de seguridad implementadas cuando los requerimientos descritos las necesiten.

### IV. CONCLUSIONES.

Los estándares para diseño de sistemas eléctricos y electrónicos de buques, orientados al aseguramiento de EMC (Compatibilidad Electromagnética), están enfocados principalmente a la integración de equipos y subsistemas pues es durante esta actividad y a raíz de esta por la se presentan la mayor parte de inconvenientes en EMC.

La compatibilidad electromagnética y su gestión está orientada principalmente a asegurar el correcto funcionamiento de equipos y sistemas; la afectación generada por Campos Electromagnéticos sobre seres humanos es del alcance de estudios epidemiológicos en los que deben ser vinculados especialistas del sector salud.

El planeamiento y control de las actividades relacionadas con EMC tales como: definición de las necesidades y requerimientos, selección especificación de equipos y sistemas, integración de sistemas y adaptación a la plataforma; dejan de ser una opción para convertirse cada vez más en una necesidad, al momento de diseñar y construir plataformas militares, especialmente.

Las exigencias en cuanto a EMC son considerablemente cada vez más altas en ambientes militares, debido al rumbo que ha tomado la tecnología militar, a la evolución de la guerra naval que ha pasado de estar centrada en plataformas, a estar centrada en redes, y actualmente está orientándose a estar centrada en el conocimiento; y ya que en ambientes navales generalmente no se tiene contacto visual con el enemigo, la dependencia de los sensores e instrumentos y de la fiabilidad de la información que se obtiene a través de ellos es prácticamente total.

La gestión para el aseguramiento de EMC, es un proceso dinámico que debe ser abordado desde las primeras fases del diseño de un buque y termina con la desactivación de la unidad a flote.

## V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KING, Ronold W. P. The electric field induced in the human body when exposed to electromagnetic fields at 1-30 MHz on shipboard. Publicado por el IEEE en Junio de 1999

TAYAL, Manoj y WAMAN, Karve Vikram. Expert system using electromagnetic interference and electromagnetic compatibility based criteria for ship design, weapon selection and evaluation. Institute of armament technology, India. Publicado por el IEEE en 1997.

Ministry of Defence. Defence Standard 59-411 Issue 5. Publication Date: 1 December 2002. Electromagnetic Compatibility Part 2: Management and Planning Procedures.

SCHMITT, Ron. "Understanding electromagnetic fields and antenna radiation takes (almost) no math". Publicado por The design magazine of electronic industry Vol 45 N° 5, marzo del 2000.

SUÁREZ Cabrera, Ruginere y ORTIZ Gómez, Sergio. Campos eléctrico y magnético en estaciones radioeléctricas de buques. Publicado por la revista Cubana de Higiene y epidemiología en 1997.

RAGHU, K.R. Challenges of the naval electromagnetic environment for the EMC engineer. Publicado por el IEEE en el 2003.

PIRICH,R.; BASANEZ, C.; ANUMOLU, P.; Electromagnetic environmental effects modeling, simulation & test validation for cosite mitigation – an overview. Publicado por el IEEE en el 2008.

NAN, Wu; SONG-GAO, Huang; DING-E, Wen y CHUN, Wang. The error cause analysis in EM simulation of ship. Publicado por el IEEE en 2008.

Ministry of Defence. Defence Standard 59-411 Part 5 Issue1. Publication Date: 23 January 2007. Electromagnetic Compatibility Part 5: Code of Practice for Tri-Service Design and Installation.

The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. IEEE std 45-2002: "IEEE Recommended practice for electrical installations on shipboard". Aprobado: 12 de septiembre de 2002.

International Electrotechnical commission. IEC 60533: Electrical and electronic installations in ships – Electromagnetic Compatibility. Segunda edición -1999.

Department of Defence. MIL- STD 1310G. Publication Date: 28 June 1996. Standard practice for shipboard bonding, grounding and other techniques for electromagnetic compatibility and safety.