



Desarrollo de una metodología de modelamiento y simulación de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de unidades a flote

Steve Mendoza Moyano
Alfredo García Lindo
Juan Carlos Hincapié Agudelo
Francisco Quijano Úsuga

Trabajo de grado para optar al título profesional:
Curso de Estado Mayor (CEM)

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"
Bogotá D.C., Colombia

2018

TCEM
359.81
D376
G.L.

FUERZAS MILITARES DE COLOMBIA
ESCUELA SUPERIOR DE GUERRA

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE CONFIABILIDAD,
DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD DE UNIDADES A FLOTE

103391

CC STEVE MENDOZA MOYANO
CC ALFREDO GARCÍA LINDO
CC JUAN CARLOS HINCAPIÉ AGUDELO
CC FRANCISCO QUIJANO ÚSUGA

ESPECIALIZACIÓN EN SEGURIDAD Y DEFENSA DE ESTADO
CURSO DE ESTADO MAYOR 2018
BOGOTÁ 2018

Desarrollo de una Metodología de Modelamiento y Simulación de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de Unidades a Flote¹

CC Steve Mendoza Moyano²

CC Alfredo García Lindo³

CC Juan Carlos Hincapié Agudelo⁴

CC Francisco Quijano Úsuga⁵

Resumen

El presente artículo, aborda la necesidad de la Armada Nacional de mejorar de manera técnica el proceso de toma de decisiones en lo referente a compra, reemplazo y mantenimiento de equipos/sistemas/unidades a flote, desde el punto de vista de la ingeniería naval, considerando los diferentes escenarios operacionales. Lo anterior, se espera lograr mediante el diseño de una metodología para la simulación de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de las unidades a flote. Para el desarrollo de esta metodología, se empleó un método denominado IDEF0 (del

¹Este artículo contiene resultados del proyecto de investigación “Desarrollo de una metodología de modelamiento y simulación de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de unidades a flote”, trabajo que se realiza como opción de grado para optar al título de Especialista en Seguridad y Defensa Nacional, realizado en la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia.

² Magister en Arquitectura e Ingeniería Naval de la Universidad de Lisboa (IST). Especialista en Política y Estrategia Marítima de la Escuela Naval Almirante Padilla. Ingeniero Naval especialidad Mecánica, Profesional en Ciencias Navales de la Escuela Naval Almirante Padilla. Perito Naval en Cubierta, Ingeniería Naval y Buceo y Salvamento. Contacto: steve.mendoza@armada.mil.co.

³ Especialista en Política y Estrategia Marítima de la Escuela Naval Almirante Padilla. Especialista en Gerencia de Proyectos de la Universidad EAN. Ingeniero Naval especialidad Mecánica, Profesional en Ciencias Navales de la Escuela Naval Almirante Padilla. Perito Naval en Cubierta, Ingeniería Naval y Buceo y Salvamento. Contacto: alfredo.garcia@armada.mil.co

⁴ Especialista en Política y Estrategia Marítima de la Escuela Naval Almirante Padilla. Ingeniero Naval especialidad Mecánica, Profesional en Ciencias Navales de la Escuela Naval Almirante Padilla. Perito Naval en Cubierta, Ingeniería Naval. Contacto: juan.hincapie.ag@armada.mil.co.

⁵ Especialista en Política y Estrategia Marítima de la Escuela Naval Almirante Padilla. Ingeniero Naval especialidad Mecánica, Profesional en Ciencias Navales de la Escuela Naval Almirante. Contacto: francisco.quijano@armada.mil.co

inglés, *Integration Definition for Function Modelling*), el cual facilita la visualización e integración de los diferentes factores y variables a analizarse. Esta metodología, permite que, a partir de un diagrama de contexto, y derivando de manera jerárquica los diferentes niveles en el proceso de toma de decisiones, ante varias alternativas que pueden atender determinado o determinados escenarios operacionales. Los entregables de esta metodología, son informaciones cuantitativas relacionadas con indicadores de desempeño y con el costo del ciclo de vida de las alternativas analizadas, que eliminan al máximo la subjetividad y que facilitan la toma de decisiones.

Palabras clave: Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad, Modelamiento, Predicción, Riesgos, IDEF0.

Abstract

This article will address the need of the Colombian Navy to improve the technical decision-making process in relation to the purchase, replacement and maintenance of equipment / systems / units afloat, from the point of view of naval engineering, considering the different operational scenarios. The above can be achieved by designing a methodology for the simulation of reliability, availability and maintainability of the afloat units. For the development of this methodology, a method called IDEF0 (from English, Definition of integration for the modeling of functions) was used, which facilitates the visualization and integration of the different factors and variables to be analyzed. This methodology allows the use of a context diagram, and hierarchically deriving the different levels in the decision-making process, before several alternatives that can be addressed or determined by operational scenarios. The deliverables of this methodology are quantitative information related to performance indicators and the cost of the life cycle of the analyzed alternatives, which eliminate subjectivity to the maximum and

facilitate decision making.

Keywords: Reliability, Maintainability, Availability, Modelling, Prediction, Risks, IDEF0.

Introducción

La confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) o RAM por sus siglas en inglés, (Reliability, Availability and Maintainability), son tres elementos importantes, que son usados en la industria para soportar la toma de decisiones. Muchas veces, la toma de decisiones está basadas “en información incompleta, incierta o difusa, debiendo a su vez producir con más bajo costo, mejor calidad y mayor nivel de Confiabilidad” (R2M, 2018). Así mismo, el documento Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de Sistemas (Análisis CDM – RAM), también nos indica “es por ello que muchas de las más importantes empresas del mundo utilizan cada vez más intensamente las disciplinas y metodologías de Ingeniería de Confiabilidad, Análisis de Riesgos y Gerencia de la Incertidumbre”(R2M, 2018).

Pero, antes que nada, es necesario presentar la definición de esos tres elementos, de acuerdo la Sociedad Americana para la Calidad (ASQ):

Confiabilidad: Definido como la probabilidad de que un sistema o componente de sistema, realice su función prevista, en las condiciones establecidas sin fallar durante un tiempo determinado.

Mantenibilidad: Se define como la probabilidad de que un sistema o elemento del sistema pueda repararse en un entorno definido dentro de un período de tiempo específico.

Disponibilidad: Es la probabilidad de que un sistema o elemento de sistema reparable esté operativo en un momento determinado en un conjunto determinado de condiciones ambientales.

Si bien es cierto, el análisis del costo del ciclo de vida de determinado activo es un elemento importante para la toma de decisiones, la simulación del RAM es un atributo inherente de este cálculo. Lo anterior, nos ayuda a “predecir los recursos futuros que se requerirán en cualquier etapa del ciclo de vida de un sistema de interés” (NATO, 2009, p. 1).

Del mismo modo, es importante mantener una coordinación entre las actividades de la confiabilidad (*dependability*) y la seguridad (*safety*) en cada proyecto a empezar, los posibles riesgos o peligros se deberán analizar por el equipo de seguridad y el análisis de los modos de falla por el equipo de confiabilidad. Se deberá considerar que no siempre las dos actividades requieren estar unidas, en algunos análisis solo necesitan una estrecha sincronización, como se puede ver en la figura propuesta San José (2016), ver *Figura 1*.

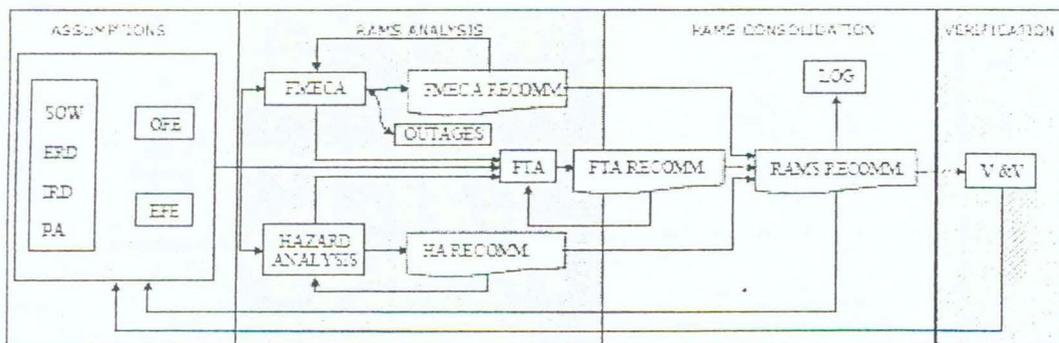


Figura 1. Proceso RAMS. Fuente: (San José, 2016)

Del mismo modo, la simulación de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, también fortalece la aplicación del concepto de Apoyo Logístico Integrado. Este es un concepto, que es identificado a nivel mundial como ILS por sus siglas en inglés (Integrated Logistic Support), el cual hace referencia a “asegurar que cuando se compre un Sistema, sea un Buque un

Tanque, o una Aeronave, sepamos exactamente y con anterioridad dónde éste va a operar, cómo mantenerlo y repararlo durante la vida útil que se le planificó” (Genta, n.d.).

Por otro lado, la disponibilidad de un componente, equipo o sistema, es de suma importancia, considerando que es el medio para obtener la producción objeto de determinado negocio; en la Armada Nacional, la disponibilidad de las unidades a flote, le garantiza a la fuerza contar con las unidades en el momento requerido. Toro y Céspedes (2001) en su documento, concluyen que la disponibilidad es el objetivo para obtener el máximo provecho a una inversión, así mismo, hacen hincapié que la disponibilidad no es una variable independiente, sino, que esta interrelacionada con la confiabilidad y la mantenibilidad. Del mismo modo, Amendola (2003) relaciona la disponibilidad de los sistemas productivos, como decisiva para la productividad y competencia.

En la Armada Nacional, históricamente se han venido desarrollando importantes proyectos de Ingeniería Naval tanto en el diseño, construcción, reparación y mantenimiento, bajo un principio de economía de recursos y con una visión, en el alcance basado en juicio de expertos y en una oferta de mercadeo local, que no garantiza la toma de la mejor decisión. De acuerdo con lo anterior y con el fin de mejorar el proceso de toma de decisiones, se requiere generar cálculos respaldados en información histórica del activo, con fin de simular el comportamiento de este, soportando la toma de la decisión; así como lo expresa Rengifo y Valencia (2009), las simulaciones permiten:

...una mejor visualización de los problemas que se analizan y ayudan a tomar decisiones acertadas de forma inmediata, además de estas y otras ventajas el proyecto combina las virtudes de la simulación con las de los indicadores de gestión y ofrece un completo diagnóstico de análisis CMD (p. 21).

Del mismo modo, el U.S. Department of Defense (1963) en su estándar militar 756B, hace referencia a la importancia de la información del activo al indicar que “las predicciones de confiabilidad generalmente se basan en datos de experiencia de elementos similares, o sus componentes, utilizados de manera similar” (traducción propia⁶).

Igualmente, la industria de la aviación también utiliza el modelamiento RAM para mejorar el desempeño de las aeronaves. Ren & Wu (2015) en su investigación modela el desempeño de una aeronave utilizando periodos operativos libres de mantenimiento (MFOP – *Maintenance Free Operating Periods*). El modelamiento está basado en el método de Petri Net y su objetivo es conocer la confiabilidad inherente de sistemas y componentes, sistemas redundantes, sistemas reconfigurables, pronósticos y diagnósticos que afectan el MFOPS de la aeronave. En el sector de la industria eléctrica y puntualmente aplicado a los sistemas de transmisión de potencia eléctrica la empresa ABB (2013), adoptó la aplicación del modelamiento RAM, con el fin de lograr una excelencia operacional y mejora en la productividad de sus equipos, complementado con la aplicación de otro sistema como el RBI (Inspección Basada en Riesgo). Los beneficios obtenidos, le han permitido aumentar el lucro a través de menos paradas programadas, menos pérdidas por lucro cesante, determinación de la política correcta de mantenimiento (tiempo óptimo de reemplazo de piezas) y optimización de inventario en almacén, así mismo les permitió mejorar las soluciones de las necesidades de la industria identificando malos actores (equipos defectuosos que dan pérdidas) e identificar áreas de posibles inversiones.

Por lo tanto, los beneficios obtenidos a través del modelamiento RAM en los diferentes sectores de la industria son evidentes, y en ese sentido el objetivo de este artículo es proponer

⁶ Texto original: Reliability predictions are generally based on experience data from similar items, or their components, used in a same or similar manner.

una herramienta que fortalezca el proceso de toma de decisiones en la Armada Nacional.

Para el desarrollo del presente trabajo fue seguida la metodología IDEF 0, la cual está orientada a modelar las decisiones, acciones y actividades de una organización o sistema. El tipo de investigación es de nivel aprehensivo, considerando que alude a la explicación de situaciones que generan los diferentes eventos contenidos y desarrollados a través de la metodología IDEF 0, por lo tanto, se considera que esta es una investigación comparativa (Escalona, 2016), en donde se pretende que a través de un proceso de análisis de los datos obtenidos mediante la simulación RAM, se soporte la toma de decisiones de la Armada Nacional en lo referente a la adquisición, reemplazo y mantenimiento de equipos/sistemas/unidades a flote, comparando las diferentes alternativas tecnológicas disponibles frente a los respectivos escenarios operacionales.

A continuación, se explica en que consiste la metodología IDEF e IDEF 0 respectivamente; posteriormente, se presenta como es el proceso de toma decisiones de la Armada Nacional, en lo referente a la compra, reemplazo y mantenimiento de las unidades; luego, se presentan los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología IDEF0 en el contexto de la Armada Nacional; también se indican las principales herramientas computacionales que podrían soportar la metodología RAM, tanto para los comportamientos base, como para la propagación de efectos; finalmente, se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones para trabajos futuros.

Metodología IDEF

Las metodologías de IDEF, fueron desarrolladas por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, en su Programa para la Integración de las Ayudas Computacionales Fabricadas, ICAM por sus siglas en inglés (*Integrated Computer Aided Manufacturing*). “El programa ICAM, identificó la

necesidad de comunicar y analizar mejor la fabricación, para el personal involucrado en mejorar la productividad” (traducción propia⁷) (AFWAL, 1981, p. 3).

IDEF significó inicialmente ICAM Definition por sus siglas en inglés, sin embargo, en 1999 fue renombrada como *Integrated Definitions Methods* también por sus siglas en inglés. En la década de los 80's, IDEF estaba compuesta de tres metodologías de modelado que caracterizan gráficamente la fabricación, IDEF 0, IDEF 1 e IDEF 2, Sin embargo, en la actualidad ya se encuentran desarrollos hasta IDEF 5.

De acuerdo AFWAL (1981), el método IDEF 0 está orientado a producir la función del modelo; por otro lado, el método IDEF 1 se utiliza para producir un modelo de información, que representa la estructura de la información necesaria para respaldar las funciones de un sistema de fabricación o ambiente; y finalmente, el método IDEF 2 se utiliza para producir un modelo dinámico, que representa el comportamiento variable en el tiempo de las funciones, la información y los recursos de un sistema de fabricación del entorno.

En el mismo sentido, KBSI (2018) por su parte indica el significado de IDEF 3, IDEF 4 e IDEF 5. En el caso de IDEF 3, hace referencia al mecanismo para recopilar y documentar procesos; en cambio el IDEF 4, es un método de diseño orientado a la producción de códigos; por último, el IDEF 5 proporciona un método teórico y empíricamente bien fundamentado diseñado específicamente para ayudar a crear, modificar y mantener ontologías.

De acuerdo con lo anterior y considerando la naturaleza del presente trabajo, fue seleccionada la metodología IDEF 0, para facilitar el desarrollo y entendimiento de este.

⁷ Texto original: The ICAM Program identified a need to better communicate and analyze manufacturing for the people involved in improving productivity.

IDEF 0

Como ya fue referido, este método está orientado a producir la función de un modelo, por lo tanto, está “diseñado para modelar las decisiones, acciones y actividades de una organización o sistema” (traducción propia⁸) (KBSI, 2018b). Esta metodología, es adecuada para modelar una amplia variedad de sistemas, en donde un sistema puede incluir combinaciones de software, hardware y personal. El resultado de la aplicación de IDEF 0, es un modelo. Un modelo consiste en una serie jerárquica de diagramas, textos, glosario y referencias cruzadas entre sí. El modelo describe qué hace un sistema, qué lo controla, en qué cosas trabaja, qué significa, que utiliza para realizar sus funciones y qué produce. De acuerdo AFWAL (1981);

Los diagramas son los principales componentes de un modelo. Todas las funciones de fabricación y las interfaces se presentan como cuadros (funciones) y flechas (interfaces) en diagramas. La posición en la que la flecha entra en un cuadro transmite la función específica de la interfaz (traducción propia⁹) (p. 11).

La Figura 2, muestra como es un diagrama tipo en la metodología IDEF 0. El diagrama está representado principalmente, por lo siguientes elementos:

- Actividad: una caja rectangular o “box” que hace referencia a la actividad o función a desarrollar, está identificada por un nombre y número. El nombre debe obedecer a un verbo o frase verbo.
- Controles: Hace referencia a las condiciones requeridas para producir un resultado adecuado. Los controles se asocian al sistema, por flechas que ingresan por la parte superior de la caja o “box”.

⁸ Texto original: Designed to model the decisions, actions, and activities of an organization or system.

⁹ Texto original: Diagrams are the major components of a model. All manufacturing functions and interfaces are presented as boxes (functions) and arrows (interfaces) on diagrams. The position at which the arrow enters a box conveys the specific role of the interface.

- Mecanismos / Recursos: Hace referencia a los medios usados para realizar o ejecutar la función. Los mecanismos o recursos se asocian al sistema, por flechas que ingresan por la parte inferior de la caja o “box”.
- Entradas: Hace referencia a los datos u objetos que la función transforma en resultados. Las entradas se asocian al sistema, por flechas que ingresan por la parte siniestra de la caja o “box”.
- Salidas: Hace referencia a los datos u objetos producidos por la función. Las salidas se asocian al sistema, por flechas que ingresan por la parte diestra de la caja o “box”.



Figura 2. Posición de las flechas y roles. Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas tienen jerarquías, y se pueden ir desglosando a medida que se requiera. El primer diagrama, se denomina diagrama de contexto o A-0, este diagrama permite visualizar el propósito del modelo y, además, ayuda a guiar y restringir la creación del mismo. El diagrama de contexto es desglosado en otros diagramas secundarios, respetando siempre la jerarquía de las actividades, estos diagramas secundarios tienen denominaciones a partir de A1, A2, A3, etc..., así mismo, diagramas secundarios deben estar dentro del alcance del diagrama de nivel superior.

La siguiente figura, muestra cómo sería el adecuado desglose de los diagramas dentro de la metodología IDEF 0, desde el diagrama de contexto hasta diagramas secundarios de tercer nivel.

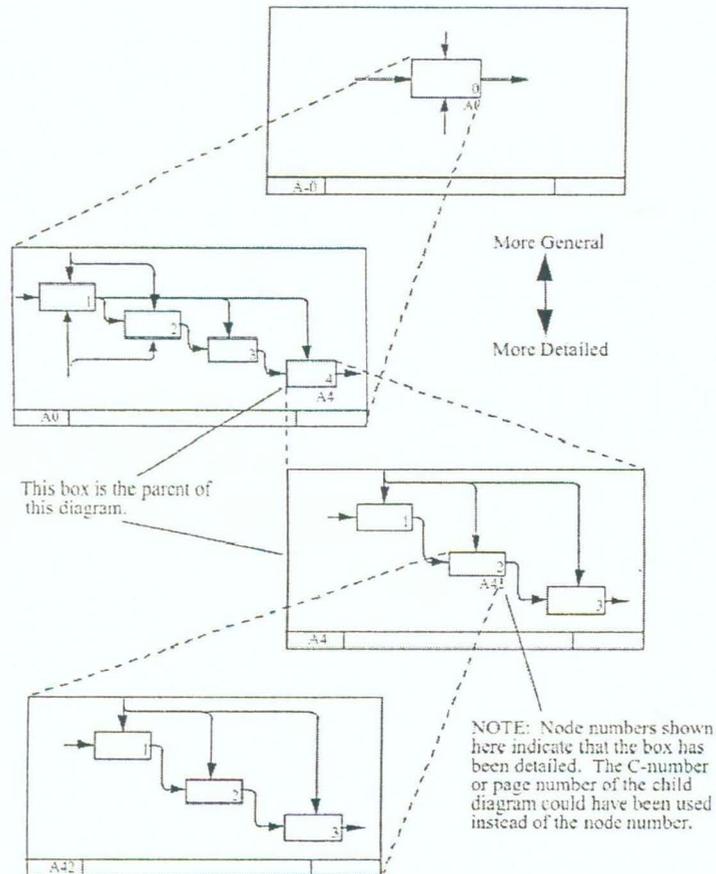


Figura 3. Descomposición de diagramas, utilizando el lenguaje de IDEF 0. Fuente: (FIPS, 1993, p. 16)

“Excepto por el diagrama de contexto, un diagrama gráfico contiene un mínimo de tres y un máximo de seis cuadros. Las cajas se organizan normalmente en diagonal desde la esquina superior izquierda a la inferior derecha, es decir, en una configuración de "escalera" (traducción propia¹⁰) (FIPS, 1993, p. 24) .

¹⁰ Texto original: Except for the single-box A-0 context diagram, a graphic diagram contains a minimum of three and a maximum of six boxes. Boxes are normally organized diagonally from the upper left corner to the lower right, i.e., in a "staircase" configuration.

¿Cómo es el proceso de toma de decisiones en la Armada Nacional?

Para dar respuesta al interrogante de ¿cómo es el proceso de toma de decisiones en la Armada Nacional?, fue preciso limitar el ámbito de aplicación, el cual, está orientado a la adquisición, reemplazo y mantenimiento de unidades a flote. Para tal fin, el grupo de trabajo se remitió a la Jefatura de Material de la Armada Nacional, jefatura responsable de estos procesos.

Por lo tanto y de acuerdo con la información suministrada por los Directores de Mantenimiento e Ingeniería Naval, los procesos de toma de decisiones dependen de la incertidumbre y a la forma de enfrentarse a ella; una manera de optimizarla es eliminándolas aplicando técnicas que puedan identificar las causas raíz de los problemas, consecuencias, probabilidades de que ocurra nuevamente, conociendo así los riesgos y mejorando la posibilidad cuando se repita. La Armada Nacional no ha sido ajena a el fenómeno. La Armada Nacional no está libre del fenómeno de la incertidumbre, en ese sentido Bolado & Ibáñez (1998) indican los siguiente:

Muchas veces la solución a un problema técnico no es inmediata por diversos motivos, por ejemplo porque no se conoce el modelo teórico aplicable al mismo o porque los datos necesarios para ejecutar esos modelos no están disponibles en el momento en que se necesitan (p. 11).

En consecuencia, la Armada Nacional utiliza principalmente el proceso para la toma de decisiones llamado multi-criterio.

La metodología del proceso de toma de decisiones multi-criterio está orientada a:

...procesos que involucran diseñar la mejor alternativa, o seleccionar la mejor de un conjunto de alternativas, teniendo en cuenta todos los criterios, seleccionando la mejor alternativa a través de modelos de preferencia. Por lo tanto se desarrolla la evaluación de

múltiples criterios y en el proceso participan un grupo interdisciplinario (Gómez at aíl, 2013, p. 24).

En el mismo sentido, (Morales Flores, 2011) en su tesis doctoral, hace referencia al procesos de toma de decisiones multicriterio e indica que “la mecánica de aplicación es relativamente simple: 1) descomponer el problema; 2) realizar juicios comparativos; y 3) sintetizar los resultados” (p. 23).

Cuando se habla de un grupo interdisciplinario, se está hablando básicamente del juicio de expertos, el cual consiste “básicamente, en solicitar a una serie de personas la demanda de un juicio hacia un objeto, un instrumento, un material de enseñanza, o su opinión respecto a un aspecto concreto” (Cabero & Llorente, 2013, p. 14). Entre los expertos con que la Armada Nacional cuenta, se encuentran los señores oficiales que en su mayoría aportan sus juicios a partir de la experiencia obtenida a través de los años en los diferentes cargos que han ocupado. No hay un número determinado de los expertos que deben participar en un proceso de toma de decisiones, inclusive, en la literatura consultada no se encontró un número ideal para la conformación de dicho grupo interdisciplinario.

Igualmente, los procesos de juicio de expertos también presentan una serie de inconvenientes que pueden dificultar la objetividad en dicho proceso, (Bolado & Ibañez, 1999) indican los siguiente:

1. Necesitan un alto nivel de recursos. El nivel de recursos requerido es mayor, desde luego, que, en un proceso informal, debido esencialmente a los costes de diseño e implantación del proceso y a la alta demanda de documentación.
2. Necesitan mayor tiempo para el proceso. La participación de expertos ajenos a la organización interesada en realizar el estudio supone un mayor tiempo que el

necesario para desarrollar un proceso informal con personal propio.

3. Presentan menor flexibilidad. La formalización hace que se reduzca la flexibilidad del proceso, siendo bastante difícil la implantación de cambios durante su desarrollo (p. 21).

Por lo tanto y de acuerdo a lo anterior, los procesos de toma de decisiones que involucran el juicio de expertos, tienen un componente importante de subjetividad, además de la dependencia de la experticia y experiencia de los expertos.

Por otro lado, existe un elemento adicional que influye o tiene un impacto importante en los procesos de tomas de decisiones, es el relacionado con la legislación de contratación del país, es decir la Ley 80 de 1993 y sus decretos reglamentarios. Es así, como a través de la Ley 1474 del 2011 en su artículo número 88 que a la letra reza:

La oferta más favorable será aquella que, teniendo en cuenta los factores técnicos y económicos de escogencia y la ponderación precisa y detallada de los mismos contenida en los pliegos de condiciones o sus equivalentes, resulte ser la más ventajosa para la entidad, sin que la favorabilidad la constituyan factores diferentes a los contenidos en dichos documentos. En los contratos de obra pública, el menor plazo ofrecido no será objeto de evaluación. La entidad efectuará las comparaciones del caso mediante el cotejo de los ofrecimientos recibidos y la consulta de precios o condiciones del mercado y los estudios y deducciones de la entidad o de los organismos consultores o asesores designados para ello.

En los procesos de selección en los que se tenga en cuenta los factores técnicos y económicos, la oferta más ventajosa será la que resulte de aplicar alguna de las siguientes alternativas:

- a) La ponderación de los elementos de calidad y precio soportados en puntajes o fórmulas señaladas en el pliego de condiciones; o
- b) La ponderación de los elementos de calidad y precio que representen la mejor relación de costo-beneficio para la entidad (Congreso de la República, 2018).

Lo anterior, prácticamente dicta que en un proceso de contratación se debe adjudicar el contrato a la parte o proveedor que adicional al cumplimiento de los requisitos técnicos mínimos, sea la oferta más económica.

Lo anterior, ha traído enormes dificultades en muchas ocasiones, debido a que en la formulación de las especificaciones técnicas del bien a contratar, no se tienen en cuenta elementos adicionales que, al ser incluidos en el análisis para la toma de decisiones, puede inclinar la balanza hacia la alternativa u oferta más conveniente para la Institución; evitando caer en el viejo y reconocido refrán popular de que lo barato sale caro.

Dentro de esos elementos adicionales se encuentran los siguientes:

- Análisis del costo del ciclo de vida.
- Infraestructura para el soporte del componente, equipo o sistema a adquirir.
- Desempeño del componente, equipo o sistema a adquirir en determinadas condiciones ambientales.
- Cumplimiento de la misión o tarea del componente, equipo o sistema a adquirir.
- La disponibilidad del componente, equipo o sistema a adquirir, a lo largo de su ciclo de

vida.

Etc.

A pesar de que la Jefatura de Material tiene conciencia de los elementos adicionales que se mencionan arriba, no cuenta con las herramientas para efectuar dichos cálculos. Solo a partir del 2016, la Jefatura de Material ha construido el procedimiento para el análisis del costo del ciclo de vida de un activo, lamentablemente, el procedimiento se encuentra en periodo de socialización con todos los miembros de la Institución.

Así mismo, a través de la Dirección de Mantenimiento se está fortaleciendo el proceso de registro de información de operación y mantenimiento de los diferentes activos con los que cuenta la Armada Nacional, en el Sistema de Información Logística SILOG, con el fin de obtener toda la data de falla de los componentes, equipos o sistemas para las condiciones especiales en las que trabajan.

La ausencia de herramientas para calcular e integrar todos los elementos y variables que afectan componente, equipo o sistema, prácticamente deja a la Institución a la merced de la información que quieran suministrar los oferentes en un proceso de contratación, siendo en la mayoría de las veces insuficiente, para el soporte adecuado de unas especificaciones técnicas.

De lo anterior, surge la necesidad de construir una metodología que soporte el proceso de toma de decisiones en la Institución.

Metodología propuesta

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a través de la metodología IDEF 0, orientada al desarrollo de la herramienta que va a fortalecer el proceso de toma de decisiones aplicada en la Armada Nacional.

Diagrama de contexto (A0)

El diagrama de contexto de alto nivel (A0), presenta de manera general las salidas, entradas, controles y recursos principales involucrados en el análisis de modelación y simulación, ver Figura 4).

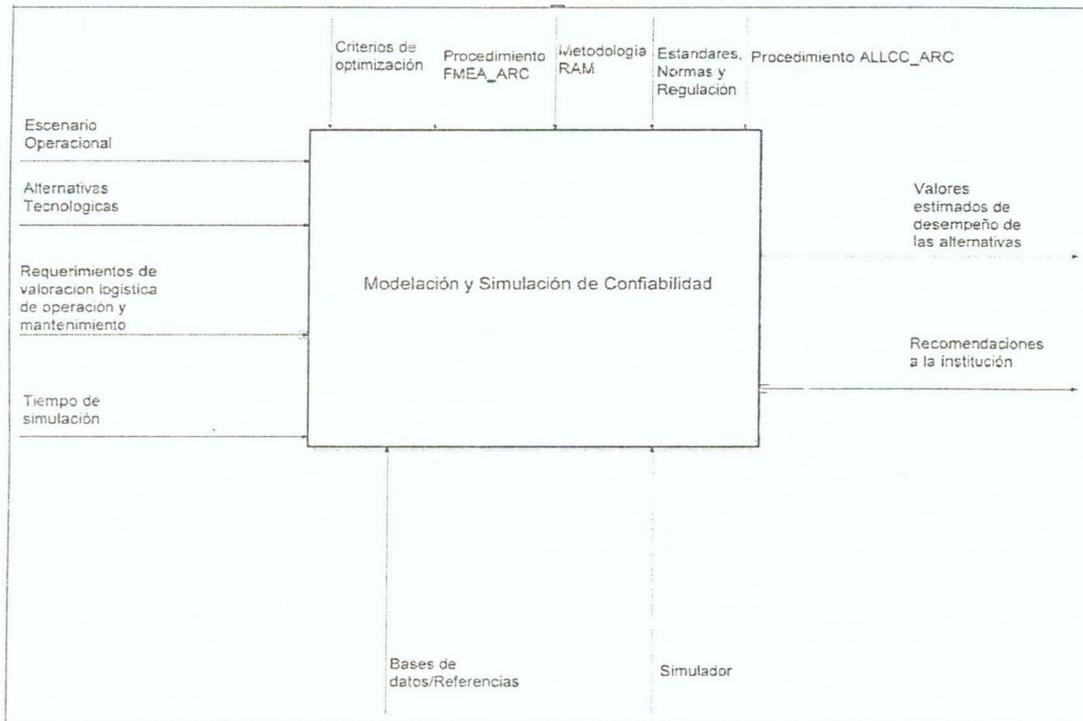


Figura 4. Diagrama de Contexto de Alto Nivel (A0). Fuente: Elaboración propia

Descripción de las entradas. De acuerdo lo anterior, la información requerida (entradas) para dar inicio a la metodología propuesta, son: los escenarios operacionales, las alternativas tecnológicas, los requerimientos de valoración logística, de operación y mantenimiento y finalmente el tiempo de simulación. A continuación, se explica brevemente lo que significa cada uno de ellos:

Los escenarios operacionales, no es más que la información relacionada con la descripción de las condiciones operacionales a las cuales se verá sometida la alternativa

tecnológica, tales como el tipo de misión, modos de operación y las condiciones ambientales, etc.

En el caso de una unidad a flote, establece las condiciones a las que se va enfrentar la misma, es así que, al tener situaciones de trabajo operacional adversos, estos determinarán las características y perfiles de resistencia, durabilidad y robustez que deben tener los diferentes grupos constructivos del buque y si los equipos o sistemas deben ser redundantes para que cumpla las funciones o misiones para lo cual se requiere el artefacto así como los datos del comportamiento del equipo y los requerimientos del equipo cuando está operando, como combustible, repuestos, reparaciones, mano de obra, entre otros.

El Estándar Militar del Departamento de Defensa de los Estados Unidos número 1629A, con referencia a las funciones de la misión y modos de operación, indica lo siguiente: “la definición del perfil de la misión debe incluir descripciones de cada misión en términos de funciones que identifican la tarea que se realizará y el modo de operación de la función específica” (traducción propia ¹¹) (US Department of Defense, 1980, p. 20). Por ejemplo, se requiere realizar operaciones de patrullaje e interdicción marítima hasta condiciones de mar 3, para la interdicción, se requiere alcanzar velocidades superiores a 40 nudos. Ese sería un escenario operacional.

Por otro lado, la entrada correspondiente a alternativas tecnológicas hace referencia a las propuestas que encontramos en el mercado u ofrecen los proponentes, básicamente son los equipos, sistemas o unidades con los cuales se espera atender de manera eficiente el escenario u escenarios operacionales requeridos. Las alternativas consideradas, deben ser analizadas minuciosamente, porque en el caso de los medios militares, estos deben cumplir estándares y características únicas, propias de su rol, por ello su diseño debe ser robustos y en muchos casos

¹¹ Texto original: Definition shall include descriptions of each mission in terms of functions which identify the task. to be performed and the functional mode of operation for performing the specific function.

trabajan de manera redundante, que puedan desarrollar su función en ambientes con mayores complejidades y con mejores parámetros. Continuando con el ejemplo anterior, la Armada Nacional para atender el escenario descrito anteriormente, encontró en el mercado dos propuestas interesantes, la primera es un bote con casco de fibra de vidrio y dos motores fuera de borda marca X y la segunda, es un bote con casco de aluminio con un motor dentro-fuera marca Y. Los dos botes propuestos, serían las alternativas tecnológicas.

Los requerimientos de valoración logística, de operación y mantenimiento están orientados a la identificación de aquellas demandas, limitaciones y factores excluyentes que tendría la Institución para mantener y soportar la alternativa tecnológica. Por ejemplo, en el caso hipotético que la Institución estuviera interesada en adquirir botes patrulleros de aluminio por motivos operacionales ya adecuadamente sustentados, la Armada Nacional debe considerar que se permita una integración logística de soporte, adicionalmente para su mantenimiento se requiere también, adquirir la capacitación y los equipos especiales para realizarlo, toda vez que, en la actualidad no se tiene esa capacidad (en el caso que eso fuera cierto); estas inversiones adicionales para operar y mantener los botes, son requerimientos propios que la Institución debe considerar, antes de adquirir los botes patrulleros en sí.

La última entrada, es el tiempo de simulación, la cual, no es más que el periodo de tiempo que la Institución espera utilizar la alternativa tecnológica en el escenario operacional definido.

Descripción de las salidas. Dentro las salidas de la metodología propuesta se presentan dos principalmente: los valores de desempeño de las alternativas y las recomendaciones a la Institución. Estas salidas, están alineadas con los beneficios de la aplicación de una metodología RAM para la toma de decisiones, que no es más que, la presentación de los resultados de una

forma cuantitativa, de tal manera que, se permita reducir la subjetividad de las decisiones al máximo, con el fin que las mismas, sean basadas principalmente en el cumplimiento operacional, es decir en el cumplimiento de la misión y la proyección costo del ciclo de vida desglosado en sus principales elementos (CAPEX -Capital Expenditure, OPEX-Operational Expenditure y REX-Risk Expenditure).

Con referencia al costo del ciclo de vida de un activo, NATO (2009) la define como el “proceso de recopilación, interpretación y análisis de datos y la aplicación de herramientas cuantitativas y técnicas para predecir los recursos futuros que se requerirán en cualquier etapa del ciclo de vida de un sistema de interés”. El resultado de este proceso incluye los costos de adquisición, operación, mantenimiento, desmantelamiento, entre otros.

Por otro lado, las recomendaciones a la Institución pueden surgir en cualquier etapa de la metodología, y usualmente están orientadas a la optimización del empleo de determinada alternativa tecnológica en el escenario operacional definido, por ejemplo, una recomendación a la Institución en el caso de los botes de guardacostas referidos anteriormente, puede ser que los botes de fibra de vidrio con los dos motores de borda marca X no deben utilizarse a máxima revoluciones por un periodo superior W horas, considerando el incremento exponencial del consumo de combustible, impactando directamente en el costo del ciclo de vida del mismo. Los hallazgos encontrados durante el análisis, se consideran como parte de las conclusiones de la metodología, y que son la recomendación final del estudio realizado.

Descripción de los controles. Como fue referido anteriormente, los controles hacen referencia a las condiciones requeridas para producir un resultado adecuado. En ese sentido y para el caso que nos ocupa, los controles que fueron tenidos en cuenta, son los siguientes:

- Criterios de optimización o requisitos para la mejora o análisis de los procesos.

- Procedimientos FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) de la Armada Nacional, para ayudar a identificar los modos de falla de los diferentes componentes, equipos o sistemas.
- Estándares, regulaciones y normas, las cuales consisten en las guías o reglas vigentes que soporten la viabilidad del proceso.
- Procedimiento LCC (Life Cycle Costing) de la Armada Nacional, para guiar los análisis del costo del ciclo de vida de las alternativas analizadas.
- La propia metodología RAM que se está desarrollando, para evaluar las diferentes opciones y sirva como guía comparativa durante todo el proceso.

Descripción de los recursos. Como fue mencionado anteriormente, los recursos hacen referencia a los medios usados para realizar o ejecutar la función. Para la presente metodología, los recursos considerados fueron los siguientes:

- La propia metodología RAM que se está desarrollando, para evaluar las diferentes opciones y sirva como guía comparativa durante todo el proceso.
- Simulador, hace referencia a la herramienta computacional que desarrollará los cálculos complejos y entregará la información necesaria para la realización de los análisis respectivos.

Diagrama de flujo actividades desarrollo análisis RAM (A1)

La Figura 5 representa de manera general las diferentes etapas o pasos que deben ser seguidos en la metodología para la simulación RAM. En ese sentido se han definido cuatro grandes actividades, a saber: exploración operación y técnica de las alternativas tecnológicas y especificación del modelo y la modelación de confiabilidad.

Exploración operacional de las alternativas. Lo que se busca en esta actividad es confrontar de una manera general cada una de las alternativas frente al o a los escenarios operacionales que fueron definidos. En este respecto, el Departamento de Defensa de los EE.UU dice lo siguiente:

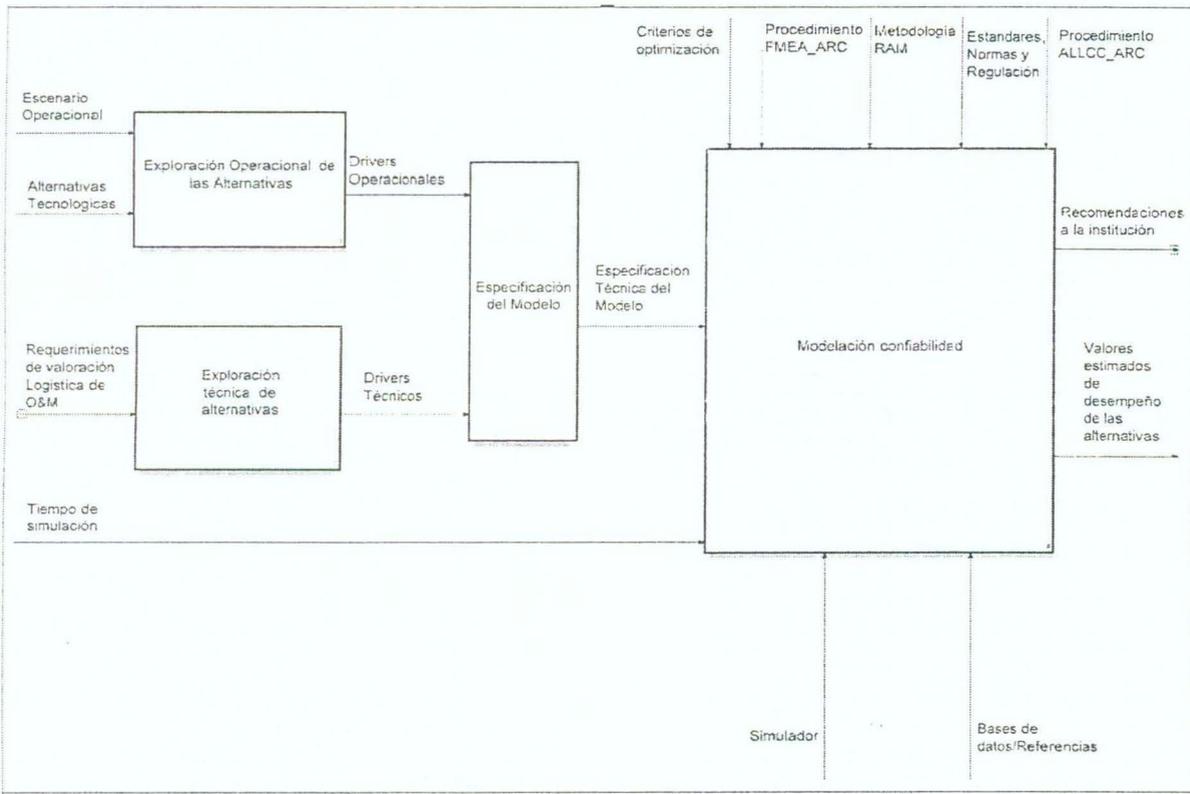


Figura 5. Diagrama de Flujo actividades desarrollo análisis RAM (A1). Fuente: Elaboración propia

Los Perfiles Ambientales son las condiciones ambientales anticipadas para cada misión. Cuando se utilizará un sistema en más de un entorno, cada perfil ambiental diferente se debe describir, así como, el uso previsto a través del tiempo del sistema y sus equipos a

partir de los estados de tiempo (meteorología y medio ambientales) de la misión para cada perfil. La cantidad de uso del entorno de tiempo se usa para determinar las relaciones de tiempo-estrés y la viabilidad de la detección de modos de fallas y disposiciones de compensación en el sistema operativo (traducción propia ¹²) (US Department of Defense, 1980, p. 22).

Continuando con el caso de los botes de guardacostas, en esta exploración nos interesaría saber si los botes propuestos técnicamente podrían cumplir con los requerimientos operacionales en las condiciones ambientales definidas en el escenario operacional. Como resultado de esta exploración, vamos a obtener los drivers operacionales que no son más que la transformación de los elementos operacionales en información técnica, que contribuye a la construcción del modelo.

Exploración técnica de las alternativas. Esta actividad hace referencia al nivel en el cual se encuentra la Armada Nacional para atender cualquiera de las alternativas tecnológicas. El resultado de esta exploración son los drivers técnicos, que producto del análisis nos mostrará las limitaciones logísticas y técnicas que tiene la organización; por ejemplo, el personal de mantenimiento de guardacostas cuenta con las competencias para atender los diferentes niveles de mantenimiento de los motores marca X o marca Y, cuentan con las herramientas y equipos necesarios para adelantar las mismas.

Para entender mejor la actividad de exploración ya sea operacional o técnica podemos tomar como reseña los buques tipo OPV, estas unidades pueden estar expuestas a un ambiente

¹² Texto Original: Environmental profiles. The environmental profiles which present the anticipated environmental conditions for each mission and mission phase shall be defined. When a system will be utilized in more than one environment each different environmental profile shall be described. The intended use, through time, of the system and its equipment shall be developed from the mission time statements for each environmental profile. The use time-environment phasing is used in determining the time-stress relationships and the feasibility of failure detection methods and compensating provisions in the operating system.

operacional adverso por largo tiempo en mares de nivel 4 y 5, lo cual genera desajustes, vibraciones y daños que implican mantenimientos de nivel 1 y 2 por la falta de una automatización que informe al instante de ocurrir las primeras fallas que son fáciles de corregir, al no tener esta tecnología ni el presupuesto para que una vez lleguen a puerto se realicen los mantenimientos, Por ello las tripulaciones se deben aumentar para realizar los trabajos requeridos y por lo tanto se debe ajustar la dotación y la habitabilidad del buque, lo que aumentará su calado y la resistencia al avance, por consiguiente se reduce la velocidad frente a la potencia aplicada y aumenta el consumo de combustible para mantener la velocidad requerida para el tipo de misión, obteniendo como resultado la reducción de la autonomía del buque, siendo una característica de la alternativa tecnológica.

En el caso anterior los drivers técnicos luego del análisis serían la automatización, el aumento de la tripulación y del peso extra que estos aportan y que afectan el calado; la resistencia al avance y la potencia requerida del motor para garantizar la velocidad son los drivers operacionales, en vista que afectan directamente el desempeño de la unidad en el ámbito operacional.

Especificación del modelamiento. Dentro de la especificación del modelamiento, se desarrolla la planeación del modelo a partir de los drivers técnicos y operacionales a través de información cuantitativa entregada por los mismos. Es información a un nivel general de ratas y modos de falla, cantidades de horas operacionales, OPEX, CAPEX y REX, etc.

Por otro lado, desde el punto de vista legal en los procesos de adquisición de equipos o sistemas, se sugiere que se consignen los requerimientos que sirvan para alimentar los bloques de información a modelar y a simular, tal como, se expone en el estándar militar número 1629 del Departamento de Defensa de Estados Unidos

El contratista deberá aportar información general de lo que constituye una falla del artículo en términos de parámetros de rendimiento y límites permisibles, para cada producto específico. Las definiciones de falla se incluirán en las reglas básicas presentadas con el plan FMECA. Las declaraciones generales del contratista no deberán entrar en conflicto con las definiciones de falla especificadas por la actividad de compra (traducción propia)¹³ (US Department of Defense, 1980, p. 102).

Modelación de confiabilidad. Por la importancia que representa la modelación de la confiabilidad, se realizó un desglose adicional de esta actividad, por lo tanto, va a ser descrita a continuación.

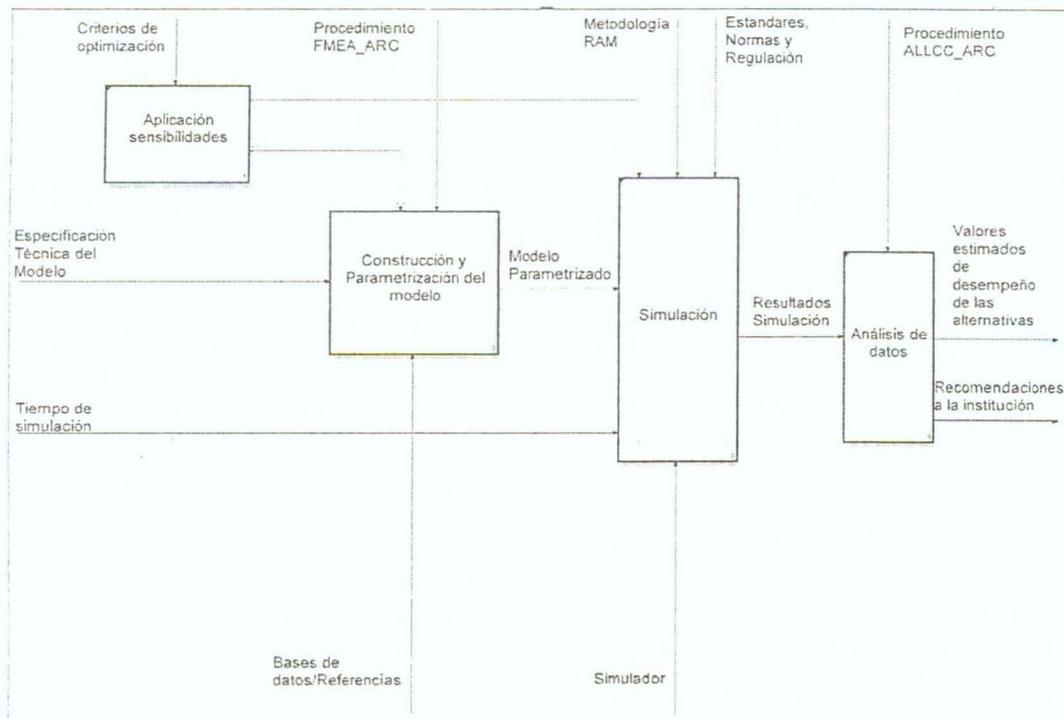


Figura 6. Modelación de Confiabilidad. Fuente: Elaboración propia.

¹³ Texto Original: The contractor shall develop general statements of what constitutes a failure of the item in terms of performance parameters and allowable limits for each specific output. Failure definitions shall be included in the ground rules submitted with the FMECA plan. The contractor's general statements shall not conflict with any failure definitions specified by the procuring activity.

Modelación de confiabilidad (A2)

Una vez se obtienen las especificaciones técnicas de lo que se va a modelar, se procede a realizar la modelación de confiabilidad de estas.

De acuerdo a lo anterior, se ha definido el diagrama “Modelación de Confiabilidad”, el cual, ha sido diseñado con cuatro grandes actividades (ver Figura 6): construcción y parametrización del modelo, la aplicación de sensibilidades, la simulación y el análisis de datos.

Construcción y parametrización del modelo (A2.1)

En esta etapa de la metodología, se pretende entregar un modelo parametrizado de cada una de las alternativas en estudio, con el fin de realizar la respectiva simulación. Por tal motivo, esta gran actividad fue desagregada en otras cuatro subactividades (ver Figura 7), las cuales son: la definición funcional, el análisis de los modos de falla, la construcción del modelo y la parametrización del mismo. A continuación, se describen cada una.

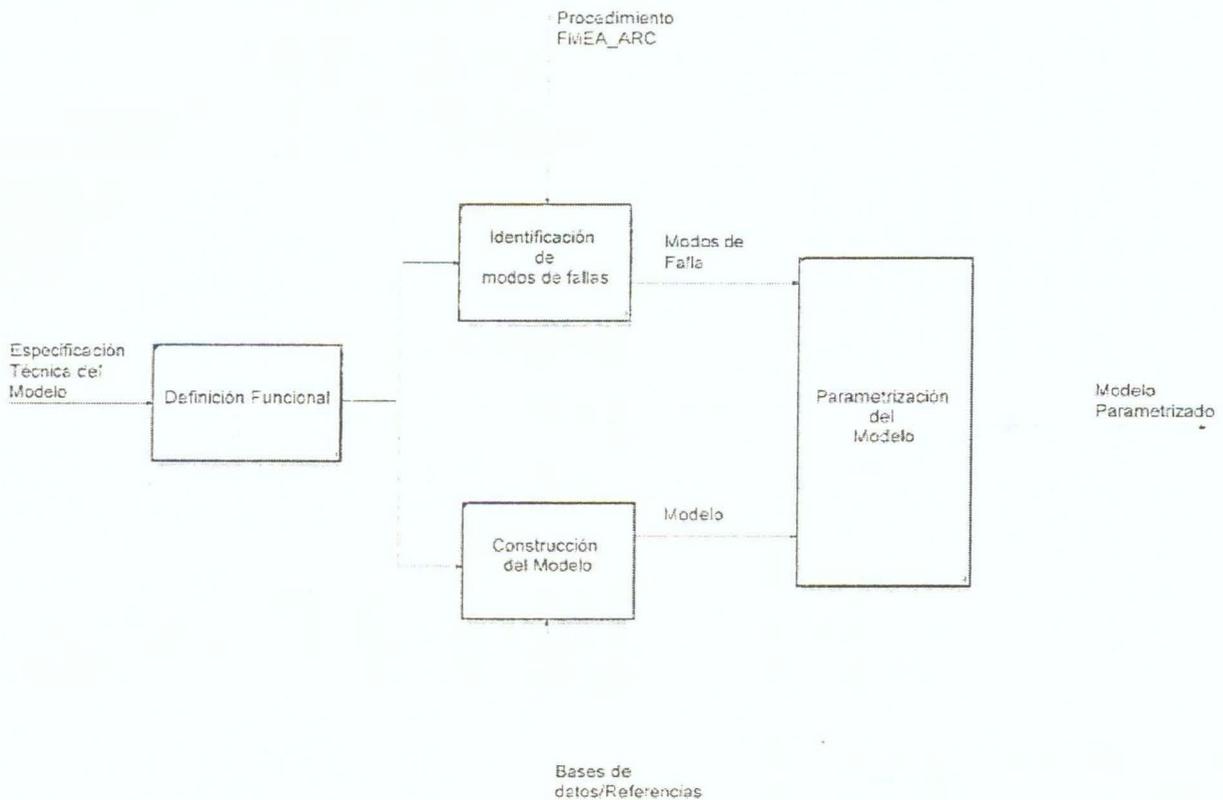


Figura 7. Construcción y parametrización del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Definición funcional. La definición funcional hace referencia a la identificación de esos elementos o componentes que son importantes e imprescindibles para que el equipo, sistema o unidad, pueda cumplir con la misión encomendada. Por ejemplo y para el caso de los botes de guardacostas, la definición funcional considera el bote, los motores y los sistemas de navegación y comunicación.

Identificación de los modos de falla. La identificación de los modos de falla, es una parte del análisis de modos y efectos de falla (FMEA - por sus siglas en inglés Failure Mode and Effect Analysis). El estándar militar 1629A del Departamento de Defensa de los EE.UU, define el FMEA como “un procedimiento mediante el cual se analiza cada modo de falla potencial en un sistema, para determinar los resultados o efectos de los mismos en el sistema, y para clasificar

cada modo de falla potencial de acuerdo con su gravedad” (traducción propia ¹⁴) (U.S. Department of Defense, 1977, p. 4). Así mismo, se evalúan elementos de alto riesgo y las actividades en curso para proporcionar acciones correctivas.

Sin embargo y como fue mencionado anteriormente, para el caso específico de esta metodología, solo se requiere identificar los modos de falla de cada alternativa. El procedimiento FMEA de la Armada Nacional de Colombia, indica que un modo de falla “es la manera como se manifiesta (o hace evidente) la falla. Un modo de falla da respuesta a la pregunta ¿qué pasa cuando una falla funcional ocurre?” (ARC, 2016, p. 11). Ejemplos de modo de falla, pueden ser apreciados en la siguiente tabla.

Tabla 1.

<i>Función</i>	<i>Modo de Falla</i>
<i>Bombear</i>	<i>Pérdida de Presión</i>
<i>Calentar</i>	<i>No regula</i>
<i>Refrigerar</i>	<i>Alta temperatura</i>
<i>Contener</i>	<i>Fuga</i>

Ejemplos de modo de falla. Fuente: ARC, 2016, p. 11

En consecuencia, en esta actividad se requiere identificar todos los posibles modos de fallo de elementos e interfaces; definir su efecto en la función o elemento inmediato, en el sistema y en la misión que se realizará.

Construcción del modelo. Esta actividad, consiste en construir representaciones de las diferentes alternativas que se desea analizar, a través de técnicas o métodos que sirvan bien a este propósito.

¹⁴ Texto original: A procedure by which each potential failure mode in a system is analyzed to determine the results or effects thereof on the system and to classify each potential failure mode according to its severity.

Los modelos, ilustran de una manera concisa, la operación, las interrelaciones y las interdependencias de las entidades funcionales de un sistema, así mismo, presentan el sistema como un desglose de sus principales funciones; muestran los modos alternativos de operación dependiendo de la definición establecida para el sistema.

En general, para la presente metodología se proponen dos métodos principalmente, los diagramas de bloque de confiabilidad (RBD) y el análisis del árbol de falla (FTA) por sus siglas en inglés (Fault Tree Analysis).

El diagrama de bloques de confiabilidad, no es más que una combinación de componentes básicos que describe la función del sistema. Cada componente del sistema es representado por un rectángulo, cuando el componente trabaja (está en servicio), se dice que la conexión entre los puntos a y b está establecida (ver *Figura 8*).

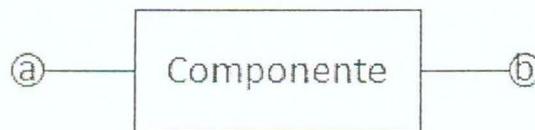


Figura 8. Representación básica RBD. Fuente: Elaboración propia.

El método de diagrama de bloques de confiabilidad tiene dos configuraciones principalmente, en serie y en paralelo. En serie, el sistema trabaja si todos los componentes trabajan (están en servicio), ver *Figura 9*.



Figura 9. Configuración en serie de un RBD. Fuente: Elaboración propia.

Y en paralelo, si al menos uno de sus componentes trabaja (está en servicio), el sistema o equipo trabaja, ver Figura 10.

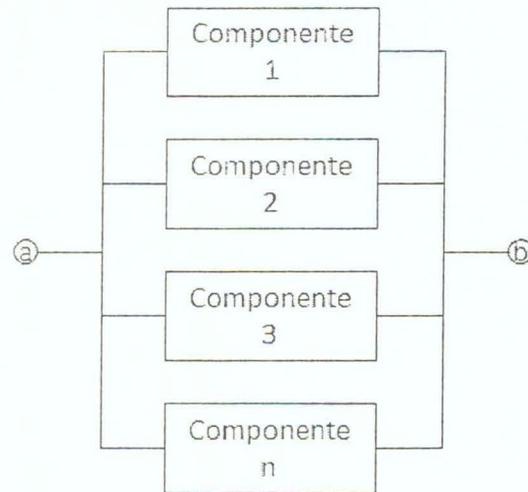


Figura 10. Configuración en paralelo de un RBD. Fuente: Elaboración propia.

Del mismo puede existir configuraciones mixtas, las cuales combinan los arreglos en paralelo y en serie (estas combinaciones son las más usuales en los sistemas).

El U.S. Department of Defense (1977) en su Estándar Militar 1629A, indica como es esa dependencia e interdependencia entre las diferentes componentes que constituyen un diagrama de bloques de confiabilidad, así:

Un diagrama de bloque de confiabilidad define la dependencia o independencia de la serie de todas las funciones de un sistema o grupo funcional para cada evento del ciclo de vida. El diagrama de bloques de confiabilidad proporcionará la identificación de interdependencias de funciones para el sistema (traducción propia¹⁵) (p. 22).

¹⁵ Texto original: A reliability block diagram defines the series dependence or independence of all functions of a system or functional group for each life-cycle event. The reliability block diagram will provide identification of function interdependencies for the system.

Finalmente, como resultado de esta actividad se tendrá un modelo, el cual se constituye en la principal entrada para la parametrización del mismo.

Parametrización del modelo. Una vez construido el modelo y conocidos los diferentes modos de falla, el siguiente paso es su parametrización.

En la parametrización del modelo, se hace referencia a la definición de las diferentes patologías que están asociadas con los equipo o componentes que conforman el sistema, “la forma en que se observa una falla, describe la forma en que ocurre la falla y su impacto en el funcionamiento del equipo” (RAC, 1993, p. 6). Tales patologías, son usualmente identificadas con base en la información histórica o referentes relacionados con el equipo o componente particular. Del mismo modo, “cuanto más precisa es la función, más fácil es identificar modos de falla potenciales para la acción preventiva / correctiva” (traducción propia ¹⁷) (SAE, 2009, P. 7).

Para cada modo de falla creado, se deberá definir la información que describa que tan frecuentemente se puede esperar que dicho modo de falla se presente, que tan complejo se espera que se pueda restituir la funcionalidad del equipo, e incluso que recursos de mantenimiento pueden ser requeridos para llevar a cabo dicha restitución.

De acuerdo lo anterior, se espera que cada equipo o componente, adopte la “personalidad” o el “comportamiento” de ese elemento de la vida real, que pretende representar.

Aplicación de sensibilidades. La aplicación de sensibilidades no es más que la identificación de aquellos parámetros que al ser introducidas ciertas variaciones, pueden tener un impacto importante en el resultado una vez se es simulado el modelo, por ejemplo: si hay una modificación importante en el precio del dólar como va a impactar el LCC de la alternativa analizada, o si por otro lado, analizamos la alternativa en los diferentes escenarios operacionales

¹⁷ Texto original: The more precise the function, the easier it is to identify potential failure modes for preventive/corrective action.

a los cuales se verá sometida, identificando cuáles van a ser sus valores de desempeño en cada uno.

Simulación. Una vez obtenido el modelo parametrizado, el siguiente paso es la simulación. La simulación hace referencia al uso de una herramienta computacional que permita representar y analizar el comportamiento de ese modelo parametrizado; “a medida que aumenta la complejidad de un modelo (por ejemplo, como reparaciones, utilización de recursos, rendimiento, mantenimiento preventivo, inspecciones y otros factores que deben considerarse), la simulación se convierte rápidamente en el único enfoque viable” (traducción propia ¹⁸) (Reliasoft, 2009). Así mismo, la simulación permite evaluar un sistema en diversas condiciones sin necesidad de interrumpirlo.

Cada componente responde al paso del tiempo de acuerdo con su configuración, generando los respectivos eventos de falla o de deterioro de su capacidad, de ahí, la importancia de la parametrización, si fue realizada apropiadamente, el deterioro del comportamiento del equipo (componente o sistema) simulado, corresponderá al que tendría en la vida real. Por lo tanto, “la simulación evalúa los índices de confiabilidad en forma indirecta por medio de técnicas numéricas” (Zapata, 2011, p. 9).

Por otro lado, es muy importante definir el número de simulaciones que van a ser realizadas. Lo anterior, estará directamente relacionado con los resultados esperados.

Análisis de datos. De la simulación, pasamos a la última actividad de la metodología, el análisis de datos. Como se presentó anteriormente, la simulación se encarga de generar una gran cantidad de información, sin embargo, esta información requiere ser analizada estadísticamente, o evento por evento, permitiendo generar estimados respecto del desempeño esperado del

¹⁸ Texto original: As the complexity of a model increases (e.g. as repairs, resource utilization, throughput, preventive maintenance, inspections and other factors are to be considered), simulation quickly becomes the only feasible approach.

sistema, ofreciendo valoraciones cuantitativas directas entre el desempeño de cada una de las opciones técnicas o logísticas que se valoran y generando recomendaciones a la Institución.

Herramientas computacionales que apoyan la metodología RAM

Para el soporte de la presente metodología, es preciso el uso de herramientas computacionales (HC), que ayuden al proceso de construcción del modelo, parametrización y posteriormente a la simulación. En ese sentido hay principalmente dos tipos de herramientas computacionales, unas orientadas a analizar los comportamientos base y otras orientadas a la propagación de sus efectos.

Las HC de los comportamientos base, tienen como objetivo la construcción del modelo de función de falla de determinado componente de acuerdo con información disponible, tales como, datos de fallas, distribuciones de probabilidad de falla, etc. Por otro lado, las HC orientadas a la propagación de los efectos de falla, tienen como objetivo el analizar y determinar cómo las diferentes funciones de fallas de los diferentes componentes, impactan el sistema al que pertenecen y de esta manera determinar cuál es la función de falla del sistema en sí.

Como datos de entrada de las HC para los comportamientos base, se puede recurrir de manera preliminar a la información relacionada con las fallas de los diferentes componentes o equipos, registrada en el Sistema de Información Logística de las FF.MM SAP-SILOG-Modulo de mantenimiento, la cual, puede ayudar a la elaboración de la taxonomía de las fallas. Del mismo modo, se pueden utilizar otros referentes, que de manera general también poseen información relacionada con un sinnúmero de componentes y equipos, entre estos referentes se encuentran, la base de datos militar especializada en el campo naval elaborada por el Naval Surface Warfare Center (NSWC) (NAVSEA, 2018), o en su defecto en el campo civil como la

SAIDI Electric Reliability Data y el Nonelectronic Reliability Data, la cuales son desarrolladas por el Reliability Information Analysis Center (RIAC) (Quanterion Solutions Incorporated, 2018a).

Dentro las principales HC para modelar los comportamientos base, se encuentran los siguientes:

- SuperSmith de Fulton Findings LLC (Quanterion Solutions Incorporated, 2018b), el cual básicamente toma la base de datos de fallas y permite construir el modelo en la función de falla y distribución Weibull. Este software, realiza el análisis de variabilidad para datos de ciclo de vida. Su uso se da para determinar la confiabilidad, seguridad, facilidad de mantenimiento, compatibilidad, control de calidad, aseguramiento del producto, dimensionamiento y análisis de garantía.
- Lenguaje R. Consiste en un entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico con soporte de alcance estático. Es uno de los lenguajes más utilizados en investigación por la comunidad estadística, siendo además muy popular en el campo de la ingeniería de datos. A esto contribuye la posibilidad de cargar diferentes bibliotecas o paquetes con funcionalidades de cálculo y gráficas. R proporciona un amplio abanico de herramientas estadísticas (modelos lineales y no lineales, tests estadísticos, análisis de series temporales, algoritmos de clasificación y agrupamiento, etc.) y gráficas (Briz Redón & Serrano Aroca, 2018).
- Crystal Ball de la empresa Oracle. Esta es una aplicación basada en hojas de cálculo para elaborar modelos predictivos, previsivos, simulación y optimización determinado los factores críticos que afectan el riesgo (Oracle, 2018).

- JMP de la empresa SAS, el cual permite efectuar la exploración visual de datos mediante el descubrimiento estadístico (JPM Statistical Discovery, 2018).

Por otro lado, las HC relacionadas con la propagación de efectos, se encuentran las siguientes:

- En el campo militar de defensa se encuentra el programa RAPTOR, desarrollado por la empresa Aeronautical Radio Incorporated (ARINC) (Rockwell Collins, 2018). Este programa, es útil para convertir detalles técnicos en consideraciones de costo del ciclo de vida. El sistema produce números mediante simulación usando la base de datos y no opiniones. Lo anterior, da facilidad en la toma de decisiones referentes a costos del ciclo de vida utilizando los detalles del campo de la ingeniería de confiabilidad y los procesos para llegar al costo de propiedad más bajo a largo plazo.
- ReliaSoft. Proporciona soluciones para facilitar un conjunto completo de técnicas de modelado y análisis de ingeniería de confiabilidad por diseño, tanto cualitativa como cuantitativamente, al mismo tiempo que infunde actividades de Diseño para la Confiabilidad (DFR). El análisis basado en datos, permite efectuar un enfrentamiento a las especificaciones de rendimiento. Esta herramienta, permite determinar la confiabilidad y la disponibilidad del sistema, lo que resulta en costos de operación reducidos y tiempo de inactividad no programado minimizado (Reliasoft, 2018).
- Relex del desarrollador Windchill Quality Solutions, es un software que integra un conjunto de módulos de análisis, que se pueden combinar de cualquier forma acuerdo a las necesidades. Este proporciona la base para la evaluación y el análisis de confiabilidad de los sistemas al permitir estimar la tasa de fallas de los componentes y del sistema, el Tiempo Medio de Vida entre Fallas (MTBF) y la confiabilidad al principio del proceso de diseño. Se puede

identificar a los principales contribuyentes a la falla del sistema y medir el impacto de la temperatura, el medio ambiente y el estrés en el sistema (Crimson Quality, 2018).

- Care de BQR, comprende un conjunto integrado de herramientas de software, que ofrece una solución a todos los aspectos RAMS (confiabilidad, capacidad de mantenimiento, disponibilidad y seguridad) de un producto (BQR, 2018). Este programa analiza las fallas de varios componentes y su impacto en el comportamiento operativo y la seguridad del sistema, teniendo en cuenta los elementos de redundancia y respaldo. Esta herramienta proporciona todos los análisis de confiabilidad en una plataforma integrada, que incluye los métodos tradicionales acuerdo a las normas internacionales.
- Itemsoftware. Software de confiabilidad para ingeniería, que incluye la evaluación de confiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad (RAMS) y la evaluación de riesgos (Item Software, 2018).
- Taro de la empresa DNV-GL es un software que permite realizar el análisis integral del rendimiento del ciclo de vida de toda una planta o sistema en sentido descendente. Mediante esta HC, se puede modelar complejos sistemas de plantas de procesamiento y tomar decisiones óptimas sobre diseño, operación y mantenimiento con base a un análisis de desempeño cuantitativo, lo que permite una predicción de rendimiento más precisa (DNV GL, 2018).

Conclusiones y trabajo futuro

En el presente artículo se propuso una metodología para el fortalecimiento del proceso de toma de decisiones de la Armada Nacional en lo referente a la adquisición, reemplazo, reparación y mantenimiento de unidades navales partiendo de la definición de los escenarios operacionales,

las alternativas tecnológicas para atender esos escenarios operacionales y los requerimientos de valoración logística, de operación y mantenimiento.

A continuación, se presentan las conclusiones del presente artículo y algunos de los posibles trabajos futuros que pueden continuar desarrollándose como resultado de la investigación.

Conclusiones

La metodología propuesta, como ya se explicó consta de cuatro grandes actividades, en cada una de ellas se obtiene información importante que va a alimentar a la siguiente gran actividad. La primera actividad, hace referencia a esa exploración que se debe realizar al comparar las diferentes alternativas tecnológicas con los escenarios operacionales. En la segunda actividad, también se realiza una exploración, pero esta vez técnica, en donde las alternativas tecnológicas son confrontadas con la capacidad que tiene la Institución para operar y mantenerlas. La tercera actividad, se efectúa las especificaciones del modelamiento, en donde se desarrolla la planeación del modelo a partir información cuantitativa entregada por las dos actividades anteriores. En la cuarta y última actividad, es donde se produce la modelación de confiabilidad.

El seguimiento de la metodología propuesta, sin lugar a dudas, fortalece el proceso de toma de decisiones de la Armada Nacional, fortaleciendo de paso los procesos de contratación de la misma, al considerar todos los elementos que se encuentran alrededor de componente, equipo o sistema a adquirir, que la mayoría de las ocasiones hacen la diferencia cuando son comparadas unas alternativas con otras. De igual forma, el entregable de la metodología es información relacionada con el desempeño, disponibilidad y costos del ciclo de vida del componente, equipo

o sistema de una manera cuantitativa, lo cual reduce al máximo la subjetividad, facilitando la toma de la decisión.

Así mismo, la metodología es una buena oportunidad para que todo el personal relacionado con los procesos de reparación y mantenimiento, incursionen en el mundo de la confiabilidad, fortaleciendo los procesos de registro de información y de análisis de datos en el Sistema de Información Logística de las Fuerzas Militares - SILOG.

Trabajo futuro

Como continuación de la metodología propuesta, y como en cualquier otro proyecto de investigación, quedan abiertas varias líneas de investigación, en las cuales es posible seguir trabajando. Como fue apreciado a lo largo del documento, la metodología fue desarrollada de una manera general haciéndose un hincapié importante en las actividades de la modelación de la confiabilidad. Sin embargo, cada gran actividad puede continuar desarrollándose hasta el nivel que se quiera, es decir, las actividades de exploración operacionales y técnica, la especificación del modelamiento, e inclusive, las propias actividades de la modelación de confiabilidad pueden desglosarse aún más, facilitando la comprensión de la metodología en todos los niveles de la Institución.

Finalmente, y con el fin de fortalecer los procesos de contratación, se debe considerar la implementación de la presente metodología en lo referente a la adquisición de equipos, componentes y sistemas para la Armada Nacional.

Referencias

- AFWAL. (1981). *Integrated Computer-Aided Manufacturing (Icam), Iv - Funct.*
- Amendola, L. (2003). Indicadores de confiabilidad propulsores en la gestión del mantenimiento. *Estudio Sobre Incluir Indicadores de Mantenimiento*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 1–4. Recuperado de [http://www.mantenimientoplanificado.com/Articulos/gesti?n mantenimiento_archivos/indicadores confiabilidad amendola.pdf](http://www.mantenimientoplanificado.com/Articulos/gesti%20n%20mantenimiento_archivos/indicadores%20confiabilidad%20amendola.pdf)
- ARC. (2016). Procedimiento de análisis de modos y efectos de falla - FMEA. Bogotá.
- ASQ. (2018). Quality Glossary | ASQ. Recuperado de May 8, 2018, from <https://asq.org/quality-resources/quality-glossary/>
- Bolado, R. I. J. Iantaron A. (1999). *El Juicio de Expertos*. Recuperado de <http://www.csn.es>
- BQR. (2018). CARE® Reliability Software | Mean Time Between Failures. Recuperado de August 9, 2018, from <https://www.bqr.com/care/>
- Briz Redón, Á., & Serrano Aroca, Á. (2018). Educación matemática. *Educación matemática*, ISSN 1665-5826, Vol. 30, N.º. 1, 2018, págs. 133-162 (Vol. 30). Editorial Santillana.
- Cabero, J., & Llorente, M. (2013). La aplicación del juicio de experto como técnica de evaluación de las tecnologías de la información y comunicación (TIC). *Revista de Tecnología de Información Y Comunicación En Educación*, 7(2), 11–22. Recuperado de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/educacion/eduweb/v7n2/art01.pdf>
- Congreso de la República. (2018). Ley 1474 del 2011.
- Crimson Quality. (2018). Relex – Reliability Management Software - PTC.
- DNV GL. (2018). Chemical process software | Petrochemical plant process solutions - Taro. Recuperado de August 13, 2018, from <https://www.dnvgl.com/services/chemical-process-software-and-petrochemical-plant-process-solutions-taro-1176>

- Escalona, T. (2016). Tipos de Metodología de la Investigación – Cómo Hacer una Metodología | aprenderLyX. Recuperado de August 7, 2018, from <http://aprenderlyx.com/tipos-de-metodologia-de-investigacion/>
- FIPS. (1993). Integration Definition For Function Modeling (IDEF0), *IV*(June 1981).
- Genta, R. N. (n.d.). Introducción al Apoyo Logístico Integrado (ILS) La nueva herramienta para lograr la Optimización de un Diseño Militar .
- Gómez, J., Aranibar, L., & Delgado, C. (2013). *Desarrollo de un Marco de Evaluación de Alternativas Como Base Para el Diseño Conceptual de la Plataforma Estratégica de Superficie (PES) para la Armada Nacional de Colombia*. Escuela Superior de Guerra.
- ITEM. (2018). Fault Tree Analysis Software for Calculating Failure Probability. Recuperado de July 3, 2018, from http://www.itemsoft.com/fault_tree.html?gclid=Cj0KCQjwvezZBRDkARIsADKQyPkErJZ8TSl14jxqZRHm7JfLkA7ZIEVAs-AW3Ho_m5xeO6Pv3itig5waAggAEALw_wcB
- Item Software. (2018). Reliability, Safety Analysis and Risk Assessment Software from Item Software.
- JPM Stastical Discovery. (2018). Software de JMP de SAS. Recuperado de August 9, 2018, from <http://www.jmp.com/es/>
- KBSI. (2018a). IDEF – Integrated DEFinition Methods (IDEF). Recuperado de May 14, 2018, from <http://www.idef.com/>
- KBSI. (2018b). IDEF0 – Function Modeling Method – IDEF. Recuperado de May 8, 2018, from http://www.idef.com/idefo-function_modeling_method/
- Morales Flores, F. J. (2011). *Aplicación de métodos de toma de decisiones multi-atributo en la definición de prioridades en la gestión de infraestructuras en San Luis Potosí, México*.

Universidad Politécnica de Madrid.

NATO. (2009). North Atlantic Treaty Code of Practice for Life Cycle Costing (Code de bonne conduite pour une {é}valuation du co{û}t global de possession), (September).

NAVSEA. (2018). Warfare Centers.

Oracle. (2018). Crystal Ball | Applications | Oracle Colombia.

Quanterion Solutions Incorporated. (2018a). Reliability Information Analysis Center (RIAC) – Quanterion Solutions Incorporated. Recuperado de August 9, 2018, from <https://www.quanterion.com/projects/reliability-information-analysis-center-riac/>

Quanterion Solutions Incorporated. (2018b). The SuperSMITH® Package by Fulton Findings LLC – Quanterion Solutions Incorporated.

R2M. (2018). Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de Sistemas (Análisis CDM – RAM)., 62, 9. Recuperado de <http://reliarisk.com/post/análisis-de-confiabilidad-disponibilidad-y-mantenibilidad-cdm-o-ram>

RAC. (1993). Failure mode, effects, and criticality analysis, 127. Recuperado de https://en.wikipedia.org/wiki/Failure_mode,_effects,_and_criticality_analysis

Reliasoft. (2009). Steps in a System Reliability, Availability and Maintainability Simulation Analysis. Recuperado de July 6, 2018, from <http://www.weibull.com/hotwire/issue103/relbasics103.htm>

Reliasoft. (2018). ReliaSoft - Reliability and Maintainability Analysis - ReliaSoft.

Ren, Z., & Wu, Y. (2015). ScienceDirect Modeling the Performance of Aircraft Utilizing Maintenance Free Operating Periods. *Procedia Engineering*, 99, 214–218. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.528>

Rengifo Álvarez, S., & Valencia Arango, A. M. (2009). Simulación Del Comportamiento Futuro

De Los Indicadores Cm Y Costos De Mantenimiento En Un Caso Industrial.

Rockwell Collins. (2018). Rockwell Collins - Building trust every day. Recuperado de August 9, 2018, from <https://www.rockwellcollins.com/>

SAE. (2009). Surface Vehicle Standard, 4970, 32.

San José, S. G. (2016). IT RAMS : Modelización y Simulación de la Fiabilidad , Disponibilidad y Mantenibilidad de Sistemas TIC Estudio de Caso Práctico : Clúster de Aplicación.

Toro Osorio, J. C., & Céspedes Gutiérrez, P. A. (2001). Metodología para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en mantenimiento. *Notas, Universidad EAFIT*, 8.

U.S. Department of Defense. (1963). Military Standard 756B - Reliability Modeling and Predictions.

U.S. Department of Defense. (1977). Military Standard 1629A_Procedures For Performing A Failure Mode, Effects And Criticality Analysis. Recuperado de <http://www.fimea-fimeca.com/milstd1629.pdf>

US Department of Defense. (1980). Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. *MIL-STD-1629, November, AMSC Number N3074, 11(6)*, 20 –21. <http://doi.org/10.1016/j.cardfail.2005.06.223>

Zapata, C. J. (2011). *Confiabilidad en Ingeniería* (Primera). Pereira. Recuperado de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/43282754/Confiabilidad_en_Ingenieria.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1530625720&Signature=vE0Ido1cKaNXz6aRWiiDvxTDQ4A=&response-content-disposition=inline;filename=Confiabilidad_en_Ing

BIBLIOTECA CENTRAL DE LAS FF.MM.
"TOMAS RUEDA VARGAS"



201002009