

## Trabajo Fin de Máster

Verificación y validación en programas de armamento y material. Aplicación a programas navales.

Autor

FRANCISCO JAVIER DEL CORRAL LARA

Director

D. Francisco José Callado Muñoz

Centro Universitario de la Defensa

2019



## **RESUMEN**

Tal como expone la instrucción 67/2011 del Secretario de Estado de Defensa (SEDEF)<sup>1</sup>, “*el proceso de obtención de recursos materiales integra el conjunto de actividades que tienen por objeto satisfacer las necesidades de este tipo de recursos mediante la definición, diseño, producción, construcción, desarrollo o adquisición, puesta en servicio, modernización en su caso y baja de los mismos*”. Este proceso comienza cuando, por parte del Estado Mayor de la Defensa, se establece la necesidad de una nueva capacidad operativa.

A su vez esta capacidad operativa será desarrollada mediante requisitos operativos de Estado Mayor (REM). Una vez que dicho REM es remitido al SEDEF, éste procederá al establecimiento de un programa de obtención. Para dirigir, controlar y coordinar dicho programa, el Director General de Armamento y Material (DGAM) constituirá una Oficina de Programa.

Uno de los principales cometidos de las Oficinas de Programa es comprobar el cumplimiento de los requisitos operativos y funcionales de los equipos y sistemas que se van a obtener, ya sea mediante adquisición o producción. Dicha comprobación se lleva a cabo mediante el proceso de Verificación y Validación (V&V).

El objetivo de este trabajo es presentar algunos de los modelos más empleados para los procesos de V&V en ingeniería de sistemas, analizando su aplicabilidad a programas navales y proponiendo aquel que ofrezca más ventajas. A continuación se detallará una forma de particularizar dicho modelo a los programas navales de adquisición de la DGAM.

## **PALABRAS CLAVE**

Ingeniería de sistemas, prueba, requisito, verificación, validación.

---

<sup>1</sup> Instrucción 67/2011, de 15 de septiembre del SEDEF, que regula el proceso de Obtención de Recursos Materiales.



## INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>PALABRAS CLAVE.....</b>	<b>3</b>
<b>LISTADO DE ACRÓNIMOS.....</b>	<b>7</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>2. MOTIVACIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Instrucciones SEDEF 67/2011 y 72/2012.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2. DOD-STD-2106 Development of Shipboard Industrial Test Procedures..</b>	<b>12</b>
<b>3.3. NASA/SP-2007-6105 Rev 1. NASA Systems Engineering Handbook.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3.1. Fases del ciclo de vida del proyecto .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3.2. Tipos de métodos de V&amp;V .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3.3. Filosofía del proceso de V&amp;V .....</b>	<b>16</b>
<b>4. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.....</b>	<b>17</b>
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
<b>5.1. PROCESOS.....</b>	<b>19</b>
<b>5.2. FASES PARA LA VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>5.3. FASES DEL DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>21</b>
<b>5.4. METODOS DE VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN.....</b>	<b>24</b>
<b>5.5. TIPOS DE ACTIVIDADES DE VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN .....</b>	<b>25</b>
<b>5.6. DESARROLLO .....</b>	<b>26</b>
<b>5.6.1. Verificación durante la fase de Diseño (V1) .....</b>	<b>27</b>
<b>5.6.2. Verificación Física en Construcción (V2).....</b>	<b>28</b>
<b>5.6.3. Verificación durante la Fase de Pruebas (V3).....</b>	<b>29</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>33</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>35</b>



## **LISTADO DE ACRÓNIMOS**

CDR	Revisión de la fase de diseño final (Critical Design Review)
FAT	Pruebas de Fábrica (Factory Acceptance Test)
FCT	Pruebas de Fábrica de Constructor (Factory Constructor Test)
FCX	Fascículo de Conexionado
FET	Pruebas Electromagnéticas en Fábrica (Factory Electromagnetic Test)
FPP	Fascículo de Pruebas a Presión
FST	Pruebas de Choque en Fábrica (Factory Shock Trial)
FVT	Pruebas de Vibraciones en Fábrica (Factory Vibrations Trial)
HAT	Pruebas Oficiales de Puerto (Harbour Acceptance Test)
HCT	Pruebas de Puerto de Constructor (Harbour Constructor Test)
IGP	Índice General de Pruebas
MCR	Matriz de Cumplimiento de Requisitos
PDR	Revisión Preliminar del Diseño (Preliminary Design Review)
SAT	Pruebas Oficiales de Mar (Sea Acceptance Trials)
SCT	Pruebas de Mar de Constructor (Sea Constructor Trial)
SDR	Revisión de la Definición del Sistema (System Definition Review)
SIR	Revisión de la Integración del Sistema (System Integration Review)
SRR	Revisión de Requisitos del Sistema (System Requirements Review)
STW	Protocolo de Puesta en Marcha de la Instalación (Setting to Work)
SVR	Revisión de la Verificación del Sistema (System Verification Review)
TRR	Revisión de Alistamiento para Pruebas (Test Readiness Review)
V&V	Verificación y Validación
VPE	Verificación por Prueba de Equipos
VPM	Verificación por Prueba de Materiales
VPP	Verificación Particular por Prueba

## **GLOSARIO**

**Calificación:** Proceso para demostrar la capacidad del diseño para cumplir los requisitos especificados. El término "calificado" se utiliza para designar el estado correspondiente.

**Especificación:** Documento que establece requisitos.

**Evidencia objetiva:** Datos que respaldan la existencia o veracidad de algo.

**Prueba Elemental:** Se denomina prueba elemental a la mínima operación, como parte de una prueba de puerto o mar, que permite la verificación completa de al menos un requisito de forma ininterrumpida y siendo complementaria al resto de pruebas elementales que conforman el protocolo. La superación con éxito de las distintas pruebas elementales por separado, permite dar por superada la prueba global.

**Proceso:** Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

**Requisito:** Necesidad o expectativa establecida, generalmente implícita u obligatoria. Los requisitos son derivados de la Especificación de Contrato y de Normas consideradas como contractuales.

**Verificación:** Confirmación mediante la aportación de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos especificados.

**Validación:** Confirmación, mediante la aportación de evidencia objetiva, de que se han cumplido los requisitos para una utilización o aplicación específica prevista.

**La verificación está asociada a requisitos especificados, mientras que la validación queda vinculada a las necesidades o expectativas del cliente o usuario final.**

## **1. INTRODUCCIÓN**

El pasado año 2013 se produjo la centralización de los programas de adquisiciones del Ejército de Tierra, la Armada y el Ejército del Aire, en la Dirección General de Armamento y Material, del Ministerio de Defensa. Uno de los objetivos de dicha centralización, es la homogenización de los procesos empleados en la gestión de estos programas. De dichos procesos, uno de los más importantes, y que forma parte de todos los programas de obtención, es el proceso de V&V. La aplicación de la ingeniería de sistemas a dichos procesos de V&V es uno de los elementos que ayuda en esta homogenización. Sin embargo, los programas terrestres, aéreos y navales presentan algunas características distintivas que influyen en su gestión.

En el caso de los programas terrestres, su proceso se centra en el diseño y construcción de un prototipo, seguido de su verificación y validación. Una vez construido, el esfuerzo se centra en mantener la calidad durante la producción en serie, normalmente de un gran número de unidades.

Respecto a los programas aéreos, los principales son de colaboración internacional, lo que implica la coordinación de un gran número de organismos, nacionales y extranjeros. Esto, junto con la importancia de su certificación de aeronavegabilidad les da unas características muy diferenciales.

Los programas navales se diferencian por su diseño de gran complejidad, el escaso número de unidades a obtener, y la histórica y especial relación existente entre el contratista principal y el cliente.

Todo lo anterior nos lleva a la conclusión de que no parece muy factible desarrollar un proceso de V&V que pueda ser común a todos los programas de adquisición de la DGAM. Dada esta diferenciación, este trabajo se va a dedicar a la gestión de los programas navales.

## 2. MOTIVACIÓN

Cuando un Jefe de Programa se plantea comenzar con la gestión de los procesos de V&V, su primera intención es la de localizar la reglamentación que debe aplicar. La única documentación aprobada al respecto son las instrucciones 67/2011 y 72/2012 del Secretario de Estado de Defensa<sup>2</sup> que, como veremos más adelante (apartado 3.1), no entran realmente en la descripción de modelos para gestionar estos procesos.

Por lo tanto, cada programa puede llevar la gestión de los procesos de V&V de un modo distinto en función de las consideraciones de su jefe de programa; normalmente en base a su experiencia, *know how*, lecciones aprendidas,... Un recurso empleado en algunos programas es el de utilizar métodos extraídos de normas, normalmente internacionales, aunque no hayan sido aprobadas por las autoridades nacionales.

Todo esto supone una heterogeneización de los procesos de V&V, con lo que las lecciones aprendidas en un programa, no pueden ser aprovechadas en los demás.

El objetivo de este trabajo es proponer un modelo a seguir por todas las Oficinas de Programa de la Jefatura de Programas Navales de la DGAM, en la validación y verificación de requisitos. Para ello, en primer lugar, vamos a presentar qué debe cumplir dicho modelo, esto es: las mencionadas instrucciones del SEDEF.

Seguidamente analizaremos dos de los métodos de ingeniería de sistemas más empleados para desarrollar los procesos de V&V en programas navales: “*DOD-STD-2106 Development of Shipboard Industrial Test Procedures*” y “*NASA/SP-2007-6105 Rev 1. NASA Systems Engineering Handbook*”. A continuación seleccionaremos uno de dichos métodos en base al mayor grado de adaptación a las citadas instrucciones.

Finalmente desarrollaremos el método seleccionado adaptándolo a las necesidades de los programas navales de adquisiciones de la DGAM.

---

<sup>2</sup> Instrucción 72/2012, de 2 de octubre, del SEDEF, que regula el proceso de obtención del armamento y material y la gestión de sus programas.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Instrucciones SEDEF 67/2011 y 72/2012.**

Como parte del proceso de centralización de los programas de armamento y material del Ministerio de Defensa, el SEDEF promulgó estas dos instrucciones, que regulan la obtención de los recursos materiales y la gestión de los programas de adquisiciones de la DGAM. Dichas instrucciones descomponen el ciclo de vida de las unidades y equipos, en las siguientes fases y etapas:

1. Fase Conceptual, con las etapas:
  - a.1. Definición de la necesidad operativa
  - a.2. Pre-viabilidad operativa.
2. Fase de definición y decisión, con las etapas:
  - b.1. Definición de los requisitos
  - b.2. Determinación de alternativa de obtención
  - b.3. Establecimiento del programa
  - b.4. Preparación para la ejecución
3. Fase de ejecución, con las etapas:
  - c.1. Diseño
  - c.2. Producción, construcción, desarrollo y/o adquisición
4. Fase de servicio, con las etapas:
  - d.1. Preparación para la entrada en servicio
  - d.2. Vida operativa
  - d.3. Baja

De dichas etapas, puede decirse que sólo tienen relación con los procesos de V&V, las b.1, b.3, b.4, c.1 y c.2. Analicemos dicha relación:

**b.1. Definición de requisitos.** Como aquí se define la solución operativa/funcional del producto a obtener, su definición está íntimamente ligada al proceso de validación.

Los objetivos de dicha solución operativa, los Requisitos de Estado Mayor (REM), serán en definitiva el objeto final de la validación por el cliente.

b.3. Establecimiento del programa. En esta etapa se redacta la Directiva del Programa donde se establece qué organismos apoyarán al área técnica en el proceso de V&V.

b.4. Preparación de la ejecución. En esta etapa se elaboran las especificaciones de contrato, que contiene los requisitos técnicos, y donde deberán incluirse los planes de V&V, que contendrán la matriz de cumplimiento de requisitos (MCR), para garantizar que todos los requisitos son evaluados, así como una relación de las pruebas a efectuar y los métodos de V&V.

c.1. Diseño. Durante esta etapa se construyen y validan los prototipos necesarios, y se publica documentación de ingeniería (esquemas funcionales, cálculos, estudios, planos,...) que puede emplearse como evidencia de cumplimiento de algunos requisitos técnicos.

c.2. Producción, construcción, desarrollo o adquisición. Durante esta etapa se llevarán a cabo las inspecciones, demostraciones y pruebas, tanto del contratista como de aceptación del cliente. Finalizará con las pruebas de evaluación operativa (EVALO) y aquellas necesarias al final de la garantía.

Ninguna de las dos instrucciones presentan modelos de procesos de V&V *per se*, si bien exponen fases y etapas de los programas en que se llevan a cabo actividades relacionadas con ellos. El motivo de analizarlas en este trabajo es que, la adaptación a dichas fases y etapas, será el criterio clave a la hora de seleccionar el modelo de V&V a emplear.

### **3.2. DOD-STD-2106 Development of Shipboard Industrial Test Procedures**

El primer modelo de ingeniería de sistemas que vamos a analizar es una norma del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Se trata de una norma del año 1986, ampliamente utilizada en programas de construcción naval por muchas armadas del mundo. Esta Norma describe el proceso de ingeniería que se utilizará en el desarrollo del contenido de los procedimientos de prueba industrial a bordo para equipos y sistemas. Se aplica a los procedimientos de prueba utilizados durante la instalación inicial en construcción, después de una

reparación, modernización o modificación, y después de períodos prolongados de varada.

Su principal característica distintiva es la descomposición del proceso de V&V en siete (7) fases o etapas:

**Etapa 1. Inspección de recepción de material y pruebas de taller:** La etapa 1 incluye aquellas pruebas e inspecciones encaminadas a la administración de inventario e inspección física de nuevos materiales, equipos y sistemas, y la documentación asociada. Estas pruebas e inspecciones están destinadas a garantizar la recepción del equipo en buenas condiciones físicas por parte del constructor naval u otra organización industrial. La documentación de la Etapa 1 no es normalmente en forma de un procedimiento de prueba.

Esta etapa incluye además las pruebas e inspecciones realizadas antes de la instalación a bordo de equipos y sistemas nuevos o reparados. En los casos en que el equipo y los sistemas se reparan a bordo del barco, se pueden usar procedimientos de prueba en el taller para validar la preparación para la prueba a bordo. Para fines de planificación del trabajo y contabilidad de costos, la etapa 1 no es parte del programa de prueba y normalmente será parte del programa de control de calidad de la organización industrial.

**Etapa 2. Inspecciones y pruebas de instalación a bordo:** Las pruebas e inspecciones de la etapa 2 se llevan a cabo antes de la operación de equipos, cableado, guías de onda, tuberías, ventilación, etc. instalados o reubicados, para garantizar que cada instalación se haya realizado de acuerdo con los planos y especificaciones establecidos. El constructor naval u organización industrial normalmente es responsable de la preparación de los procedimientos de prueba de esta etapa.

**Etapa 3. Pruebas de equipamiento:** Las pruebas de la etapa 3 demuestran que, después de la instalación a bordo, el equipo individual funciona dentro de los límites y tolerancias establecidos. Estas pruebas de operatividad del equipo se realizan independientemente del sistema (es decir, el equipo puede estar aislado del sistema) y se pueden realizar antes de completar la instalación del sistema.

**Etapa 4. Pruebas de sistema:** Las pruebas de etapa 4 demuestran que un equipo y sus funciones requeridas, incluidas totalmente dentro de un sistema

independiente, se ejecutan dentro de los límites y tolerancias establecidos. Estas pruebas normalmente se aplican a funciones, señales y comandos de un sistema independiente, dentro del sistema de combate del buque. La etapa 4 incluye todas las pruebas que involucran 2 o más elementos del equipo, que no involucran más de un sistema independiente del sistema de combate. Estas pruebas pueden incluir algunas entre dos o más equipos y entre dos grupos de equipos dentro del mismo sistema.

**Etapa 5. Pruebas e integración “intersistemas”:** Las pruebas de la etapa 5 involucran dos o más sistemas independientes dentro del sistema de combate. Estas pruebas demuestran que dos o más sistemas independientes realizan una función o funciones específicas dentro de los estándares establecidos. Se incluye el intercambio de señales, comandos, funciones y todas las interfaces asociadas entre sistemas.

**Etapa 6. Pruebas especiales:** Las pruebas de la etapa 6 requieren instalaciones o recursos de simulación especiales, externos a la organización de prueba propia, pero a efectos del contratista se consideran como parte de las pruebas de puerto. Se pueden aplicar pruebas especiales a uno o más equipos, a un solo sistema o a varios sistemas, y puede requerir la operatividad total del barco. Las pruebas de la etapa 6 que solo pueden realizarse en el mar deben designarse como etapa 7. Por lo general, habrá muy pocas pruebas de la etapa 6 en un programa de pruebas industriales.

**Etapa 7. Pruebas de mar:** Las pruebas de la etapa 7 son aquellas que precisan que el buque esté navegando; pueden ser tanto pruebas de constructor, como pruebas de aceptación. Los procedimientos de prueba no se identifican con un número de etapa 7 a menos que la prueba solo pueda realizarse total o parcialmente en el mar.

### **3.3. NASA/SP-2007-6105 Rev 1. NASA Systems Engineering Handbook**

El segundo modelo de procesos de V&V que vamos a analizar es el “Manual de Ingeniería de Sistemas de la NASA”. A los efectos del presente estudio, hay tres elementos destacados en este método de ingeniería de sistemas: las fases del ciclo de vida del proyecto, los tipos de métodos de verificación y validación, y la filosofía del proceso de V&V.

#### **3.3.1. Fases del ciclo de vida del proyecto**

Pre-Fase A: Estudios conceptuales: identificación de alternativas factibles.

Fase A: Desarrollo de concepto y tecnología: definir el proyecto e identificar e iniciar la tecnología necesaria.

Fase B: Diseño preliminar y finalización de la tecnología: establecer un diseño preliminar y desarrollar la tecnología necesaria.

Fase C: Diseño final y fabricación: completar el diseño del sistema y construir / codificar los componentes.

Fase D: Ensamblaje, integración y prueba del sistema, entrega: integración de componentes y verificación del sistema, preparación para las operaciones y entrega.

Fase E: Operaciones y mantenimiento: operar y mantener el sistema.

Fase F: Baja: eliminación de sistemas y análisis de datos.

Cada una de estas fases incluye, a su vez, algún hito de revisión (SDR, PDR, CDR, SIR,...). Estos hitos se encuentran definidos en el manual de ingeniería de sistemas de la NASA, aunque no son objeto del presente trabajo.

#### **3.3.2. Tipos de métodos de V&V**

Análisis: Se trata del uso de modelos matemáticos y técnicas analíticas para predecir la adecuación de un diseño a las expectativas de los interesados en base a datos calculados o datos derivados de una menor estructura del sistema y verificaciones de productos finales. El análisis se utiliza generalmente cuando un prototipo; modelo de ingeniería; o producto fabricado, ensamblado e integrado, no está disponible. El análisis incluye el uso del modelado y la simulación como herramientas analíticas. Un modelo es una representación matemática de la realidad. Una simulación es la manipulación de un modelo.

Demostración: Es la muestra de que el uso de un producto final cumple con el requisito individual especificado. En general, es una confirmación básica de la capacidad de rendimiento, diferenciada de las pruebas por la falta de recopilación detallada de datos. Las demostraciones pueden involucrar el uso de modelos físicos o maquetas; por ejemplo, un requisito de que todos los controles sean accesibles por un operador podría verificarse haciendo que dicho operador realice tareas relacionadas con dichos controles, en un simulador. Una demostración también podría ser la operación real del producto final por personal altamente calificado, que realizan un evento único que demuestra una capacidad para operar en límites extremos del rendimiento del sistema, una operación que normalmente no se espera de un operador en operación real.

Inspección: El examen visual de un producto final realizado. La inspección se utiliza generalmente para verificar las características de diseño físico o la identificación específica del fabricante. Por ejemplo, si hay un requisito de que el pasador de armado de seguridad tenga una bandera roja con las palabras "Quitar antes de usar" impresa en la bandera con letras negras, se puede usar una inspección visual de la bandera del pasador de armado para determinar si este requisito está cumplido.

Prueba: Consiste en hacer uso de un producto final para obtener los datos detallados necesarios para verificar el rendimiento, o proporcionar información suficiente para verificar el rendimiento mediante un análisis más detallado. Las pruebas se pueden realizar en productos finales o prototipos. La prueba produce datos en puntos discretos para cada requisito especificado bajo condiciones controladas y es una técnica de verificación intensiva de recursos.

### **3.3.3. Filosofía del proceso de V&V**

- Los procesos de V&V se pueden llevar a cabo en cualquier fase o etapa del proyecto y de forma recurrente durante el ciclo de vida de dicho proyecto.
- Los procedimientos de V&V se definen en función de:
  - los procedimientos necesarios para cada tipo de validación o verificación seleccionada,
  - el propósito y objetivo de cada paso del procedimiento,
  - cualquier acción previa y posterior a la prueba, y
  - los criterios para determinar el éxito o fracaso del procedimiento.

#### **4. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.**

Seguidamente vamos a analizar cuál de los dos modelos de ingeniería de sistemas mostrados es más idóneo para aplicarlo a los programas navales de adquisiciones de la DGAM. El criterio que utilizaremos será el de grado de cumplimiento de las instrucciones del SEDEF 67/2011 y 72/2012. En concreto y dado que se trata de procesos de V&V, en qué medida se adecúan cada uno de estos dos modelos a las fases y etapas descritas en ellas.

La norma DOD-STD-2106 se basa en una descomposición en etapas siguiendo un criterio de complejidad de los elementos, esto es, comenzar con los más simples (materiales en almacén), continuar con equipos, luego sistemas con varios equipos, luego integración de varios sistemas, y finalizar con pruebas de mar de toda la unidad.

No se hace referencia a fases temporales de diseño, integración, construcción, ni a tipos de pruebas. No existe, por tanto, forma de evaluar su grado de adecuación a las fases y etapas expuestas en las instrucciones del SEDEF.

Sin embargo, en el caso del manual de ingeniería de la NASA, las fases del ciclo de vida coinciden con bastante exactitud con lo estipulado en las instrucciones 67/2011 y 72/2012 del SEDEF, como se puede observar en la siguiente figura:

Manual NASA	Instrucciones SEDEF
Prefase A	Fase 1
Fase A	Fase 2
Fase B	Etapa c.1
Fase C	Etapa c.2
Fase D	Etapa d.1
Fase E	Etapa d.2
Fase F	Etapa d.3

**Figura 1. Comparación de fases del proceso de V&V. (Elaboración propia).**

De lo anteriormente expuesto, se deduce que este último método parece el más adecuado a la hora de llevar a cabo los procesos de V&V de los programas navales de obtención de la DGAM.

## 5. METODOLOGÍA.

A continuación se procede a exponer y desarrollar una metodología que adecúe el modelo del “NASA Systems Engineering Handbook”, al caso concreto de los programas navales de la DGAM. El eje de toda esta metodología serán **los requisitos**.

De acuerdo con la instrucción 67/2011 del SEDEF, la DGAM comienza a intervenir en el proceso de gestión del programa, una vez que se recibe el REM. Dichos requisitos operativos son “traducidos” en requisitos técnicos que componen la especificación de contrato, cuyo cumplimiento se exige al contratista (p. ej. el requisito operativo de velocidad máxima, dará lugar al requisito técnico de potencia del motor propulsor<sup>3</sup>).

Por tanto, el primer paso será la **definición de requisitos**; esta tarea es fundamental ya que, de la buena definición de los requisitos, dependerá el resultado del resto del proceso. Esta fase de definición de requisitos no es propiamente una parte de los procesos de V&V. Los requisitos son los que habrá que validar y verificar, y de su buena definición dependerá mucho cómo se desarrolle posteriormente dichos procesos.

Un requisito bien definido debe cumplir los siguientes atributos:

- **Claro y conciso:** se debe evitar el encadenamiento de requisitos mediante el uso de conjunciones. No debe ser ambiguo, de forma que admita múltiples interpretaciones.
- **Completo:** incluye toda la información necesaria para definir el producto, y por tanto no deja cuestiones abiertas.
- **Consistente:** no debe plantear contradicciones con otros requisitos ni tampoco generar redundancia.

---

<sup>3</sup> Se trata de una simplificación, a efectos de servir como ejemplo; generalmente un requisito operativo de velocidad máxima dará lugar a más de un requisito técnico.

- Trazable: debe tener un código único que lo identifique, de forma que permita que pueda ser controlado durante todo el proceso de obtención.
- Alcanzable: debe poder conseguirse con la tecnología existente, dentro del presupuesto asignado y en los plazos establecidos.
- Medible.
- Verificable: debe ser posible verificar su cumplimiento.

Por tanto, a partir de los requisitos, vamos a comenzar a exponer la metodología que se propone en el presente trabajo.

A partir de los requisitos comenzaremos a construir una matriz (**matriz de cumplimiento de requisitos, MCR**) a la cual iremos incorporando los “atributos” de los requisitos: fases de V&V, evidencias de cumplimiento, método de V&V, grado de cumplimiento,... Empezaremos definiendo dichos **atributos** en los siguientes apartados; a continuación desarrollaremos la metodología (apartado 5.6) y finalmente propondremos un ejemplo de MCR, para tratar de fijar los conceptos.

## 5.1. PROCESOS

En la guía NASA Systems Engineering Handbook se establecen las definiciones de verificación y validación, y se exponen las diferencias entre ambos procesos (ver GLOSARIO). Partiendo de ello, y como base de nuestra metodología vamos a establecer los procesos que se asocian a la verificación y validación, a lo largo del diseño y desarrollo:

1. La **validación de requisitos** garantiza que las expectativas del cliente han sido transformadas en requisitos técnicos y que estos han sido derivados a los receptores responsables de evidenciar el cumplimiento de los mismos.
2. La **verificación del diseño** trata de comprobar que el diseño cumple con los requisitos y/o especificaciones aplicables. El proceso habitual para formalizar con el cliente la verificación del diseño es el visto bueno a las matrices de cumplimiento de requisitos, previo a las revisiones técnicas. Las revisiones

técnicas más relevantes en este sentido son la SDR, PDR y CDR<sup>4</sup>, donde progresivamente se van verificando aspectos cada vez más de detalle del diseño.

Por otro lado, la verificación del diseño incluye una verificación de sub-productos como son los equipos y materiales, que se realiza través de Inspecciones, Certificados de Equipos y Materiales, Protocolos de Pruebas de Fábrica (FAT, FCT, FET, FST y FVT<sup>5</sup>) y el resultado de las mismas (VPE, VPM y VPP).

3. La **verificación del producto** consiste en comprobar que los requisitos y/o especificaciones aplicables están implementados en el propio producto, como resultado del diseño. La verificación del producto forma parte esencial del proceso de aceptación del producto por parte del cliente. La verificación del producto se realiza a través de controles tecnológicos y de funcionalidad, pruebas de puerto (HCT y HAT), pruebas de mar (SCT y SAT) y el resultado de las mismas.

4. La **validación del diseño** tiene por objeto comprobar que se cumplen con los requisitos para el uso previsto. Este proceso tiene lugar en paralelo con la verificación del primer producto de la serie.

5. La **validación de un producto** indica que el producto cumple con los fines esperados en el entorno previsto, es decir, que cumple con las expectativas de los clientes y otras partes interesadas y se muestra a través del desarrollo de una prueba, análisis, inspección o demostración. La comprobación de los requisitos operativos, para la aplicación específica establecida por el cliente, le corresponde al propio cliente, a través de sus pruebas de evaluación operativa (EVALO).

## 5.2. FASES PARA LA VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Este atributo no está contemplado en el manual de la NASA; su objeto es agrupar los requisitos con un criterio temporal. Según si un requisito es verificable en

---

<sup>4</sup> Hitos de revisión definidos en el “Manual de ingeniería de sistemas de la NASA”, mostrados en la Figura 2.

<sup>5</sup> Todas estas inspecciones, protocolos, pruebas,... serán definidas en el apartado 5.5 posterior.

diseño, en construcción o en pruebas, implicará unas tareas determinadas en cada fase del desarrollo del proyecto.

- **Diseño (V1)**: engloba las fases de A, B y C1, y tiene como entregables, para la evidencia del cumplimiento, esquemas funcionales, cálculos y estudios, planos de disposiciones 2D y modelo 3D y pruebas de fábrica.
- **Física en Construcción (V2)**: comprende las Fases C2 y D1, y las evidencias de cumplimiento principales las conforman los controles tecnológicos y las marcas de inspección.
- **Pruebas (V3)**: engloba las pruebas de puerto (V3.1) y mar (V3.2). Las evidencias de verificación vendrán dadas por los resultados de la ejecución de los protocolos de pruebas.

### 5.3. FASES DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

Vamos a proponer prácticamente las mismas fases que enumera el manual de ingeniería de sistemas de la NASA, con dos diferencias principales:

- No vamos a contemplar las fases E y F, ya que en ellas no se lleva a cabo ninguna tarea relacionada con los procesos de V&V.
- Las fases C y D las vamos a subdividir en dos cada una, ya que engloban la mayor parte de estos procesos de V&V, tanto en plazo, como en carga de trabajo. Al finalizar cada fase se establece un hito de revisión (ver Figura 2), en que se analizan las tareas previstas y su grado de finalización<sup>6</sup>. Al desdoblarse estas fases, duplicamos el número de hitos de revisión, con lo que incrementamos el grado de control y supervisión del programa.

Estas fases ya fueron definidas en el apartado 3.3.1 anterior. A continuación veremos una descripción de las tareas que la metodología propuesta asigna a cada una de ellas:

---

<sup>6</sup> Cada hito de revisión finaliza con un panel ejecutivo, compuesto por autoridades del cliente, en que se aprueba dicho hito, y se autoriza el comienzo de la siguiente fase.

## **Pre-Fase A. Estudios conceptuales**

El propósito de esta fase es desarrollar diferentes estudios, en base a criterios de eficiencia operativa, de prestaciones de la plataforma, de *fabricabilidad* y de coste y plazo, para definir conceptos viables desde los que se pueda seleccionar la solución de diseño definitiva.

## **Fase A. Desarrollo del concepto y tecnologías**

El principal esfuerzo de esta fase es desarrollar en mayor detalle los diseños conceptuales de la fase anterior, consolidar la arquitectura funcional a nivel de sistemas y determinar las funciones que serán claves para el desarrollo de las instalaciones y los equipos.

## **Fase B. Diseño Preliminar**

El principal objetivo de esta fase es establecer una arquitectura funcional del Sistema a nivel de instalaciones que esté acorde con las especificaciones establecidas durante la Fase A.

Como resultado de la fase de Diseño Preliminar se revisan los documentos de diseño lanzados en las fases anteriores, se lanzan los documentos de diseño que definen la arquitectura funcional a nivel de instalaciones, se consolidan los planes para la gestión del proyecto durante las fases siguientes y se realiza una revisión de la planificación y el coste asociado.

En relación con la metodología propuesta para los procesos de V&V, durante esta fase el contratista propone los métodos de verificación para cada requisito, en cada una de las fases de desarrollo del proyecto.

## **Fase C1. Diseño Final**

El objetivo de esta fase es completar las modificaciones del diseño de detalle del sistema, trasladando las especificaciones de la arquitectura funcional a una arquitectura física.

A los efectos de la metodología propuesta, durante esta fase del proyecto, el contratista deberá determinar la necesidad de verificación en cada fase<sup>7</sup>; esto es, en qué fase o fases se va a verificar cada requisito. Asimismo deberá

---

<sup>7</sup> Las fases de V&V están definidas en el apartado 5.2 anterior.

presentar el estado de la verificación del diseño: evidencia de cumplimiento de aquellos requisitos ya verificados documentalmente en la etapa de diseño.

### **Fase C2. Preparación para la Construcción**

Sus objetivos son la finalización del modelo de detalle, la publicación del diseño, la elaboración de las órdenes de fabricación y asegurar que los planes de producción, las instalaciones, los procedimientos y el personal están preparados para iniciar el proceso de producción.

Metodología: continuar con la asignación de fases para la verificación de los requisitos y las evidencias que justifican su cumplimiento, revisando el estado de los requisitos de diseño y proponiendo métodos de V&V para el resto de las fases.

### **Fase D1. Construcción e Integración**

El objetivo de esta fase es la producción, el ensamblaje, la integración y la verificación de los elementos que componen el sistema.

Con relación a la metodología de procesos de V&V, durante la Fase D1, se revisarán las Matrices de Cumplimiento de Requisitos (MCR) con objeto de actualizar aquellos requisitos V1 (fase de diseño) que en la Fase C2 no fueron categorizados como Cumplidos, mediante la evidencia objetiva de cumplimiento. De igual forma se indicará el nivel de cumplimiento de los requisitos V2 (fase de construcción).

La verificación de requisitos en la fase V2 se lleva a cabo mediante revisión documental de los controles tecnológicos definidos en el proyecto, así como mediante la inspección de locales e instalaciones.

### **Fase D2. Pruebas**

A lo largo de la Fase D2 se completa la puesta en marcha de todas las instalaciones del submarino (STW) y se desarrollan las pruebas de puerto (HAT) y mar (SAT) con el objetivo de verificar el cumplimiento de los requisitos especificados.

Metodología: en esta fase se completarán las columnas de la MCR relativas a los requisitos verificables en V<sub>2</sub> (fase de pruebas): protocolos y resultados de pruebas de puerto y mar.

En la siguiente figura se ilustran estas fases, junto con los hitos de revisión que sirven de separación entre ellas. Dichos hitos se encuentran definidos en el manual de ingeniería de sistemas de la NASA, y no son objeto del presente trabajo.

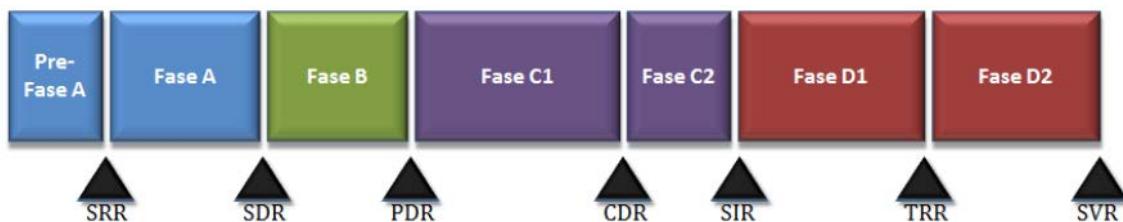


Figura 2. Fases del proceso de V&V. (Elaboración propia).

## 5.4. METODOS DE VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Vamos a emplear los mismos cuatro (4) métodos propuestos por el manual de ingeniería de sistemas de la NASA, si bien vamos a adecuar su descripción a nuestro entorno productivo.

- **Inspección**

El método de verificación por inspección engloba:

- Inspección documental: planos, esquemas de diseño o certificados de fabricantes. Se lleva a cabo en la fase V1, y sus evidencias son documentos de diseño y especificaciones de compra.
- Inspección del producto: Observación realizada sobre el producto en fábrica o a bordo.

- **Demostración**

Controles para verificar cualitativamente el rendimiento del producto (ejemplo: control de continuidad y aislamiento, puesta en marcha, etc.), definidos en el proyecto.

Se emplea en V2 y V3, mediante controles tecnológicos.

- **Prueba**

Verificación cuantitativa del rendimiento del producto, en base a un protocolo en el que se definen los datos de entrada, las condiciones de contorno y los datos de salida esperados.

Las pruebas pueden ser aplicables a todos los productos de la serie (prueba serie) o sólo al primer elemento de la serie (prueba tipo).

Este método se puede emplear en V1 mediante pruebas de fábrica (FAT), en V2 mediante fascículos de pruebas a presión (FPP) y/o en V3 mediante pruebas de puerto (HAT) y mar (SAT).

- **Análisis**

Incluye los desarrollos de estudios justificativos o simulaciones para evidenciar el cumplimiento de los requisitos. Incluye la verificación por extensión.

Este método se emplea en la fase de diseño (V1), y sus evidencias de cumplimiento son documentos de cálculo y documentos informativos.

## 5.5. TIPOS DE ACTIVIDADES DE VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

A continuación vamos a ver cómo se adaptan a esta metodología los principales tipos de actividades que se pueden llevar a cabo en los procesos de V&V en programas navales:

- Pruebas de Fábrica (FAT, FCT): Verifican en las instalaciones del suministrador las características de los equipos o sistemas de acuerdo con las especificaciones técnicas de compra. Algunas de ellas, como las de integración de equipos, pueden realizarse en los “land based test sites” (LBTS).
- Simulaciones: Algunas de las verificaciones resulta más sencillo, rápido y económico realizarlas por medio de simuladores. El caso más evidente es el de las pruebas de integración de los subsistemas del Sistema de Combate.
- Controles tecnológicos: Operaciones de verificación que se realizan a un elemento, o a un conjunto de elementos que constituyen un determinado producto intermedio, al objeto de asegurar la calidad del producto final.

Existen un gran número de tipos de controles, que se clasifican según la naturaleza de la inspección.

- Pruebas a Presión de equipos y sistemas (FPP): Proceso por el cual se verifica la resistencia a la presión y estanqueidad de los equipos y circuitos. Estas pruebas incluyen aquellos elementos que se verán sometidos a presión.
- Puesta en marcha de la instalación (STW): Proceso de puesta en marcha progresiva de una instalación, desde su puesta bajo tensión al funcionamiento local en manual y funcionamiento en remoto, pasando por las sucesivas etapas de integración en la instalación de la que forma parte, del sistema, y de la unidad en su conjunto.
- Pruebas de puerto (HAT/ HCT): Comprueban en grada o en puerto las características, prestaciones y requisitos de las instalaciones y su integración con el resto de sistemas del buque.
- Pruebas de mar (SAT/ SCT): Comprueban en la mar las características y requisitos de las instalaciones y sistemas, y su integración con el resto de sistemas del buque.
- Inspecciones de locales e instalaciones: Estas inspecciones se basan en la verificación de la conformidad del acabado de los locales e instalaciones, en el control visual de la calidad de los montajes y de la limpieza y buena condición de los elementos sujetos a inspección. Se realizarán en paralelo a las actividades descritas anteriormente y en dos fases bien diferenciadas y con distinto alcance.

## 5.6. DESARROLLO

Una vez definidos los atributos de los requisitos, podemos continuar detallando la metodología propuesta.

Como se comentó anteriormente, a cada requisito se le asocian los atributos compuestos de una o varias evidencias de verificación, según los métodos de verificación establecidos (Inspección, Análisis, Demostración, Prueba) y las etapas dentro del desarrollo del proyecto, V1 (Verificación durante la fase de

Diseño), V2 (Verificación durante la Construcción) y V3 (Verificación en Fase de Pruebas).

La verificación de los sistemas, subsistemas y equipos respecto a los requisitos de su mismo nivel, tiene implícita la validación de los equipos, subsistemas y sistemas situados en un nivel inferior.

En el hito de revisión correspondiente, el contratista propondrá las evidencias de verificación más adecuadas para cada método y etapa. Una vez aprobadas por el Panel Ejecutivo de dicho hito, las evidencias deberán de plasmarse en documentos y estarán controladas por el Sistema de Gestión Documental.

A continuación presentaremos, para cada fase, los principales tipos de actividad de V&V, y las evidencias, citadas por tipo de documento, que pueden ser consideradas como justificación del cumplimiento de requisitos:

### **5.6.1. Verificación durante la fase de Diseño (V1)**

Se desarrolla durante las fases B y C1 del proyecto y tiene por entregables la documentación que evidencia el cumplimiento de requisitos de diseño. Esta documentación se compone, entre otros, de los esquemas funcionales, cálculos, estudios, planos de disposiciones 2D y modelo 3D y pruebas de fábrica. Durante esta fase se generarán las matrices MCR que incluirán el plan de validación y las referencias a las evidencias de cumplimiento correspondientes a la fase V1.

#### **5.6.1.1. Verificación del Diseño Funcional (V1.1)**

Se establecerán las Matrices de Cumplimiento de Requisitos (MCR) para cada una de las instalaciones, como elementos de gestión, control y seguimiento de la verificación del diseño. Estas matrices contendrán todos los requisitos de verificación del diseño que afectan a cada receptor, aunque en esta fase sólo se alcanzará a verificar los requisitos que se han clasificado para ser verificados en la fase V1. Los documentos de ingeniería (esquemas mecánicos, esquemas eléctricos, diagramas de control,...) servirán como evidencia de cumplimiento de dichos requisitos.

#### **5.6.1.2. Pruebas de Fábrica (V1.2)**

Las pruebas de fábrica (FAT, FST, FVT, FET, FCT) constituirán las evidencias de cumplimiento de requisitos en la fase V1.2. Estas pruebas, pueden ser

llevadas a cabo por los distintos suministradores en el lugar de origen o en la propia factoría.

A su vez se encuentran clasificadas en dos grupos:

- **FAT/FCT**: Verifican el proceso de diseño y fabricación y confirman la integridad del diseño sobre las condiciones ambientales y operativas establecidas en las especificaciones. Comprenden también las pruebas de calificación de los prototipos, que se llevan a cabo sobre las primeras unidades fabricadas, antes de las FAT.
- **FET/FST/FVT**: Verifican la resistencia de los equipos y sistemas al impacto y condiciones ambientales. Comprende las pruebas de calificación de materiales, como las pruebas de choque, vibraciones, resistencia al ambiente salino, atmósfera explosiva (ATEX) y compatibilidad electromagnética.

#### **5.6.2. Verificación Física en Construcción (V2).**

Se desarrolla principalmente durante las fases C2 y D1 del proyecto. Las evidencias objetivas de verificación de esta fase las conforman los **controles tecnológicos** y las **inspecciones**. A continuación se muestra un listado exhaustivo de controles tecnológicos de entre los que, mediante acuerdo, el contratista y el cliente seleccionarán los que consideren más adecuados como evidencias de verificación de los requisitos correspondientes (p.ej. como evidencia de cumplimiento de un requisito de ruido máximo en un compartimento, se podrá emplear un “control tecnológico de ruido y vibraciones”):

- Control de ruido y vibraciones.
- Control de aplastamiento de antivibratorios.
- Control de par de apriete.
- Control de trazabilidad y número de serie.
- Controles dimensionales y de posicionamiento.
- Controles eléctricos (continuidad, conexionado, masa, tendido de cables, ajuste de sensores).
- Pruebas de presión (estanqueidad y resistencia sobre equipos, circuitos de tuberías y tanques).

- Controles de puesta en marcha (maniobrabilidad válvulas, control local, control remoto, prueba de alarmas).
- Controles de integración (montaje, flushing, pruebas de estanqueidad,...).
- Controles de pinturas y revestimientos.
- Controles de soldadura.

En lo que respecta a las inspecciones de locales (pintura y limpieza, canalizaciones y aislamientos, espacios de mantenimiento), inspecciones de instalaciones (montajes, apariencia, interferencias, puestas a masa) e inspección final del buque antes de la entrega, se realizará acordando un “check-list” para fijar los aspectos a revisar en cada caso y una ficha de registro.

#### **5.6.3. Verificación durante la Fase de Pruebas (V3)**

Esta fase engloba las pruebas de puerto y mar, tanto de constructor como de aceptación y se desarrolla principalmente durante la fase D2, aunque puede empezar antes de finalizar la fase D1, solapándose con ésta. Se corresponde con la etapa final de la construcción.

- Pruebas de puerto: Durante esta etapa se verifica si los equipos o sistemas cumplen los objetivos de funcionalidad, capacidad y eficacia para los que se han diseñado en la condición de buque en puerto, apoyándose en el conjunto de pruebas, tanto de aceptación (HAT) como de constructor (HCT). Coexistirán actividades propias de esta fase, con actividades de puesta a punto de las instalaciones e integraciones entre sistemas de la fase anterior, si bien la actividad principal será la ejecución de las pruebas de puerto. Esta etapa se inicia con el submarino en la grada y concluye con la primera salida a la mar.
- Pruebas de mar: En esta etapa se verifica el comportamiento del submarino en condiciones de entorno reales, para determinar su funcionalidad operativa en las condiciones ambientales para las que ha sido diseñado. Durante esta etapa coexistirán actividades propias de esta fase con actividades de puesta a punto de las instalaciones e integraciones entre sistemas, pruebas de puerto condicionadas a haber alcanzado cotas de inmersión determinadas y trabajos de modificaciones, reparaciones y terminación del buque, si bien la actividad principal será la ejecución de las pruebas de mar.

Del mismo modo, durante esta fase tendrán gran impacto en la planificación global los períodos de varada del buque, necesarios para la corrección de deficiencias y posibles modificaciones, así como el periodo previsto de preparación del submarino para la entrega al cliente.

La realización satisfactoria de los Procedimientos de Pruebas verificará el cumplimiento de los requisitos técnicos de la especificación de contrato. En los protocolos de pruebas deberá de existir una trazabilidad clara entre cada uno de los requisitos y la prueba elemental en la que se verifican. Las evidencias de verificación vendrán dadas por la adquisición de las distintas pruebas elementales a las que se ha asociado cada requisito.

El estado de verificación de los requisitos correspondiente a fase V3 quedará registrado en las matrices MCR.

#### **5.6.3.1. Estrategia de pruebas**

Para finalizar con la metodología propuesta, a continuación se mencionan algunos criterios que pueden ser de aplicación para el desarrollo de la estrategia de pruebas. Estos criterios proceden de lecciones aprendidas durante años de trabajo en oficinas de programa:

- Se anticipará en lo posible cualquiera de las tareas contempladas en la planificación, de acuerdo con la estrategia constructiva del buque, aplicando el criterio ASAP. Por ello, se tratarán de anticipar las pruebas en las diferentes secciones antes de su unión. Una vez que se ha producido la unión de secciones o bloques del buque, resulta más difícil llevar a cabo pruebas de equipos en los distintos locales.
- Aun teniendo en cuenta la premisa anterior, se ha de evitar la realización simultánea de tareas de montajes y pruebas en una misma instalación a bordo del buque, ya que los riesgos en materia de seguridad lo hacen inviable. Mezclar personal, herramientas y/o documentación de montajes por un lado, y pruebas por otro, en un mismo local, puede dar lugar fallos en ambos procesos.
- La verificación de los requisitos se asignará a la etapa más temprana en la que el requisito queda completamente verificado, y se evitirá en lo posible volver a verificar el requisito en verificaciones posteriores. Todo lo que sea posible verificar en puerto en condiciones seguras, se asignará a las pruebas de puerto. Se evitará duplicar o trasladar a las pruebas de mar, ensayos u

operaciones que ya han sido verificadas previamente. Las salidas a la mar son más complicadas, más caras, más incómodas y más inseguras.

- Se establecerá una secuencia lógica de pruebas, partiendo inicialmente de las pruebas de los elementos de más bajo nivel para, posteriormente, ir aumentando en complejidad y nivel de integración, hasta obtener la integración total del buque. Si comenzamos las pruebas por un sistema muy complejo, y se produce un fallo, resultará mucho más difícil localizar la fuente de dicho fallo, que si hubiéramos ido progresivamente aumentando la complejidad de lo probado.
- El orden lógico para la verificación por prueba de los requisitos de cualquier instalación se desarrollará partiendo de sus controles de montaje y pruebas a presión, para seguir posteriormente con las verificaciones de puesta a punto, pruebas de puerto de la instalación y finalmente, sus pruebas de mar.
- Se planificarán las pruebas teniendo en cuenta las relaciones entre ellas, llevándose a cabo en primer lugar las pruebas que permiten realizar posteriormente pruebas más complejas.
- Las pruebas se distribuirán proporcionalmente durante todo el periodo de pruebas para equilibrar las cargas de trabajo y optimizar los recursos disponibles.
- Se establecerán diferentes grupos de trabajo por disciplina (Electricidad, Mecánica, Sistemas de Combate), de forma que se establezcan varias líneas de avance y puedan llevarse a cabo pruebas (o la preparación de las mismas) de manera simultánea.
- Se tratarán de agrupar aquellas pruebas que precisan disponer de una configuración específica del buque para poder llevarlas a cabo, realizando pruebas de distintos sistemas simultáneamente. Del mismo modo, se agruparán aquellas pruebas o puestas a punto que requieran de una misma asistencia técnica por parte de los suministradores.

Recapitulando: empleando los **requisitos** como hilo conductor de esta metodología, primero los hemos definido (en base a unas características), después hemos acordado el o los métodos de V&V (y sus fases temporales), y finalmente hemos propuesto las evidencias de cumplimiento.

Todo este proceso de V&V quedará **registrado** en las matrices de cumplimiento de requisitos (MCR), que cumplirán, básicamente, tres funciones:

- Establecer el plan de verificación para cada uno de los requisitos establecidos (documentación de verificación, método de verificación, fase de verificación).
- Relacionar cada requisito con las evidencias objetivas del cumplimiento de dicho requisito.
- Registrar el estado de verificación de cada uno de los requisitos, proporcionando los indicadores de avance del proceso.

Después de haber definido las herramientas necesarias, y de haber expuesto la metodología a emplear en esta propuesta de procesos de V&V, veremos un ejemplo de matriz de cumplimiento de requisitos (MCR), que es el objetivo de toda esta metodología, en el que emplearemos dichas herramientas (atributos):

DATOS REQUISITO		VERIFICACIÓN FASE DISEÑO (V1)		
ID	DESCRIPCION	DOC V1.1	DOC V1.2	RES V1.2
RX1	El equipo x1 dará la prestación y1.	EME-x1	FAT-x1	R-FAT-x1
RX2	El equipo x2 dará la prestación y2.	EEL-x2		
RX3	El equipo x3 dará la prestación y3.			
RX4	El equipo x4 dará la prestación y4.		FAT-x4	R-FAT-x4

REQ.	VERIFICACIÓN FASE CONSTRUCCIÓN (V2)	VERIFICACIÓN FASE PRUEBAS (V3)	GRADO DE CUMPLIMIENTO
ID	DOC V2	DOC V3	RES V3
RX1			CUMPLE
RX2		HAT-x2	R-HAT-x2
RX3	FPP-x3	SAT-x3	No Evaluado
RX4	INSP-x4		CUMPLE

Figura 3. Ejemplo de matriz de cumplimiento de requisitos (MCR). (Elaboración propia).

El requisito RX1 ha sido verificado en fase de diseño (V1) mediante *inspección documental*, empleando como evidencia de cumplimiento un esquema mecánico (EME). Asimismo, ha sido verificado en dicha fase, mediante *prueba*, concretamente la prueba de fábrica (FAT) FAT-x1, obteniendo como evidencia de cumplimiento el documento de resultado de prueba R-FAT-x1. Este requisito no precisa de verificación en fase de construcción, ni en fase de pruebas. Dicho requisito se CUMPLE.

El requisito RX2, en fase de diseño, sólo ha sido verificado mediante inspección documental, cuya evidencia es un esquema eléctrico (EEL). Dicho requisito también ha sido verificado en fase de pruebas (V3), mediante la prueba de puerto con protocolo HAT-x2, teniendo como evidencia de cumplimiento el documento de resultado de prueba R-HAT-x2. Dicho requisito se CUMPLE.

El requisito RX3 se ha verificado en fase de construcción (V2), mediante un *control tecnológico*, concretamente una prueba de presión, dejando como evidencia de cumplimiento el documento FPP-x3. Asimismo será verificado en pruebas de mar, mediante la prueba con protocolo SAT-x3. Esta prueba aún no se ha llevado a cabo, por lo que la casilla correspondiente a su resultado “RES V3” está vacía, y el “grado de cumplimiento” es “No Evaluado”.

El requisito RX4 ha sido verificado en fase de diseño mediante la prueba de fábrica FAT-x4, obteniendo como evidencia de cumplimiento el documento R-FAT-x4. También ha sido verificado en fase de construcción, mediante una *inspección* de tanque, dejando como evidencia de cumplimiento el documento INSP-x4. Este requisito se CUMPLE.

De esta forma, cuando todos los requisitos tengan su última casilla de la MCR (grado de cumplimiento) cubierta con un “CUMPLE”, sabremos que el contratista ha cumplido con todo lo estipulado en la especificación de contrato, y que tenemos registro de todas las evidencias de dicho cumplimiento.

## 6. CONCLUSIONES

Los procesos de V&V son parte fundamental de la metodología que la Ingeniería de Sistemas establece a lo largo del diseño y desarrollo de sistemas complejos. Se inician con el establecimiento y aceptación de los requisitos de la especificación de contrato, a los que se van incorporando sucesivamente otro

tipo de requisitos que provienen de normas, instrucciones técnicas,... y finalizan con la entrega del producto. Se realizan a través de la demostración del cumplimiento de dichos requisitos tanto en el diseño como en el producto final.

Dentro de la Ingeniería de Sistemas e Integración (SE&I) no existe una metodología única para llevar a cabo los procesos de V&V. Esto lleva a que entre las diferentes Oficinas de Programa no exista uniformidad al respecto, lo que dificulta la sinergia entre ellas, reduciendo además la utilidad de las lecciones aprendidas.

Tras analizar los requerimientos de las instrucciones del SEDEF, en relación con la validación y verificación, y presentar dos de los métodos más empleados en la ingeniería de sistemas para llevar a cabo los procesos de V&V, se ha seleccionado aquel que mejor se adapta a dichas instrucciones: NASA Systems Engineering Handbook. NASA/SP-2007-6105 Rev.1.

Finalmente se ha mostrado la forma de adaptar dicho método a los programas navales de la DGAM.

Conclusiones finales:

- No parece factible emplear un mismo método de V&V en los programas de adquisición terrestres, navales y aéreos de la DGAM.
- El modelo empleado en el Programa S80 se adapta a lo estipulado en las instrucciones del SEDEF.
- Dicho modelo es extrapolable al resto de programas navales de la DGAM.
- Esta communalidad en los procesos de V&V en los programas navales tiene innegables ventajas tales como lecciones aprendidas, especialización, movilidad del personal,...

## **7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

National Aeronautics and Space Administration. (2007) NASA Systems Engineering Handbook. NASA/SP-2007-6105 Rev.1. Washington, DC.

Department of Defense Standard. (1986) DOD-STD-2106 Development of Shipboard Industrial Test Procedures. Washington D.C.

Instrucción 67/2011, de 15 de septiembre del SEDEF, que regula el proceso de Obtención de Recursos Materiales. BOD-189 de 27 de septiembre de 2011.

Instrucción 72/2012, de 2 de octubre, del SEDEF, que regula el proceso de obtención del armamento y material y la gestión de sus programas. BOD-202 de 16 de octubre de 2012.