

Propuestas para la elaboración de requisitos en proyectos de sistemas de defensa: una aplicación en nuevos desarrollos de misiles de crucero

Proposals for requirements definition in defense systems projects: an application in new cruise missile developments

Resumen: Este artículo presenta propuestas para la elaboración de requisitos relacionados con proyectos de sistemas de defensa, teniendo como aplicación práctica en los próximos desarrollos de misiles de crucero. Con base en la historia del misil Tomahawk, se recomienda la interacción entre la organización patrocinadora del proyecto y los ingenieros de desarrollo en un proceso de ajustes y adaptaciones entre la expectativa inicial del usuario, el nivel de desarrollo tecnológico y las capacidades industriales nacionales. Esta tarea puede brindar análisis en profundidad y soluciones para asesorar técnicamente a las autoridades en la toma de decisiones que involucren proyectos de ingeniería relacionados con la defensa nacional. Aún se crea una nueva clase de requisitos, los requisitos cero, que se caracterizan por contener una demanda inalterable por parte de la autoridad decisoria, afectando decisivamente las características finales del producto. Finalmente, se sugieren complementaciones al texto de los requisitos para comprender mejor los deseos del usuario y permitir prever los plazos y los recursos materiales, financieros y humanos demandados.

Palabras clave: requisitos de diseño; misil de crucero; asesoramiento técnico para la toma de decisiones; ingeniería de Sistemas; Tomahawk.

Abstract: The paper presents proposals for definition of project requirements in defense systems, considering upcoming developments of cruise missiles as an application. Based on the Tomahawk missile history, the text recommends interactions between the project's sponsoring organization and development engineers with a process of adjustments and tailoring among the user's initial expectations, the technology readiness level (TRL), and national industrial skills. This task aims to provide in-depth analyzes and solutions to technically advise authorities in the decision-making process involving engineering projects related to the national defense strategy. In addition, the authors created a new type of requirement, the "zero requirements". It is characterized by an immutable demand from the main stakeholder, which decisively affects the product's final characteristics. Finally, the article proposes improvements in the requirements writing by adding new information fields to understand the user's initial goals better and provide an initial resource/cost/time-consuming estimation.

Keywords: project requirements, cruise missile, technical advice for decision-making, system engineering, Tomahawk.

Eduardo Bento Guerra 

Exército Brasileiro.

Comissão de Absorção de Conhecimentos e Transferência de Tecnologia (CACTTAV).
São José dos Campos, SP, Brasil.
guerra.eduardo@eb.mil.br

José Júlio Dias Barreto 

Exército Brasileiro.

Escritório de Projetos do Exército (EPEX).
Brasília, DF, Brasil.
barreto.julio@eb.mil.br

Recibido: 27 jun. 2022

Aprobado: 14 mar. 2023

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

ISSN on-line 2316-4891 / ISSN print 2316-4833

<http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/index>



Creative Commons
Attribution Licence

1 INTRODUCCIÓN

Los requisitos de diseño son atributos en un sistema. Consisten en resoluciones simples que identifican la capacidad, la característica o el grado de calidad de un sistema y están concebidos para agregar valor o presentar utilidad al usuario/cliente (YOUNG, 2003).

Además, proporcionan las bases fundamentales que permiten a un equipo de desarrollo definir los demás trabajos técnicos asociados durante un proyecto. Es decir, el diseño del concepto, estudio de factibilidad, desarrollo de la solución, fabricación de prototipos, realización de pruebas de ingeniería y ensayos necesarios para acreditar cada uno de estos requisitos del proyecto (INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING, 2015; UNITED STATES, 2020a).

En el desarrollo de sistemas de defensa, cada necesidad del usuario registrada como requisito del proyecto (ya sea requisito técnico u operativo) demanda un nivel de desarrollo tecnológico (Technology Readiness Level –TRL) (UNITED STATES, 2020b) necesario para la implementación de la solución final. Por lo tanto, el proceso de elaboración de los requisitos debe tener en cuenta las tecnologías que domina la base industrial nacional y los recursos disponibles (financieros, humanos, materiales, etc.) (UNITED STATES, 2001). Así es posible considerar y seleccionar las características/funcionalidades entre las opciones que priorizan la obtención rápida de material de uso militar (MUM) o la adquisición de conocimientos y capacidades que aún faltan en el parque industrial del país (LIMA, 2007), lo que por lo general carece de más tiempo.

Cabe advertir que estos factores están interrelacionados y requieren, en la práctica, que los requisitos de diseño sean elaborados de forma interactiva en un proceso de adecuación y ajuste entre la expectativa inicial del usuario y el escenario tecnológico del país (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2017), teniendo como variables de decisión el tiempo disponible para obtener el sistema de defensa y los recursos disponibles (o la magnitud del esfuerzo que realizar) (UNITED STATES, 2001).

Este hecho preferentemente antes de iniciar el desarrollo necesita un trabajo conjunto entre el usuario (o la organización patrocinadora) y los ingenieros/gestores del proyecto (UNITED STATES, 2020a). Un equipo técnico de ingeniería, con experiencia en el tema, es capaz de identificar los factores limitantes y los obstáculos en cada potencial requisito (necesidad/intención inicial) (RICH; JANOS, 1994). El objetivo es brindar información al patrocinador que le permita visualizar el escenario general, asesorándolo en la toma de decisiones que involucren la definición de la mejor manera de obtener lo que se pretende, ya sea mediante adaptaciones en los requisitos propuestos inicialmente (camino con prioridad por menor tiempo de adquisición y/o menor costo) o mediante la elaboración de proyectos auxiliares cuyos resultados sean fundamentales en el proyecto principal (camino con prioridad para el objeto que desarrollar, independientemente del plazo, la capacidad tecnológica disponible y los recursos requeridos).

Queda evidente la importancia de este trabajo conjunto en el desarrollo de munición inteligente, particularmente de misiles de crucero tácticos, ya que se requiere la integración de diferentes sistemas y subsistemas en un entorno de fabricación específico destinado a este fin (FLEEMAN, 2012). Es posible que muchos de estos componentes complejos solo estén disponibles en países extranjeros, y que problemas como los embargos comerciales tienen el potencial de impedir o retrasar un proyecto nacional (GALDINO; SCHONS, 2022). Estas cuestiones pueden

justificarse por un enfoque estratégico, con la apertura de un proyecto auxiliar para la obtención nacional de un elemento aún no dominado técnicamente o no fabricado por la industria del país (UNITED STATES, 2002, 2022b).

Hasta el momento y con base en la experiencia de trabajo brasileña en proyectos de municiones inteligentes en el Ejército Brasileño, no están previstos (LIMA, 2007; BRASIL, 2022) ni son habituales desarrollos con proceso interactivo inicial entre el organismo patrocinador del proyecto en el Ejército Brasileño y el equipo de ingeniería del proyecto con el objetivo final de elaborar el conjunto total de requisitos.

La falta de interacción en las etapas iniciales de los procesos de innovación es uno de los retos que superar en un esfuerzo por implementar una cultura con una visión sincrónica, sistémica e integrada de la innovación tecnológica y los ciclos de vida de un Producto de Defensa (PRODE) (BARBOSA; BUENO CALDEIRA, 2021). La ampliación de las interrelaciones entre los agentes de innovación es beneficiosa para la Base Industrial de Defensa, lo que incrementaría, en consecuencia, el poder disuasorio del país (FRANCO AZEVEDO, 2018).

Por otro lado, la ausencia de alianzas interinstitucionales es una carencia que constituye un obstáculo para la innovación militar (BARBOSA; BUENO CALDEIRA, 2021). Por lo tanto, este artículo espera contribuir a aumentar la interacción entre las organizaciones patrocinadoras y los desarrolladores en los ciclos de innovación de los factores generadores de capacidades militares. Su propósito es establecer una propuesta de clase específica de requisito, cuyos datos se establecen en forma conjunta y de común acuerdo entre el usuario operacional y el plantel de ingenieros, aún en la etapa inicial del ciclo de innovación militar. Dado que todavía no existe un término en la literatura para esta clase de requisito, este artículo propone y adopta el término requisito cero.

La intención es que el requisito cero solo represente los requisitos operativos del PRODE que no se pueden modificar ni eliminar, ni siquiera ante desafíos de carácter técnico, comercial (embargos, por ejemplo) o de fabricación, y que deben prevalecer por sobre los demás. Estas definiciones permitirán comprender mejor el material que desarrollar y prever más precisamente los costos involucrados, los esfuerzos necesarios y los plazos requeridos.

La redacción final de cada requisito cero se logrará con la ayuda de mayores interacciones entre los responsables de establecer los deseos operativos primarios y aquellos cuya tarea es convertir estas necesidades obligatorias en lenguaje de ingeniería, con la consiguiente identificación de soluciones tecnológicas viables y el establecimiento de las características, físicas o de rendimiento, necesarias para el producto de defensa.

Una vez finalizada esta interacción inicial, es posible obtener, posteriormente, la elaboración del documento con el conjunto de requisitos del proyecto (operativos, técnicos, logísticos e industriales), tal y como ya establece la Instrucción General del Ejército (BRASIL, 2022).

Para profundizarse en el tema, el cuarto apartado de este artículo aborda la elaboración de los requisitos cero en el caso de municiones inteligentes, en particular los misiles de crucero, además de identificar las categorías relevantes. El quinto apartado, a su vez, presenta la importancia de ordenar estas categorías según la prioridad de logro. El sexto apartado muestra qué campos de información deben completarse para cada requisito cero. Y, por último, las consideraciones finales se exponen en el séptimo apartado.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Historia del desarrollo de misiles de crucero –el misil Tomahawk

La propuesta de establecer una nueva clase de requisitos, los requisitos cero, tiene como base la historia del desarrollo del misil de crucero estadounidense Tomahawk.

En 1972 SALT I (Strategic Arms Limitation Talks), un conjunto de acuerdos bilaterales y tratados internacionales entre los Estados Unidos y la Unión Soviética, estableció restricciones para detener el avance del uso de misiles balísticos con cargas nucleares. Estados Unidos se preocupaba, además de una guerra nuclear, por el avance de las tecnologías soviéticas relacionadas con los misiles antibuque y el uso, en Vietnam, de vehículos aéreos pilotados a distancia capaces de recopilar información de inteligencia sobre, hasta entonces, zonas inaccesibles o muy defendidas (ROCKET AND MISSILE SYSTEM, 2015).

Quedaba evidente la necesidad de incluir otro tipo de arma capaz de hacer frente a las nuevas amenazas enemigas y superar los crecientes obstáculos impuestos por las restricciones de los acuerdos internacionales. El empeño norteamericano se llevaba a cabo en 1970 cuando el concepto de misil de crucero estratégico (alto alcance), con lanzamiento sumergido, demostró ser factible tras un estudio realizado por el Centro de Análisis Naval (CNA) (WERRELL, 1998). Estados Unidos tenía una extensa flota de submarinos de misiles balísticos nucleares (SSBN) y submarinos de ataque (SSN), ambas armas vitales en la lucha por el dominio del mar durante la Guerra Fría (1946–1991) (POLMAR; MOORE, 2004).

Si bien hubo una propuesta para desarrollar una versión de largo alcance del misil antibuque Harpoon debido a una mayor facilidad y rapidez para obtenerlo, en 1971 se propuso un programa alternativo, Submarine Tactical Anti-ship Weapon System (STAWS), para diseñar un misil con alcance de 500 millas (800 kilómetros (km)). En 1972, el secretario de Defensa Melvin Laird asignó un nuevo nombre al desarrollo: el STAWS pasó a llamarse Submarine-Launched Cruise Missiles –Misiles de crucero lanzados desde submarinos– (SLCM) (YENNE, 2018).

Al comienzo del programa SLCM, se utilizaban solamente los submarinos como medios de lanzamiento. Hubo debates sobre múltiples opciones para definir cómo se almacenarían los misiles de crucero, principalmente si se lanzaran de forma horizontal (a través de los tubos de torpedos) y/o vertical (de la misma forma que un misil balístico). Y además se debatió sobre la construcción de una nueva clase de submarinos o la adaptación de submarinos de ataque y misiles balísticos de la flota. La decisión provino del almirante Hyman Rickover, conocido como el padre de la Marina nuclear. Los nuevos misiles de crucero se lanzarían desde tubos de torpedos de submarinos existentes. Solo esa decisión limitó inmediatamente el diámetro del nuevo misil a 21 pulgadas (533 milímetros (mm)) y la longitud total a unos 20 pies (6096 mm) (YENNE, 2018).

Después de revisar diferentes propuestas de desarrolladores, la Armada de los EE. UU. seleccionó a dos empresas como finalistas, cada una aportaba diferentes soluciones técnicas. Convair, una división de General Dynamics, construyó un prototipo (Figura 1) llamado YBGM-109. Ling-Temco-Vought produjo un demostrador llamado YBGM-110. El ganador fue Convair, y su YBGM-109 tuvo éxito durante dos lanzamientos que tenían como objetivo evaluar el lanzamiento

sumergido con la posterior transición al vuelo de crucero. Sin embargo, el YBGM-110 falló durante el proceso de apertura del ala (YENNE, 2018).

Figura 1 – Durante las etapas de prueba, el prototipo de Convair se conocía solo como General Dynamics Cruise Missile (o el Misil de Crucero de General Dynamics, nuestra traducción).



Fuente: Yenne, 2018.

No obstante, este artículo no tiene el objetivo de narrar los orígenes del misil de crucero Tomahawk, sino de extraer importantes decisiones tomadas en ese entonces y convertirlas en actividades que aboguen por la interacción entre los agentes operativos y los agentes técnicos, aún en la etapa inicial del proceso de innovación militar, para mejorar los proyectos nacionales de desarrollo de nuevas tecnologías de defensa.

2.2 Aspectos del modelo administrativo del ciclo de vida de los materiales de uso militar en el Ejército Brasileño

El Ejército Brasileño gestiona actualmente el desarrollo de sistemas y materiales para uso militar con base en una Instrucción General (EB10-IG-01.018) (BRASIL, 2022) y tiene el objetivo de ordenar y describir los procesos, actividades y eventos que ocurren durante el ciclo de vida del material (no sólo los que serán desarrollados, sino también los ya están desarrollados por iniciativa de terceros), estableciendo el orden y los organismos responsables.

Según esta Instrucción General, tras identificada la demanda para llenar una carencia o mantener la capacidad operativa, el Organismo de Gestión Operacional inicia, mediante el ciclo de producción doctrinal del Sistema de Doctrina Militar Terrestre, la redacción de un documento llamado Condiciones Doctrinales y Operacionales de un Sistema Militar de Defensa de la Fuerza Terrestre (CONDOP SMD F Ter), en el cual debe describir los aspectos doctrinales y operativos, tales como: misión, ambiente operativo, tipos de operación, funcionalidades que realizar,

desempeño esperado, apoyo logístico necesario y tecnológico, material o restricciones humanas que puedan limitar la operación.

Esta acción que se prevé en la EB10-IG-01.018 está acorde con lo que se pretende desde el punto de vista de la ingeniería de desarrollo, es decir, el primer paso para iniciar un proyecto de un nuevo sistema de defensa es conocer y comprender los deseos iniciales de la organización patrocinadora del proyecto (UNITED STATES, 2020a).

Los pasos destinados al análisis de los requisitos del proyecto plantean desafíos importantes tanto para el organismo que estipulará sus necesidades operativas como para los responsables de la ingeniería de los sistemas del proyecto, y las deficiencias en este proceso generan aplazamientos en el proyecto y aumentan considerablemente su costo (PIASZCZYK, 2011). Además, la redacción inadecuada de los requisitos, ya sea por ambigüedades o por la definición errónea de funcionalidades o características, afecta todas las actividades posteriores de ingeniería y de planificación del proyecto (CLARK; HOWELL; WILSON, 2007).

Por lo tanto, se recomienda que la elaboración del CONDOP SMD F Ter cuente también con la participación de los ingenieros que trabajarán en el nuevo desarrollo, brindando información específica que les permita establecer ya las primeras estimaciones de costos, plazos y recursos materiales y humanos necesarios, además de posibilitar el inicio de la redacción de requisitos técnicos, logísticos e industriales.

Tomando como referencia la historia del Tomahawk, se observa claramente la motivación inicial de Estados Unidos para llenar una carencia en su capacidad operativa: acuerdos internacionales que limitaban el uso de su arsenal nuclear y el surgimiento de nuevos sistemas de armas para el enemigo. El alto mando estadounidense decidió desarrollar municiones que, si bien existían desde 1918 en versiones rudimentarias (YENNE, 2018), necesitarían tener un alcance con dimensiones que permitieran su uso a nivel estratégico (WERRELL, 1998).

En este caso se pueden identificar dos puntos importantes para la ingeniería de desarrollo. El primero es el conocimiento previo de las carencias en la capacidad operativa (o de los hechos que impiden su mantenimiento). El concepto de capacidad operativa está relacionado con las actitudes que deben tener las unidades destinadas a obtener un efecto estratégico, operativo o táctico. En general es por medio de una combinación de personal, formación, capacitación, equipo, logística y estructura organizativa, con base en una doctrina de uso (BRASIL, 2015).

El segundo punto es conocer las opciones identificadas preliminarmente como soluciones (sistemas o materiales de uso militar). Ambos permiten que un grupo de ingenieros experimentados contribuya con nuevas propuestas técnicas o análisis de factibilidad (RICH; JANOS, 1994). Y, en debate conjunto con la organización patrocinadora, establecer el tipo de material más adecuado, teniendo en cuenta las posibles limitaciones técnicas, el nivel de desarrollo tecnológico nacional y las capacidades instaladas en el parque industrial (GIRARDI; FRANÇA JÚNIOR; FERREIRA GALDINO, 2022; UNITED STATES, 2002).

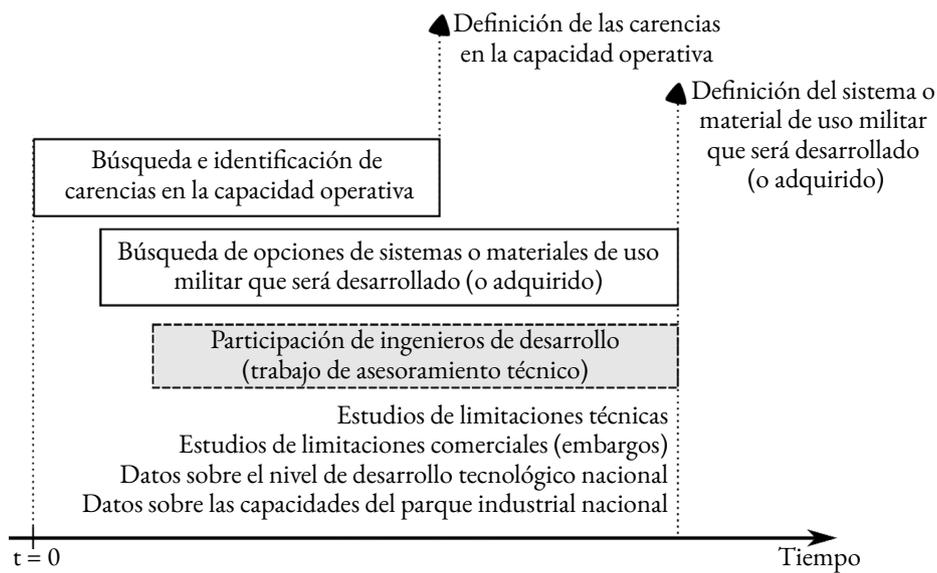
Este es un trabajo interactivo con el propósito de asesorar la toma de decisiones con relación al tipo de material o sistema que desarrollar, promoviendo estimaciones iniciales de las necesidades tecnológicas y los costos/tiempos involucrados.

Una dinámica similar se observó, aproximadamente dos años antes de la decisión del almirante Hyman Rickover de utilizar misiles de crucero lanzados desde submarinos, cuando

el Centro de Análisis Naval (CNA) realizó estudios de ingeniería para verificar la factibilidad de lanzar este tipo de munición sumergida. El CNA es un centro de investigación compuesto por expertos con formación y experiencia en el campo de defensa, y sirve al interés público al brindar análisis en profundidad y soluciones al gobierno de los Estados Unidos respecto al mejor camino para definir la política y gestión de las operaciones y proyectos relacionados con la defensa estadounidense (CNA, 2022).

Se infiere que en los proyectos de desarrollo de sistemas de defensa complejos se recomienda una división temporal en las labores de búsqueda e identificación de carencias de capacidad operativa y búsqueda de opciones de sistemas o materiales de uso militar que serán desarrollados o adquiridos (Figura 2). Por lo tanto, como una forma de contribuir al aumento de la interacción entre los agentes de innovación aún en la etapa inicial del proyecto, se recomienda la participación de un equipo de ingenieros experimentado y cohesionado junto con la organización patrocinadora para ayudar en la selección del sistema de uso militar o material que será desarrollado.

Figura 2 – Ejemplo para aumentar la interacción entre los agentes de innovación militar mediante la inclusión de un equipo de ingenieros de desarrollo aún en la etapa de búsqueda e identificación de carencias en la capacidad operativa y de búsqueda de opciones para sistemas o materiales de uso militar que será desarrollado (o adquirido).



Fuente: Figura elaborada por los autores, 2022.

Un uso complementario de la dinámica que ilustra la Figura 2 es la realización del registro documental de las carencias encontradas en la capacidad operativa, ya que son materias primas importantes para la elaboración de los requisitos técnicos, logísticos e industriales en etapas posteriores. En los proyectos de municiones inteligentes, son algunos ejemplos de estas carencias: (i) los medios de lanzamiento (en el caso del proyecto Tomahawk, hasta entonces no había posibilidad de lanzar misiles de crucero sumergidos); (ii) ciertos objetivos que necesitan ser neutralizados

(buques de guerra u objetivos estratégicos, como puentes, aeródromos, refinerías); y (iii) determinada región del territorio nacional con posibilidad de mejoría en el sistema defensivo (distancias entre objetivos potenciales y puntos de lanzamiento, además de las peculiaridades del entorno operativo). Cabe señalar que otra carencia puede ser la falta de propiedad nacional de una tecnología específica, como cierto tipo de ojiva o componente de munición interno, como actuadores electromecánicos, sistemas de inercia o motores de crucero.

Un ejemplo de documentación (registro) que contiene carencias operativas llenadas con la ayuda del uso de misiles de crucero es el estudio de una estrategia de antiacceso y negación de área en la desembocadura del río Amazonas (CALDAS, 2020). A modo de ilustración, la lectura de la investigación, bajo enfoque de la ingeniería, permite extraer condicionantes climáticos y definir las respectivas normas técnicas aplicables, establecer criterios y soluciones logísticas para el desplazamiento y almacenamiento del sistema/municiones, además de comprender la naturaleza de los objetivos con toda la consiguiente determinación de las características necesarias de rendimiento de la munición.

3 LA CREACIÓN DE REQUISITOS CERO Y SU CONTRIBUCIÓN A UNA MAYOR INTERACCIÓN ENTRE LOS AGENTES DE INNOVACIÓN MILITAR

Desde el punto de vista de un ingeniero en la dirección técnica/gestión de un nuevo proyecto, el inicio del desarrollo de una munición inteligente requiere el conocimiento de datos específicos proporcionados únicamente por el cliente (u organización patrocinadora). Son condicionantes operativos que, en ninguna circunstancia, pueden ser suprimidas o modificadas, incluso ante desafíos técnicos de fabricación o comerciales (embargos, por ejemplo).

Aunque puede parecer que estas imposiciones proporcionadas por el agente operativo (cliente) se interpretan solo como los requisitos operativos ya existentes (BRASIL, 2022), la experiencia en proyectos de desarrollo de sistemas de defensa complejos (REZENDE *et al.*, 2021; REZENDE *et al.*, 2022), como misiles de crucero y cohetes guiados (FLEEMAN, 2012), muestra que es indispensable comprender, registrar y clasificar las restricciones específicas que representan requerimientos operacionales, imponiendo restricciones al desarrollador y determinando tipo, costo y plazo de obtención del producto (BOORD; HOFFMAN, 2016; KRILL, 2001).

El proceso que llevó al desarrollo del misil Tomahawk evidencia una de estas restricciones inmutables bajo cualquier condición. Independientemente del tipo de requerimiento operativo, el nuevo misil debe tener las dimensiones de los tubos de torpedos de submarinos de la Armada de los EE. UU. (YENNE, 2018). Y esta característica no podría cambiarse, incluso ante cualquier dificultad técnica.

Este ejemplo muestra las repercusiones desde la perspectiva de la ingeniería. Algunas variables del proyecto, por ejemplo, autonomía, volumen disponible para combustible y capacidad de carga útil, sufrirían impacto directo (FLEEMAN, 2001) y tendrían sus valores definidos o limitados únicamente con base en una sola imposición operativa. Por no hablar de la posibilidad de fracaso del proyecto, que sólo se advertiría en una etapa avanzada de desarrollo, si esta imponente condición operativa exigiera un esfuerzo (material, financiero, tecnológico, etc.) más allá de

lo posible y estuviera incluido sólo en el conjunto de los demás requisitos operacionales, tal como se realiza en los desarrollos del Ejército Brasileño hasta el momento (BRASIL, 2022).

Las imposiciones operativas inmutables son frecuentes en el diseño de nuevos sistemas o materiales para uso militar. Así como uno de los Requisitos Operacionales Básicos del Sistema de Misiles Táctico de Crucero para el Ejército Brasileño (BRASIL, 2012), que establece que las municiones deben ser lanzadas desde el Vehículo Lanzador Múltiple (AV-LMU) que integra el sistema ASTROS (ASTROS, 2021; OLIVEIRA ALVES, 2022) de la empresa Avibras. Este requisito único restringe inmediatamente la longitud máxima de la munición (el límite es igual a la longitud de la plataforma de lanzamiento del AV-LMU) y, en consecuencia, puede hacer inviable, durante la ejecución del proyecto de desarrollo, lograr otros varios requisitos operativos relacionados con el rendimiento o la funcionalidad, como el alcance y la capacidad de la cabeza de guerra (FLEEMAN, 2001). En casos extremos, el resultado será la impracticabilidad o reducción de las capacidades operativas previamente deseadas, hecho que no es raro en la innovación de los sistemas de defensa (UNITED STATES, 2008).

Teniendo el proceso de desarrollo inicial del misil Tomahawk como ilustración de buenas prácticas en la obtención de productos de defensa, en el que la interacción entre los agentes de innovación permitió realizar estudios tempranos de factibilidad e ingeniería sobre imposiciones operativas inmutables, sumado a los impactos que ciertos requisitos de sistemas de defensa pueden provocar en la obtención del PRODE, se estableció una nueva clase de requisitos, llamada requisitos cero.

Así, el desafío radica en la identificación previa de los condicionantes que serán la base para la construcción del proyecto de ingeniería (requisitos cero). Se recomienda realizar un trabajo interactivo entre los tomadores de decisiones operacionales y el equipo de ingenieros de desarrollo para evaluar las solicitudes de los clientes con alto potencial en la solución de ingeniería (evaluación de los efectos de interrelación entre los requisitos derivados de la operación). Esta acción también es ventajosa por aumentar las interacciones entre los agentes operativos y técnicos en las etapas iniciales del proceso de innovación militar.

De lo anterior se infiere que los diferentes sistemas de defensa tienen sus condicionantes operativas específicas que es más probable que se impongan, con alto riesgo de afectar a las demás decisiones y soluciones de ingeniería durante el curso del desarrollo de PRODE.

Con el fin de profundizar en la propuesta de creación de requisitos cero, el siguiente apartado amplía su concepto para el caso de un sistema de defensa caracterizado por misiles de crucero mediante la búsqueda de sus principales categorías para discutir las en el proceso de interacción entre los agentes de innovación. En este apartado también se abordará la importancia del ordenamiento correcto de los requisitos cero y del conjunto de información que se incorporará en su texto.

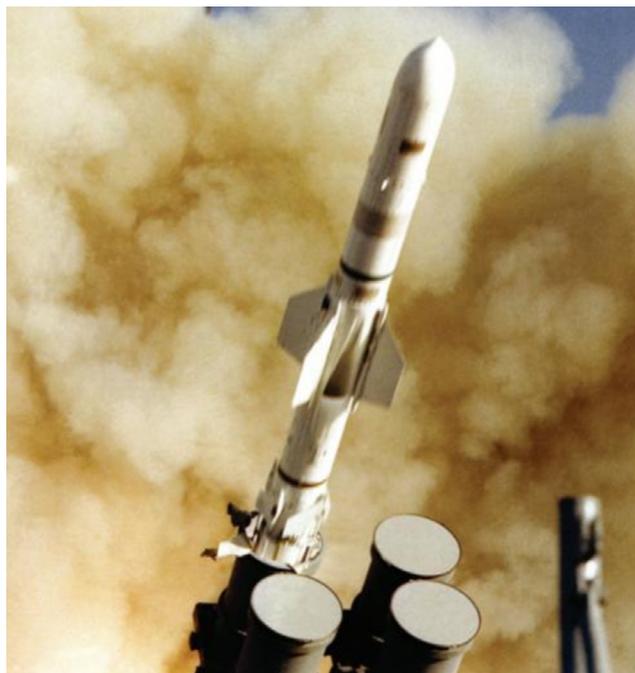
4 REQUISITOS CERO PARA MISILES DE CRUCERO

Para el caso del desarrollo de misiles de crucero, se propone separar los requisitos cero en las siguientes categorías: medios de lanzamiento, alcance, tipos de objetivos (y efectos de destrucción/neutralización), exactitud, restricciones de desempeño, contramedidas, aspectos logísticos y tecnologías críticas.

4.1 Medios de lanzamiento

La categoría medios de lanzamiento deberá contener todas las formas previstas relacionadas al lanzamiento del nuevo misil, ya sea terrestres, marítimas o aéreas. La forma en la que se lanza un misil es una de las principales variables para cambiar el aspecto y la geometría de la munición (FLEEMAN, 2001) y, por lo tanto, es un requisito cero típico. Las municiones con previsión de lanzamiento desde multiplataforma requieren diversas adaptaciones en su fuselaje y receptáculos lanzadores (contenedores o *canisters*). Para un lanzamiento desde el aire, por ejemplo, debe preverse la inclusión de correas de soporte para sujetar el misil al pilón de la aeronave lanzadora y refuerzos estructurales localizados; todos generan un aumento de peso y modifican el volumen interno. Las consecuencias no deseadas son un alcance más corto y/o una capacidad de carga útil reducida con base en la misma geometría.

Figura 3 – Lanzamiento del RGM-84 Harpoon (misil antibuque) desde un canister a bordo del buque de guerra USS Leahy.



Fuente: Yenne, 2018.

4.2 Alcance

La categoría alcance es uno de los principales requisitos operativos que caracterizan a una munición inteligente. Aunque se interpreta comúnmente como la distancia desde el punto de lanzamiento hasta el objetivo, el alcance tiene una gran dependencia con el perfil de vuelo (trayectorias, velocidades y altitudes de vuelo) en vehículos aéreos como misiles de crucero. De esta manera, el valor numérico del alcance siempre debe tratarse junto con la envolvente operativa.

4.3 Tipos de objetivos (y efectos de destrucción/neutralización)

También con alto grado de relevancia, los tipos de objetivos que alcanzar (y los efectos esperados de destrucción/neutralización) influyen directamente en varias decisiones del proyecto tanto a nivel técnico/gerencial como a nivel estratégico. La elección de determinado tipo de objetivo tiene impactos, entre otros factores, en la selección del sensor de navegación terminal (*seeker*) y de cabeza de guerra (alto explosivo, múltiple, termobárica, etc.).

Si bien ya existían algunas iniciativas en Brasil en el desarrollo de tecnologías relacionadas con dispositivos *seekers* (TECNOLOGIA..., 2015) y productos terminados (radar autodirector activo) por una empresa brasileña con el apoyo de un país extranjero (OMNISIS, 2022), la necesidad de derribar cierto tipo de objetivos, junto con otras condicionantes operativas, puede llevar a la obligación de desarrollar un nuevo dispositivo, cuya tecnología aún no se domina totalmente a nivel nacional.

En este contexto, los líderes y gestores de proyecto deben crear tareas que promuevan la obtención de un componente adecuado, lo que puede significar abrir un proyecto paralelo, con su propio equipo y recursos. Esta misma decisión estratégica fue tomada por la empresa estadounidense Raytheon (RAYTHEON, 2015), en preparación para el proceso de modernización del Tomahawk Block IV. Raytheon comenzó el desarrollo independiente, solamente de un nuevo *seeker* multimodo (Figura 4) con el objetivo de mejorar las capacidades del principal misil de crucero del arsenal estadounidense.

Figura 4 – Prueba de vuelo cautivo (2015) del *seeker* multimodo desarrollado por la empresa norteamericana Raytheon. El prototipo de *seeker* se instaló en un morro Tomahawk sujetado al frente de una aeronave T-39.



Fuente: Raytheon, 2015.

4.4 Exactitud

La exactitud indica el grado de acercamiento a una estimación con relación al parámetro real. Respecto a sistemas de artillería, la exactitud significa la probabilidad de que el punto de impacto de la munición (estimación) alcance el objetivo real deseado (parámetro real). Y el término precisión se refiere al grado de acercamiento obtenido en las observaciones con relación a una magnitud. En el caso de las municiones, existe una agrupación de impactos con relación a su magnitud, independientemente de que esta agrupación se aproxime o no al objetivo real (GUERRA; SANTOS, 2020).

**Figura 5 – El círculo a la izquierda representa alta exactitud y alta precisión.
El círculo a la derecha indica baja exactitud y alta precisión.**



Fuente: Guerra; Santos, 2020.

**Figura 6 – El círculo a la izquierda representa alta exactitud y baja precisión.
El círculo a la derecha indica baja exactitud y baja precisión.**



Fuente: Guerra; Santos, 2020.

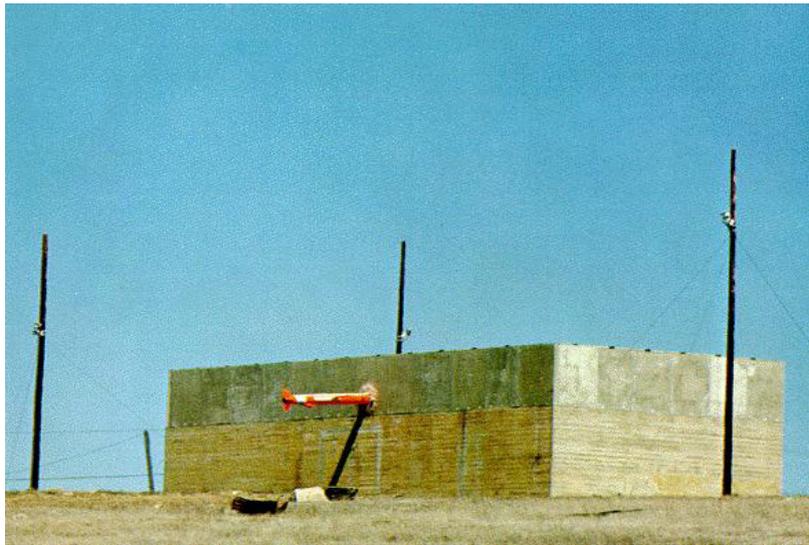
Otro término muy utilizado por los operadores e ingenieros militares que se ocupan de los sistemas de armas que emplean municiones es error circular probable (CEP). El CEP realiza una estimación en la que informa la región donde se espera que ocurra el 50% de los impactos tras el uso de un sistema de armas.

La elección de un valor de CEP (u otro dato sobre la exactitud de la munición) tiene un gran impacto en la selección de los componentes internos responsables del correcto posicionamiento del misil en su trayectoria previamente programada, como el sistema inercial y el sistema de navegación terminal (*seeker*). Cuanto mayor sea la necesidad de garantizar un punto de caída cercano al objetivo, mayor será la exigencia de alta precisión de sensores de navegación, lo que, en última instancia, significa adoptar tecnologías con niveles de desarrollo considerados bajos en Brasil.

Por otra parte, la adopción de componentes fabricados en otros países tiene la posibilidad de sufrir futuros embargos comerciales, incluso en momentos cruciales del desarrollo, como la etapa final de pruebas de homologación del producto para la producción de un lote piloto.

La opción de alcanzar determinado valor de exactitud puede estar ligada a una decisión estratégica de iniciar un desarrollo separado de tecnologías asociadas a los sistemas de navegación, con preceptiva homologación e industrialización del elemento.

Figura 7 – Prueba de vuelo del misil de crucero Tomahawk lanzado desde un submarino frente a la costa de California teniendo como destino un objetivo en el área de la Armada de los EE. UU. ubicado en la isla de San Clemente, California (NICKLAS, 2012).



Fuente: Nicklas, 2012.

4.5 Restricciones de desempeño

Las restricciones de desempeño se refieren a parámetros críticos que se establecen para el cumplimiento de la misión en los diferentes tipos de operaciones. Los típicos ejemplos para misiles de crucero son la altura mínima de vuelo y la velocidad durante el vuelo de crucero.

Un misil que se destina a neutralizar solo buques de guerra ya tiene su altura mínima de vuelo establecida por la solución de ingeniería, y no es necesario que la organización patrocinadora establezca un valor mínimo en sus requisitos operativos (la información operativa necesaria es el tipo de objetivo, es decir, la neutralización de buques de guerra de cierta clase, por ejemplo). En este caso, la altura de vuelo estará estipulada en los requisitos técnicos (la altura mínima de vuelo dependerá del estado del mar para permitir el perfil de vuelo cerca del mar o *sea skimming* –desnatado del mar).

Respecto a los misiles destinados a atacar posiciones en tierra, las alturas mínimas de vuelo están relacionadas con los tipos de batería antiaérea o radares de detección de amenazas presentes durante una operación, y los valores proporcionados por el operativo se utilizarán para adaptar la

solución de ingeniería. Una situación similar se da en la velocidad de crucero, y es más útil que el desarrollador comprenda el escenario operativo que obtenga datos numéricos de velocidad.

Otros ejemplos de restricciones de desempeño son la obligación de operar en un espacio con GPS denegado y el uso de una constelación de satélites para la comunicación entre la munición y la estación terrestre (cambios de ruta o aplicación de comandos de aborto de misión). Se destaca que estas condicionantes también implican el uso de tecnologías aún no establecidas completamente en Brasil, por ejemplo los sistemas inerciales de alta precisión y dispositivos GPS *anti-jamming*¹.

4.6 Contramedidas

Se han desarrollado varias contramedidas para neutralizar los misiles de crucero en dirección hacia su objetivo. La Corporación RAND (SPEIER; NACOUZI; MCMAHON, 2014) resume las principales contramedidas que se determinaron para neutralizar la amenaza que representan los misiles en su trabajo sobre formas de disuadir la proliferación de este tipo de municiones en el mundo.

Las principales variables de desempeño relacionadas con la protección de un misil de crucero en vuelo son: altitud de vuelo, trayectoria (maniobrabilidad), velocidad y nivel de sigilo (*stealth*) (JOHNSTON, 2000), lo que está asociado con el corte transversal de radar (RCS – Radar Cross Section) y la firma infrarroja.

Cabe señalar que solo uno de estos aspectos, la velocidad de crucero, estipula directamente el tipo de motor que será instalado o desarrollado. Los misiles de crucero con velocidades supersónicas de aproximadamente Mach 3 generalmente operan con motores estatorreactores (FRY, 2004) que junto con los motores estatorreactores de combustión supersónica (velocidad hipersónica superior a Mach 5) no han sido desarrollados en Brasil. De esta manera, la imposición operativa de una velocidad de crucero por encima de la velocidad del sonido generará necesariamente un aumento de tiempo y costos para obtener una nueva motorización.

De manera similar, los niveles de sigilo influyen directamente en el aspecto de la solución final, ya sea mediante la aplicación del material absorbente de radiación en el cuerpo del misil o mediante el diseño del fuselaje con facetas destinadas a reducir la firma radar.

4.7 Aspectos logísticos

Las municiones con alto nivel tecnológico requieren una logística específica, que se compone de un complejo sistema de apoyo, incluso en tiempos de paz (DANTAS, 2021).

Algunos aspectos logísticos tienen un alto impacto potencial en la solución final para un nuevo misil y deben abordarse e incorporarse en las discusiones técnicas que aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo. Un ejemplo es la frecuencia requerida entre las actividades de mantenimiento (intervalo de tiempo en que se retira la munición del cargador y se traslada para realizar cualquier procedimiento de revisión o mantenimiento); el uso o supresión

1 Dispositivos GPS *anti-jamming* protegen los receptores de la señal GPS de interferencias intencionales (*jamming*).

de equipos de prueba portátiles (diagnóstico de sistemas electrónicos y mecánicos para verificar que el misil está apto para ser lanzado); el tipo de combustible utilizado en el motor de crucero; y la obligación de que la munición permanezca dentro del contenedor de lanzamiento durante todo el ciclo de vida del material.

Así se observa la importancia de considerar también los factores logísticos como requisitos cero.

4.8 Tecnologías críticas

Una carencia operativa puede ser la ausencia de propiedad nacional de cierta tecnología adoptada en sistemas o materiales para uso militar. Para municiones inteligentes, Brasil aún necesita avanzar en la homologación e industrialización de dispositivos de navegación inercial y de sistemas de navegación terminal (*seekers* –activos, semiactivos y pasivos). También cabe mencionar los desarrollos en motores que permiten velocidades supersónicas de cruceros (motores estatorreactores) e hipersónicos (motores estatorreactores de combustión supersónica), así como avances en la producción de cabezas nucleares como las armas termobáricas.

Sin duda, estos trabajos demandarán mayores costos y, principalmente, tiempo, además la organización patrocinadora será responsable de la decisión de desarrollar tecnologías críticas.

El desarrollo de misiles de crucero está sujeto a varias restricciones, ya sea desde embargos comerciales unilaterales por parte de naciones que tienen componentes críticos (motores, dispositivos de inercia, etc.) o mediante mecanismos de control de exportación de artículos que figuran como prohibidos en acuerdos internacionales, como el MTCR –Régimen del Control de Tecnología de Misiles (MISSILE TECHNOLOGY CONTROL REGIME, 2022). Cabe señalar que el surgimiento del misil Tomahawk se debió a una restricción impuesta por uno de estos acuerdos (SALT I) que limitaba el uso del arsenal nuclear norteamericano.

Una vez aclaradas las categorías de requisitos cero, se puede hacer una síntesis en una tabla con ejemplos hipotéticos (Tabla 1). La numeración “0.?” que se muestra en la Tabla 1 indica el símbolo propuesto para este tipo de requisito. El “0” representa un requisito cero y el signo “?” indica que, luego de seleccionadas las imposiciones operativas, se deben ordenar según un criterio de prioridad.

Los ejemplos de la Tabla 1 ilustran que una imposición operativa en determinada categoría genera automáticamente la renuncia a completar la otra (marcada como no asignada). Al establecer una condicionante para hundimiento de buques de guerra, la exactitud y las contramedidas se convierten en consecuencias inmediatas, y cabe a los desarrolladores establecer por escrito los requisitos técnicos asociados. Además, no hay obligatoriedad de completar todas las categorías, solo aquellas que son requisito operativo que no se puede cambiarlas, a pesar de cualquier otro requisito operativo o dificultad técnica, de fabricación o comercial (en la Tabla 1, por ejemplo, no se asignó ninguna condicionante a la categoría aspecto logístico). Sin embargo, se recomienda informar siempre si la organización patrocinadora acepta el uso de componentes COTS importados o si hay interés en el uso/desarrollo de solo elementos nacionales (categoría tecnologías críticas).

Tabla 1 – Categorías de requisitos cero para misiles de crucero y ejemplos hipotéticos.

Requisitos Cero para misiles de crucero		
Numeración	Categoría	Ejemplo
0.?	Medios de lanzamiento	Lanzamiento desde el vehículo AV-LMU del sistema ASTROS
0.?	Alcance	200 km
0.?	Tipos de objetivos (y efectos de destrucción/neutralización)	Hundir corbetas (similares a la clase Inhaúma de la Armada de Brasil) y fragatas (similares a la clase Niterói de la Armada de Brasil)
0.?	Exactitud	No asignado
0.?	Restricciones de desempeño	No asignado
0.?	Contramidas	Operar en un entorno con GPS denegado
0.?	Aspectos logísticos	No asignado
0.?	Tecnologías críticas	Se pueden utilizar componentes COTS (commercial-of-the-shelf)

Fuente: Tabla elaborada por los autores, 2022.

5 ORDENAMIENTO DE LOS REQUISITOS CERO

Los requisitos cero se basan en el hecho de que existen requisitos operativos inmutables y que guían todo el desarrollo de municiones. Sin embargo, dado que estos requerimientos se establecen antes del inicio formal del proyecto de desarrollo, es posible que se presenten situaciones en las que el cumplimiento de un requisito imposibilite, total o parcialmente, el cumplimiento de otro. En ese sentido, se sugiere una clasificación entre requisitos cero en función del grado de inalterabilidad de los componentes asociados a cada categoría (Tabla 1).

Esta acción tiene como objetivo guiar a los desarrolladores durante los estudios de factibilidad de la solución (asistencia técnica) y el diseño conceptual. Se busca reportar las incompatibilidades a la organización patrocinadora, en caso de que ocurran, y presentar propuestas de solución alineadas con las necesidades operativas prioritarias, incluso antes del inicio del desarrollo.

En el contexto de los misiles de crucero, los ejemplos típicos de requisitos interrelacionados son el alcance de la munición y el tipo de objetivo al que se destina a alcanzar. Un ejemplo de comparación es el Tomahawk cuando se observan las versiones de ataque a tierra (BGM-109C – Bloque II) y a antibuque (BGM-109B – Block I), como se muestra en la Tabla 2.

Con las mismas dimensiones y peso, las versiones BGM-109B y BGM-109C del Tomahawk tienen diferencias significativas de alcance (Tabla 2). Este hecho reside en la necesidad de BGM-109B de utilizar un sistema (*seeker*) con tecnología de radar que permite la navegación terminal hasta objetivos en movimiento en el mar. La experiencia como ingeniero de desarrollo indica que este tipo de dispositivos tienen un peso elevado y ocupan un gran volumen, factores que perjudican el desempeño en vuelo y limitan el espacio destinado al combustible, respectivamente. Se observa, por lo tanto, que los misiles de crucero diseñados a neutralizar objetivos en movimiento tienden a tener un alcance más bajo en comparación con los (similares) utilizados para destruir objetivos fijos (no metálicos) en tierra.

Tabla 2 – Comparación entre alcance y tipos de objetivos para los misiles Tomahawk, Harpoon y Zvezda.

Misil	Dimensiones y Peso ¹	Alcance ²	Tipo de Objetivo	Sistema de Navegación Terminal
Tomahawk (BGM-109C – Block II) ³	L: 5,56 m D: 0,53 m P: 1.203 kg	1297 km ⁴	Fijado al suelo	Inercial + TERCOM + DSMAC
Tomahawk (BGM-109B – Block I) ⁵	L: 5,56 m D: 0,53 m P: 1.205 kg	465 km ⁶	Buques	Radar activo
Harpoon (RGM-84F – Block ID) ⁷	L: 5,3 m D: 0,34 m P: 785 kg	240 km ⁸	Buques	Radar activo
Zvezda Kh-35 ⁹	L: 4,40m D: 0,42 m P: 620 kg	130 km	Buques	Radar activo
Zvezda Kh-35U ¹⁰	L: 4,40m D: 0,42 m P: 670 kg	260 km	Buques	Radar activo

1. La longitud de los misiles (sin *booster*) se representa con la letra L, el diámetro con la D y el peso total con la P. 2. Los valores de alcance dependen del perfil de vuelo y la velocidad. Los datos presentados se basan en valores típicos que caracterizan la munición. 3. Referencia: Nicklas (2012). 4. Referencia: Laur y Llanso (1995). 5. Dimensiones y peso – Referencia: Tomahawk... (2020). 6. Referencia: Laur y Llanso (1995). 7. Dimensiones y peso – Referencia: RGM-84... (2016). 8. Referencia: O'Halloran (2015). 9. Dimensiones, peso y alcance – Referencia: Kh-35... (2018). 10. Dimensiones, peso y alcance – Referencia: Kh-35... (2018).

Fuente: Tabla elaborada por los autores, 2022.

La necesidad operativa de aumentar el alcance de los misiles antibuque fue objeto de mejoras en versiones anteriores del Harpoon. Introducida en 1991, la versión RGM-84F (Block ID) permitió un aumento en el alcance a 240 km mediante un incremento en la longitud para llegar a 5,3 metros (m) (O'HALLORAN, 2015) (versiones anteriores como la RGM-84A tienen un alcance de 92,6 km, con una longitud de 4,64 m (FULLER; EWING, 2016)). Sin embargo, se discontinuó la versión en 2003, ya que una mayor dimensión limitaba el lanzamiento a través de los dispositivos que ya utilizaba la flota de superficie y submarinos (O'HALLORAN, 2015).

Otro ejemplo relevante de desarrollo destinado a mejorar el alcance es el misil ruso Zvezda. La versión inicial permite derribar buques a 130 km del punto de lanzamiento, mientras que el modelo Kh-35U permitía el doble al reemplazar el motor de crucero; reubicar el espacio interno para mayor almacenamiento de combustible; y uno nuevo *seeker* más ligero y con mayor sensibilidad (Kh-35..., 2018). De esta forma, no se modificaron las dimensiones externas, manteniéndose los medios de lanzamiento para ambas versiones.

Los casos anteriores demuestran la importancia de que la organización patrocinadora establezca un orden de prioridad para los requisitos cero. En caso de que exista conflicto entre los requisitos, hay dos posibilidades que se debe seguir: el proceso de corrección (modificación) ocurre con elementos con un índice de inmutabilidad más bajo o cuando la autoridad decisoria opta, después del asesoramiento técnico basado en estudios de factibilidad, por cambiar o eliminar algún

requisito cero causante de la incompatibilidad. Teniendo como base el misil Zvezda se supone que el medio de lanzamiento asume un mayor índice de inmutabilidad (requisito 0.1) y, por tanto, no ha sufrido remodelación. El cumplimiento del requisito de alcance se logró mediante cambios en los componentes internos de la munición (sin cambiar las dimensiones externas).

Teniendo el ejemplo presente en la Tabla 1, es posible crear dos escenarios ficticios (Tabla 3). El escenario A tiene la categoría medio de lanzamiento con el más alto índice de inmutabilidad (número más bajo posible, es decir, 0.1), mientras que la categoría alcance tiene un número más alto, por ejemplo, 0.3. La información proporcionada por la autoridad decisoria indica que cualquier trabajo que será realizado para asegurar el alcance deseado (o cumplir cualquier otro requisito cero) no debe realizarse en el medio de entrega, sino en otro componente interno de la munición (desarrollo de un nuevo combustible específico, modificación de motorización para modelos de menor consumo, reducción de peso estructural, etc.). El escenario B, a su vez, enumera la categoría alcance con la numeración 0.1, que denota la obligación de alcanzar el valor exigido, aunque se implementen algunas adaptaciones en el medio de lanzamiento, tales como cambios en las dimensiones externas de la munición (siempre con la debida autorización de la autoridad decisoria).

Tabla 3 – Ejemplos de posibles escenarios con diferentes ordenaciones de requisitos cero.

Escenario A		Escenario B	
Numeración	Categoría	Numeración	Categoría
0.1	Medios de lanzamiento: AV-LMU del sistema ASTROS	0.1	Alcance: 200 km
0.2	Tipo de objetivo: objetivos en movimiento en el mar	0.2	Tipo de objetivo: objetivos en movimiento en el mar
0.3	Alcance: 200 km	0.3	Medios de lanzamiento: AV-LMU del sistema ASTROS

Fuente: Tabla elaborada por los autores, 2022.

6 LA REDACCIÓN DE REQUISITOS CERO

La literatura especializada en ingeniería de sistemas recomienda que un requisito de diseño sea redactado en una oración simple, con el verbo deberá, capaz de informar lo indispensable (características o funcionalidades) para viabilizar el desarrollo de una solución por parte del equipo de ingenieros (KOELSCH, 2016).

Este artículo propone agregar cuatro nuevos campos de información al texto único y simple que constituye un requisito. El propósito es proporcionar datos adicionales para una mejor comprensión de los deseos y expectativas de la organización patrocinadora. La práctica de trabajo en el desarrollo de municiones inteligentes revela que el proceso de definición y uso de requisitos es recursivo e interactivo con la autoridad decisoria, y los datos complementarios al texto sobre el requisito aportan una sólida solución final y coherente con los objetivos iniciales del proyecto patrocinador. De esta manera, se recomienda incluir el campo justificación, con una descripción de las motivaciones que llevaron a los datos presentes en el requisito.

Además, se sugiere incorporar los campos metodología de prueba (método de prueba que se debe utilizar para probar el requisito), estimación del número de cuerpos de prueba (prototipos necesarios para probar el requisito) y criterios básicos de aceptación (criterio para evaluar el requisito). Así, es posible posibilitar un mejor conocimiento del material al líder técnico del proyecto y brindar a los gerentes una posición sobre la previsión de costos y plazos requeridos.

La Tabla 4 proporciona un ejemplo de cómo completar los campos propuestos para complementar los requisitos de diseño del sistema de defensa.

Tabla 4 – Ejemplo de escritura de requisitos cero con la inclusión de campos de información.

Campo	Contenido
Numeración ¹	0.1
Requisito ²	El misil de crucero se lanzará desde el vehículo AV-LMU del sistema ASTROS 2020.
Justificación ³	A diferencia de otros lanzamientos de misiles de la competencia, el misil de crucero debe lanzarse desde la misma plataforma sobre la que se lanzan los cohetes convencionales del sistema ASTROS, facilitando la logística del misil, principalmente en lo que se refiere a los componentes de los vehículos de lanzamiento ⁴ . Por lo tanto, no se deben realizar cambios en los sistemas mecánicos, hidráulicos y de hardware de AV-LMU. Solo se pueden considerar las actualizaciones de software.
Metodología de prueba ⁵	Prueba en vuelo.
Estimación del número de cuerpos de prueba ⁶	un prototipo de trabajo del misil de crucero.
Criterios básicos de aceptación ⁷	El misil cumplió con todas sus funciones (mecánica, electrónica, etc.) tras ser disparado desde un vehículo AV-LMU junto con los demás vehículos del sistema ASTROS.

^{1,2,3,5,6,7} Elaborado en conjunto con la organización patrocinadora y el equipo de ingenieros. ⁴ Referencia: Dantas (2021).

Fuente: Tabla elaborada por los autores, 2022.

Aunque la Tabla 4 presenta un ejemplo de escritura para los requisitos cero, se recomienda el mismo procedimiento para todos los demás requisitos técnicos, logísticos e industriales del proyecto.

7 CONCLUSIÓN

La tarea de elaboración de requisitos en proyectos de desarrollo de sistemas complejos juega un papel clave en la obtención de una solución final sólida capaz de cumplir con las expectativas y necesidades iniciales de la organización patrocinadora. La experiencia en el desarrollo de municiones inteligentes, como los misiles de crucero, revela que cuanto mayor sea la inversión de tiempo y recursos en el proceso de construcción de los requisitos, menor será la posibilidad de ocurrir problemas relacionados con el aplazamiento de los plazos y el aumento de los costos inicialmente previstos.

En adición a este proceso está el trabajo conjunto entre el usuario y los ingenieros/gestores técnicos, incluso antes del inicio formal del proyecto de desarrollo. Un equipo de ingenieros militares, con experiencia en el tema de interés, tiene la capacidad de brindar análisis en profundidad

y soluciones para asesorar técnicamente a las autoridades en la toma de decisiones que involucran proyectos de ingeniería relacionados con la defensa nacional.

Para ello, es obligatorio que exista una interacción entre la organización patrocinadora y los ingenieros de desarrollo aún en una etapa previa a la elaboración del CONDOP SMD F Ter.

La relevancia de este constante trabajo conjunto también se percibe durante la producción de requisitos operativos, puesto que preferentemente deben contener solo información que caracterice el contexto laboral, evitando, salvo en casos específicos, textos con datos numéricos que puedan orientar una solución técnica específica, ya sea para una parte o todo el Sistema o Material de Uso Militar (SMEM).

En este sentido, la adopción de una nueva clase de requisitos pretende identificar las condicionantes que serán la base para toda la construcción del proyecto de ingeniería. Dada esta importancia se recomienda que los requisitos cero (y el ordenamiento relativo entre ellos) sean condensados en un documento específico, adjunto al CONDOP SMD F Ter.

Además, la inclusión de nuevos campos de información, adheridos al texto del requisito, permite una mejor comprensión de los deseos y objetivos de SMEM, así como brinda a los gestores una previsión inicial de plazos y recursos materiales, financieros y humanos necesarios.

Por último, las propuestas presentadas para la elaboración de requisitos en proyectos de sistemas de defensa contribuyen a obtener una solución final (SMEM) coherente con la demanda operativa inicial, con plazos y costos estimados y controlados de manera más adecuada.

REFERENCIAS

ASTROS. Um Sistema, Múltiplas Missões. **AVIBRAS**, São José dos Campos. 2021. Disponível em: <https://www.avibras.com.br/site/areas-de-atuacao/defesa/astros.html>. Acesso em: 13 mar. 2022.

BARBOSA, F. G. de F. T.; BUENO CALDEIRA, A. Desafios da inovação como estratégia para a geração de capacidades militares terrestres. **Coleção Meira Mattos**: revista das ciências militares, Rio de Janeiro, v. 15, n. 54, p. 273-293, 2021. Disponível em: <http://ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/6904>. Acesso em: 29 mar. 2023.

BOORD, W. J.; HOFFMAN, J. B. **Air Missile Defense Systems Engineering**. Boca Raton: CRC, 2016.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército. **Portaria – EME no 137, de 14 de setembro de 2012**. Aprova o Requisitos Operacionais Básicos nº 05/12, Sistema Míssil Tático de Cruzeiro para o Sistema ASTROS. Brasília, DF: Boletim do Exército, 2012.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército. **Portaria – EME no 309, de 23 de dezembro de 2014**. Aprova o Catálogo de Capacidades do Exército (EB20-C-07.001). Brasília, DF: Boletim do Exército, 2015. Disponível em: http://www.sgex.eb.mil.br/sg8/006_outras_publicacoes/07_publicacoes_diversas/04_estado_maior_do_exercito/port_n_309_eme_23dez2014.html. Acesso em: 29 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército. **Portaria no 1.885-C Ex, de 5 de dezembro de 2022**. Aprova as Instruções Gerais para a Gestão do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (EB10-IG-01.018). Brasília, DF: Boletim do Exército, 2022.

CALDAS, L. R. **O estudo da estratégia de antiacesso e de negação de área (A2/AD), na Foz do Rio Amazonas, e suas consequências para a formulação conceitual do Míssil Tático de Cruzeiro (MTC) MK2**. 2020. Monografia (Especialista em Ciências Militares) – Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2020.

CLARK, D. L.; HOWELL, D. M.; WILSON, C. E. **Improving naval shipbuilding project efficiency through rework reduction**. 2007. Master's Thesis (Master of Science in Systems Engineering Management) – Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2007. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA473801>. Acesso em: 29 mar. 2023.

CNA. National Security Analysis. **CNA**, Arlington, 2022. Disponível em: <https://www.cna.org/>. Acesso em: 6 jun. 2022.

DANTAS, R. P. A importância da logística do míssil tático de cruzeiro. **Revista Doutrina Militar**, Brasília, DF, v. 1, n. 29, p. 4-9, 2021. Disponible en: <http://ebrevistas.eb.mil.br/DMT/article/view/9416>. Acceso en: 29 mar. 2023.

FLEEMAN, E. L. **Tactical Missile Design**. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001.

FLEEMAN, E. L. **Missile design and system engineering**. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.

FRANCO AZEVEDO, C. E. Os elementos de análise da cultura de inovação no setor de Defesa e seu modelo tridimensional. **Coleção Meira Mattos: revista das ciências militares**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 45, p. 145-167, 2018. Disponible en: <http://ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/582>. Acceso en: 29 mar. 2023.

FRY, R. A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution. **Journal of Propulsion and Power**, Reston, v. 20, p. 27-58, 2004. Disponible en: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.9178>. Acceso en: 29 mar. 2023.

FULLER, M.; EWING, D. **IHS Jane's Weapons: Naval 2012-2013**. [S. l.]: Ihs Global Inc, 2016.

GALDINO, J. F.; SCHONS, D. L. Maquiavel e a importância do poder militar nacional. **Coleção Meira Mattos: revista das ciências militares**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 56, p. 369-384, 2022. Disponible en: <http://ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/10070>. Acceso en: 29 mar. 2023.

GIRARDI, R.; FRANÇA JUNIOR, J. A.; FERREIRA GALDINO, J. A customização de processos de avaliação de prontidão tecnológica baseados na escala TRL: desenvolvimento de uma metodologia para o Exército Brasileiro. **Coleção Meira Mattos: revista das ciências militares**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 57, p. 491-527, 2022. Disponible en: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/9597>. Acceso en: 29 mar. 2023.

GUERRA, E. B.; SANTOS, E. H. **Conceito e cálculo do CEP (erro circular provável) para foguetes balísticos e sistemas de artilharia de saturação de área**. Rio de Janeiro: Centro Tecnológico do Exército, 2020.

INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING. **System Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities**. 4. ed. Seattle: INCOSE, 2015.

JOHNSTON, M. S. **An analysis on the survivability of land attack missiles**. 2000. Master's Thesis (Master of Science in Operations Research) – Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2000.

KH-35 Anti-Ship Cruise Missile. **Military Today**, [s. l.], 2018. Disponible en: http://www.military-today.com/missiles/kh_35.htm. Acceso en: 7 jun. 2022.

KOELSCH, G. **Requirements writing for system engineering**. Herndon: Apress, 2016.

KRILL, J. A. Systems engineering of air and missile defenses. **John Hopkins APL Technical Digest**, Laurel, v. 22, n. 3, p. 220-233, 2001. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/290691499_Systems_engineering_of_air_and_missile_defenses. Acceso en: 29 mar. 2023.

LAUR, T. M.; LLANSO, S. L. **Encyclopedia of modern U.S. military weapons**. New York: Berkley Hardcover, 1995.

LIMA, F. da C. **O processo decisório para obtenção de materiais de emprego militar no Exército Brasileiro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2007. Disponible en: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/3514>. Acceso en: 29 mar. 2023.

MISSILE TECHNOLOGY CONTROL REGIME. Página Institucional. **MTCR**, [s. l.], 2022. Disponible en: <https://mtr.info/>. Acceso en: 6 jun. 2022.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA Systems Engineering Handbook**. Washington, DC: NASA, 2017.

NICKLAS, B. D. **American Missiles**. 1962 to the present day. Barnsley: Frontline Books, 2012.

O'HALLORAN, S. J. **Jane's Weapons: Strategic 2015 2016: Yearbook**. [S. l.]: Ihs Global Inc, 2015.

OLIVEIRA ALVES, A. O sistema ASTROS como uma ferramenta de dissuasão e presença. **Coleção Meira Mattos: revista das ciências militares**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 58, p. 43-60, 2023. Disponible en: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/8626>. Acceso en: 29 mar. 2023.

OMNISYS. Página Institucional. **Omnisys**, [s. l.], 2022. Disponible en: <https://www.omnisys.com.br/>. Acceso en: 1 jun. 2022.

PIASZCZYK, C. Model based systems engineering with Department of Defense architectural framework. **Systems Engineering**, San Diego, v. 14, n. 3, p. 305-326, 2011. Disponible en: <https://incose.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.20180>. Acceso en: 29 mar. 2023.

POLMAR, N.; MOORE, K. **Cold War Submarines: The Design and Construction of the U.S. and Soviet Submarines**. Washington, DC: Potomac, 2004.

RAYTHEON. Raytheon to test new multi-mode seeker for Tomahawk cruise missile. **Raytheon Technologies**, Waltham, 2015. Disponible en: <https://raytheon.mediaroom.com/2015-04-14-Raytheon-to-test-new-multi-mode-seeker-for-Tomahawk-cruise-missile>. Acceso en: 1 jun. 2022.

REZENDE, L. B. de *et al.* Main competencies to manage complex defence projects. **Project Leadership and Society**, Amsterdam, v. 2, p. 1–13, 2021. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666721521000089?via%3Dihub>. Acceso en: 29 mar. 2023.

REZENDE, L. B. de *et al.* The main Project complexity factors and their interdependencies in defence projects. **Project Leadership and Society**, Amsterdam, v. 3, p. 1–12, 2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666721522000102>. Acceso en: 29 mar. 2023.

RGM-84 Harpoon. **Weaponsystems.net**, [s. l.], 2016. Disponible en: <https://weaponsystems.net/system/583-RGM-84+Harpoon>. Acceso en: 7 jun. 2022.

RICH, B.; JANOS, L. **Skunk Works: a personal memoir of my years at Lockheed**. Boston: Little, Brown, 1994.

ROCKET AND MISSILE SYSTEM. Strategic missiles. **Britannica**, Chicago, 2015. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/rocket-and-missile-system/Strategic-missiles#ref521083>. Acceso en: 20 maio 2022.

SPEIER, R. H.; NACOUZI, G.; MCMAHON, K. S. Penaid nonproliferation. Hindering the spread of countermeasures against cruise missile defenses. **Rand Corporation**, Santa Monica, 2014. Disponible en: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR378.html. Acceso en: 29 mar. 2023.

TECNOLOGIA de sensor cria sistema inovador para guiar míssil. **USP – Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2015. Disponible en: <https://www5.usp.br/noticias/tecnologia-2/tecnologia-de-sensor-cria-sistema-inovador-para-guiar-missil/>. Acceso en: 1 jun. 2022.

TOMAHAWK BGM-109 B/E anti-ship missile. **Missilery.info**, [s. l.], 2020. Disponible en: <https://en.missilery.info/missile/bgm109b-e>. Acceso en: 7 jun. 2022.

UNITED STATES. Department of Defense. **Systems Engineering Fundamentals**. Fort Belvoir: Defense Acquisition University, 2001.

UNITED STATES. Accountability Office. General Accounting Office. **Defense acquisitions: steps to improve the Crusader Program's investment decisions**. Washington, DC: General Accounting Office, 2002.

UNITED STATES. Accountability Office. General Accounting Office. **Best practices: increased focus on requirements and oversight needed to improve DOD's acquisition environment and weapon system quality.** Washington, DC: General Accounting Office, 2008.

UNITED STATES. Department of Defense. **Engineering of Defense Systems.** Washington, DC: Department of Defense, 2020a.

UNITED STATES. Accountability Office. General Accounting Office. **Technology readiness assessment guide:** best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects. Washington, DC: General Accounting Office, 2020b.

WERRELL, K. P. **The Evolution of the Cruise Missile.** Washington, DC: Air University, 1998.

YENNE, B. **The Complete History of U.S. Cruise Missiles:** From Kettering's 1920's Bug and 1950' Snark to Today's Tomahawk. North Branch: Specialty, 2018.

YOUNG, R. R. **The requirements engineering handbook.** Norwood: Artech House, 2003.

