

Propostas para elaboração de requisitos em projetos de sistemas de defesa: uma aplicação em novos desenvolvimentos de mísseis de cruzeiro

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

Resumo: Este artigo apresenta propostas para elaboração de requisitos relacionados aos projetos de sistemas de defesa, tomando como aplicação para os próximos desenvolvimentos de mísseis de cruzeiro. Com base no histórico do míssil Tomahawk, recomenda-se interações entre a organização patrocinadora do empreendimento e engenheiros de desenvolvimento em um processo de ajustes e adequações entre a expectativa inicial do usuário, o nível de maturidade tecnológica e capacidades industriais nacionais. Essa tarefa pode prover análises aprofundadas e soluções para assessorar tecnicamente as autoridades nas tomadas de decisão, envolvendo projetos de engenharia relacionados à defesa nacional. Ainda, uma nova classe de requisitos, os requisitos zero, é criada e caracterizada por conter uma demanda imutável oriunda da autoridade decisora, afetando, decisivamente, características finais do produto. Por fim, são sugeridos complementos ao texto dos requisitos, de maneira a melhor compreender os desejos do usuário e possibilitar previsão de prazos e dos recursos materiais, financeiros e humanos demandados.

Palavras-chave: requisitos de projeto; míssil de cruzeiro; assessoria técnica para tomada de decisão; engenharia de sistemas; Tomahawk.

Abstract: This article presents proposals for definition of requirements related to defense systems projects, considering upcoming developments of cruise missiles as an application. Based on the Tomahawk missile history, it recommends interactions between the project's sponsoring organization and development engineers in a process of adjustments and tailoring between the user's initial expectations, the technology readiness level (TRL), and national industrial skills. This task may provide in-depth analyzes and solutions to technically advise authorities in the decision-making process, involving engineering projects related to the national defense strategy. Also, a new type of requirement, the zero requirements, is created and 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

Recebido: 27 jun. 2022

Aprovado: 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 INTRODUÇÃO

Requisitos de projeto são atributos em um sistema. Constituem em simples sentenças que identificam a capacidade, a característica ou o nível de qualidade de um sistema e são concebidos de modo a agregar valor ou apresentar utilidade para o usuário (ou cliente) (YOUNG, 2003).

Além disso, eles fornecem as bases principais que possibilitam a uma equipe de desenvolvimento definir todos os demais trabalhos técnicos associados no transcurso de um projeto. Ou seja, o desenvolvimento do conceito, estudo de viabilidade, desenvolvimento da solução, fabricação de protótipos, realização de ensaios de engenharia e testes necessários para comprovação de cada um desses requisitos de projetos (INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING, 2015; UNITED STATES, 2020a).

No desenvolvimento de sistemas de defesa, cada necessidade do usuário registrada como requisito de projeto (seja requisito técnico, seja operacional) demanda um determinado nível de maturidade tecnológica (Technology Readiness Level – TRL) (UNITED STATES, 2020b) necessária para a implementação da solução final. O processo de elaboração do conjunto de requisitos deve, portanto, considerar as tecnologias dominadas pela base industrial nacional e os recursos totais disponibilizados (financeiros, humanos, materiais etc.) (UNITED STATES, 2001). Dessa forma, é possível ponderar e selecionar características/funcionalidades entre opções que priorizem a obtenção rápida de um material de emprego militar (MEM) ou a aquisição de conhecimentos e capacidades ainda ausentes no parque fabril do país (LIMA, 2007), o que geralmente requer mais tempo.

É imediato notar que esses fatores estão inter-relacionados e, na prática, exigem que os requisitos de projeto sejam elaborados de maneira interativa em um processo de adequação e ajuste entre a expectativa inicial do usuário e o cenário tecnológico do país (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2017), tendo como variáveis de decisão, o tempo disponível para obtenção do sistema de defesa e os recursos disponíveis (ou a dimensão do esforço que se pretende despender) (UNITED STATES, 2001).

Tal fato exige, preferencialmente antes da decisão de iniciar o desenvolvimento, um trabalho conjunto entre o usuário (ou a organização patrocinadora) e os engenheiros/gestores do projeto (UNITED STATES, 2020a). Uma equipe técnica de engenharia, experiente no assunto de interesse, é capaz de identificar fatores limitantes e óbices em cada potencial requisito (necessidade/desejo inicial) (RICH; JANOS, 1994). O objetivo é abastecer o patrocinador com informações que o permitam visualizar o cenário geral, assessorando-o nas tomadas de decisões que envolvem a definição do melhor caminho para a obtenção do que foi pretendido, seja por intermédio de adaptações nos requisitos inicialmente propostos (caminho com prioridade para menor tempo de obtenção e/ou menor custo), seja pela preparação de projetos auxiliares cujos resultados são fundamentais no projeto principal (caminho com prioridade para o objeto a ser desenvolvido, independentemente do prazo, da capacidade tecnológica disponível e dos recursos exigidos).

A importância desse trabalho em conjunto fica evidente no desenvolvimento de munições inteligentes, em especial, mísseis táticos de cruzeiro, uma vez que é exigida a integração de distintos sistemas e subsistemas em um ambiente fabril específico e dedicado a esse fim (FLEEMAN, 2012). Muitos desses complexos componentes podem estar disponíveis

apenas em países estrangeiros, e problemas como embargos comerciais têm a possibilidade de impedir ou atrasar um empreendimento nacional (GALDINO; SCHONS, 2022). Tais questões podem justificar uma abordagem estratégica, com a abertura de um projeto auxiliar para a obtenção nacional de um item ainda não tecnicamente dominado ou não fabricado pela indústria do país (UNITED STATES, 2002, 2022b).

No Brasil, até o momento e tomando como base a experiência de atuação em projetos de munições inteligentes no Exército Brasileiro, não é previsto (LIMA, 2007; BRASIL, 2022), e por essa razão também não é costumeiro, desenvolvimentos com um processo interativo inicial entre o órgão patrocinador do empreendimento no Exército Brasileiro e a equipe de engenharia do projeto com o objetivo final de elaborar o conjunto total de requisitos.

A falta de interação nas fases iniciais de processos de inovação é um dos desafios a serem suplantados dentro de um esforço de implantação de uma cultura com visão síncrona, sistêmica e integrada dos ciclos de inovação tecnológica e de vida de um Produto de Defesa (PRODE) (BARBOSA; BUENO CALDEIRA, 2021). A ampliação das inter-relações entre os agentes da inovação é benéfica para Base Industrial de Defesa, o que traria, em consequência, o crescimento do poder dissuasório do país (FRANCO AZEVEDO, 2018).

A ausência de parcerias interinstitucionais é uma lacuna que ainda configura obstáculo à inovação militar (BARBOSA; BUENO CALDEIRA, 2021). Este artigo visa, portanto, contribuir com um acréscimo na interação entre os órgãos patrocinadores e os desenvolvedores em ciclos de inovação de fatores geradores de capacidades militares. O propósito é propor uma classe específica de requisito, cujos dados são estabelecidos em conjunto e em comum acordo entre o usuário operacional e o corpo de engenheiros, ainda em fase inicial do ciclo de inovação militar. E uma vez que não existe nomenclatura para essa classe de requisito na literatura, este artigo propõe e adota o termo requisito zero.

A intenção é que o requisito zero represente apenas exigências operacionais do PRODE que não podem ser alteradas ou eliminadas, mesmo diante de desafios de natureza técnica, comercial (embargos, por exemplo) ou fabril, e que deve preponderar sobre todas as demais. Essas definições permitirão uma melhor compreensão do material a ser desenvolvido e uma provisão mais acurada sobre os custos envolvidos, os esforços necessários e os prazos demandados.

A redação final de cada requisito zero será alcançada com ajuda do incremento nas interações entre os responsáveis por estabelecer os desejos operacionais primários e aqueles cuja tarefa é converter essas necessidades mandatórias em linguagem de engenharia, com a consequente identificação de soluções tecnológicas viáveis e estabelecimento das características, físicas ou de desempenho, necessárias ao produto de defesa.

Uma vez finalizada essa interação inicial, pode-se obter, em momentos subsequentes, a produção do documento com o conjunto total de requisitos de projeto (operacionais, técnicos, logísticos e industriais), conforme já estabelecido em Instrução Geral do Exército (BRASIL, 2022).

Como forma de aprofundar o tema, a seção 4 deste artigo aborda a elaboração dos requisitos zero para o caso de munições inteligentes, em especial, os mísseis de cruzeiro, e identifica as categorias relevantes. A seção 5, por sua vez, apresenta a importância de ordenar essas categorias conforme a prioridade de atingimento. Já a seção 6 ilustra quais campos de informações devem ser preenchidos para cada requisito zero. Por fim, as considerações finais são postas na seção 7.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Histórico de desenvolvimento de mísseis de cruzeiro – o míssil Tomahawk

A proposta de estabelecer uma nova classe de requisitos, os requisitos zero, tem sua importância ilustrada na história do desenvolvimento do míssil de cruzeiro estadunidense Tomahawk.

Em 1972, o SALT I (Strategic Arms Limitation Talks), conjunto de conferências bilaterais e tratados internacionais entre Estados Unidos e União Soviética, estabeleceu restrições que visavam conter o avanço do uso de mísseis balísticos com cargas nucleares. Além do contexto da guerra nuclear, havia uma preocupação dos Estados Unidos com relação ao avanço de tecnologias soviéticas relacionadas com mísseis antinavios e com o emprego, no Vietnã, de veículos aéreos remotamente pilotados com capacidade de angariar informações de inteligência sobre, até então, áreas inacessíveis ou altamente defendidas (ROCKET AND MISSILE SYSTEM, 2015).

Havia claramente uma necessidade de inclusão de outro tipo de armamento capaz de lidar com novas ameaças inimigas e de contornar os crescentes obstáculos impostos por restrições de acordos internacionais. Os esforços norte-americanos nesse sentido ocorreram ainda em 1970, quando o conceito de um míssil de cruzeiro estratégico (elevado alcance), com lançamento submerso, foi demonstrado como factível após um estudo realizado pelo Center for Naval Analysis (CNA) (WERRELL, 1998). Os Estados Unidos tinham uma extensa frota de submarinos nucleares de mísseis balísticos (SSBN), além dos submarinos de ataque (SSN), ambos armas vitais na luta pelo domínio do mar durante a Guerra Fria (1946–1991) (POLMAR; MOORE, 2004).

Embora houvesse uma proposta de desenvolver uma versão de longo alcance do míssil antinavio Harpoon, devido a uma maior facilidade e rapidez em sua obtenção, um programa alternativo foi proposto em 1971, Submarine Tactical Anti-ship Weapon System (STAWS), com o objetivo de projetar um míssil com alcance de 500 milhas (800 quilômetros (Km)). Em 1972, um novo nome foi atribuído ao desenvolvimento pelo Secretário de Defesa Melvin Laird, o STAWS foi renomeado como Submarine-Launched Cruise Missiles (SLCM) (YENNE, 2018).

No início do programa SLCM, apenas submarinos foram considerados como meios de lançamento. Múltiplas opções foram debatidas para definir como os mísseis de cruzeiro seriam estocados e, principalmente, lançados horizontalmente (por meio dos tubos de torpedo) e/ou verticalmente (da mesma forma que um míssil balístico). Houve também debates sobre construir uma nova classe de submarinos ou adaptar os submarinos de ataque e de mísseis balísticos da frota. A decisão veio do Almirante Hyman Rickover, considerado o pai da Marinha com propulsão nuclear. Os novos mísseis de cruzeiro seriam lançados dos tubos de torpedo dos submarinos já existentes. Apenas essa decisão limitou, imediatamente, o diâmetro do novo míssil em 21 polegadas (533 milímetros (mm)) e o comprimento total em cerca de 20 pés (6096 mm) (YENNE, 2018).

Após análises de diferentes propostas de desenvolvedores, a Marinha dos Estados Unidos selecionou duas empresas como finalistas, cada uma com diferentes soluções técnicas. A Convair, uma divisão da General Dynamics, construiu um protótipo (Figura 1) sob a designação YBGM-109. Já a Ling-Temco-Vought produziu um demonstrador denominado YBGM-110. A vencedora foi a Convair, tendo seu YBGM-109 obtido sucesso durante dois lançamentos que visavam avaliar o

lançamento submerso com a posterior transição para o voo de cruzeiro. O YBGM-110, no entanto, apresentou falha durante o processo de abertura das asas (YENNE, 2018).

Figura 1 – Durante as fases de testes, o protótipo da Convair era conhecido apenas como General Dynamics Cruise Missile (ou o Míssil de Cruzeiro da General Dynamics, tradução nossa)



Fonte: Yenne, 2018

Contudo, o objetivo deste artigo não é contar as origens do míssil de cruzeiro Tomahawk, mas sim extrair importantes decisões tomadas à época e convertê-las em atividades que preconizam a interação entre os agentes operacionais e os agentes técnicos, ainda na fase inicial do processo de inovação militar, de modo a aprimorar projetos de desenvolvimento nacionais de novas tecnologias de defesa.

2.2 Aspectos do modelo administrativo do ciclo de vida dos materiais de emprego militar no Exército Brasileiro

Atualmente, o Exército Brasileiro gera o desenvolvimento dos sistemas e materiais de emprego militar com base em uma Instrução Geral (EB10-IG-01.018) (BRASIL, 2022), cuja finalidade é ordenar e descrever os processos, atividades e eventos que ocorrem durante o ciclo de vida do material (não só os a serem desenvolvidos, mas também os já desenvolvidos por iniciativa de terceiros), fixando a ordem e os órgãos responsáveis.

De acordo com essa Instrução Geral, após identificada uma demanda de preenchimento de lacuna ou manutenção de capacidade operacional, o Órgão de Direção Operacional inicia, por intermédio do ciclo de produção doutrinária do Sistema de Doutrina Militar Terrestre, a elaboração de um documento denominado Condicionantes Doutrinárias e Operacionais de um Sistema Militar de Defesa da Força Terrestre (CONDOP SMD F Ter), que deve descrever os aspectos doutrinários e operacionais, tais como: missão, o ambiente operacional, os tipos de operação,

as funcionalidades a serem executadas, os desempenhos esperados, os apoios logísticos necessários e as restrições de ordem tecnológica, material ou humana que possam limitar a operação.

Essa ação prevista na EB10-IG-01.018 está aderente ao desejado sob o ponto de vista da engenharia de desenvolvimento, ou seja, o primeiro passo ao iniciar um projeto de um novo sistema de defesa deve ser conhecer e entender os desejos iniciais da organização patrocinadora do empreendimento (UNITED STATES, 2020a).

As etapas destinadas à análise de requisitos de projeto impõem desafios significativos tanto para o órgão que estipulará suas necessidades operacionais quanto para os responsáveis pela engenharia de sistemas do projeto, e deficiências nesse processo causam atrasos no empreendimento e elevam, sobremaneira, seu custo (PIASZCZYK, 2011). Ademais, a redação inadequada de requisitos, seja por meio de ambiguidades, seja pela definição errônea de funcionalidades ou características, afeta todas as atividades subsequentes de engenharia e de planejamento do projeto (CLARK; HOWELL; WILSON, 2007).

Dessa forma, é recomendado que a elaboração da CONDOP SMD F Ter também tenha participação dos engenheiros que atuarão no novo desenvolvimento, abastecendo-os com informações específicas que os permitam já traçar as primeiras estimativas de custos, prazos e recursos materiais e humanos necessários, além de possibilitar o início da redação dos requisitos de caráter técnico, logístico e industrial.

Tendo como referência o histórico do Tomahawk, observa-se claramente a motivação inicial dos Estados Unidos para preencher uma lacuna em sua capacidade operacional: acordos internacionais que limitavam o uso de seu arsenal nuclear e o surgimento de novos sistemas de armas do inimigo. A decisão do alto comando norte-americano foi por desenvolver uma munição que, embora já existisse desde 1918 em versões rudimentares (YENNE, 2018), necessitaria ter um alcance com dimensões que possibilitassem seu emprego no nível estratégico (WERRELL, 1998).

Nesse caso, pode-se identificar dois importantes pontos para consumo da engenharia de desenvolvimento. O primeiro é o conhecimento prévio das lacunas na capacidade operacional (ou dos fatos que impedem a sua manutenção). O conceito de capacidade operativa está relacionado às atitudes que devem ter as unidades orientadas para obter um efeito estratégico, operacional ou tático. Geralmente mediante uma combinação de pessoal, instrução, adestramento, equipamento, logística e estrutura organizacional, baseadas em uma doutrina de emprego (BRASIL, 2015).

O outro ponto é estar a par das opções preliminarmente identificadas como soluções (sistemas ou materiais de emprego militar). Ambos possibilitam a um grupo de engenheiros experimentados contribuir com novas proposições técnicas ou análises de viabilidade (RICH; JANOS, 1994). E, em um debate conjunto com a organização patrocinadora, estabelecer o tipo de material mais adequado, tendo já levado em consideração possíveis limitações técnicas, o nível de maturidade tecnológica nacional e as capacidades instaladas no parque fabril (GIRARDI; FRANÇA JÚNIOR; FERREIRA GALDINO, 2022; UNITED STATES, 2002).

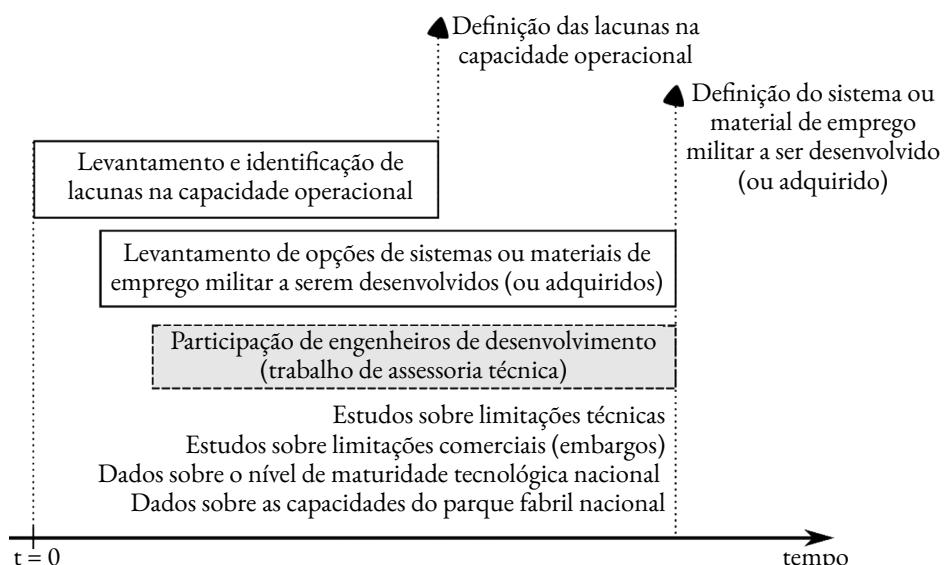
Trata-se de um trabalho interativo com a finalidade de assessorar a tomada de decisão em relação ao tipo de material ou sistema a ser desenvolvido, promovendo estimativas iniciais das necessidades tecnológicas e dos custos/prazos envolvidos.

Dinâmica similar foi observada quando o Center for Naval Analysis (CNA), cerca de dois anos antes da decisão do Almirante Hyman Rickover por utilizar mísseis de cruzeiro lançados

de submarinos, realizou estudos de engenharia para verificar a viabilidade do lançamento desse tipo de munição quando submersas. O CNA é uma organização de pesquisa composta por um quadro de especialistas com formação e experiência na área de defesa que serve ao interesse público provendo análises aprofundadas e soluções para auxiliar os líderes do governo dos Estados Unidos a escolher o melhor caminho na definição de políticas e gerenciamento de operações e projetos relacionados à defesa norte-americana (CNA, 2022).

Infere-se, portanto, que em projetos de desenvolvimento de sistemas de defesa complexos é recomendada uma divisão temporal nos trabalhos de elaboração da Comop (Figura 2). Sendo assim, sugere-se, como forma de contribuir com o aumento da interação entre os agentes da inovação ainda na fase inicial do empreendimento, a participação de uma experiente e coesa equipe de engenheiros em conjunto com a organização patrocinadora para auxiliar nos trabalhos de seleção do sistema ou material de emprego militar a ser desenvolvido. Apenas após, propõe-se definir a missão, o ambiente operacional e os tipos de operação, além das funcionalidades e o desempenho esperado (conteúdos já previstos para constar na Comop segundo a EB10-IG-01.018).

Figura 2 – Ilustração de uma forma de aumentar a interação entre os agentes de inovação militar, por meio da inclusão da participação de equipe de engenheiros de desenvolvimento ainda na fase de levantamento e identificação das lacunas na capacidade operacional e de levantamento de opções de sistemas ou materiais de emprego militar a serem desenvolvidos (ou adquiridos)



Fonte: Figura elaborada pelos autores, 2022

Um aproveitamento complementar da dinâmica ilustrada pela Figura 2 é a realização do registro documental das lacunas encontradas na capacidade operacional, uma vez que são importantes matérias-primas para a elaboração dos requisitos técnicos, logísticos e industriais em etapas subsequentes. Em projetos de munições inteligentes, alguns exemplos dessas lacunas são: (i) os meios de lançamento (no caso que resultou no projeto do Tomahawk, não havia até então a possibilidade de lançamento de mísseis de cruzeiro quando submersos); (ii) determinados

alvos que necessitam ser neutralizados (navios de guerra ou alvos estratégicos, como pontes, aeródromos, refinarias); e (iii) determinada região do território nacional com possibilidade de melhoria no sistema defensivo (distâncias entre potenciais alvos e pontos de lançamento, além das peculiaridades do ambiente operacional). Ressalta-se que uma lacuna também pode vir a ser a ausência de domínio nacional de uma tecnologia específica, como um determinado tipo de cabeça de guerra ou componente interno da munição, como atuadores eletromecânicos, sistemas iniciais ou motores de cruzeiro.

Um exemplo de documentação (registro) que condensa lacunas operacionais preenchidas com ajuda do emprego de mísseis de cruzeiro é o estudo sobre uma estratégia de antiacesso e de negação de área, na foz do rio Amazonas (CALDAS, 2020). Apenas a título de breve ilustração, a leitura da pesquisa, sob o foco da engenharia, possibilita extrair condicionantes climáticas e definir as respectivas normas técnicas aplicáveis, estabelecer critérios e soluções logísticas para deslocamento e armazenamento do sistema/munições, além de compreender a natureza dos alvos, com toda a decorrente determinação de características necessárias de desempenho da munição.

3 A CRIAÇÃO DOS REQUISITOS ZERO E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA O AUMENTO DA INTERAÇÃO ENTRE AGENTES DA INOVAÇÃO MILITAR

Sob o ponto de vista de um engenheiro na liderança técnica/gestão de um novo projeto, o início do desenvolvimento de uma munição inteligente requer o conhecimento de dados específicos providos apenas pelo cliente (ou organização patrocinadora). Trata-se de condicionantes operacionais que, sob nenhuma hipótese, podem ser suprimidas ou alteradas, mesmo diante de desafios técnicos, fabris ou comerciais (embargos, por exemplo).

Embora em uma primeira leitura essas imposições providas pelo agente operacional (cliente) possam ser interpretadas apenas como os já existentes requisitos operacionais (BRASIL, 2022), a experiência em projetos de desenvolvimento de sistemas complexos de defesa (REZENDE *et al.*, 2021; REZENDE *et al.*, 2022), tais como mísseis de cruzeiro e foguetes guiados (FLEEMAN, 2012), mostra a indispesabilida de compreender, registrar e classificar condicionantes específicas que representam exigências operacionais, impondo restrições ao desenvolvedor e determinando o aspecto, o custo e o prazo de obtenção do produto (BOORD; HOFFMAN, 2016; KRILL, 2001).

O processo que culminou no desenvolvimento do míssil Tomahawk evidencia uma dessas restrições imutáveis sob quaisquer condições. A despeito de qualquer outro requisito operacional, o novo míssil deveria ter as dimensões dos tubos de torpedo dos submarinos da Marinha dos Estados Unidos (YENNE, 2018). E essa característica não poderia ser alterada, mesmo diante de qualquer dificuldade técnica.

Esse exemplo ilustra as repercuções sob o olhar da engenharia. Algumas variáveis do projeto, por exemplo, o alcance, o volume disponível para combustível e a capacidade de carga útil, sofreriam impacto direto (FLEEMAN, 2001) e teriam seus valores definidos ou limitados somente com base em uma única imposição operacional. Isso sem mencionar a própria possibilidade de insucesso do empreendimento, que seria notada apenas em fase avançada do desenvolvimento, caso essa condição operacional impositiva demandasse esforço (material, financeiro, tecnológico etc.) acima do possível e estivesse incluída apenas no conjunto de

todos os outros requisitos operacionais, tal como é executado, até o momento, nos desenvolvimentos do Exército Brasileiro (BRASIL, 2022).

Imposições operacionais imutáveis são comuns em projetos de novos sistemas ou materiais de emprego militar. Tal qual um dos Requisitos Operacionais Básicos do Sistema Míssil Tático de Cruzeiro para o Exército Brasileiro (BRASIL, 2012), que estabelece que a munição deve ser lançada da Viatura Lançadora Múltipla (AV-LMU) que integra o sistema ASTROS (ASTROS, 2021; OLIVEIRA ALVES, 2022), da empresa Avibras. Esse único requisito restringe, imediatamente, o comprimento máximo da munição (o limite é igual ao comprimento da plataforma lançadora da AV-LMU) e, consequentemente, pode vir a inviabilizar, durante a execução do projeto de desenvolvimento, a consecução de diversos outros requisitos operacionais relacionados aos desempenhos ou funcionalidades, como o alcance e a capacidade da cabeça de guerra (FLEEMAN, 2001). Em casos extremos, o desfecho será a inviabilização ou a redução de capacidades operacionais previamente desejadas, fato não raro de ocorrer na inovação de sistemas de defesa (UNITED STATES, 2008).

Tendo como amostra de boa prática na obtenção de produtos de defesa o processo inicial de desenvolvimento do míssil Tomahawk, em que a interação entre agentes da inovação proporcionou a execução de estudos antecipados de viabilidade e engenharia sobre imposições operacionais imutáveis, e aliado aos impactos que requisitos específicos de sistemas de defesa podem causar à obtenção do PRODE, estabelece-se uma nova classe de requisitos, denominada requisitos zero.

Assim, o desafio recai na identificação prévia das condicionantes que serão a base para toda a construção do projeto de engenharia (requisitos zero). Recomenda-se um trabalho interativo entre os decisores operacionais e equipe de engenheiros de desenvolvimento com o intuito de avaliar as solicitações do cliente com alto potencial de impacto na solução de engenharia (avaliação dos efeitos de inter-relação entre requisitos oriundos do operacional). Essa ação também traz como benefício o aumento das interações entre agentes operacionais e técnicos nas fases iniciais do processo de inovação militar.

Do exposto até esse ponto, infere-se que diferentes sistemas de defesa têm suas condicionantes operacionais específicas com maior probabilidade de serem impositivas e com elevado risco de afetar todas as demais decisões e soluções de engenharia, durante o curso do desenvolvimento do PRODE.

De modo a aprofundar a proposta de criação dos requisitos zero, seu conceito é expandido nas próximas seções para o caso de um sistema de defesa caracterizado por mísseis de cruzeiro, por intermédio do levantamento das suas principais categorias a serem debatidas no processo de interação entre os agentes da inovação. A importância da correta ordenação relativa entre os requisitos zero e o conjunto de informações a ser incorporado em seu texto também serão abordados neste texto.

4 REQUISITOS ZERO PARA MÍSSEIS DE CRUZEIRO

Para o caso de desenvolvimentos de mísseis de cruzeiro, propõe-se a separação dos requisitos zero nas seguintes categorias: meios de lançamento, alcance, tipos de alvos (e efeitos de destruição/neutralização), acurácia, restrições de desempenho, contramedidas, aspectos logísticos e tecnologias críticas.

4.1 Meios de lançamento

A categoria meios de lançamento deve conter todas as formas previstas para o lançamento do novo míssil, sejam elas terrestres, marítimas e aéreas. A maneira como um míssil é lançado é uma das principais variáveis de alteração de aspecto e geometria da munição (FLEEMAN, 2001), e, portanto, é um típico requisito zero. Os casos de munições com previsão de lançamento multiplataforma requerem diversas adaptações em sua fuselagem e nos receptáculos lançadores (contêineres ou *canisters*). Para o lançamento a partir do ar, por exemplo, deve-se prever a inserção de alças de sustentação para fixação do míssil ao pilone da aeronave lançadora e reforços estruturais localizados, todos proporcionam um aumento de peso e alteram o volume interno. As consequências indesejadas são um menor alcance e/ou redução da capacidade de carga útil, tendo como base uma mesma geometria.

Figura 3 – Lançamento do RGM-84 Harpoon (míssil antinavio), a partir de um canister a bordo do navio de guerra USS Leahy



Fonte: Yenne, 2018

4.2 Alcance

A categoria alcance é um dos principais requisitos operacionais que caracteriza uma munição inteligente. Embora seja comumente interpretada como a distância do ponto de lançamento até o alvo, o alcance tem, para veículos aéreos como os mísseis de cruzeiro, forte dependência com o perfil de voo (trajetórias, velocidades e altitudes de voo). Sendo assim, deve-se tratar o valor numérico do alcance sempre em conjunto com o envelope de operação.

4.3 Tipos de alvos (e efeitos de destruição/neutralização)

Também com elevado grau de relevância, os tipos de alvos a serem batidos (e os efeitos esperados de destruição/neutralização) influenciam diretamente em diversas decisões de projeto tanto no nível técnico/gerencial quanto no nível estratégico. A escolha por um determinado tipo de alvo impacta, entre outros fatores, na seleção do sensor de navegação terminal (*seeker*) e da cabeça de guerra (alto explosiva, múltipla, termobárica etc.).

Embora já existam no Brasil algumas iniciativas de desenvolvimento de tecnologias relacionadas aos dispositivos *seekers* (TECNOLOGIA..., 2015) e produtos finalizados (radar auto diretor ativo) por empresa brasileira com apoio de nação estrangeira (OMNISYS, 2022), a necessidade de abater certos tipos de alvo, em conjunto com outras condicionantes operacionais, podem conduzir a obrigatoriedade de desenvolver um dispositivo novo, cuja tecnologia ainda não seja de pleno domínio nacional.

Nesse contexto, os líderes e gestores do projeto devem atuar no sentido de criar tarefas que resultem na obtenção de um componente adequado, o que pode significar a abertura de um projeto em paralelo, com equipe e recursos próprios. Essa mesma decisão estratégica foi tomada pela empresa estadunidense Raytheon (RAYTHEON, 2015), como preparação para o processo de modernização do Tomahawk Block IV. A Raytheon iniciou um desenvolvimento independente, apenas de um novo *seeker* multimodo (Figura 4), com o intuito de aprimorar as capacidades do principal míssil de cruzeiro do arsenal norte-americano.

Figura 4 – Ensaio em voo cativo (2015) do *seeker* multimodo desenvolvido pela empresa norte-americana Raytheon. O protótipo do *seeker* foi instalado em um nariz de Tomahawk fixado à frente de uma aeronave T-39



Fonte: Raytheon, 2015

4.4 Acurácia

O termo acurácia representa o grau de proximidade de uma estimativa em relação ao parâmetro real. Em termos de sistemas de armas de artilharia, a acurácia significa a probabilidade do ponto de impacto da munição (estimativa) atingir o alvo real desejado (parâmetro real). Já o termo precisão significa o grau de proximidade das observações em relação à sua média. Tratando-se de munições, tem-se o agrupamento dos impactos em relação à sua média, independentemente, se esse agrupamento está, ou não, próximo do alvo real (GUERRA; SANTOS, 2020).

Figura 5 – O círculo à esquerda representa uma alta acurácia e uma alta precisão.

O círculo à direita indica uma baixa acurácia e uma alta precisão



Fonte: Guerra; Santos, 2020

Figura 6 – O círculo à esquerda representa uma alta acurácia e uma baixa precisão.

O círculo à direita indica uma baixa acurácia e uma baixa precisão



Fonte: Guerra; Santos, 2020

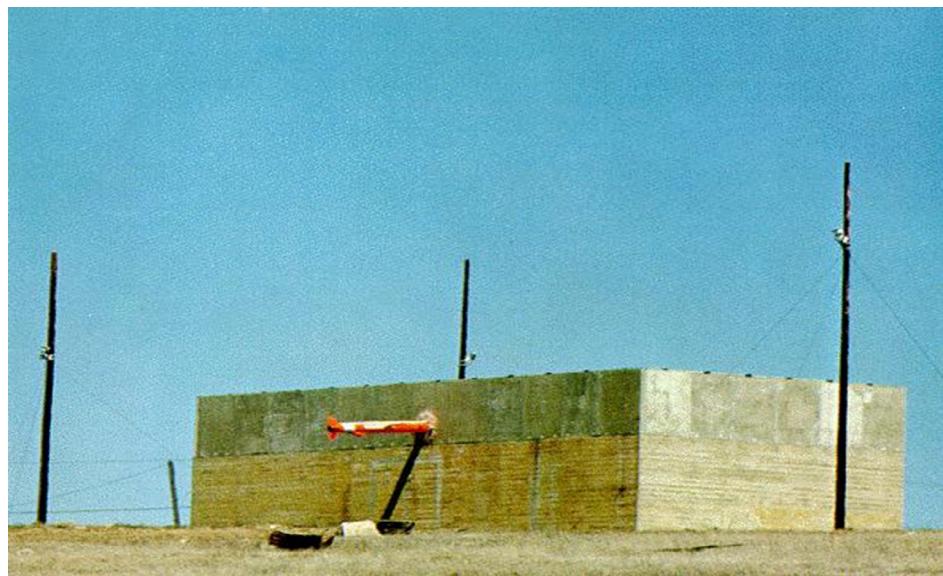
Uma outra expressão amplamente empregada por operadores e engenheiros militares que lidam com sistemas de armas com emprego de munições é o erro circular provável (CEP). O conceito básico de CEP recai no fato dele ser um estimador que informa a região em que são esperados obter 50% dos impactos após o emprego de um sistema de armas.

A escolha de um valor de CEP (ou qualquer outro dado sobre a acurácia da munição) tem forte impacto sobre a seleção de componentes internos responsáveis pelo correto posicionamento do míssil em sua trajetória previamente programada, tais como o sistema inercial e o sistema de navegação terminal (*seeker*). Quanto maior a necessidade de garantir um ponto de queda próximo ao alvo, maior a obrigatoriedade de alta precisão dos sensores de navegação, o que, em última instância, significa adotar tecnologias com níveis de maturidade considerados baixos no Brasil.

Por outro lado, a adoção de componentes fabricados por outros países tem a possibilidade de acarretar futuros embargos comerciais e, em momentos cruciais do desenvolvimento, tal como a fase final de testes de homologação do produto para a produção de um lote piloto.

A opção por atingir determinado valor de acurácia pode estar atrelada a uma decisão estratégica de iniciar um desenvolvimento em separado de tecnologias associadas aos sistemas de navegação, sendo mandatórias a homologação e industrialização do item.

Figura 7 – Ensaio em voo do míssil de cruzeiro Tomahawk lançado de um submarino na costa da Califórnia tendo como destino um alvo em área da Marinha dos Estados Unidos localizada na Ilha de São Clemente, Califórnia (NICKLAS, 2012)



Fonte: Nicklas, 2012

4.5 Restrições de desempenho

As restrições de desempenho devem ser interpretadas como imposições de parâmetros críticos para o cumprimento da missão, nos diversos tipos de operação. Exemplos típicos para mísseis de cruzeiro são a altura mínima de voo e a velocidade durante o voo de cruzeiro.

Um míssil destinado a neutralizar apenas belonaves já tem sua altura mínima de voo determinada pela solução de engenharia, e não há a necessidade da organização patrocinadora estabelecer um valor mínimo em seus requisitos operacionais (a informação operacional necessária é o tipo de alvo, ou seja, a neutralização de navios de guerra de determinada classe, por exemplo). Nesse caso, a altura de voo será estipulada em requisitos técnicos (a altura mínima de voo dependerá do estado do mar, para permitir o perfil de voo rente ao mar, ou *sea skimming*).

Já para mísseis destinados a atacar posições em terra, alturas mínimas de voo estão relacionadas com os tipos de bateria antiaéreas ou radares de detecção de ameaças presentes durante uma operação, e valores providos pelo operacional serão utilizados para adequar a solução de

engenharia. Situação similar ocorre com a velocidade de cruzeiro, sendo mais útil para o desenvolvedor compreender o cenário operacional do que obter um dado numérico de velocidade.

Outros exemplos de restrições de desempenho são a obrigatoriedade de operar em um espaço com GPS negado e o uso de determinada constelação de satélites, para a comunicação entre a munição e a estação de solo (mudanças de rota ou aplicar comandos de abortivas de missão). Reforça-se que tais condicionantes também envolvem o uso de tecnologias ainda não totalmente estabelecidas no Brasil, por exemplo, sistemas inerciais de elevada precisão e dispositivos GPS *anti-jamming*¹.

4.6 Contramedidas

Existem diversas contramedidas desenvolvidas para neutralizar mísseis de cruzeiro em rota para o alvo. A RAND Corporation (SPEIER; NACOUZI; MCMAHON, 2014) resume as principais contramedidas criadas com o intuito de neutralizar a ameaça proporcionada por mísseis, em seu trabalho sobre formas de dissuadir a proliferação de desse tipo de munição no mundo.

As principais variáveis de desempenho relacionadas com a proteção de um míssil de cruzeiro em voo são: altitude de voo, trajetória (manobrabilidade), velocidade e nível de furtividade (*stealth*) (JOHNSTON, 2000), o qual é associado a seção reta radar (RCS – Radar Cross Section) e assinatura infravermelho.

Cabe ressaltar que apenas um desses aspectos, a velocidade de cruzeiro, estipula diretamente o tipo de motorização a ser instalado ou desenvolvido. Mísseis de cruzeiro com velocidade supersônica em torno de Mach 3 geralmente adotam motores ramjet (FRY, 2004), os quais, juntos com motores scramjet (velocidades hipersônicas, acima de Mach 5), não tiveram desenvolvimento finalizado no Brasil. Sendo assim, uma imposição operacional por uma velocidade de cruzeiro acima da velocidade do som trará, mandatoriamente, um acréscimo de tempo e custos destinados à obtenção de uma nova motorização.

Similarmente, os níveis de furtividade influenciam diretamente no aspecto da solução final, seja por meio de aplicação de material absorvedor de radiação no corpo do míssil, seja pelo projeto da fuselagem com facetas que visam a redução da assinatura radar.

4.7 Aspectos logísticos

Munições com elevado grau tecnológico exigem uma logística específica, composta por um complexo sistema de apoio, mesmo em tempos de paz (DANTAS, 2021).

Alguns aspectos logísticos têm alto potencial de impacto na solução final de um novo míssil e devem ser tratados e incorporados nas discussões técnicas ainda nas fases iniciais do desenvolvimento. Apenas como ilustração, cita-se a frequência exigida entre atividades de manutenção (intervalo de tempo em que a munição é retirada do paiol e deslocada para realização de qualquer procedimento de revisão ou manutenção); o uso ou supressão de

¹ Dispositivos GPS *anti-jamming* protegem receptores de sinal GPS de interferências intencionais (*jamming*).

equipamentos de testes portáteis (diagnóstico de sistemas eletrônicos e mecânicos para verificar se o míssil está apto a ser lançado); o tipo de combustível utilizado no motor de cruzeiro; e a obrigatoriedade da munição ter de permanecer no interior do contêiner lançador em todo ciclo de vida do material.

Observa-se, assim, a importância de também considerar fatores logísticos como requisitos zero.

4.8 Tecnologias críticas

Uma lacuna operacional pode vir a ser a ausência de domínio nacional em certa tecnologia adotada em sistemas ou materiais de emprego militar. Para munições inteligentes, o Brasil ainda precisa obter avanços na homologação e industrialização de dispositivos de navegação inercial e de sistemas de navegação terminal (*seekers* – ativos, semiativos e passivos). Também é passível de menção os desenvolvimentos em motores para possibilitar velocidades de cruzeiro supersônica (motores *ramjet*) e hipersônica (motores *scramjet*), bem como avanços na produção de cabeças de guerra, como armas termobáricas.

Naturalmente, tais trabalhos demandarão maiores custos e, principalmente, prazo, cabendo à organização patrocinadora a decisão por desenvolver tecnologias críticas.

O desenvolvimento de mísseis de cruzeiro sofre diversas restrições, seja com ajuda de embargos comerciais unilaterais de nações que têm componentes críticos (motores, dispositivos inerciais etc.), seja por mecanismos de controle de exportação de itens listados como proibidos em acordos internacionais, tal como o MTCR (Missile Technology Control Regime) (MISSILE TECHNOLOGY CONTROL REGIME, 2022). Cabe destacar que o surgimento do míssil Tomahawk foi devido a uma restrição imposta por um desses acordos (SALT I), que limitou o emprego do arsenal nuclear norte-americano.

Elucidadas as categorias dos requisitos zero, pode-se resumi-las em uma única tabela com exemplos hipotéticos (Tabela 1). A numeração “0.?” mostrada na Tabela 1 indica a simbologia proposta para essa classe de requisito. O “0” representa tratar-se de um requisito zero e a marcação “?” indica que após selecionadas as imposições operacionais, elas devem ser ordenadas em um critério de prioridade.

Os exemplos presentes na Tabela 1 visam ilustrar que certa imposição operacional em determinada categoria automaticamente ocasiona a dispensa de preenchimento de outra (marcados como não atribuídos). Ao estabelecer uma condicionante de afundar navios de guerra, a acurácia e as contramedidas tornam-se consequências imediatas, e cabe aos desenvolvedores redigir os requisitos técnicos associados. Além disso, não há obrigatoriedade de completar todas as categorias, apenas aquelas que representam uma exigência operacional que não pode ser alterada, a despeito de qualquer outro requisito operacional ou dificuldade técnica, fabril ou comercial (no caso da Tabela 1, não foi atribuída nenhuma condicionante para a categoria aspecto logístico). Recomenda-se, contudo, sempre informar se a organização patrocinadora aceita o uso de componentes COTS importados ou se existe o interesse no uso/desenvolvimento de apenas itens nacionais (categoria tecnologias críticas).

Tabela 1 – Categorias de requisitos zero para mísseis de cruzeiro e exemplos hipotéticos

Requisitos Zero para mísseis de cruzeiro		
Numeração	Categoria	Exemplo
0.?	Meios de lançamento	Lançar da viatura AV-LMU do sistema ASTROS
0.?	Alcance	200 Km
0.?	Tipos de alvo (e efeitos de destruição/neutralização)	Afundar coerturas (similares à classe Inhaúma da Marinha Brasileira) e fragatas (similares à classe Niterói da Marinha Brasileira)
0.?	Acurácia	Não atribuído
0.?	Restrições de desempenho	Não atribuído
0.?	Contramedidas	Operar em ambiente com GPS negado
0.?	Aspectos logísticos	Não atribuído
0.?	Tecnologias críticas	Podem ser utilizados componentes COTS (commercial-of-the-shelf)

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

5 A ORDENAÇÃO DOS REQUISITOS ZERO

A origem dos requisitos zero reside no fato de existir requisitos operacionais imutáveis e norteadores de todo o desenvolvimento da munição. Entretanto, uma vez que tais exigências são estabelecidas em um momento anterior ao início formal do projeto de desenvolvimento, é possível ocorrer situações em que o atendimento a uma imposição impossibilite, total ou parcialmente, o cumprimento de outra. Com isso em mente, é sugerida uma ordenação entre os requisitos zero, com base no grau de inalterabilidade de componentes associados a cada categoria (Tabela 1).

Essa ação visa orientar os desenvolvedores durante estudos de viabilidade de solução (assessoria técnica) e o projeto de conceito. O intuito é reportar à organização patrocinadora incompatibilidades, caso ocorram, e apresentar propostas de soluções alinhadas com necessidades operacionais prioritárias, mesmo antes do início do desenvolvimento.

No contexto de mísseis de cruzeiro, exemplos típicos de requisitos inter-relacionados são o alcance da munição e o tipo de alvo que ela foi destinada a abater. O Tomahawk é um bom elemento de comparação, quando se observa as versões de ataque ao solo (BGM-109C – Block II) e antinavio (BGM-109B – Block I), tal como apresentado na Tabela 2.

Com as mesmas dimensões e peso, as versões BGM-109B e BGM-109C do Tomahawk apresentam diferenças significativas no alcance (Tabela 2). Tal fato reside na necessidade de empregar, no BGM-109B, um sistema (*seeker*) com tecnologia radar para possibilitar a navegação terminal até alvos móveis no mar. A experiência como engenheiro de desenvolvimento indica que tais dispositivos têm um peso elevado e ocupam grande volume, fatores que prejudicam o desempenho em voo e limitam o espaço destinado ao combustível, respectivamente. Observa-se, portanto, que mísseis de cruzeiro projetados para neutralizar alvos móveis tendem a apresentar alcance inferior quando comparados com aqueles (similares) empregados para destruição de alvos fixos (não metálicos) no solo.

Tabela 2 – Comparação entre alcance e tipos de alvos para os mísseis Tomahawk, Harpoon e Zvezda

Míssil	Dimensões e Peso ¹	Alcance ²	Tipo de Alvo	Sistema de Navegação Terminal
Tomahawk (BGM-109C – Block II) ³	C: 5,56 m D: 0,53 m P: 1.203 Kg	1297 Km ⁴	Fixos no solo	Inercial + TERCOM + DSMAC
Tomahawk (BGM-109B – Block I) ⁵	C: 5,56 m D: 0,53 m P: 1.205 Kg	465 Km ⁶	Navios	Radar ativo
Harpoon (RGM-84F – Block ID) ⁷	C: 5,3 m D: 0,34 m P: 785 Kg	240 Km ⁸	Navios	Radar ativo
Zvezda Kh-35 ⁹	C: 4,40 m D: 0,42 m P: 620 Kg	130 Km	Navios	Radar ativo
Zvezda Kh-35U ¹⁰	C: 4,40 m D: 0,42 m P: 670 Kg	260 Km	Navios	Radar ativo

1. O comprimento dos mísseis (*sem booster*) está representado pela letra C, o diâmetro pela letra D e o peso total por P. 2. Os valores de alcance dependem do perfil de voo e da velocidade. Os dados apresentados são baseados em valores típicos que caracterizam a munição. 3. Referência: Nicklas (2012). 4. Referência: Laur e Llanso (1995). 5. Dimensões e peso – Referência: Tomahawk... (2020). 6. Referência: Laur e Llanso (1995). 7. Dimensões e peso – Referência: RGM-84... (2016). 8. Referência: O'Halloran (2015). 9. Dimensões, peso e alcance – Referência: Kh-35... (2018). 10. Dimensões, peso e alcance – Referência: Kh-35 (2018).

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

A necessidade operacional de aumento de alcance em mísseis antinavios foi objeto de melhorias de versões pregressas do Harpoon. Introduzido em 1991, a versão RGM-84F (Block ID) possibilitou um aumento de alcance para 240 Km por intermédio de um incremento no comprimento para atingir 5,3 metros (m) (O'HALLORAN, 2015) (versões anteriores, como a RGM-84A tem alcance de 92,6 Km, com um comprimento de 4,64 m (FULLER; EWING, 2016)). No entanto, a versão foi descontinuada em 2003, uma vez que a maior dimensão limitava o lançamento por meio dos dispositivos já em uso pela frota de superfície e de submarinos (O'HALLORAN, 2015).

Outro relevante exemplo de desenvolvimento com vistas ao aprimoramento de alcance é o míssil russo Zvezda. A versão inicial possibilita abater navios a 130 Km do ponto de lançamento, enquanto o modelo Kh-35U permitiu o dobro desse valor, por meio da substituição do motor de cruzeiro; realocação de espaço interno para maior estocagem de combustível; e um novo *seeker* mais leve e com maior sensibilidade (Kh-35..., 2018). Desse modo, as dimensões externas não foram modificadas, mantendo-se os meios de lançamento para ambas as versões.

Os casos acima demonstram a importância da organização patrocinadora estabelecer uma ordem de prioridade para os requisitos zero. Caso haja conflito de atendimento entre requisitos, existem duas possibilidades a se seguir: o processo de correção (modificação) ocorre em itens com menor índice de imutabilidade ou a autoridade decisora opta, após assessoria técnica baseada em estudos de viabilidade, por alterar ou suprimir algum requisito zero causador

da incompatibilidade. Tomando como base o míssil Zvezda, tem-se que o meio de lançamento assume maior índice de imutabilidade (requisito 0.1) e, assim, não sofreu remodelamento. O atendimento ao requisito de alcance deu-se por meio de alterações em componentes internos à munição (sem alteração das dimensões externas).

Tendo o exemplo presente na Tabela 1, é possível criar dois cenários fictícios (Tabela 3). O primeiro, cenário A, tem a categoria meio de lançamento com o maior índice de imutabilidade (menor numeração possível, ou seja, 0.1), ao passo que a categoria alcance apresenta uma numeração mais alta, por exemplo, 0.3. A informação prestada pela autoridade decisora indica que qualquer trabalho a ser realizado de modo a garantir o alcance desejado (ou atendimento a qualquer outro requisito zero) não deve ocorrer no meio de lançamento, e sim em outro componente interno da munição (desenvolvimento de um novo e específico combustível, alteração da motorização para modelos com menor consumo, redução de peso estrutural etc.). O cenário B, por sua vez, elenca a categoria alcance com numeração 0.1, o que denota a obrigação de atingir o valor demandado, mesmo que sejam implementadas algumas adaptações no meio de lançamento, como mudanças nas dimensões externas da munição (sempre com a devida autorização da autoridade decisora).

Tabela 3 – Exemplos de cenários possíveis com diferentes ordenações de requisitos zero

Cenário A		Cenário B	
Numeração	Categoria	Numeração	Categoria
0.1	Meios de lançamento: AV-LMU do sistema ASTROS	0.1	Alcance: 200 Km
0.2	Tipo de alvo: alvos móveis no mar	0.2	Tipo de alvo: alvos móveis no mar
0.3	Alcance: 200 Km	0.3	Meios de lançamento: AV-LMU do sistema ASTROS

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

6 A REDAÇÃO DOS REQUISITOS ZERO

A literatura especializada em engenharia de sistemas recomenda que um requisito de projeto seja redigido em uma sentença simples, expressa com o verbo deverá, capaz de informar o indispensável (características ou funcionalidades) para possibilitar o desenvolvimento de uma solução por parte da equipe de engenheiros (KOELSCH, 2016).

Este artigo propõe adicionar quatro novos campos de informações ao texto único e simples que caracteriza um requisito. O propósito é prover dados adicionais para melhor compreensão dos desejos e expectativas da organização patrocinadora. A prática de trabalho em desenvolvimentos de munições inteligentes revela que o processo de definição e uso dos requisitos é recursivo e interativo com a autoridade decisora, e dados complementares ao texto do requisito contribuem para a obtenção de uma solução final robusta e aderente aos objetivos iniciais do patrocinador. Dessa forma, recomenda-se a inclusão do campo justificativa, com uma descrição das motivações que conduziram aos dados presentes no requisito.

Adicionalmente, sugere-se incorporar os campos metodologia de ensaio (método de teste que deverá ser empregado para a comprovação do requisito), estimativa de número de corpos de prova (protótipos necessários para que seja possível comprovar o requisito) e critério básico de aceitação (critério para avaliar o requisito). Com isso, é possível possibilitar ao líder técnico do projeto um melhor conhecimento do material e prover aos gestores uma posição sobre previsão de custos e prazos demandados.

A Tabela 4 foi montada de forma a fornecer um exemplo de como preencher os campos propostos para complementar os requisitos de projeto de sistemas de defesa.

Tabela 4 – Exemplo de redação de requisitos zero com a inclusão de campos de informações

Campo	Conteúdo
Numeração ¹	0.1
Requisito ²	O míssil de cruzeiro deverá ser lançado da viatura AV-LMU do sistema ASTROS 2020.
Justificativa ³	Diferentemente de outros lançadores de mísseis concorrentes, o míssil de cruzeiro deverá ser lançado da mesma plataforma em que são lançados os foguetes convencionais do sistema ASTROS, facilitando sobremaneira a logística do míssil, principalmente com relação aos componentes das viaturas lançadoras ⁴ . Assim, não deverá ser implementada nenhuma alteração nos sistemas mecânicos, hidráulicos e hardwares da AV-LMU. Apenas atualizações de software poderão ser consideradas.
Metodologia de ensaio ⁵	Teste em voo.
Estimativa de número de corpos de prova ⁶	um protótipo funcional do míssil de cruzeiro.
Critério básico de aceitação ⁷	Míssil cumpriu todas as suas funções (mecânicas, eletrônicas etc.) após ser disparado de uma viatura AV-LMU em conjunto com as demais viaturas do sistema ASTROS.

^{1,2,3,5,6,7} Elaborado em conjunto com a organização patrocinadora e equipe de engenheiros. ⁴ Referência: Dantas (2021).

Fonte: Tabela elaborada pelos autores, 2022

Apesar da Tabela 4 apresentar um exemplo de redação para requisitos zero, recomenda-se o mesmo procedimento para todos os demais requisitos técnicos, logísticos e industriais do projeto.

7 CONCLUSÃO

A tarefa de elaboração de requisitos em projetos de desenvolvimento de sistemas complexos tem papel vital na obtenção de uma solução final sólida capaz de atender às expectativas e necessidades iniciais da organização patrocinadora. A experiência no desenvolvimento de munições inteligentes, tais como mísseis de cruzeiro, revela que quanto maior for o investimento de tempo e recursos no processo de construção dos requisitos, menor será a possibilidade de ocorrer problemas relacionados com dilação de prazo e aumento dos custos inicialmente planejados.

Uma significativa adição a esse processo é o trabalho conjunto entre o usuário e os engenheiros/gestores técnicos, antes mesmo do início formal do projeto de desenvolvimento. Uma equipe de engenheiros militares, com experiência no assunto de interesse, é capaz de prover análises

aprofundadas e soluções para assessorar tecnicamente as autoridades nas tomadas de decisão envolvendo projetos de engenharia relacionados à defesa nacional.

Para tal propósito, é mandatório que haja uma interação entre a organização patrocinadora e engenheiros de desenvolvimento ainda em fase anterior à elaboração da CONDOP SMD F Ter.

A relevância desse constante trabalho conjunto também é notada durante a produção dos requisitos operacionais, uma vez que devem, preferencialmente, conter apenas informações que caracterizem o contexto do emprego, evitando-se, exceto casos específicos, textos com dados numéricos que venham a direcionar uma solução técnica específica, seja para parte, seja todo o Sistema ou Material de Emprego Militar (SMEM).

Nesse sentido, a adoção de uma nova classe de requisitos pretende identificar as condicionantes que serão a base para toda construção do projeto de engenharia. Dada essa importância, recomenda-se que os requisitos zero (e a ordenação relativa entre eles) sejam condensados em um documento próprio, anexo à CONDOP SMD F Ter.

Adicionalmente, a inclusão de novos campos de informação, aderidos ao texto do requisito, permitem um melhor conhecimento dos desejos e objetivos para o SMEM, além de prover aos gestores uma previsão inicial de prazos e recursos materiais, financeiros e humanos necessários.

Por fim, as propostas apresentadas para elaboração de requisitos em projetos de sistemas de defesa contribuem para a obtenção de uma solução final (SMEM) aderente à demanda operacional inicial, com prazos e custos estimados e controlados mais adequadamente.

REFERÊNCIAS

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. Disponível em: <http://ebrevistas.eb.mil.br/DMT/article/view/9416>. Acesso em: 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. Disponível em: <http://ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/582>. Acesso em: 29 mar. 2023.

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

FULLER, M.; EWING, D. **IHS Jane's Weapons Naval 2012-2013**. Croydon: Janes, 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. Disponível em: <http://ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/10070>. Acesso em: 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. Disponível em: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/9597>. Acesso em: 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. Disponível em: http://www.military-today.com/missiles/kh_35.htm. Acesso em: 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. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/290691499_Systems_engineering_of_air_and_missile_defenses. Acesso em: 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. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/3514>. Acesso em: 29 mar. 2023.

MISSILE TECHNOLOGY CONTROL REGIME. Página Institucional. **MTCR**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://mtcr.info/>. Acesso em: 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. Disponível em: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/view/8626>. Acesso em: 29 mar. 2023.

OMNISYS. Página Institucional. **Omnisys**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.omnisys.com.br/>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://incose.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.20180>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://raytheon.mediaroom.com/2015-04-14-Raytheon-to-test-new-multi-mode-seeker-for-Tomahawk-cruise-missile>. Acesso em: 1 jun. 2022.

REZENDE, L. B. de.; BLACKWELL, P.; DENICOL, J.; GUILLAUMON, S. Main competencies to manage complex defence projects. **Project Leadership and Society**,

Amsterdam, v. 2, p. 1–13, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666721521000089?via%3Dihub>. Acesso em: 29 mar. 2023.

REZENDE, L. B.; DENICOL, J.; BLACKWELL, P.; KIMURA, H. The main Project complexity factors and their interdependencies in defence projects. **Project Leadership and Society**, Amsterdam, v. 3, p. 1–12, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666721522000102>. Acesso em: 29 mar. 2023.

RGM-84 Harpoon. **Weaponsystems.net**, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://weaponsystems.net/system/583-RGM-84+Harpoon>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/rocket-and-missile-system/Strategic-missiles#ref521083>. Acesso em: 20 maio 2022.

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

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

TOMAHAWK BGM-109 B/E anti-ship missile. **Missilery.info**, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://en.missilery.info/missile/bgm109b-e>. Acesso em: 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.

