

ESCOLA SUPERIOR DE GUERRA

JONATHAS DE CASTRO DIAS

**COMPOSIÇÃO DE PACOTES DE SOBRESSALENTES
CRÍTICOS EM OPERAÇÕES MILITARES**

Artigo apresentado ao Departamento de Estudos da Escola Superior de Guerra como requisito parcial à obtenção do certificado do Curso de Gestão, Logística e Apoio à Decisão.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio Gavião

Rio de Janeiro

2025

Este trabalho, nos termos de legislação que resguarda os direitos autorais, é considerado propriedade da ESCOLA SUPERIOR DE GUERRA (ESG). É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que sem propósitos comerciais e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e não expressam qualquer orientação institucional da ESG.

JONATHAS DE CASTRO DIAS

COMPOSIÇÃO DE PACOTES DE SOBRESSALENTES CRÍTICOS EM OPERAÇÕES MILITARES

JONATHAS DE CASTRO DIAS¹

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas militares modernos exige abordagens logísticas mais precisas e baseadas em dados, capazes de garantir a continuidade operacional em ambientes hostis e de difícil acesso. Este estudo teve como objetivo propor uma metodologia para a seleção de itens críticos de sobressalentes em operações militares, integrando ferramentas qualitativas e quantitativas de apoio à decisão. A pesquisa utilizou a metodologia FMECA para identificar e classificar a criticidade dos componentes, complementada pela classificação ABC, que hierarquizou os itens segundo seu impacto na disponibilidade operacional. Na etapa quantitativa, foi aplicado o Fator de Estimativa de Consumo (F), associado à distribuição de Poisson, para dimensionar a quantidade de sobressalentes com confiabilidade superior a 90%, considerando um *lead time* de seis meses. Os resultados evidenciaram que os componentes de Classe A, devem compor o núcleo do pacote logístico de sobressalentes da missão. Conclui-se que a integração das análises FMECA, ABC e Fator F constitui uma ferramenta eficaz para o planejamento logístico de forças militares, permitindo equilibrar risco, custo e disponibilidade em operações sob restrição de suprimentos.

Palavras-chave: Logística Militar; Confiabilidade; FMECA; Classificação ABC; Sobressalentes.

ABSTRACT

The growing complexity of modern military systems requires more precise and data-driven logistical approaches capable of ensuring operational continuity in hostile and hard-to-reach environments. This study aimed to propose a methodology for selecting critical spare parts in military operations by integrating qualitative and quantitative decision-support tools. The research employed the FMECA methodology to identify and classify component criticality, complemented by the ABC classification, which ranked the items according to their impact on operational availability. In the quantitative stage, the Consumption Estimation Factor (F), associated with the Poisson distribution, was applied to determine the quantity of spare parts with reliability above 90%, considering a six-month lead time. The results showed that Class A components should form the core of the mission's spare parts logistics package. It is concluded that the integration of FMECA, ABC classification, and the F Factor provides an effective tool for the logistical planning of military forces, enabling a balance between risk, cost, and availability in operations under supply constraints.

Keywords: Military Logistics; Reliability; FMECA; ABC Classification; Spare Parts.

¹ Primeiro-Tenente Fuzileiro Naval

1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos sistemas militares modernos tem imposto desafios cada vez maiores à manutenção da prontidão operativa, especialmente em ambientes de atuação caracterizados por incerteza, restrições logísticas e elevada exigência operacional. As forças armadas, ao dependerem de meios cada vez mais sofisticados, enfrentam a necessidade de garantir que esses sistemas estejam permanentemente disponíveis e em condições seguras de uso, mesmo diante de condições adversas de operação (Freitas, Oliveira, 2008).

Em ambientes operacionais hostis ou isolados, a logística de manutenção e controle do estoque de suprimentos assume um papel estratégico. A impossibilidade de reposição imediata de componentes ou a limitação de recursos exige que as organizações militares planejem com precisão o consumo de sobressalentes e prevejam as necessidades de manutenção com base em dados históricos e parâmetros de confiabilidade, sendo a gestão preditiva de sobressalentes essencial para equilibrar o custo logístico e a disponibilidade operacional, sobretudo em sistemas sujeitos a uso intensivo e manutenção complexa (Auweraer; Boute, 2019).

Nesse contexto, compreender como os sistemas se comportam ao longo do tempo e quais componentes apresentam maior criticidade torna-se fundamental para o planejamento da logística de manutenção. A análise do comportamento de falhas, associada a modelos de confiabilidade e de estimativa de consumo, permite não apenas prever a demanda de sobressalentes, mas também otimizar estoques e reduzir tempos de indisponibilidade. Assim, o estudo da confiabilidade e do desempenho operacional das viaturas militares constitui uma ferramenta indispensável para a tomada de decisão na gestão de manutenção e logística militar. (Choi; Suh, 2020)

No âmbito da logística militar, diversas ferramentas estatísticas têm sido empregadas com o objetivo de calcular o estoque de sobressalentes de acordo com a utilização de sistemas ao longo de sua vida útil, como exemplos: a análise preditiva com base em Inteligência Artificial (IA), modelos de séries temporais para prever tendências futuras, demandas de inventário e necessidades de aquisição a curto e longo prazo. Complementarmente, algoritmos de Machine Learning (ML), utilizados para examinar grandes volumes de dados, podem ser explorados para identificar padrões complexos e não-lineares, categorizar riscos, prever escassez na cadeia de

suprimentos e otimizar itens de estoque. Por fim, a resiliência do sistema logístico é testada e modelada usando ferramentas estratégicas como a Modelagem de Dinâmica de Sistemas, que analisa o comportamento logístico de longo prazo e as interdependências, e as Simulações de Monte Carlo, que aplicam variações estocásticas em parâmetros críticos para produzir resultados probabilísticos e otimizar a alocação de recursos em cenários incertos. A utilização conjunta dessas ferramentas de IA e simulações, consegue elevar a prontidão operacional, minimizando o tempo de indisponibilidade do equipamento (Atakari, 2025).

Corroborando com os aspectos supracitados, uma das principais características dos sistemas militares é a operação em ambientes extremos e até hostis, com restrições de acesso a esses locais por meios convencionais e que costumam ser distantes de suas bases de aquartelamento. Isto resulta em dificuldades adicionais de provisionamento logístico para a operação continuada do meio, pois as frações logísticas precisam deslocar diversos sobressalentes e estrutura de manutenção para a sobrevivência das unidades operacionais (Aubry; Lièvre, 2016).

Para mitigar esse problema, o planejamento da manutenção deve ser bem executado, principalmente na questão dos sobressalentes que devem ser empregados nas operações militares, tendo em vista o esforço logístico de realizar o ressuprimento no decorrer do tempo. Em ambientes operacionais distantes e hostis, a segurança do suprimento assume uma preocupação crescente, exigindo a capacidade de responder a aumentos imprevistos na demanda. A criticidade dos sobressalentes ganha um peso maior, por tornarem os sistemas indisponíveis em caso de desabastecimento ou interrupções na cadeia de suprimentos. Para garantir a robustez e continuidade das operações, é necessário que as Unidades Militares considerem estratégias de redundância, incluindo estoques de componentes críticos e o cálculo correto da quantidade necessária para o tempo da operação (Hellberg et al., 2025).

Nesse contexto, foi proposto o seguinte problema de pesquisa: com base nas características e emprego de viaturas militares no Corpo de Fuzileiros Navais (CFN), como selecionar itens críticos de sobressalentes para uma determinada operação?

Para resolver o problema de pesquisa, esta pesquisa propõe uma abordagem quantitativa e qualitativa de estoques para uma operação militar, considerando itens críticos, dados reais de manutenção de viaturas militares do inventário da Marinha do Brasil e entrevistas com especialistas de manutenção dessas mesmas viaturas. Essa

pesquisa também contribui com metodologia capaz de apoiar decisões relativas à manutenção, substituição e planejamento logístico de estoques de sobressalentes dos sistemas em uso.

Visando uma melhor compreensão do problema proposto, o presente trabalho está dividido em cinco seções principais. A 1ª Seção introduziu o tema, com levantamento inicial dos principais temas, apresentação de objetivos e motivações para a realização da pesquisa.

A 2ª Seção realizou um levantamento preliminar da literatura, identificando os principais conceitos atinentes ao problema proposto e embasando os métodos utilizados para a resolução do problema.

A 3ª Seção detalhou as etapas metodológicas da pesquisa, incluindo a coleta de dados utilizados e técnicas de cálculo.

A 4ª Seção analisou os resultados sob a forma de estudo de caso em operações de paz das Nações Unidas, propondo a seleção de sobressalentes emergenciais.

Na última seção, os resultados do trabalho foram apresentados para responder o problema de pesquisa e para apoiar a resolução de problemas de Logística Militar.

1.1 Delimitação do Estudo

Este estudo está delimitado à análise dos dados de manutenção de um tipo de viatura militar do inventário de uma Organização Militar (OM) do CFN, no período compreendido entre os anos de 2015 e 2024. A escolha por este recorte temporal deveu-se à disponibilidade de dados em arquivo, estruturados e consistentes, provenientes de Ordens de Serviço (OS) registradas de forma contínua pela Seção de Manutenção da OM analisada.

Optou-se por não incluir outros modelos de viaturas, a fim de preservar a homogeneidade da amostra e garantir que o modelo seja útil ao serviço de manutenção da viatura selecionada. Além disso, não está no escopo do trabalho estudar os motivos e causas das avarias, e se elas foram sanadas de forma correta. Assim, para a realização do estudo, assumiu-se a hipótese de que os reparos foram executados de forma correta e eficiente e as avaliações das avarias foram devidamente registradas nas OS.

1.2 Relevância e Justificativa do Estudo

A confiabilidade dos sistemas militares é um dos pilares fundamentais para a garantia da soberania e defesa nacional (Brasil, 2020). No cenário atual, em que os meios empregados pelas forças armadas frequentemente permanecem em serviço por períodos estendidos de seus ciclos de vida, é de suma importância acompanhar e antecipar o desgaste desses sistemas, para levantar as necessidades dos suprimentos de forma eficiente. A presente pesquisa justifica-se pela sua relevância em oferecer ferramentas para a realização dessas tarefas de forma empírica e com base na literatura científica.

Do ponto de vista técnico, os resultados obtidos podem subsidiar decisões de manutenção mais eficientes, melhor alocação de recursos e aumento da disponibilidade dos sistemas militares, com impacto direto na prontidão desses meios. Do ponto de vista científico, o estudo contribui para o avanço da literatura nacional na área de Defesa ao propor a aplicação de ferramentas de apoio a decisão com dados reais de manutenção, para a montagem de pacotes emergenciais de sobressalentes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Essa Seção apresenta um levantamento dos principais conceitos da Logística de Defesa, examinando como a literatura acadêmica tem abordado esses temas e aplicações relacionadas ao problema de pesquisa.

A análise de fatores da manutenção como a confiabilidade (R, do inglês *reliability*), disponibilidade (A, do inglês *availability*) e manutenibilidade (M), que geram o acrônimo “RAM”, são essenciais para analisar o comportamento dos sistemas ao longo de seus ciclos de vida. Segundo Elsayed (2021), confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de que um sistema ou produto desempenhar suas funções requeridas de maneira satisfatória por um determinado período, sob condições operacionais específicas, sem falhas.

Para a disponibilidade, Blanchard, Verma e Peterson (1995) a definem como uma “função do tempo de operação (confiabilidade) e tempo de inatividade (manutenibilidade)”. A disponibilidade também pode ser entendida como o tempo total em que o equipamento ou sistema está disponível para operar (Kardec; Nascif, 2013).

A manutenibilidade, pela norma NBR 5462/1994, é definida como: “capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”.

A taxa de falhas de um componente, subsistema ou sistema é a quantidade de falhas no tempo. A distribuição acumulada dessas falhas (função $F(t)$) fundamenta o cálculo de confiabilidade, obtida através de seu complemento ($R(t) = 1 - F(t)$). Baseando-se nos conceitos supracitados, pode se obter a “Taxa de Falhas”, também definida como função de risco $h(t)$, que pode ser entendida como a quantidade de risco associada ao tempo (t). Ela tem sua utilidade na análise da vida útil dos equipamentos, sendo um indicativo de como aquela unidade envelhece, se for um valor maior. O inverso da taxa de falhas indica o tempo médio para ocorrer uma falha, sendo designado de “Tempo Médio Até a Falha” (em inglês *Mean Time To Failure* – MTTF) para componentes não reparáveis ou substituídos na primeira falha e “Tempo Médio Entre Falhas” (em inglês *Mean Time Between Failure* - MTBF) para componentes reparáveis (Fogliatto; Ribeiro, 2009).

Na logística de defesa é comum a adaptação do MTTF para o sistema como um todo, computando os dados de falha do produto de defesa integralmente. O termo usado é o Tempo Médio Entre Falhas Operacionais (em inglês *Mean Time Between Operational Mission Failure* - MTBOMF), sendo usualmente aplicado como requisito para a construção ou modernização de sistemas nas forças armadas norte-americanas (Castelli, 2006; Doubleday, 2015; Ma, 2004).

Outro termo importante na pesquisa é o “Lead Time”, que significa “Tempo de Entrega”. Esse termo representa o período entre o pedido do sobressalente e a sua efetiva entrega (Jones, 2006). Esse termo também pode ser associado ao tempo sem o sobressalente, sendo uma variável representativa da cadeia de suprimentos. Considerando essa pesquisa sobre a seleção de itens críticos para algum ambiente operacional sob condições austeras ao envio/recebimento de sobressalentes, o Lead Time considerado foi o tempo total de operação.

A modelagem dos parâmetros RAM na engenharia de confiabilidade é realizada, de modo geral, através de distribuições de probabilidade Weibull (Fan et al, 2023; Shahriari et al, 2024). Outros autores destacam que as distribuições exponencial, gama, lognormal e Weibull são as mais frequentemente empregadas para determinar a distribuição que mais se aproxima dos tempos de falha que

constituem a análise (Hao, Pei, 2025). Liu et al. (2012) destacam a versatilidade da distribuição Weibull em cenários do mundo real.

A distribuição de Poisson também é utilizada na modelagem de incerteza em estoques de sobressalentes (Aronis et al., 2004). O tempo médio de manutenção, atrasos logísticos/administrativos e o lead time de sobressalentes também entram na modelagem de requisitos e na avaliação de disponibilidade operacional dos meios militares (Pinçe; Turrini; Meissner, 2021).

Por vezes, as políticas de manutenção são realizadas de forma subjetiva, utilizando métodos não empíricos, ou baseados diretamente em estimativas de operadores experientes (Misaii et al, 2024). Esses processos baseados apenas em julgamento tendem a ser estáticos e sujeitos a viés; por isso, métodos orientados por dados são preferíveis para revisar periodicamente a configuração das necessidades de sobressalentes (Choi; Suh, 2020). Métodos sem base científica podem aumentar a subjetividade das decisões atinentes a manutenção, sendo recomendável priorizar dados objetivos e limitar a intervenção subjetiva ao estritamente necessário (Cantini et al., 2024).

A utilização de modelos de previsão de utilização de sobressalentes tradicionalmente parte de históricos de demanda e falhas dos sistemas; contudo, alguns autores incorporam informações contextuais e qualitativas, como a utilização em determinado tipo de operação, ou até de relatos de especialistas no sistema. Sun et al. (2018) faz essa análise com foco em aeronaves civis, na qual utilizam-se de históricos de reparo e relatórios para alimentar os sistemas de demanda e de previsão. Quando os dados aparecem de forma descontínua, pode ser inviável trabalhar apenas com análises de variáveis.

Young (2008) destaca o uso de simulação de ciclo de vida e dados de manutenção para orientar previsões em sistemas militares, principalmente no Corpo de Fuzileiros Navais do Estados Unidos. O autor também aponta a necessidade de fundamentar decisões sobre estoques de sobressalentes em análises de confiabilidade e de custo-benefício alinhadas ao perfil operacional, considerando o ambiente e a duração das operações.

Para priorizar sobressalentes quando o orçamento é limitado, a ideia de Weighted Readiness Benefit (WRB), utilizada pelo Exército Norte-Americano, pode ser útil. Esse conceito considera que cada componente exerce influência diferente na prontidão operacional do sistema, então realiza um cálculo ponderado por pesos

(graus de importância) dos equipamentos e pela estrutura das OM que detêm esses meios. Essa métrica WRB permite classificar itens não apenas pelo custo/demanda, mas pelo impacto que esse componente possui na disponibilidade operacional, orientando a composição de estoques e de listas de sobressalentes com foco no impacto real de cada missão. Na estimativa do WRB, os pesos são definidos com apoio de especialistas, que priorizam os componentes de cada sistema conforme a disponibilidade operacional (Girardini; Miller, 2025).

Diante da escassez de recursos para a aquisição de estoques de sobressalentes, a priorização de componentes torna-se fundamental. Nesse contexto, a classificação ABC multicritério é uma abordagem consolidada que diferencia a criticidade de equipamentos em ambientes variados, combinando critérios como valor unitário e comportamento de demanda com base no princípio de Pareto. Essa técnica segmenta os itens em classes, tradicionalmente A (críticos), B (moderados) e C (não críticos), permitindo a associação de políticas de estocagem e suprimento coerentes a cada categoria, priorizando os sobressalentes de acordo com a disponibilidade de recursos (Cantini et al., 2024).

A Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA) é uma técnica bastante usada em engenharia de confiabilidade e manutenção (Jones, 2006). Sua finalidade é identificar de forma sistemática as possíveis falhas de peças, subsistemas e do sistema como um todo, suas causas, efeitos provocados e riscos. Este processo visa a priorização de riscos, a garantia de operacionalidade do sistema, o desenvolvimento de diagnósticos e, de maneira crucial, o planejamento de suporte. Ao detalhar os modos de falha, suas consequências e classificar sua criticidade (gravidade da falha), a FMECA estabelece a base para determinar quais sobressalentes são mais críticos. Assim, é possível priorizar o estoque com base na probabilidade de falha e no impacto da falha na operacionalidade do sistema, assegurando um planejamento de suporte eficaz e a existência de um método para restaurar o sistema à condição operacional para cada falha prevista (Jones, 2006).

Sendo assim, analisando a literatura proposta, é possível propor um modelo de seleção de itens de estoques emergenciais, tendo em vista a disponibilidade orçamentaria, priorizando os sobressalentes por nível de criticidade ou custo. As técnicas da classificação ABC, a FMECA e o princípio de Pareto podem ser associados para a solução do problema de pesquisa, apoiando o assessoramento de

políticas de manutenção e de estoques de sobressalentes críticos nas operações militares.

3. METODOLOGIA

Essa pesquisa iniciou-se com uma abordagem quantitativa, descrevendo o comportamento e identificando componentes de sistemas militares ao longo do tempo. A pesquisa foi categorizada desta forma, quanto aos fins, porque busca somente a análise e comparação dos indicadores de manutenção de viaturas de diferentes idades, sem abranger as causas da variação desses parâmetros entre esses sistemas.

Para a coleta de dados, foi utilizado o meio de investigação documental, sendo “realizada em documentos observados no interior de órgãos públicos e privados de qualquer natureza, ou com pessoas” (Vergara, 2016). Os dados foram obtidos a partir da Seção de Manutenção de uma OM que dota a viatura analisada. Os dados primários das OS de manutenção reúnem as seguintes variáveis de interesse: designação da viatura, serviço realizado, data da notificação da avaria e tempo de reparo. Ao total foram analisadas 1.808 OS, com informações entre os anos de 2015 e 2024.

Após a coleta, os dados foram transformados em indicadores de manutenção, por exemplo, tempo entre falhas e tempo de reparo de cada componente, com base nas datas de notificação das avarias e datas de conclusão do serviço. Foram descartadas informações sem relação ao estudo, ou com erros de digitação, por exemplo, quando a data final do reparo era inferior a data da avaria.

Após essa filtragem, os componentes foram organizados em ordem alfabética e avaliados quanto à criticidade, ou seja, o quanto cada item impacta a disponibilidade operacional da viatura. Essa categorização utilizou a metodologia FMECA, com base na opinião de três especialistas em manutenção, com experiência direta na gestão e execução das atividades de manutenção das viaturas analisadas, via questionário.

Em seguida, os especialistas atribuíram valores de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detectabilidade (D) de 25 itens selecionados com base na FMECA, com base em uma escala Likert de dez pontos, em que “1” representava a menor valor e “10” o maior para cada variável S, O e D. A Severidade significa a gravidade da falha ao sistema, de insignificante (valor “1”) ao impacto extremo, com dano grave ao

sistema (valor “10”). A Ocorrência busca avaliar a percepção de probabilidade de o item falhar, com base na experiência de manutenção do especialista no tipo de viatura analisado, recebendo “1” para baixíssima probabilidade de falha e “10” para extrema. A Detectabilidade avalia o quanto é mais simples (valor “1”) ou mais complexo (valor “10”) antecipar a avaria, por inspeção visual, por sensor, ou outra forma de diagnóstico. Por fim, o produto de S, O e D é denominado Número de Prioridade de Risco (NPR), cujo maior resultado indica a prioridade do item na manutenção do sistema (Chennoufi, Chakhrit, 2024).

Cada avaliador pode ter percepções distintas na avaliação dos itens. É aceitável que os valores máximos, mínimos e a variância das avaliações sejam diferentes. Nesse caso, as avaliações de cada especialista precisam ser padronizadas para a mesma escala. Nessa pesquisa foi utilizado o coeficiente de variação de Pearson, uma medida estatística que expressa a variabilidade de um conjunto de dados em relação à sua média, sendo calculado como a razão entre o desvio padrão e a média, conforme a Equação (1) (Stepniak, 2025).

$$V_{ajustado} = \frac{V_i \times \sigma_v}{\bar{v}} \quad (1)$$

Em que:

- V_i representa o valor individual do parâmetro para o item i ;
- σ_v é o desvio padrão populacional dos valores atribuídos;
- \bar{v} é a média aritmética dos valores em todos os itens avaliados.

Com os valores de NPR (Número de Prioridade de Risco) já obtidos, que consiste na multiplicação dos valores do S, O e D ajustados, procedeu-se à classificação dos componentes segundo o método de categorização ABC, amplamente utilizado em análises de confiabilidade e gestão de estoques. Essa abordagem tem como objetivo identificar quais itens representam maior impacto na criticidade do sistema, priorizando aqueles que concentram a maior parcela do risco total.

Inicialmente, todos os itens foram ordenados de forma decrescente em função do valor de NPR. Em seguida, foi calculado o percentual acumulado de participação de cada componente no total dos valores de NPR obtidos. A partir dessa ordenação, os itens foram agrupados em três classes de criticidade, com base no princípio de Pareto (Khanorkar, Kane, 2023):

- a) Classe A: compreende os componentes com maiores valores de NPR, que, somados, representam até 80 % do total acumulado.
- b) Classe B: engloba os componentes cuja soma cumulativa de NPR situa-se entre 80 % e 95 % do total.
- c) Classe C: reúne os componentes com menor impacto relativo, responsáveis pelos 5 % finais do total acumulado de NPR.

Após a classificação ABC, foram definidas as variáveis de cálculo do Fator de Estimativa de Consumo (F), expresso pela Equação (2), em que “K” é a quantidade de itens, componentes de “N” sistemas, com taxa de falhas “L”, operando à razão de “M” horas por dia de operação, considerando “D” o tempo de desabastecimento (ou “lead time”) do item.

$$F = K \times N \times L \times M \times D \quad (2)$$

Esse Fator “F” representa uma estimativa de consumo do item durante a operação, sem reabastecimento. Esse “consumo” pode ser associado a um estoque de segurança ou quantidade do item a constar de um pacote de sobressalentes críticos para a operação.

Entretanto, Jones (2006) destaca a importância de considerar a incerteza dessa estimativa, então usa o Fator “F” como parâmetro de uma distribuição de Poisson, para obter novas quantidades de itens para atender a diferentes políticas de estoque. Por exemplo, se o planejamento logístico considera uma política de estoque de 90%, que pode ser interpretada como a confiabilidade mínima do pacote de sobressalentes para apoiar as operações, basta calcular a quantidade Q de itens de uma distribuição de Poisson de parâmetro “F” que representa o percentil de 90%. No software R, esse cálculo é realizado através da função “*qpois*”, conforme a Equação (3). A quantidade “Q” dos diversos itens críticos analisados configura o pacote de sobressalentes capaz de atender a operação, sem a necessidade de reabastecimento ou durante o tempo de resposta da cadeia de suprimentos dos itens. No caso de cálculo do resultado da confiabilidade (“Conf”) necessária para atender a determinada política de estoque, deve-se usar a Equação (4).

$$Q = \text{qpois}(0.90, "F") \quad (3)$$

$$\text{Conf} = \text{ppois}(\text{"Q"}, \text{"F"}) \quad (4)$$

4. APLICAÇÃO EM CENÁRIO DE OPERAÇÕES DE PAZ

Os 25 itens selecionados para análise, com base nos maiores NPR, foram classificados no formato ABC, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Valores da Criticidade dos Itens e sua categorização

ITEM	S	Saj.	O	Oaj.	D	Daj.	NPR	ABC
ITEM 4	8,33	2,09	7,00	2,25	5,33	2,37	11,10	A
ITEM 7	8,00	2,00	8,33	2,68	4,00	1,77	9,51	A
ITEM 12	8,33	2,09	7,33	2,36	4,33	1,92	9,45	A
ITEM 10	8,00	2,00	6,67	2,14	4,67	2,07	8,88	A
ITEM 2	8,67	2,17	6,33	2,03	4,00	1,77	7,83	A
ITEM 5	9,33	2,34	4,33	1,39	5,00	2,22	7,21	A
ITEM 11	7,33	1,84	6,67	2,14	3,67	1,63	6,39	A
ITEM 1	7,33	1,84	4,00	1,28	5,33	2,37	5,58	A
ITEM 14	8,00	2,00	4,00	1,29	4,33	1,92	4,95	A
ITEM 17	6,67	1,67	7,67	2,46	2,00	0,89	3,65	A
ITEM 13	5,00	1,25	4,67	1,50	4,33	1,92	3,61	A
ITEM 9	6,00	1,50	5,33	1,71	3,00	1,33	3,42	A
ITEM 3	3,67	0,92	8,00	2,57	3,00	1,33	3,14	A
ITEM 24	8,33	2,09	5,00	1,61	2,00	0,89	2,97	B
ITEM 15	5,33	1,34	5,00	1,61	3,00	1,33	2,85	B
ITEM 19	5,33	1,34	4,67	1,50	2,67	1,18	2,37	B
ITEM 22	4,33	1,09	3,00	0,96	4,33	1,92	2,01	B
ITEM 16	9,00	2,25	2,33	0,75	2,67	1,18	2,00	B
ITEM 6	4,67	1,17	8,67	2,78	1,33	0,59	1,92	B
ITEM 25	6,33	1,59	5,00	1,61	1,67	0,74	1,88	B
ITEM 8	8,00	2,00	6,00	1,93	1,00	0,44	1,71	C
ITEM 21	5,33	1,34	8,33	2,68	1,00	0,44	1,59	C
ITEM 20	4,00	1,00	2,67	0,86	4,00	1,78	1,52	C
ITEM 23	6,67	1,67	4,00	1,29	1,33	0,59	1,27	C
ITEM 18	5,00	1,25	5,00	1,61	1,00	0,44	0,89	C

Fonte: O Autor, 2025.

O resultado dessa classificação permitiu avaliar o risco operacional do sistema. Verificou-se que os itens pertencentes à Classe A concentram a maior parte da exposição ao risco de indisponibilidade, indicando prioridade para ações de controle, monitoramento e provisão de sobressalentes. Os itens da Classe B, embora com menor peso individual, ainda exercem influência relevante sobre o desempenho global, sendo recomendável acompanhar sua taxa de falhas e revisar periodicamente seus planos de manutenção. Por fim, os itens da Classe C apresentaram valores reduzidos de NPR, podendo ser mantidos sob gestão de estoque mínima ou sob

demanda, sem comprometer significativamente a disponibilidade operacional do sistema.

Para o cálculo do Fator “F”, considerou-se um cenário hipotético de uma Operação de Paz, em que seja necessário calcular as quantidades de itens de um pacote de sobressalentes críticos para uma missão específica. Com base nas diretrizes do *Peacekeeping Capability Readiness System* (PCRS) das Nações Unidas, as forças designadas para operações de manutenção da paz devem possuir capacidade de autossustentação logística por um período mínimo de seis meses, sem depender de apoio externo imediato (Leslie, 2011; United Nations, 2023). Esse período de seis meses corresponde à variável “D” do Fator “F”.

No cenário hipotético, considerou-se uma Força de Emprego Rápida (FER) composta por dez viaturas ($K = 10$). A análise documental das OS revelou uma média de emprego operacional de 27,5 horas mensais por viatura. Esse dado foi utilizado para estimar o parâmetro “M”, que equivale a razão de 0,9167 h/dia. Com base no histórico de manutenção, estimou-se o MTBF dos 25 componentes analisados. A partir desses valores, calculou-se a taxa de falhas horária (L), obtida pela relação inversa $L=1/MTBF$.

Considerando uma confiabilidade mínima de 90% como a política de estoque, para minimizar o risco de indisponibilidade operacional decorrente da falta de sobressalentes, obteve-se o resultado da Tabela 2, que indica as quantidades dos itens e as respectivas confiabilidades, que devem atender ao mínimo de 90% de confiança em uma cadeia de suprimentos sem desabastecimento em seis meses de operação de paz.

Tabela 2 – Quantidades e Confiabilidade do Pacote de Sobressalentes

ITEM	K	N	M	L	D (x27,5h)	F	Quant.	Conf.
ITEM 1	10	1	0,9167	0,000938	165	1,42	3	0,944
ITEM 2	10	1	0,9167	0,000779	165	1,18	3	0,968
ITEM 3	10	6	0,9167	0,000370	165	3,36	6	0,945
ITEM 4	10	2	0,9167	0,000235	165	0,71	2	0,965
ITEM 5	10	1	0,9167	0,000067	165	0,10	0	0,903
ITEM 6	10	4	0,9167	0,000418	165	2,53	5	0,956
ITEM 7	10	2	0,9167	0,000271	165	0,82	2	0,950
ITEM 8	10	2	0,9167	0,000034	165	0,10	0	0,903
ITEM 9	10	2	0,9167	0,000274	165	0,83	2	0,948
ITEM 10	10	1	0,9167	0,000291	165	0,44	1	0,927
ITEM 11	10	1	0,9167	0,000587	165	0,89	2	0,939
ITEM 12	10	1	0,9167	0,000795	165	1,20	3	0,966
ITEM 13	10	1	0,9167	0,000653	165	0,99	2	0,922

ITEM	K	N	M	L	D (x27,5h)	F	Quant.	Conf.
ITEM 14	10	1	0,9167	0,000469	165	0,71	2	0,965
ITEM 15	10	1	0,9167	0,001340	165	2,03	4	0,945
ITEM 16	10	1	0,9167	0,001727	165	2,61	5	0,950
ITEM 17	10	1	0,9167	0,000067	165	0,10	0	0,903
ITEM 18	10	1	0,9167	0,000826	165	1,25	3	0,962
ITEM 19	10	1	0,9167	0,000067	165	0,10	0	0,903
ITEM 20	10	2	0,9167	0,000140	165	0,42	1	0,932
ITEM 21	10	24	0,9167	0,000190	165	6,91	10	0,908
ITEM 22	10	4	0,9167	0,000632	165	3,83	6	0,907
ITEM 23	10	2	0,9167	0,000537	165	1,63	3	0,918
ITEM 24	10	2	0,9167	0,000237	165	0,72	2	0,964
ITEM 25	10	2	0,9167	0,000373	165	1,13	3	0,972

Fonte: O Autor, 2025.

A associação das Tabelas 1 e 2 permitiu compor um pacote de sobressalentes que valoriza a criticidade de cada componente, com a quantidade necessária ao atendimento da política de estoque de um mínimo de 90%. No cenário hipotético considerou-se a restrição de recursos para a composição do pacote de sobressalentes críticos, então os cálculos prosseguiram somente com os itens da classe A. A Tabela 3 consolida o resultado do estudo, com as quantidades finais e o atendimento da política de estoque estabelecida para a missão.

Tabela 3 – Pacote de Sobressalentes Críticos

ITEM	NPR	ABC	F	Quant.	Conf.
ITEM 4	11,10	A	0,71	2	0,965
ITEM 7	9,51	A	0,82	2	0,950
ITEM 12	9,45	A	1,20	3	0,966
ITEM 10	8,88	A	0,44	1	0,927
ITEM 2	7,83	A	1,18	3	0,968
ITEM 5	7,21	A	0,10	1	0,995
ITEM 11	6,39	A	0,89	2	0,939
ITEM 1	5,58	A	1,42	3	0,944
ITEM 14	4,95	A	0,71	2	0,965
ITEM 17	3,65	A	0,10	1	0,995
ITEM 13	3,61	A	0,99	2	0,922
ITEM 9	3,42	A	0,83	2	0,948
ITEM 3	3,14	A	3,36	6	0,945

Fonte: O Autor, 2025.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou responder à questão de como selecionar itens críticos de sobressalentes para uma determinada operação militar, considerando simultaneamente fatores de confiabilidade, comportamento de falhas e restrições logísticas. Para isso, foi desenvolvida uma abordagem integrada que uniu a análise

qualitativa, por meio da metodologia FMECA e classificação ABC, à análise quantitativa, baseada no Fator de Estimativa de Consumo (F), fundamentado em parâmetros operacionais reais e na distribuição de Poisson.

A etapa qualitativa permitiu hierarquizar os componentes de acordo com o impacto de suas falhas na disponibilidade operacional, evidenciando que uma pequena parcela dos itens — classificados como de Classe A — concentra a maior parte do risco de indisponibilidade do sistema, sendo, portanto, prioritária na composição dos pacotes de sobressalentes críticos. Essa hierarquização possibilitou racionalizar a alocação de recursos, direcionando esforços de manutenção e reposição para os elementos de maior criticidade.

Na abordagem quantitativa, os parâmetros de operação e confiabilidade foram empregados para estimar o consumo esperado de sobressalentes durante um período de seis meses, estabelecido como o lead time logístico conforme as diretrizes do *Peacekeeping Capability Readiness System* (PCRS) da ONU. O uso do modelo probabilístico de Poisson permitiu dimensionar a quantidade de sobressalentes com um nível de confiabilidade superior a 90%, assegurando que a força mantivesse sua capacidade operacional mesmo sob condições de isolamento e dificuldade de ressuprimento.

Os resultados obtidos demonstram que a integração entre a análise de criticidade e o modelo de confiabilidade estatística é uma estratégia eficaz para o planejamento logístico militar, permitindo equilibrar disponibilidade, risco e custo. A metodologia proposta fornece um instrumento objetivo de apoio à decisão para a gestão de manutenção e suprimentos, que pode ser aplicado não apenas em missões internacionais, mas também em operações domésticas com restrição logística. Além disso, o modelo pode ser ajustado para diferentes níveis de confiabilidade ou restrições orçamentárias, o que amplia sua aplicabilidade a diversos cenários operacionais.

Por fim, conclui-se que a aplicação combinada das ferramentas FMECA, classificação ABC com o cálculo do Fator de Consumo, constitui uma base metodológica sólida para a seleção de sobressalentes críticos, oferecendo uma resposta robusta ao problema proposto e contribuindo para o aprimoramento das práticas de manutenção e logística no âmbito das Forças Armadas. Recomenda-se, para estudos futuros, a incorporação de variáveis econômicas e de fatores operacionais, de acordo com ambiente em que se atua, de modo a aperfeiçoar a

previsão de consumo e otimizar ainda mais o processo decisório em contextos reais de operação.

REFERÊNCIAS

- ARONIS, K. P.; MAGOU, I.; DEKKER, R.; TAGARAS, G. Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: A case study. **European Journal of Operational Research**, v.154, n.3, p. 730-739, 2004.
- ATAKARI, Chandrasekhar. The Influence of AI-Enabled Predictive Analytics on ERP-Based Strategic Planning in Defense Supply Chains. **International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology**, v. 6, 2025.
- AUBRY, Monique; LIÈVRE, Pascal. **Project Management in Extreme Situations: Lessons from Polar Expeditions, Military and Rescue Operations, and Wilderness Explorations**. New York: CRC Press, 2016.
- AUWERAER, Sarah Van Der; BOUTE, Robert. Forecasting spare part demand using service maintenance information. **International Journal of Production Economics**, v. 213, p. 138, 2019.
- BLANCHARD, Benjamin S.; VERMA, Dinesh; PETERSON, Elmer L. **Maintainability: A key to effective serviceability and maintenance management**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1995.
- BRASIL, Ministério da Defesa. **Política Nacional de Defesa. Estratégia Nacional de Defesa**. (MD, Org.). Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-defesa/pnd_end_congresso_.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.
- CANTINI, Alessandra; PERON, Mirco; CARLO, Filippo De; SGARBOSSA, Fabio. A data-driven methodology for the periodic review of spare parts supply chain configurations. **International Journal of Production Research**, v. 62, n. 5, p. 1818–1845, 2024.
- CASTELLI, Christopher J. Coburn remains critical: Senate keeps V-22 money in spending bill, but fate of funds unclear. **Inside the Navy**, v.19, n.18, p. 1-13, 2006.
- CHENNOUFI, Mohammed; CHAKHRIT, Ammar. An extended FMECA approach using new risk assessment and prioritization based approach. **International Journal of Information Technology**, v.16, n.3, p. 1595-1604, 2024.
- CHOI, Boram; SUH, Jong Hwan. Forecasting spare parts demand of military aircraft: Comparisons of data mining techniques and managerial features from the case of South Korea. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 15, 1 ago. 2020.
- FREITAS, José Eduardo de Figueiredo; OLIVEIRA, Luiz Guilherme. A engenharia de sistemas e a gestão de CoPS como ferramentas da gestão de projetos complexos

na área de TI. **Journal of Information Systems and Technology Management**, v. 5, n. 1, p. 15-36, 2008.

DOUBLEDAY, Justin. McCain wants service to consider other systems: Navy, Gilmore At Odds Over Minehunting System Reliability Data. **Inside the Navy**, v.28, n.35, p. 1-5, 2015.

ELSAYED, E. A. **Reliability Engineering**. 3 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2021.

FAN, L.; HU, Z.; LING, Q.; LI, H.; QI, H.; CHEN, H. Reliability analysis of computed tomography equipment using the q-Weibull distribution. **Engineering Reports**, v.5, n.7, e12613, 2023.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GIRARDINI, Kenneth; MILLER, Candice. **Common Shop Stock Lists for the Army's Ground Brigade Combat Teams**. Santa Monica: RAND Corporation, 2025. Disponível em: https://www.dmi-ida.org/download-pdf/pdf/AD1329864_CommonShopStockListsfortheArmysGroundBrigadeCombatTeams.pdf. Acesso em: 10 out. 2025.

HAO, Jianping; PEI, Mochao. Mission Reliability Assessment for the Multi-Phase Data in Operational Testing. *Stats*, v.8, n.49, p. 1-27, 2025.

HELLBERG, Roland; SPRÄNGARE, David; CANDELL, Olov; CARPENFELT, Claes; LUNDBERG, Kristian; SAMUELSSON, Per; ANTAI, Imoh; ANDERSSON, Per; BACKLUND, Lars. Performance constraints in defence industry supply chains: evidence from case studies. **Defence and Peace Economics**, 2025.

JONES, James V. **Integrated logistics support handbook**. 3 ed. ed. New York: Sole Press, 2006.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função estratégica**. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark Editora, 2013.

KHANORKAR, Yash; KANE, P. V. Selective inventory classification using ABC classification, multi-criteria decision making techniques, and machine learning techniques. **Materials Today: Proceedings**, v.72, p. 1270-1274, 2023.

LESLIE, Don. **Operational logistical support of UN peacekeeping missions: intermediate logistics course**. *Williamsburg: Peace Operations Training Institute*, p. 107-119, 2011.

LIU, Z.; MA, X.; HONG, D.; ZHAO, Y. Mission reliability assessment for battle-plane based on flight profile. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, v.38, n.1, p. 59-63, 2012.

MA, Jason. MTBOMF would go from 70 to 43.5 hours: Marine Corps proposes Lowering EFV's Reliability Requirement. **Inside the Navy**, v.17, n.5, p. 1-13, 2004.

MISAIL, H.; FOULADIRAD, M.; HAGHIGHI, F. Optimal perfect corrective maintenance policy for a system with multiple components using data-driven decision-making methods. **Quality and Reliability Engineering International**, v.40, n.1, p. 472-498, 2024.

NBR, ABNT. 5462 **Confiabilidade e Manutenibilidade–Terminologia**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.

PINÇE, Çerağ; TURRINI, Laura; MEISSNER, Joern. Intermittent demand forecasting for spare parts: A Critical review. **Omega**, v.105, 102513, 2021.

SHAHRIARI, Mohammadreza; SHAHRASBI, Hooman; ZARETALAB, Arash. Reliability analysis of lifetime systems based on Weibull distribution. **International Journal of Nonlinear Analysis and Applications**, v.15, n.1, p. 321-329, 2024.

STEPNIAK, Czesław. Coefficient of variation. **International encyclopedia of statistical science**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 487-488, 2025.

SUN, Yongquan *et al.* An Ordering Decision-Making Approach on Spare Parts for Civil Aircraft Based on a One-Sample Prediction. **IEEE Access**, v. 6, p. 27790–27795, 22 mar. 2018.

UNITED NATIONS. **Peacekeeping Capability Readiness System (PCRS)**, 2023. Disponível em: <https://pcrs.un.org>. Acesso em: 10 out. 2025.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

YOUNG, Brad. **Total lifecycle management- assessment tool: an exploratory analysis**. Monterey, California: Naval Postgraduate School, jun. 2008.