UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOSÉ JOAQUIM DA SILVA NETO

AVALIAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES BASEADO NO NSGA-II APLICADO NA MANUTENÇÃO DE VEÍCULOS EM OPERAÇÕES MILITARES

Recife
2023

JOSÉ JOAQUIM DA SILVA NETO

AVALIAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES BASEADO NO NSGA-II APLICADO NA MANUTENÇÃO DE VEÍCULOS EM OPERAÇÕES MILITARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira.

Recife

2023

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586a Silva Neto, José Joaquim da.
Avaliação de uma política de dimensionamento de sobressalentes baseado no NSGA-II aplicado na manutenção de veículos em operações militares / José Joaquim da Silva Neto. – 2023.
79 f.: il., fig., tab., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira.
Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção, 2023.
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia de Produção. 2. Algoritmo genético. 3. Gestão da manutenção. 4. Gestão de estoques. 5. NSGA-II. 6. Operações militares. 7. Sobressalentes. I. Ferreira, Rodrigo José Pires (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2024-74

JOSÉ JOAQUIM DA SILVA NETO

AVALIAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES BASEADO NO NSGA-II APLICADO NA MANUTENÇÃO DE VEÍCULOS EM OPERAÇÕES MILITARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovada em: 20/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Gilberto Reynoso Meza (Examinador Externo)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que tudo me proporciona e me deu o merecimento de galgar mais este passo, com fé tudo se torna possível.

Agradeço também à minha família, minha esposa Karla Vivian pelo amor e apoio incondicional, essa vitória é nossa, pois tudo é nosso, ao pequeno grande herói, João Gabriel meu filho (voltaremos a brincar), a meu pai Maurício pela educação e por ser exemplo, meus irmãos Rodrigo Gomes e Ana Patrícia que sempre me apoiaram e ajudaram no decorrer de toda a jornada da vida, mesmo na distância o amor fraterno sempre prevalece.

Agradeço à UFPE, a todos os professores do Departamento de Engenharia de Produção, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, a todos os componentes do Grupo de Pesquisa REASON, a Tatiana Aires pela grande contribuição e ao Professor Rodrigo Ferreira pela orientação. Venho agradecer aos alunos mestrandos que ingressaram comigo nessa jornada em 2021.1, em especial ao grupo G4, com quem dividi aflições e alegrias nesse ciclo de aprendizado.

Gratidão também ao Exército Brasileiro, na pessoa do TC Melo, primeiro incentivador, aos comandantes TC G. Souza, TC Douglas, TC Zylberberg, ao Maj. Silva Júnior, atual chefe do Centro de Operações de Manutenção, ao Maj. Nascimento, que provavelmente vai me cobrar o passo seguinte (Doutorado), à brilhante equipe da Seção de Informática do Parque Regional de Manutenção/7 e a todos militares e servidores que fizeram e fazem a Casa Forte da Manutenção.

Por fim, agradeço à Maria Lenilda, minha mãe, a quem dedico este trabalho, todo carinho, amor e cuidado que sempre teve com seus filhos, tenho certeza de que em algum lugar ela está feliz com essa conquista.

“Gozo o prazer, que os anos não carcomem, de haver trocado a minha forma de homem, pela imortalidade das Ideias” (Anjos; Augusto dos, 1998, p. 52).

RESUMO

Para manter uma operação eficiente, com alto índice de disponibilidade, os custos de manutenção têm impacto significativo na gestão de uma frota. Seja no setor público ou privado, esses custos tendem a aumentar na medida em que aumenta o tempo de vida dos veículos, máquinas e equipamentos sobre os quais se tem gestão. O presente trabalho apresenta a avaliação de uma política de dimensionamento de sobressalentes baseada no algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II, aplicado na manutenção corretiva de veículos em um contexto de operações militares. Diante de um cenário de orçamento limitado, o apoio à decisão das aquisições busca um portfólio de itens com menor custo e maior nível de serviço, de maneira que tais níveis de estoque não sejam superados por uma futura demanda de falhas. Dentre as principais contribuições da pesquisa pode-se evidenciar que a utilização do NSGA-II no dimensionamento de sobressalentes apresentou um impacto operacional e econômico, com uma maior racionalização nas aquisições, estimando-se uma redução de 25% do nível médio de estoque de peças, equivalendo aproximadamente a uma diminuição de 135 mil reais de capital parado, uma vez que foi capaz de melhorar significativamente a gestão de peças de reposição, apresentando um indicativo de aquisição de peças, diminuindo a probabilidade de ruptura do estoque e o tempo total de reparo, uma vez que há uma menor incidência de interrupções por falta de peças. O modelo pode ser replicado em outras organizações que atuam na manutenção de frota ou outros equipamentos com multicomponentes.

Palavras-chave: algoritmo genético; gestão da manutenção; gestão de estoques; NSGA-II; operações militares; sobressalentes.

ABSTRACT

To maintain an efficient operation, with a high level of availability, maintenance costs have a significant impact on the management of a fleet. Whether in the public or private sector, these costs tend to increase as the lifespan of the vehicles, machines and equipment over which they are managed increases. The present work presents the evaluation of a spare parts sizing policy based on the NSGA-II multi-objective genetic algorithm, applied to the corrective maintenance of vehicles in a context of military operations. Faced with a limited budget scenario, procurement decision support seeks a portfolio of items with lower cost and higher level of service, so that such stock levels are not exceeded by future demand for failures. Among the main contributions of the research, it can be seen that the use of NSGA-II in sizing spare parts had an operational and economic impact, with greater rationalization in acquisitions, estimating a 25% reduction in the average level of parts stock, approximately equivalent to a decrease of 135 thousand reais in idle capital, as it was able to significantly improve the management of spare parts, presenting an indication of parts acquisition, reducing the probability of stock rupture and the total repair time, as there is a lower incidence of interruptions due to lack of parts. The model can be replicated in other organizations that work in fleet maintenance or other multi-component equipment.

Keywords: genetic algorithm; maintenance management; inventory management; NSGA-II; military operations; spare parts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Custos de Manutenção Automotiva.....	15
Figura 2 –	Orçamento da Defesa Nacional	16
Figura 3 –	Tipos de Manutenção.....	26
Figura 4 –	Ciclo do Algoritmo Genético.....	39
Figura 5 –	Etapas do modelo.....	41
Figura 6 –	Fluxo de Etapas do NSGA-II	45
Figura 7 –	Localização do Parque Regional de Manutenção/7.....	47
Figura 8 –	Organograma do Pq R Mnt/7.....	48
Figura 9 –	Organizações Militares subordinadas à 7ª Região Militar.....	48
Figura 10 –	Ciclo Logístico do Processo de Manutenção.....	50
Figura 11 –	Combinações Bloco 1 (Nível de Serviços x Custo)	59
Figura 12 –	Verdadeira Fronteira de Pareto do Bloco 1.....	59
Figura 13 –	Verdadeira Fronteira de Pareto do Bloco 2.....	60
Figura 14 –	Resultados comparativos do Bloco 1.....	63
Figura 15 –	Resultados comparativos do Bloco 2.....	64
Figura 16 –	Resultado NSGA-II.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Políticas de Manutenção..... 25
Tabela 2 – Diferentes Modelos de MOEAs..... 35
Tabela 3 – Classificação dos Algoritmos Evolutivos conforme abordagem adotada..... 37
Tabela 4 – Metodologia do Algoritmo Genético..... 38
Tabela 5 – Etapas do NSGA-II..... 44
Tabela 6 – Classes de Suprimento..... 49
Tabela 7 – Escalões de Manutenção..... 51
Tabela 8 – Vetor do Custo-Benefício..... 56
Tabela 9 – Limites Inferior e Superior..... 57
Tabela 10 – Dados do Bloco 1..... 58
Tabela 11 – Dados do Bloco 2..... 58
Tabela 12 – Cenários NSGA-2..... 62
Tabela 13 – Análise Quantitativa do Bloco 1..... 65
Tabela 14 – Análise Quantitativa do Bloco 2..... 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADEA	Adaptative Decomposition-Based Evolutionary
C Op Mnt	Centro de Operações de Manutenção
CESVI	Centro de Experimentação e Segurança Viária
CFCond	Centro de Formação de Condutores
Cia C Sv	Companhia de Comando e Serviço
Cia Mnt	Companhia de Manutenção
Com Soc	Comunicação Social
COTER	Centro de Operações Terrestre
DQBRN	Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear
EDN	Estratégia de Defesa Nacional
EME	Estado Maior do Exército
FGV	Fundação Getúlio Vargas
Fisc Adm	Fiscal Administrativo
HÁ-HCLDS	High Availability, High Cost e Low Demand Systems
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMV	Índice de Manutenção Veicular
MA	Manufatura Aditiva
MEANDS	Multiobjective Evolutionary Algorithm based on Non-dominated Decomposed Sets
MOEA	Multi-objective evolutionary algorithm
MOEA/DD	Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Dominance and Decomposition
MRO	Manutenção, Reparo e Operação
NARMAT	Norma Administrativa Relativa aos Materiais
NARSUP	Normas Administrativas Relativas ao Suprimento
NPGA	Niched-Pareto Genetic Algorithm
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
OM	Organização Militar
Pel L Mnt	Pelotão Leve de Manutenção
Pel Mnt Armt	Pelotão de Manutenção de Armamento
Pel Mnt Vtr	Pelotão de Manutenção de Viatura
PESA	Pareto Envelope-Base Selection Algorithm
Pq R Mnt/7	Parque Regional de Manutenção/7
RN	Redes Neurais

ROB	Requisitos Operacionais Básicos
SFPC	Seção de Fiscalização de Produtos Controlados
SISCOFIS	Sistema de Controle Físico
SPEA	Strenght Pareto Evolutionary Algorithm
TPF	True Pareto Front
TRD	Termo de Recebimento Definitivo
VOP	Viatura Operacional

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO .....**	**14**
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	19
1.1.1	**Objetivo Geral.....**	19
1.1.2	**Objetivos Específicos.....**	19
1.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2	**REVISÃO DE LITERATURA E BASE CONCEITUAL.....**	**23**
2.1	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.2	MANUTENÇÃO E CONFIABILIDADE.....	24
2.3	GESTÃO DE ESTOQUES.....	29
2.4	DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES.....	31
2.5	ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO.....	34
3	**PROPOSTA MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE OBRESSALENTES BASEADO NO NSGA II APLICADO NA MANUTENÇÃO DE VEÍCULOS EM OPERAÇÕES MILITARES.....**	**40**
4	**ESTUDO DE CASO.....**	**46**
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO.....	46
4.1.1	**Exército Brasileiro.....**	**46**
4.1.2	**Parque Regional de Manutenção.....**	**47**
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	49
4.2.1	**Logística e Manutenção.....**	**50**
4.2.2	**Viatura Operacional.....**	**51**
4.3	ESTIMATIVA INICIAL DAS PEÇAS SOBRESSALENTES.....	53
4.4	MODELOS DE POLÍTICAS DE ESTOQUE.....	54
4.4.1	**Horizonte |Temporal.....**	**55**
4.4.2	**Custo-benefício.....**	**56**
4.4.3	**Método Exaustivo.....**	**57**
4.5	APLICAÇÃO DO MODELO NSGA-II.....	60
4.6	ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
5	**CONCLUSÃO**	**68**
5.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	69

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 70
REFERÊNCIAS **71**
ANEXO A – DETALHAMENTO DA VIATURA..... 78

1 INTRODUÇÃO

Conforme preestabelecido na Constituição Federal e ratificado por meio do estabelecimento da Estratégia de Defesa Nacional - EDN, o Exército Brasileiro é destinado à manutenção da força terrestre em pleno estado de prontidão, estruturado e preparado para o cumprimento de missões operacionais terrestres. Em virtude da limitação de recursos, seja por motivos políticos, econômicos ou sociais, em geral vinculados a percentuais orçamentários do Produto Interno Bruto, nem sempre é possível garantir uma regularidade e previsibilidade no emprego dos recursos, inclusive os que são destinados à execução da manutenção. O custeio total anual relativo à manutenção preventiva e corretiva é de aproximadamente R$142,7 milhões, se tratando de manutenção de viaturas, a maior dificuldade na racionalização do uso dos recursos está na grande variedade de modelos e fabricantes em toda a frota, que segundo dados do Sistema de Controle Físico (SISCOFIS) constam 24 marcas com 106 modelos distintos, sem falar nas variações de ano de fabricação, o que não permite manter em estoque peças de reposição que comporte essa alta variabilidade.

Entre os anos de 2011 e 2012 o Exército Brasileiro, como parte do plano de modernização da frota, buscou parcerias junto a empresas com interesse e capacidade técnica para projetar e fabricar viaturas operacionais 3/4 e 1/2 Ton, com o objetivo de substituir a frota de veículos de tal categoria. Nesse sentido, fazia-se necessário que tais viaturas fossem concebidas em conformidade com algumas exigências operacionais da organização, passando por estudos, testes e formação de um protocolo de interesses para atender à visão e às necessidades inerentes da atividade de defesa.

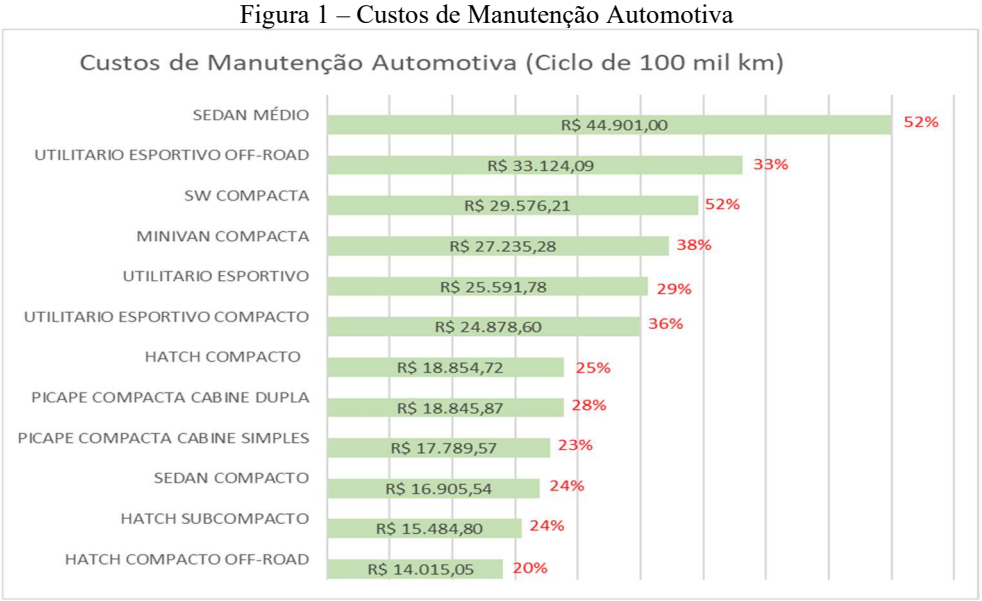
Conforme tratado na Lei de Fomento à Base Industrial de Defesa (Lei nº 12.598 de 21 de março de 2012), um tratamento alinhado em bases legais é de extrema importância, tanto das economias avançadas como das economias emergentes, tendo em vista o nível de sensibilidade e caráter estratégico dos produtos de defesa.

Fazendo uma análise nos últimos anos, com relação às atividades logísticas do Exército Brasileiro, evidencia-se que os recursos distribuídos às organizações militares que prestam apoio de manutenção têm apresentado uma média crescente de 32,73% tanto por questões de aumento inflacionário, como também pelo avanço da vida útil dos veículos e, seu emprego pleno em diversas operações militares, que podem ser exemplificadas no contexto da nossa região, entre as quais Operação Guararapes que realiza diversos exercícios de adestramento para preparação em um eventual emprego externo, como para garantia das leis e

da ordem, a Operação Carro-Pipa que realiza a preparação, coordenação e fiscalização dos prestadores de serviço durante a entrega de água potável nas regiões em decreto de emergência ou calamidade pública, como também na Operação Acolhida que conduz refugiados advindos de países vizinhos que vivenciam crise humanitária para as cidades onde serão instalados e Operação Mandacaru, que consiste no patrulhamento ostensivo para estabelecimento de um ambiente estável e seguro para a população no interior do estado. Portanto, um maior emprego dos produtos de defesa, resulta consequentemente no aumento do volume de peças sobressalentes e aumento na complexidade das peças demandadas em decorrência de uma maior incidência de falhas eventuais.

Dentre os critérios de escolha de um determinado modelo ou fabricante automotivo, um dos fatores de extrema importância para a gestão de frota de veículos, além dos requisitos de desempenho, segurança, capacidade, índice de furto, autonomia e consumo de combustível, entre outros, são os custos atrelados à manutenção, seja preventiva ou corretiva. De acordo com levantamento feito pelo Centro de Experimentação e Segurança Viária - CESVI, com base no Índice de Manutenção Veicular - IMV, o qual levou em consideração os custos de manutenção mecânica, considerando os componentes que devem ser substituídos ao longo dos primeiros 100 mil quilômetros de rodagem, conforme dados do fabricante dos 45 modelos mais vendidos no Brasil, os custos de manutenção veicular são estimados em 24 mil reais, como pode ser verificado na Figura 1, o que corresponde a um percentual médio de 32% do valor do veículo (CESVI, 2020), isso sem considerar falhas antecipadas que decorrem de mal uso ou negligenciamento da manutenção preventiva.

Figura 1 – Custos de Manutenção Automotiva

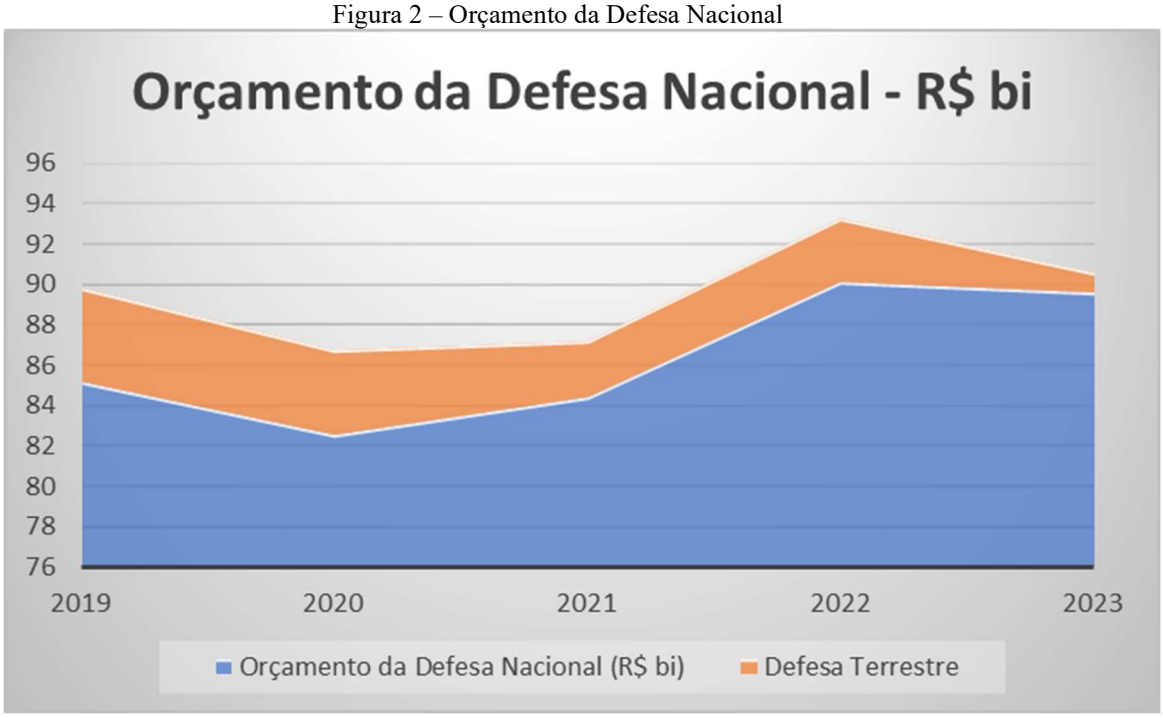


Fonte: Adaptado de CESVI BRASIL (2020)

Com o impacto pós-pandêmico nas cadeias de suprimento do setor automotivo, havendo uma ruptura nas relações produtivas, falta de insumos, além de aumento nos custos de energia e matérias-primas (FGV/ Ibre, 2022), o seguimento de peças automotivas teve uma alta de 16,5%, sendo principal contribuinte do aumento de veículos novos e usados, que em 2022 tiveram um aumento em torno de 22,8% (IBGE, 2022).

Com relação aos recursos, apesar de ter um percentual significativo para administração geral, incluindo despesas com pessoal, verifica-se que o orçamento da Defesa Nacional é contemplado de forma regular, a Figura 2 apresenta os dados gerais, acompanhado da parcela específica para a Defesa Terrestre. Verifica-se que existe margem para obtenção de uma parcela maior de recursos, uma vez que, de maneira geral, os recursos são distribuídos de forma direcionada quando há projetos bem detalhados de execução orçamentária. Por outro lado, tem sido observado um decréscimo nos valores destinados à Defesa Terrestre, logo, necessitando cada vez mais de um melhor planejamento das ações, emprego eficiente dos recursos, ainda mais quando se trata da execução da manutenção, buscando sempre a capacidade de pleno emprego e a disponibilidade.

Figura 2 – Orçamento da Defesa Nacional



Fonte: Adaptado do Portal da Transparência (2023).

Um reflexo concreto da eficiência no emprego dos recursos destinados à manutenção é o índice de disponibilidade dos equipamentos sobre os quais se tem gestão. Tratando-se

especificamente da gestão de frotas de viaturas da 7ª Região Militar (Rio-Grande-do-Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas), um extrato desse índice mostra uma disponibilidade de 66,11% para viaturas operacionais e não-operacionais (Diretoria de Material do Exército Brasileiro, 2023).

A proposta deste trabalho é avaliar uma política de dimensionamento de estoque de peças sobressalentes, concebida por meio da aplicação de um modelo que busca apresentar os respectivos indicativos de aquisição para a composição do estoque, como forma de atender às diversas demandas de peças de reposição em manutenção corretiva e de oportunidade em uma frota de veículos operacionais no contexto de uma organização militar, cuja missão é prestar o apoio de manutenção e recuperação em sistemas mecânicos de suspensão, direção, freio e anexos, mantendo os níveis de serviço, buscando uma maior assertividade, maior giro de estoque e minimização de eventos de rupturas que acarretam o aumento na taxa de indisponibilidade da frota, bem como do tempo de execução da manutenção.

A importância desse estudo se deve ao fato de que, na grande maioria das organizações, sejam públicas ou privadas, os recursos para aquisição de peças são escassos em comparação com as demandas existentes, segundo dados da Diretoria de Material do Comando Logístico do Exército Brasileiro, o custo médio anual de manutenção está estimado em cerca de 105 milhões de reais, o que equivale a cerca de 3,43% do valor patrimonial. Um levantamento das solicitações de recursos por parte das OM detentoras de viaturas operacionais, entre 2018 e 2023, constataram uma demanda de, aproximadamente, R$782 milhões de reais (SILVESTRE, 2022). Ainda segundo a Diretoria de Material, 2⁄3 do custo total do ciclo de vida de uma viatura é empregado após a aquisição, o que inclui manutenção e reparo. Portanto é necessário implementar uma metodologia que proporcione maior convergência entre as aquisições e os itens que serão posteriormente demandados, com base nas tendências de consumo, histórico de falhas e perfil operacional dos itens e sistemas a serem manutenidos, em termos de características das organizações e estágio do ciclo de vida.

Em princípio, diante da grande variabilidade de potenciais falhas e do baixo número de ocorrências pontuais, não há como prever exatamente quais peças precisarão ser substituídas e quais sistemas apresentarão ocorrências. Por outro lado, não seria efetivo realizar as aquisições com base na demanda direta, após a ocorrência da falha, tendo em vista que o processo de aquisição em órgãos públicos é caracterizado por longo lead time, o que provocaria um longo período de indisponibilidade, uma vez que as viaturas precisariam ficar aguardando todo o processo de aquisição e chegada das peças.

Toda previsão está sujeita a uma margem de erro, o qual aumenta, quanto maior for o horizonte de previsão e, tanto a forma de coleta, como a escolha da técnica interferem no nível de erro da previsão considerada (BALLOU, 2005).

Um modelo adequado de dimensionamento de sobressalentes reduz os impactos sociais, ambientais e, principalmente, econômicos (LIMA, 2022). Esse último em decorrência dos lucros cessantes decorrente do capital impactado em forma de estoque, no caso de superestimação, bem como pela interrupção do processo nos casos em que ocorre a falta do suprimento de reparo nos estoques subestimados. Além disso, o amadurecimento de uma política eficiente contribui para o aprimoramento orçamentário em períodos futuros (LIMA, 2022).

A maior parte das questões que norteiam a manutenção estão relacionadas, não de forma excludente, à qualificação do pessoal envolvido, a forma como a tecnologia da informação está presente no processo, ao nível de complexidade do processo decisório e à necessidade de garantias mínimas de disponibilidade e qualidade nas operações dos equipamentos e setores sobre os quais a gestão atua (CAMPOS, 1994).

Nesse sentido, o gestor depara-se com as limitações de recursos, pois é improvável que haja uma disponibilidade de recurso suficiente para contemplar todas as peças a um nível baixo de probabilidade de ruptura do estoque e o modelo direciona para a priorização de itens com a melhor relação custo-benefício.

Em organizações públicas, em geral, o ordenador de despesas não tem uma autonomia sobre a recepção dos recursos, o que não é diferente em uma organização militar. Existe um planejamento, geralmente em ciclos de médio prazo (trimensal a anual), para liberação de recursos, no entanto, não há uma precisão exata de valores e de quando de fato ocorrerá a disponibilização. Logo, é necessário buscar uma maior eficiência na gestão de suprimentos, sobretudo no presente estudo, das peças de reposição, para que no intervalo entre ressuprimentos o nível de serviço se mantenha adequado para a manutenção da frota.

O contexto da pesquisa é aplicar, em uma organização militar de manutenção, o modelo matemático baseado no NSGA-II para melhor gestão de peças de reposição, estabelecendo indicativos de aquisição de peças dos diferentes sistemas a serem manutenidos e proporcionar o nível de serviço desejado para cada sistema ou, individualmente, para cada item de reposição. Destacando que o modelo apresentado poderá ser replicado em qualquer outra organização, que preste serviços de manutenção. A avaliação do modelo é realizada por meio da comparação dos resultados obtidos, em termos de distância média e quantidade de pontos

encontrados, com o que resulta da Verdadeira Fronteira de Pareto, obtida por meio do método exaustivo, que gerou todas as combinações possíveis para um conjunto reduzido de itens, verificando o quão próximas são as soluções apresentadas pelo modelo utilizando o algoritmo genético.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar uma política de dimensionamento de sobressalentes aplicados na manutenção corretiva de veículos em operações militares, buscando equilibrar objetivos conflitantes em termos de aumentar o nível de serviço, ou seja, diminuir a probabilidade de falta de um sobressalente qualquer demandado, por meio da aquisição para estoque de um conjunto de itens críticos, ao mesmo tempo em que atenda a um limite de disponibilidade de recursos para essa aquisição.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pretende-se:

a) Fazer uma revisão na literatura sobre metodologias de dimensionamento de peças sobressalentes para manutenção corretiva;
b) Propor um mecanismo de classificação dos componentes, caso seja necessário reduzir o universo de estudo, considerando parâmetros de classificação como os custos de aquisição, níveis de criticidade e previsibilidade;
c) Estimar a probabilidade de ruptura do estoque de um determinado item, dados os diferentes níveis de estoque;
d) Estimar o nível de serviço médio para uma determinada solução;
e) Gerar soluções que busquem se aproximar ao máximo da verdadeira fronteira de Pareto, considerando os maiores níveis de serviço e menores custos de aquisição;
f) Estabelecer os critérios de avaliação para mensurar o desempenho do método de dimensionamento de estoque de peças sobressalentes;
g) Medir e comparar o método de dimensionamento de peças sobressalentes conforme critérios de avaliação pré-estabelecidos.

De maneira geral, a aplicação do modelo busca redução das rupturas do estoque, que ocorre quando a demanda de qualquer um dos componentes críticos é maior que o quantitativo disponível para reposição. Com a diminuição das rupturas, é reduzido o período médio em que o equipamento fica indisponível ou operando com restrições em decorrência da falta de peças e, consequentemente, aumenta a eficiência do sistema.

1.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para realização deste trabalho, além de uma revisão bibliográfica, documental em manuais de sistemas automotivos, a respeito de manutenção, gerenciamento de estoques de peças de reposição e algoritmos evolutivos genéticos, foi feita uma análise do histórico do livro registro de viaturas, relatórios de apoio de manutenção e levantamentos diretos com usuários, mecânicos, supervisores e equipe de planejamento, reunindo as informações relativas à priorização de peças críticas e taxas de demanda ao longo do tempo. Trata-se de uma pesquisa de abordagem quantitativa e de natureza aplicada, tendo em vista que busca gerar conhecimentos de aplicação prática de uma política de dimensionamento de peças de reposição.

Quanto aos procedimentos, a pesquisa pode ser classificada como um Estudo de Caso, uma vez que o foco do estudo envolve um único equipamento em uma instituição, consolidando dados reais de manutenção. Esses dados reúnem conceitos de manutenção, análise estatística de eventos erráticos independentes, com demanda baixa e irregular, associados às políticas de manutenção oriunda de algoritmos evolutivos, em específico, o algoritmo genético.

A pesquisa se dá em uma organização militar responsável pela manutenção de frota de viaturas operacionais e sua relevância evidencia-se pelo fato de que a aplicação do algoritmo genético no dimensionamento de peças de reposição pode ser replicada para outras organizações de manutenção, assim como para políticas de manutenção em outros equipamentos no âmbito de toda a Defesa Nacional.

Para viabilizar a presente pesquisa foram coletados dados de manutenção relativos ao quantitativos e custos de peças aplicadas ao longo do projeto de recuperação e manutenção corretiva de viaturas, sendo necessário uma consolidação e tratamento desses dados, distinguindo entre os insumos de manutenção preventiva, que não fazem parte do escopo deste trabalho, e análise da criticidade, possibilitando que se faça a análise comparativa para

verificação do desempenho da aplicação do modelo na política de manutenção de múltiplos objetivos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi desenvolvida em cinco capítulos, sendo o presente capítulo introdutório, apresentando os objetivos gerais e específicos, bem como a metodologia utilizada e, os demais capítulos assim divididos: base conceitual, roteiro para aplicação do modelo, estudo de caso, seguido de conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

O capítulo 2 traz, primeiramente, uma revisão da literatura referente a sobressalentes, tanto na abordagem de controle, como dimensionamento que é o principal foco da presente pesquisa. Em seguida é apresentada a base conceitual utilizada como subsídio à realização do estudo. Dentre os subtópicos que integram o capítulo, além da revisão da literatura, têm-se a manutenção e confiabilidade, com os tipos de manutenção, suas características e como cada uma se relaciona com a confiabilidade dos sistemas. Na sequência, foi abordado os diferentes tipos de gestão de estoques e como diferentes gestões podem contribuir para uma melhor eficiência no processo de manutenção. Ao final do capítulo, tratou-se dos métodos de dimensionamento de sobressalentes, dando um destaque para os algoritmos genéticos, sua vasta aplicação na área da engenharia e outros trabalhos no qual ele é utilizado para dimensionamento de estoque de peças de reposição.

O capítulo 3 apresenta um procedimento para aplicação do modelo no contexto de manutenção, seja na manutenção automotiva, como também em outros equipamentos, mas que também estejam alinhados com as características de alta variedade de componentes críticos e com múltiplos objetivos.

No capítulo 4 é detalhada a aplicação prática do modelo, o contexto de organização militar de manutenção, suas características, bem como os resultados da aplicação do algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II no dimensionamento do estoque de sobressalentes.

E, por fim, o capítulo 5 trata das conclusões referente aos resultados da aplicação do modelo, relação destes resultados com os objetivos pretendidos com sua aplicação, propostas de melhorias na aplicação do algoritmo e sugestões para futuros trabalhos em áreas similares.

2 REVISÃO DA LITERATURA E BASE CONCEITUAL

Nos próximos tópicos são apresentadas uma revisão da literatura de trabalhos recentes sobre peças sobressalentes e suas diferentes abordagens, bem como as bases teóricas que sustentam os fundamentos em torno dos conceitos de manutenção, confiabilidade, gestão de estoque de peças de reposição, sua contribuição para a disponibilidade e confiabilidade que corroboram para consistência da aplicação do modelo a esta proposta de pesquisa.

2.1 REVISÃO DA LITERATURA

Com o advento de tecnologias da indústria 4.0 é possível em alguns sistemas implementar algoritmos que forneçam uma maior precisão sobre a previsão de demanda, ao ponto de possibilitar a eliminação dos estoques (DURSUN *et al.* 2024), no entanto, para esse nível de precisão e garantia de disponibilidade, a sensibilidade dos algoritmos teria que atuar em níveis de perfeição. Os trabalhos recentes destacam a importância do equilíbrio entre a disponibilidade dos equipamentos/sistemas atrelados aos níveis de estoques de peças de reposição com os custos operacionais associados às políticas de estoques (DIAZ *et al.* 2023). Existem diversas áreas de mercado, caracterizadas por comportamentos de demanda específicos para cada um dos sistemas. Uma das grandes abordagens nos métodos de previsão de demanda, cujo objetivo é estimá-la com base em uma distribuição adequada, buscando economias nas ações de manutenção, assim como extrair dos dados relativos aos sistemas, informações adequadas para estruturação de planos de manutenção e considerar os diversos indicadores para melhor avaliação da eficiência na gestão do estoque de sobressalentes como Rippe & Kiesmüller (2023), Hekimoğlu & Karli (2023), Zhang *et al.* (2023). Outra abordagem inclui o controle e rapidez da reposição Feng *et al.* (2023), Ma *et al.* (2023), Lv & Shang (2023), este último, inclusive, propõe um modelo com aplicação de um algoritmo genético de classificação não dominada aprimorado-II com busca local.

Fazendo uma revisão na literatura, verificam-se alguns estudos na área de sobressalentes e aplicação de algoritmos no dimensionamento de estoque de peças. Zheng *et al*. (2024) faz uma investigação para otimização conjunta da manutenção e pedido de peças em sistemas multicomponentes e multifornecedores, estabelecendo um modelo por meio do processo de decisão de Markov resolvido por um algoritmo híbrido de aprendizagem por reforço profundo, obtém-se resultados com custos 3,86% menores e com grandes ganhos em tempo de resolução.

O trabalho proposto por Basu R. *et al.* (2023) contribui para a melhoria da resiliência e sustentabilidade na cadeia de fornecimento de sobressalentes, uma heurística de roteamento e programação incorpora a manutenção aditiva próxima ao cliente final. As previsões de demanda de peças sobressalentes em frotas veiculares levam em consideração alguns fatores chaves, como o número de veículos na frota, o número de falhas que demandam troca de peças, o número de manutenções periódicas, o tempo médio entre falhas e demandas anteriores (İFRAZ *et al.* 2023), uma avaliação comparativa entre os diversos métodos de previsão de demanda, que inclui regressão, métodos de regras, redes neurais artificiais, indica quais apresentam os melhores resultados, com maior precisão e menor desvio, de forma que o departamento de manutenção funcione com eficácia.

2.2 MANUTENÇÃO E CONFIABILIDADE

A função manutenção, desde sua origem no final do século XVIII, acompanhou a evolução da organização da função produção (LEMOS *et al*, 2011). Segundo Kardec e Nascif (2001) a evolução da manutenção passa de uma expectativa de conserto após a falha para uma maior disponibilidade e confiabilidade, melhor custo-benefício, produtividade e sustentabilidade ambiental. O entendimento de qualidade na manutenção, amplia o conceito de melhoria contínua e diferencial competitivo inserido também na gestão da manutenção, que possui significativa importância nos objetivos de desempenho, como função de apoio, mas que influencia diretamente os objetivos da organização (LEMOS *et al*, 2011).

Exigência de maior disponibilidade e confiabilidade, são aspectos fundamentais para um melhor planejamento das ações de manutenção, pois esta, como função estratégica, responde diretamente pela disponibilidade e confiabilidade dos ativos físicos e qualidade dos produtos, representando, portanto, importância capital nos resultados da empresa e sobre esses fatores devem ser planejadas as ações de manutenção de uma organização (COSTA, 2013). Da mesma forma, Kardec (2009) enfatiza a manutenção vista como um processo, se relacionando com outras funções chaves da organização, assim como Compras, Suprimentos, Engenharia, garantindo a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos e instalações de modo a atender à Produção/ Serviço, com segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados.

Fogliatto (2009) afirma que o objetivo principal da manutenção é “manter e melhorar a confiabilidade e regularidade de operação do sistema produtivo”.

Sobre a origem da manutenção e sua evolução, Moubray (2000) divide os sistemas de manutenção em três estágios:

a) Primeira Geração - período da segunda guerra mundial, as ações de prevenção de falhas não eram priorizadas e as ações corretivas eram executadas na medida em que as falhas ocorriam;
b) Segunda Geração - período pós segunda guerra mundial, as indústrias dependendo cada vez mais de um número diverso e complexo de máquinas e ganha destaque o tempo de inatividade das máquinas, consequentemente os conceitos de manutenção preventiva, os custos de manutenção se tornam muito mais significativos, fazendo crescer a importância do planejamento da manutenção e de sistemas de controle.
c) Terceira Geração - metade da década de 70, novas pesquisas, técnicas, geram um impulso ainda maior e aspectos de segurança, meio ambiente, do ciclo de vida e da eficácia dos custos começam a ter uma importância cada vez maior.

Com relação ao contexto de manutenção de frotas, Campos (1994) relaciona fatores ligados à qualificação da mão-de-obra, nível de informação, complexidade do processo decisório e da necessidade de monitoramento da qualidade e produtividade.

As políticas de manutenção definem como serão elaborados os planos de manutenção (KELLY & HARRIS, 1980), os quais podem ser aplicados de forma combinada ou isolada, ver Tabela 1.

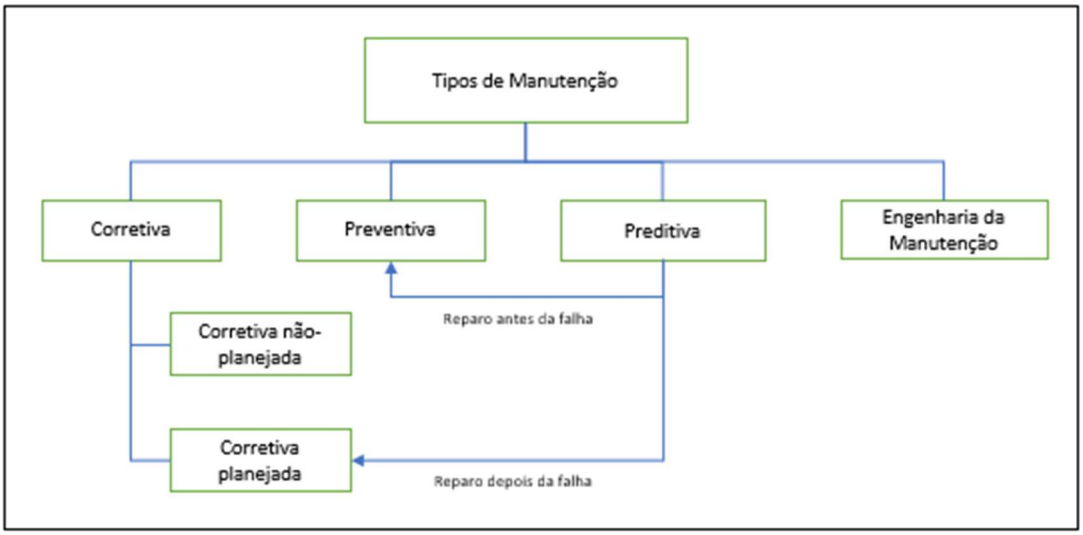
Tabela 1 – Políticas de Manutenção

Política	Manutenção	Descrição
I	Intervalo Pré-Fixado	Substituição individual ou de grupo de componentes
II	Baseada na Condição do Parâmetro	Monitoramento contínuo ou periódico
III	Corretiva	Reparo local ou por substituição de componentes
IV	Oportunidade	Usada em componentes complexos ou demandas com longo tempo
V	Modificação de Projeto	Nível mais alto de complexidade

Fonte: Kelly & Harris (1980).

Para Kardec e Nascif (2001) a manutenção caracteriza-se pela forma de intervenção nos ativos e dividem-se em corretiva, preventiva, preditiva e engenharia da manutenção, conforme Figura 3.

Figura 3 – Tipos de Manutenção



Fonte: adaptado de Lemos (2011).

A manutenção no contexto das organizações públicas e/ou militares, contribuem para o desenvolvimento nacional e mantém o adestramento dos quadros de armamento, viaturas e equipamentos (FERNANDES, 2010).

Com relação à manutenção, Verbert *et al* (2017) propõe uma estratégia para planejamento da manutenção pontual em sistemas multicomponentes, considerando cada componente de forma independente, adotando estratégias específicas, mais adequadas em cada situação e, em uma segunda etapa, otimiza o plano a nível de sistema, contabilizando a dependência estrutural e os ganhos potenciais da disseminação ou combinação de várias atividades de manutenção.

Para os veículos operacionais abordados na presente pesquisa, são realizados dois tipos de manutenção, a preventiva e a corretiva. Na manutenção preventiva existe uma relação direta entre a quilometragem ou o tempo de utilização da viatura e os itens necessários para realização da manutenção e, portanto, um acompanhamento desses parâmetros dá uma estimativa dos sobressalentes e insumos que serão necessários. Já na manutenção corretiva não existe essa relação direta, apesar de poder ser identificada algumas tendências, muitas interferências podem afetar a durabilidade ou falha de um determinado componente, forma de direção, as intervenções da manutenção preventiva, o tipo de terreno em que é utilizada, entre outros.

Para Corrêa (2022), o maior desafio da manutenção se dá pela contradição de manter a disponibilidade total ao mesmo tempo em que há uma forte pressão para a redução de custos, as decisões, portanto, se dão na relação existente entre o estoque e o nível de serviço.

Ali *et al* (2020) em sua metodologia propõe um mix entre atividades de manutenção planejada e não planejada para minimizar os investimentos em itens de manutenção, reparo e operação, os chamados MRO, ao mesmo tempo em que busca melhorar o tempo operacional da planta produtiva.

Zhu *et al.* (2020) com o objetivo de diminuir a intermitência de demanda de peças de reposição, principal problema dos problemas de controle de estoque, propõe a utilização do plano de manutenção como principal fonte de informação da distribuição da demanda de peças de reposição, criando um sistema de controle dinâmico de estoque. Yan *et al.* (2020) também apresenta uma investigação de ações conjuntas de manutenção e otimização de estoque de peças de reposição, introduzindo ações de manutenção e formulação de um modelo de custo total esperado por meio de programação dinâmica estocástica, no contexto de horizonte finito. Boer (2020) apresenta o impacto da Manufatura Aditiva (MA) na capacidade de resposta, eficiência e sustentabilidade da cadeia de fornecimento de peças de reposição das forças armadas em operações militares e missões humanitárias. Esses impactos estão relacionados à redução dos prazos de entrega, desperdício, consumo de energia e níveis de estoque, bem como aumento da disponibilidade operacional. Cardeal *et al* (2023) também na área de MA, apresenta um modelo de apoio à decisão para selecionar peças de reposição compatíveis com esse tipo de manufatura, contribuindo para a adoção de forma sustentável da manutenção aditiva em larga escala, de maneira a otimizar os níveis de estoques, através da melhoria do tempo de resposta, diminuição das cadeias de suprimento e abrindo mercados de fornecedores.

Hanbali *et al.* (2022) desenvolve um modelo de manutenção incluindo parâmetros de qualidade das peças de reposição, erros de inspeção e prazo de ressuprimento, além de outros fatores de custos, como custo de manutenção, custo de reposição e custo de falta. O modelo indica o ponto de degradação no qual uma nova peça de reposição deva ser solicitada e demonstra que uma manutenção adequada pode gerar uma economia de até 22%. Zhang *et al.* (2022) propõe um trade-off de custo, mas contrabalanceado pela manutenibilidade, considerando o tempo e as sequências de substituições e uma política de substituição por idade para sistemas em paralelo com durações de missão, seguido da análise das políticas ótimas de cada substituição.

Cardeal *et al*. (2023) propõe um modelo de quatro etapas, que aborda caracterização, pré-seleção e direcionamento estratégico, centrado na exclusão sequencial, para introdução da manutenção aditiva nas cadeias de manutenção, garantindo o fornecimento, reduzindo o tempo de inatividade e os custos. Teixeira (2022), investiga a gestão/política de estoque e

classificação dos sobressalentes com base em múltiplos critérios, técnicos e econômicos, como criticidade, prazo, preço, frequência de falha, consumo anual, procura e número de fornecedores, tendo em vista que muitos destes são negligenciados na definição das políticas de gestão adotadas. Corrêa & Santana (2022) busca uma combinação entre os métodos de classificação ABC e XYZ, caracterizados, respectivamente, do maior para o menor valor agregado e do menor para o maior nível de criticidade dos itens, proporcionando mais eficácia na classificação das categorias. Ainda segundo o autor, as características dos estoques devem ser conhecidas para que sejam usadas ferramentas adequadas e adotadas formas diferentes de tratamento.

Para Jardine (2006) um bom produto está diretamente relacionado ao nível de confiabilidade apresentado pelo mesmo, a manutenção surge como a forma de assegurar um nível adequado de confiabilidade do produto.

Ainda segundo Jardine (2006), com relação ao ciclo geral, a manutenção divide-se em três fases: Coleta de Dados, Processamento de Dados e Tomada de Decisão da Manutenção. Verifica-se que o fator resultante da manutenção é o nível de confiabilidade obtido após a ação de manutenção. A metodologia apresentada por Corso et al. (2016) trata da busca de soluções, considerando a variação de diversos fatores que correspondam a um nível de confiabilidade exigido.

Confiabilidade consolidando desempenho, período e condições de operação e parâmetro estatístico, definida conforme Kardec & Nascif (2019) como a probabilidade de um dispositivo executar de forma satisfatória uma função específica, por um período determinado e nas condições de operação definidas.

A confiabilidade e eficiência da gestão de manutenção contribuem para a sustentabilidade econômica, aumentando a qualidade e a produtividade e, consequentemente, a disponibilidade e confiabilidade dos ativos (BELTRAME, 2022).

2.3 GESTÃO DE ESTOQUES

Segundo Zhu (2022) para haver um equilíbrio entre o custo de pedidos e o atraso esperado para realização da manutenção, se faz necessário um modelo e algoritmo de otimização, no qual são considerados a relação entre tempo e custo, restringido pelas precedências das atividades de manutenção, que neste caso, não são consideradas como independentes.

Alguns autores fizeram contribuições em relação à classificação da demanda e sobre as diferentes abordagens que podem ser dadas a esses diferentes grupos de itens. Williams (1984) classifica a demanda nas categorias: “suaves”, “lentas” e “esporádicas”, considerando as diferenças entre suas variâncias. Syntetos e Boylan (2001) consideram quatro categorias: “Errático”, “Irregular”, “Intermitente” e “Regular”, combinando a variabilidade e os intervalos de ocorrência da demanda.

Com relação às distribuições de probabilidade, algumas se ajustam bem ao comportamento da demanda de peças de reposição, entre elas a Normal, Geométrica, Poisson ou Composta. O que vai balizar a aplicação de uma ou outra é a disponibilidade de informações a respeito do comportamento das ocorrências e a facilidade de operacionalização dos dados, que em relação aos modelos de inventário tendem a ser o menos complexo possível (SYNTETOS; KEYES; BABAI, 2009). Bacchetti e Saccani (2012) e Cavalieri et al. (2008). Segundo Corrêa & Santana (2022), o estoque de materiais indiretos necessários para a operação dos processos, chamados MRO (*Maintenance, Repair and Operating*), caracterizados por baixos ou baixíssimos níveis de consumo, demanda intermitente e não previsível, com altos custos e tempos de reposição e alta criticidade para a operação, em geral não seguem a distribuição normal e, portanto, a Distribuição de Poisson é mais adequada. A decisão sobre o que manter e o quanto manter não é simples e pode gerar riscos na produção, na qualidade do atendimento e, em se tratando de itens MRO essas decisões são ainda mais complexas (CORRÊA & SANTANA, 2022).

A gestão dos estoques deve ser realizada corretamente para que seja traduzida em resultados positivos, sendo eficaz na resolução dos problemas, nas decisões sobre o estoque e no conhecimento sobre os tipos e quantitativos do estoque (CORRÊA & SANTANA, 2022).

Diante do desafio de estabelecer uma política equilibrada, considerando a intermitência de demanda, grande variabilidade de componentes e os diferentes níveis de criticidade em que estão associados os sobressalentes, Hu *et al* (2018) aplicou uma estruturação de Pesquisa Operacional para que não haja falta e nem excesso de estoque.

Basten (2014) pesquisa modelos para controle de estoque de peças de reposição sob restrições de serviço orientadas ao sistema, como organizações militares e fabricantes de equipamentos originais, descrevendo modelos de local único e vários itens, bem como modelos de dois níveis, os quais consistem em vários armazéns locais e um depósito central e, por fim, as variações desses modelos, incorporando embarques laterais, remessas emergenciais e reparo da peça defeituosa.

As ações de manutenção, quando não realizadas no momento correto, podem acarretar grandes tempos de inatividade, gerando desperdícios significativos de produção Zhang *et al*. (2019), para minimizar esses tempos improdutivos, foi proposto uma estratégia de manutenção oportunista, cujo modelo fora baseado em séries de cadeia de Markov, considerando o tempo limite de espera de manutenção e o gerenciamento de estoque de peças de reposição, dentro dos limites de confiabilidade do sistema, buscando reduzir o número de intervenções diante da oportunidade de atuar no conjunto de componentes.

Duran & Afonso (2020) apresentaram um modelo de decisão baseado no custeio do ciclo de vida do produto ou sistema, calculando todos os custos incorridos ao longo de sua vida útil, inclusive os custos operacionais logísticos e de peças de reposição, para analisar os impactos das decisões, políticas de estoques e seus parâmetros em cenários hipotéticos no longo prazo, permitindo operar esse sistema com baixo custo e alta eficiência.

O controle e gerenciamento de estoque são trade-off entre investimento, cujo objetivo é manter menos estoque e, maior nível de serviço, reunindo o conjunto de técnicas, ferramentas e estratégias para manter os itens certos, na hora certa, no lugar certo, ao custo certo e na quantidade adequada.

Yu *et al.* (2022) também em abordagem conjunta de gestão de estoques de peças de reposição e manutenção planejada, propõem uma Programação Não-Linear Inteira Mista para encontrar parâmetros de inventário, equilibrando os custos de estoque e a disponibilidade de sobressalentes. Para lidar com a não-linearidade, as combinações de diferentes portfólios de itens e as características estocásticas do problema e as instâncias de grande escala, foi proposto também um Algoritmo Genético de dois estágios, que foi analisado após um estudo computacional.

Cevallos-Torres *et al*. (2022) aplicou um Modelo Metaheurístico Genético para minimizar os custos de vendas de um distribuidor, com base na simulação de Monte Carlo, para estabelecer a composição de estoque ao final de cada período mensal.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES

O planejamento e controle da manutenção é responsável pelo controle dos parâmetros de custos, estado de conservação, índice de disponibilidade e confiabilidade dos ativos, assim como pelo tempo médio entre falhas e tempo médio de reparo (BELTRAME, 2022).

A definição de quais peças e das respectivas quantidades que devem ser adquiridas e mantidas em estoque retrata os principais questionamentos que motivaram esta pesquisa.

Segundo Ferreira (2015), uma boa gestão do estoque de peças de reposição certamente influencia positivamente na gestão da manutenção, pois leva a uma maior confiabilidade e maior disponibilidade dos equipamentos e, portanto, impacta diretamente na rentabilidade do negócio.

Muniz (2020) traz uma revisão da literatura com modelos conjugados de previsão de demanda, combinando métodos qualitativos e quantitativos para a tomada de decisão.

Dentro da cadeia de suprimentos e sua gestão, as peças de reposição e a estreita relação com os recursos produtivos assumem um papel de extrema importância, exigindo uma programação colaborativa entre os recursos e estoque de peças (ZHANG *et al*, 2022).

As peças de reposição são mantidas para reduzir os impactos gerados pelo tempo de indisponibilidade dos equipamentos (HU *et al*, 2018). A indisponibilidade das peças sobressalentes, na especificação, quantidade e no momento exato de execução dos reparos, podem gerar grandes perdas financeiras. O que justifica a existência das peças de reposição é que tais perdas, decorrentes de uma possível indisponibilidade do equipamento são maiores que os custos de manutenção em estoque dessas peças.

Busca-se, portanto, uma maior acurácia no estabelecimento dos níveis de estoques dos componentes críticos, ou seja, ter a quantidade certa de determinada peça, no momento em que seja demandada, buscando um balanço ideal entre o nível de serviço prestado e consequentemente o quantitativo de estoque de sobressalentes, bem como os respectivos custos de armazenagem, oportunidade e controle, para que seja traduzido em maiores índices de disponibilidade das peças críticas, compatível com a limitação orçamentária.

Bachetti (2012) investigou a lacuna entre a pesquisa e a prática no gerenciamento de peças de reposição e após uma revisão da literatura sobre classificação e previsão de demanda de peças de reposição, apontou quatro direções de pesquisa, dentre as quais: classificação de peças de reposição, gerenciamento e previsão de demanda, modelos de gerenciamento de estoque e medição de desempenho, considerando as diretrizes gerenciais baseadas em contingência, relacionando fatores contextuais e práticas de gerenciamento.

Para Constantino *et al* (2018) em sistemas de baixa demanda, cujos padrões são irregulares e geralmente caracterizados por zeros frequentes, mas que exigem alta disponibilidade e alto custo, os chamados *HA-HCLDS* (*High Availability, High Cost* e *Low Demand Systems*) existem duas abordagens distintas, a abordagem por item, na qual busca-se definir de forma equilibrada, em termos de custos de manutenção, da logística de pedido e de falta (indisponibilidade), o nível ideal de estoque de cada item, sem considerar as interações entre eles e, a abordagem sistêmica, na qual visa definir uma função custo-disponibilidade

para o sistema em termos do nível de serviço e as restrições associadas. Constantino *et al.* (2018) propõe um modelo onde são definidos, com base em múltiplos critérios e conforme preferências e limitações do decisor, níveis mínimos de estoque que satisfaçam as restrições de disponibilidade do sistema, o mesmo adota a distribuição de Poisson para descrever o padrão de demanda dos itens.

Dombi *et al.* (2018) examina os ciclos de vida de compras de peças de reposição no setor eletrônico, introduz uma função de modelo de demanda flexível e propõe uma abordagem de aplicação combinada de técnicas analíticas e computacionais suaves, indicando tendências e pontos de virada de curva do ciclo de vida de compra.

Em virtude das características da demanda de peças de reposição, em geral lenta, irregular e errática, Turrini & Meissner (2019) consideram que o desempenho do sistema está associado à escolha da distribuição de demanda, portanto, distribuições inadequadas podem gerar altas perdas que poderiam ser evitadas e com uso do teste de ajuste de Kolmogorov Smirnov (K–S) confirma que as distribuições de demanda por período em geral se ajustam à distribuição de Poisson compostas.

Kian *et al*. (2019) por sua vez aborda o monitoramento de operação das peças críticas de um equipamento, por meio do acompanhamento em tempo real de parâmetros de componentes do motor e aplicação de programação matemática para determinar o caminho logístico mais eficiente para ressuprimento, dada a iminência de falha, se tratando de um equipamento não estacionário. Essa perspectiva deve ser considerada nos casos em que as peças de reposição têm custos extremamente altos ou há restrições que inviabilizam a aquisição antecipada.

Considerando a variedade considerável de peças sobressalentes, pequenos incrementos na precisão da previsão de demanda, podem gerar ganhos significativos em termos de custos (Lee & Kim, 2018), na busca de maiores desempenhos de previsibilidades de demanda, aplicam-se técnicas de mineração de dados. Na mesma linha, Faker (2022) em sistemas no qual o nível de degradação é perceptível, visa uma abordagem de mineração de dados e aprendizado de máquina para problemas integrados de manutenção e gerenciamento de peças de reposição, nesses casos a degradação é comparada com o modo real de funcionamento.

Com relação à previsão de demanda das peças de reposição, Duran (2020) apresenta um modelo de decisão voltado para o custeio com base em atividades que consideram o ciclo de vida dos ativos físicos com representação da taxa de falhas baseada em uma distribuição Weibull, onde é possível estabelecer diferentes políticas de estoque de longo prazo. Babai (2020) faz uma comparação de métodos de Redes Neurais (RN) com os métodos paramétricos

(suavização exponencial simples, Croston e aproximação de Syntetos–Boylan) e não-paramétricos existentes (Willemain e método de Zhou e Viswanathan) permitindo novos *insights* sobre seus desempenhos. Mehdizadeh (2020) considera como um dos principais fatores para a previsão de demanda de demanda de sobressalentes, o número de carros vendidos e as quilometragens associadas, fazendo uma análise ABC para novos critérios e com a teoria aproximada dos conjuntos, busca induzir regras e padrões para prever demandas no futuro. Babai (2021) propõe um novo método Bayesiano de distribuições compostas de Poisson e faz comparações ao método Bayesiano baseado em Poisson com distribuição Gamma a priori, bem como a um método frequentista paramétrico e não paramétrico.

Bounou (2020) em sua pesquisa apresenta indicadores de desempenho para gestão conjunta da manutenção e de peças de reposição, baseado em modelagem estocástico-determinística que permite visualizar o impacto dos parâmetros, como taxa de demanda, taxa de atraso, taxa de reparo, taxa de intervenção preventiva e corretiva, taxas de falha e taxas de sucesso de teste, nesses indicadores de desempenho.

Liu (2021) faz uma abordagem de degradação não-linear de três estágios em estruturas de aeronaves, setor de destaque na gestão da manutenção e de sobressalentes, propondo um planejamento de quatro níveis, com variações de intervalo de inspeção até a ação corretiva, buscando maximizar o tempo de operação e minimizar os custos de manutenção.

Ekstrom (2021) constrói um modelo de portfólio de compras com base nos requisitos e capacidades operacionais e de prazo do mercado, considerando um trade-off entre rigor teórico e relevância prática para aplicação.

Mouschoutzi (2022) faz uma revisão da literatura sobre a gestão de peças de reposição da indústria marítima, desde a aquisição e armazenamento em um depósito central, passando pelos vários modais logísticos envolvidos na entrega, até a sua aplicação a bordo nas atividades de manutenção, além da logística reversa de itens reparáveis, que são desembarcados, manutenidos e novamente entregues para reaplicação.

Faker *et al.* (2022), buscando otimizar o custo total, faz uma abordagem de mineração de dados e aprendizado de máquina na integração entre manutenção, produção e gerenciamento de peças de reposição em componentes cujo nível de degradação é perceptível.

Para Mouschoutzi (2022) as operações da cadeia de suprimentos e logística de peças de reposição são altamente complexas, incertas e de custo elevado. Isso se torna ainda mais desafiador, quando se trata de itens cujas especificações e diretrizes técnicas regulatórias restringem a quantidade de fornecedores.

2.5 ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO

Antes de uma abordagem direta sobre os algoritmos genéticos, alguns conceitos importantes sobre Fronteira de Pareto esclarecem um dos principais alvos de busca dos problemas de otimização multiobjetivo. A fronteira de Pareto é o conjunto que comporta todas as soluções não-dominadas de um problema multiobjetivo, entende-se por solução não-dominada a solução a qual um dos objetivos não pode ser melhorado sem piorar ao menos um dos outros objetivos (NETO, 2023).

Segundo a definição de otimalidade de Pareto (1896, *apud* ARROYO, 2002, p. 10) diz-se que $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}^*$ é uma solução eficiente ou ótima de Pareto se não existir qualquer outra solução $\mathbf{x} \in \mathbf{X}^*$ tal que **x** domine $\mathbf{x}^*$. $\mathbf{z}^* = \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$ é, portanto, um ponto eficiente ou um ponto ótimo de Pareto. O conjunto de todas as soluções eficientes é chamada de conjunto eficiente e a imagem em $\mathbf{Z}^*$ do conjunto ótimo de Pareto é a Fronteira de Pareto (ARROYO, 2002).

Nesses problemas com múltiplos objetivos, em geral conflitantes, não existe uma única solução que otimize todos os objetivos, mas sim um conjunto de soluções não-dominadas (XU *et al.* 2023). No entanto, em decorrência das limitações tecnológicas, em problemas reais talvez seja difícil obter um grande percentual dos pontos que compõem a Fronteira de Pareto, dessa maneira é tão importante quanto obter pontos aproximados e distribuídos por toda a fronteira (ARROYO, 2002).

A característica mais importante de um Algoritmo Genético é a capacidade de encontrar soluções ótimas em problemas complexos, principalmente em problemas multiobjetivos. Schaffer (1985) implementou um algoritmo genético de vetor evolutivo que avaliava de forma individual cada um dos objetivos almejados, mas que não permitia uma diversidade adequada nas soluções.

Deb (2001) dividiu os algoritmos evolutivos genéticos em dois tipos, os Não-Elitistas e os Elitistas, os quais se diferenciavam pela inclusão ou não de algum tipo de elitismo em alguma etapa de suas iterações. Alguns exemplos de algoritmos elitistas são o *Strenght Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA) de Zitzler & Thiele (1998) e *Pareto Envelope-Base Selection Algorithm* (PESA) de Corne et al. (2000) que mantém uma população externa de soluções não-dominadas encontradas até então. Outro exemplo é o modelo de Deb (2001) *Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II), que se diferencia pelo fato de combinar as populações atual e anterior para preservar as melhores soluções de ambas. Na Tabela 2 são citados os diferentes modelos de Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos, distinguindo-os quanto às características de elitismo.

Tabela 2 – Diferentes Modelos de MOEA

Diferentes Modelos de MOEA			
Sigla	**Nome do Modelo**	**Referência**	**Elitista**
VEJA	(*Vector Evaluated Genetic Algorithm*)	(Schaffer, 1985)	Não
WBGA	(*Weight Based Genetic Algorithm*)	(Hajela e Lin, 1992)	Não
MOGA	(*Multiple Objective Genetic Algorithm*)	(Fonseca e Fleming, 1993)	Não
NSGA	(*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*)	(Srinivas e Deb, 1994)	Não
NPGA	(*Niched-Pareto Genetic Algorithm*)	(Horn et al., 1994)	Não
PPES	(*Predator-Prey Evolutionary Strategy*)	(Laumanns et al.,1998)	Não
REMOEA	(*Rudolph's Elitist Multi-Objective Evolutionary Algorithm*)	(Rudolph, 2001)	Sim
NSGA-II	*(Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm)*	(Deb et al., 2000; Deb e Sundar, 2006)	Sim
SPEA, SPEA2	*(Strenght Pareto Evolutionary Algorithm) 1 e 2*	(Zitzler et al., 2001; Zitzler e Thiele, 1998)	Sim
TGA	(*Thermodynamical Genetic Algorithm*)	(Kita et al., 1996)	Sim
PAES	(*Pareto-Archived Evolutionary Strategy*)	(Knowles e Corne, 1999)	Sim
MOMGA1 e	(*Multi-Objective Messy Genetic Algorithm*) I e II	(Veldhuizen, 1999)	Sim
Micro-GA	(*Multi-Objective Micro-Genetic Algorithm*)	(Coello, 2001)	Sim
PESA-1 e PESA-2	(*Pareto Envelope-Base Selection Algorithm*) I e II	(Corne et al., 2001, 2000)	Sim
ε -MOEA	(*ε-dominance Multi-Objective Evolutionary Algorithm*)	(Deb et al., 2003)	Sim

Fonte: Adaptado de Ticona & Delbém (2008).

Os algoritmos evolutivos genéticos são estudados por pesquisadores de diversas áreas, que se concentram principalmente na etapa de seleção, devido à necessidade de integrar medidas vetoriais de desempenho com a forma inerentemente escalar onde eles compensam o desempenho individual (FONSECA & FLEMING, 1993).

Na área de química, depara-se com situações em que precisam ser definidas uma série de fatores que influenciam, positiva ou negativamente, na realização dos processos. Definir adequadamente o quanto e quais esses fatores, requer uma otimização dos parâmetros que na

maioria das vezes, não são possíveis de serem obtidos por métodos lineares ou diretos. Costa Filho (1999) cita como exemplo, a métrica de desempenho de uma síntese que está relacionada com a temperatura, pH e quantitativo de catalisador utilizado na reação.

O *Niched-Pareto Genetic Algorithm* (NPGA) utiliza um torneio binário com base em dominância de Pareto no processo de seleção, onde os indivíduos escolhidos aleatoriamente e comparados com um subconjunto dos indivíduos da população (HORN et al., 1994).

Knowles e Corne (1999) traz a *Pareto-Archived Evolutionary Strategy* (PAES) que representa um algoritmo não trivial mais simples possível, capaz de gerar diversas soluções no conjunto ótimo de Pareto na estratégia de evolução (1+1) que usa busca local a partir de uma população, fazendo comparação de um pai e sua prole, que assume o lugar do primeiro dependendo da dominância.

Uma outra abordagem evolucionária de otimização multiobjetivo que busca várias soluções em uma única execução é o Algoritmo Evolutivo de Força de Pareto (SPEA) proposto por Zitzler (1999), combina vários recortes de maneira única, armazenando soluções não-dominadas em uma segunda população, com avaliações individuais de aptidão, buscando preservar a diversidade da população usando a relação de dominância de Pareto, além de incorporar um procedimento de agrupamento para reduzir o conjunto não-dominado ao mesmo tempo em que mantém suas características.

Com relação ao tipo de abordagem adotada, os algoritmos evolutivos podem ser classificados, segundo Li (2015, *apud* JUNQUEIRA, 2021, p.34), em quatro categorias: baseados em dominância de Pareto, baseados em indicadores, baseados em preferências e os baseados em métodos de agregação. Essa classificação pode ser exemplificada conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos Algoritmos Evolutivos conforme abordagem adotada

Sigla	Algoritmo	Referência	Abordagem
SPEA2	*Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2*	Zitzler et al., 2001	Dominância de Pareto
NSGA-II	*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*	Deb et al., 2002	Dominância de Pareto
SMS-EMOA	*S-metric Selection Evolutionary Multiobjective Algorithm*	Emmerich et al., 2005	Indicadores
HypE	*Hypervolume-Based Many-Objective Optimization*	Bader & Zitzler, 2011	Indicadores
PBEA	*Preference-based Evolutionary Algorithm*	Thiele et al., 2009	Preferências
PICEA-w	*Preference-Inspired co-evolutionary algorithm using Weight Vectors*	Wang et al., 2015	Preferências
MOGLS	*Multiobjective Genetic Local Search*	Ishibuchi & Murata, 1998	Agregação

MOEA/D	*Multiobjective Evolutionary Algorithm based on Decomposition*	Zhang & Li, 2007	Agregação
C-MOGA	*Cellular Multiobjective Genetic Algorithm*	Alba et al. 2007	Agregação
RVEA	*Reference Vector guided Evolutionary Algorithm*	Cheng et al. 2016	Agregação

Fonte: Adaptado de Junqueira (2021).

Ainda com relação a classificação exemplificada na Tabela 3, há os algoritmos que apresentam junções de mais de uma abordagem das que foram elencadas, como por exemplo o MOEA/DD - *Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Dominance and Decomposition* (Li *et al*., 2015) e MEANDS – *Multiobjective Evolutionary Algorithm based on Non-dominated Decomposed Sets* (LAFETÁ et al., 2018) que abordam em conjunto frentes de dominância e agregação. Além dos modelos que são adaptados de algoritmos anteriores, como o ADEA – *Adaptative Decomposition-Based Evolutionary* (HAN *et al*., 2019).

O Algoritmo Genético Elitista de Ordenação Não-Dominada (NSGA-II) apresentado por Deb (2002) implementa um modelo que não exige uma alta complexidade computacional, considera o fator do elitismo, fazendo com que boas soluções não sejam perdidas ao longo das gerações e garante uma diversidade das soluções, sendo esses os principais motivos para adoção deste algoritmo em relação aos outros. Além disso, a simplicidade de aplicação e a rapidez no tempo de obtenção dos resultados também influenciaram na escolha do algoritmo.

Inspirados na biologia evolutiva, os algoritmos genéticos são técnicas de busca computacional que têm por objetivo encontrar soluções, mesmo que aproximadas, em problemas de otimização (KUMAR *et al*, 2010). Esses algoritmos podem ser utilizados na resolução de problemas de otimização ou em sistemas de modelagem que consideram aleatoriedade de eventos. São uma classe especial de Algoritmo Evolutivo e seus principais operadores são a seleção, o cruzamento e a mutação (MIRJALILI, 2019). Após sua inicialização, seguida dessas operações básicas, o algoritmo precisa de uma lógica para terminar sua operação, que pode obedecer a um dos critérios de parada ou combinações desses, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Metodologia do Algoritmo Genético

I	ETAPA	POSSIBILIDADES
1	**Inicialização**	Soluções geradas aleatoriamente
		Partindo de uma solução inicial
2	**Seleção**	Nível de aptidão
		Seleção de soluções mais adequadas

		Classificação amostral aleatória
		Seleção de pequena proporção de soluções menos adequadas
3	**Reprodução**	Cruzamento
		Mutação
4	**Terminação**	Critérios mínimos
		Fixação do número de gerações
		Limite de Orçamento
		Convergência

Fonte: Adaptado de Kumar (2010).

As soluções iniciais podem ser obtidas por geração aleatória ou partindo de uma solução inicial definida pela característica do problema, que pode ser oriunda de dados conhecidos, bem como de uma solução não ideal obtida por outra metodologia.

Os critérios de seleção, que também são adaptados às condições do problema, podem ser relativos ao nível de aptidão, ou seja, o quão essa solução se aproxima das condições ideais, avaliação quantitativa individual das soluções e consequente ordenação, crescente ou decrescente ou, por questões de custos, tempo disponível, seleção aleatória de soluções da população inicial, desconsiderando para as gerações seguintes a necessidade de elencar apenas as melhores soluções. Além disso, para manter a diversidade da população, muitos algoritmos selecionam uma pequena proporção de soluções menos adequadas.

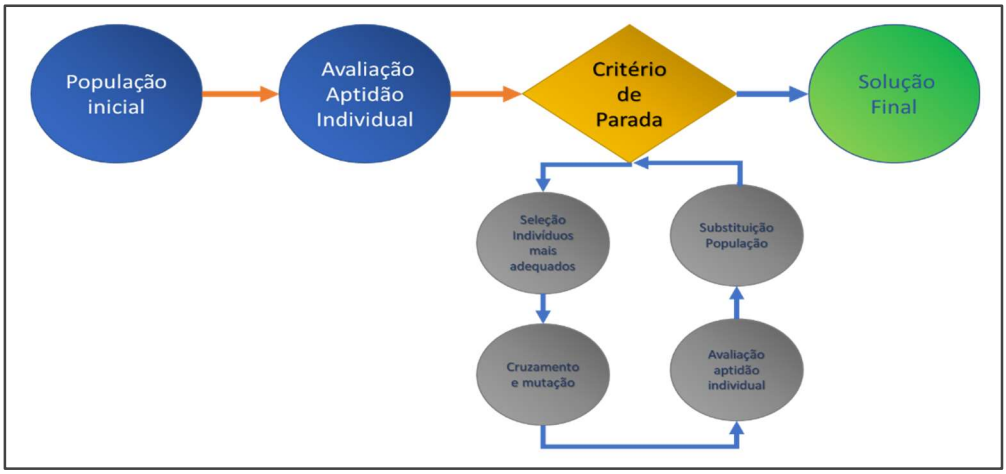
Por sua vez, a reprodução considera dois formatos para gerar as soluções descendentes, o cruzamento e a mutação. No cruzamento ocorre a seleção, de acordo com a metodologia do algoritmo, que estabelece quais indivíduos serão selecionados, assim como a quantidade e posição das rupturas de trechos das soluções pais e as replica nas soluções filhos. O cruzamento é responsável pela convergência para a situação desejada (COSTA FILHO, 1999). Na mutação há a modificação de algum gene ou característica de alguma solução, o que mantém uma variedade da população, uma vez que essas alterações gerem indivíduos mais adaptados, tais características serão transmitidas aos demais membros, contribuindo para que não haja uma convergência prematura para um ótimo local (COSTA FILHO, 1999).

Em políticas de suprimentos, o processo de mutação e crossover de cromossomos constituem forças aleatórias da demanda ou de comportamento de mercado (MOORI *et al*, 2010). Em geral, não se consegue incorporar todas as complexidades inerentes a problemas reais, mas é possível simular determinadas situações e se antecipar à ocorrência de tais problemas.

Na etapa de Terminação, são implementadas as regras de parada do algoritmo. Tais regras podem ser de critérios mínimos, número de gerações, limite de orçamento ou convergência. A regra de critério mínimo interrompe o ciclo quando são atingidos os níveis de parâmetros desejados, como por exemplo: nível de eficiência, probabilidade de sucesso, custo entre outros. A regra do número de gerações é bem simples e interrompe o algoritmo quando é atingido o número de gerações estabelecido previamente. Limite orçamentário considera o tempo ou limite de custo para finalizar o ciclo de geração de soluções. A regra de convergência limita a geração de soluções ao momento em que não há mais ganhos perceptíveis entre uma geração e outra.

O ciclo do algoritmo genético pode ser analisado genericamente conforme Figura 4.

Figura 4 – Ciclo Algoritmo Genético



Fonte: Adaptado de Kumar et al (2010).

De forma resumida, o algoritmo cumpre 4 etapas, sendo a primeira a geração da população inicial, seguida da avaliação de aptidão dessa população, com estabelecimento do critério de parada, o qual está inserido um ciclo que seleciona os indivíduos mais adequados para fazer o cruzamento e mutação, reavaliando individualmente a população gerada e substituindo as soluções menos ajustadas, até cumprir os critérios de parada e gerar a solução final.

3 METODOLOGIA PROPOSTA DE MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES BASEADO NO NSGA-II APLICADO NA MANUTENÇÃO DE VEÍCULOS EM OPERAÇÕES MILITARES

De uma forma geral os algoritmos evolutivos genéticos funcionam com a geração de uma população inicial, que pode ser aleatória ou partindo de alguma lógica direcionada, e sucessivas combinações na qual a geração seguinte elenca as soluções com maior aptidão em relação à função objetivo.

Este capítulo tem como objetivo apresentar as etapas do modelo desenvolvido nesta pesquisa, o qual consiste na aplicação do algoritmo NSGA-II no dimensionamento de peças sobressalentes destinadas à manutenção corretiva, cujas demandas são erráticas. As características de aplicação do algoritmo nesse tipo de problema é a capacidade combinatória dele na busca de soluções, de forma simples e rápida, ao mesmo tempo em que atendam aos critérios definidos na função objetivo. Os critérios a serem considerados, variam de acordo com as características individuais de cada problema, mas em geral, alguns exemplos são: custos de aquisição, custos (penalidades) decorrentes de falta de determinado componente, nível de disponibilidade do sistema, custo de espera para chegada de sobressalente e tempo de conclusão da manutenção.

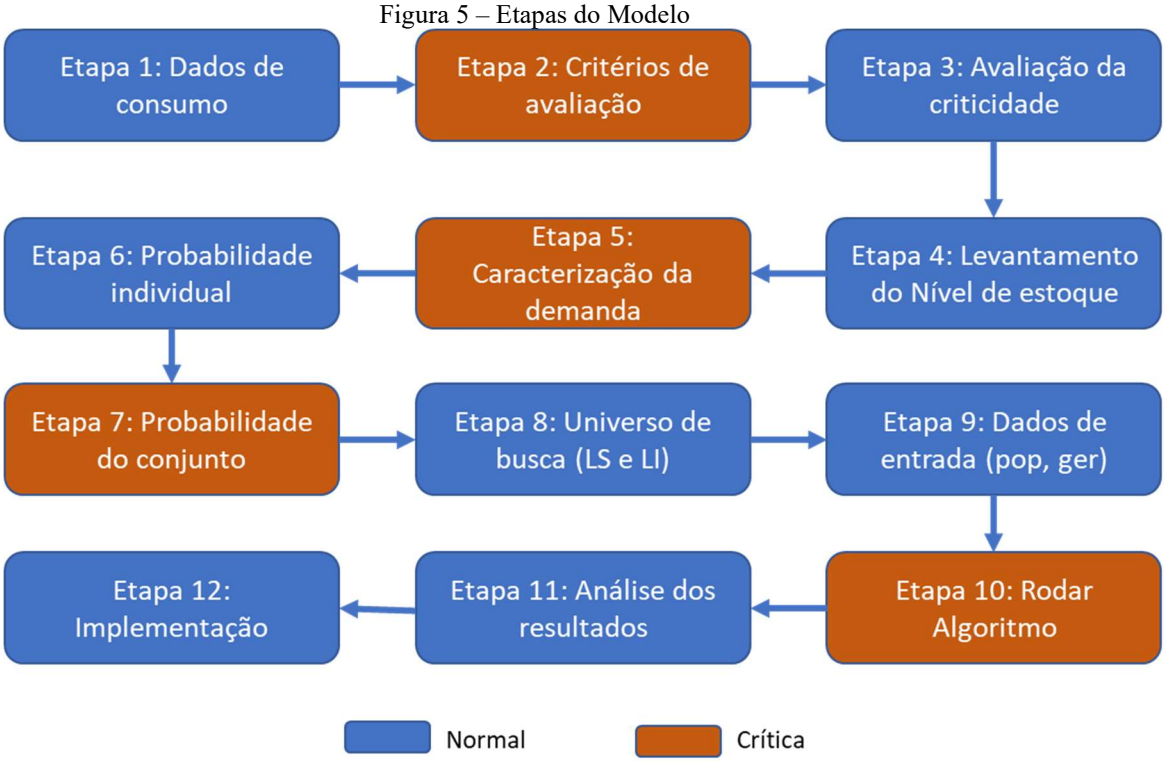
Um dos pressupostos considerados na validação para aplicação do modelo é de que a organização deve ter dados de consumo dos componentes ou, ao menos, ser capaz de elicitar essas taxas de consumo de forma a permitir o cálculo das probabilidades de ruptura do estoque, ou seja, a probabilidade de ocorrer uma demanda maior do que o nível de estoque disponível do item, em determinado período. Conforme identificado ao longo da pesquisa, a principal dificuldade foi estimar o modo de falha de cada componente, em virtude da grande quantidade e variabilidade funcional dos mesmos, portanto, uma aproximação com base na Distribuição de Poisson foi utilizada com o objetivo de determinada um nível de estoque que não seja superado por uma demanda futura (SILVA NETO & FERREIRA, 2022a) (SILVA NETO & FERREIRA, 2022b).

O modelo pode ser aplicado em organizações de manutenção em qualquer área de atuação, mas que possuam equipamentos formados por diversos componentes e que tais componentes sejam passíveis de substituição. Pode ser aplicado tanto em organizações públicas ou privadas, mas que o tipo de serviço prestado priorize a rapidez no atendimento do cliente. Suas principais contribuições são de gerar um conjunto de portifólio de itens passíveis de aquisição, atendendo à limitação de recurso disponível, ao mesmo tempo em que

proporciona o maior nível de serviço possível, correspondente à probabilidade média de que o estoque de sobressalentes não seja superado por uma demanda futura de falhas, além de melhorar o giro de peças armazenadas, decorrente de aquisições mais assertivas, reduzindo o nível médio de peças em estoque e capital parado.

O Fluxograma geral das etapas do modelo são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Etapas do Modelo



Fonte: O Autor (2023).

A seguir são detalhadas cada uma das etapas do fluxograma do modelo e os respectivos esclarecimentos a respeito da criticidade e importância que são atribuídas a elas:

Etapa 1 - Dados de consumo

Nesta primeira etapa são levantados e consolidados os dados históricos de demanda dos componentes, por se tratar de um modelo aplicado à manutenção corretiva, são desconsiderados os componentes de aplicação periódica conforme tempo de vida ou histórico de uso. Deve-se estabelecer a janela histórica de análise dos dados e o período em que os dados serão atualizados. A taxa de consumo considera a quantidade demandada de determinado componente no período analisado.

Etapa 2 - Critérios de avaliação

Na segunda etapa, considerada como uma etapa crítica do fluxo, tendo em vista que é o momento em que se define a forma de como serão elencados os itens, dentre toda a

variedade de componentes que fazem parte do veículo ou equipamento gerido, para definição de quais peças serão incluídas na política. A definição dos critérios de avaliação da criticidade dos componentes é importante para estratificar os itens que serão contemplados no modelo, adotando medidas diferentes para cada escala de criticidade atribuída. Alguns fatores que contribuem para que um item seja considerado como crítico seria: a taxa de demanda, o custo de aquisição, a disponibilidade no mercado, o tempo de ressuprimento, a importância do item no sistema no qual será aplicado, nível de variabilidade da demanda e outros.

Etapa 3 - Avaliação da criticidade

Após a definição dos fatores que serão considerados para definir se um item será ou não considerado como crítico, deve-se proceder com a avaliação dos itens conforme esses critérios preestabelecidos. De maneira que se tenha de forma ordenada os itens que serão considerados na tratativa do modelo. Essa ordenação auxilia o gestor na definição de quais itens serão contemplados na política de manutenção, uma vez que políticas estratificadas para uma quantidade grande de itens pode não trazer uma efetividade adequada, além da possibilidade de não haver recursos disponíveis, tanto financeiros quanto tecnológicos, para incluir todos os componentes no primeiro momento. Com relação ao critério de custos, podem ser considerados os custos de aquisição, transporte e armazenamento e, quanto mais atualizado os valores, mais adequado será para que o modelo retrate a realidade do problema em questão.

Etapa 4 - Levantamento do nível de estoque

Definido o conjunto de itens críticos a serem contemplados no modelo, deve-se fazer um extrato da atual situação do nível de estoque desses componentes, levantando os níveis atuais, estoque de segurança, assim como definindo se esses fatores serão considerados na implementação do modelo.

Etapa 5 - Caracterização da demanda

Uma outra etapa crítica do fluxo é a caracterização da demanda, que trataria da curva estatística que mais consegue explicar o comportamento da demanda dos componentes. A importância dessa etapa se dá pelo fato de que uma atribuição de distribuição de probabilidade não compatível com o comportamento da demanda de falhas pode resultar negativamente na eficácia da aplicação do modelo. Cada componente pode seguir um tipo de comportamento estatístico diferente, no entanto, quanto mais variações houver, mais difícil será gerir esses dados. Em geral, para demandas erráticas e irregulares de eventos aleatórios de falhas de componentes, a Poisson consegue representar de forma bastante satisfatória a ocorrência desses eventos, o que não impede que outras distribuições possam ser utilizadas.

Etapa 6 - Cálculo da probabilidade individual

O cálculo das probabilidades de falta de um determinado item, considera a taxa de consumo histórica, o nível atual de estoque e a distribuição de probabilidade adotada na etapa 5. O cálculo é feito de forma individual, considerando independência de ocorrência de falhas de um componente em relação a outro.

Etapa 7 - Probabilidade do conjunto

Nessa etapa leva-se em consideração a configuração dos componentes no sistema, para definição de como as probabilidades de ruptura individuais contribuirão para a probabilidade de falha ou nível de serviço do sistema. Trata-se também de uma etapa crítica, pois está associada ao arranjo como os componentes críticos estão configurados no veículo ou equipamento, o que é característico de cada sistema, cabendo ao analista definir como serão convertidas as probabilidades de ruptura individuais para o nível de serviço do conjunto considerando o vetor quantitativo de sobressalentes.

Etapa 8 - Universo de busca (Limite Superior e Limite Inferior)

Para viabilizar a operação do algoritmo se faz necessário que seja definido o universo de busca das soluções, estabelecendo limites nos quais irão variar os genes dos cromossomos para encontrar as eventuais soluções, conforme direcionamento da função objetivo e suas multivariáveis.

Etapa 9 - Definição dos dados de entrada

Para inicializar o algoritmo, deve ser definido os dados de entrada para iniciar o processo de busca das soluções, que consiste na definição do tamanho da população e quantidade de gerações até a finalização. Para correta operação do algoritmo e tempo de convergência, define-se quantidades mínimas para a população e número de gerações necessárias. Outro dado importante, que pode ser colocado tanto como um dado de entrada, como inserido dentro do próprio código é o percentual de crossover e mutação.

Etapa 10 - Rodar algoritmo

Após a definição dos dados de entrada, o algoritmo faz todo o processo de busca de soluções de geração em geração, elegendo as melhores soluções de acordo com a função objetivo, quanto maior a qualidade do algoritmo, mais rápido será o tempo de finalização e seu poder de convergência. Essa é uma etapa crítica pois é o resultado bruto da aplicação do modelo, onde são extraídos os vetores indicativos de aquisição a serem analisados pelo decisor.

As operações do Algoritmo Genético de Ordenação Não-Dominada NSGA-II estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Etapas do NSGA-II

Id	Etapa	Detalhamento
A	Algoritmo Genético	Função baseada no algoritmo evolutivo para encontrar a melhor solução para múltiplos objetivos, utilizando os dados de entrada (tamanho da população e critério de parada)
B	Inicialização de Variáveis	Inicia os cromossomos conforme tamanho da população, podendo ser direcionado (estimativa inicial) ou de forma aleatória.
C	Avaliador do Objetivo	Avalia a função objetivo definida pelo usuário (sempre minimização), conforme número de funções e variáveis de decisão, que considera a classificação ou frente na qual as soluções residam e a distância de aglomeração.
D	Módulo de Inicialização Não-Dominada	Classifica a população atual com base na dominação
E	Processo de Seleção	Processo de seleção de n indivíduos aleatórios
F	Operador Genético	Produção de descendentes de cromossomos pais, por meio de operadores genéticos de cruzamento e mutação
G	Substituição de Cromossomos	Substitui cromossomos com base na classificação e distância de aglomeração até que o tamanho da população seja atingido
H	Fronteira de Pareto	Encontra as fronteiras de Pareto com base nas relações de dominância
I	Função Objetivo	Descreve a função objetivo, o intervalo de espaço para a variável de decisão, intervalo máximo e mínimo de cada variável

Fonte: O Autor (2023).

O fluxo dessas etapas pode ser ilustrado conforme Figura 6, este fluxo será realizado de forma cíclica até que seja atingido o critério de parada estabelecido.

O NSGA-II foi o algoritmo utilizado para a geração da política de estoques a ser adotada e inicia com os dados de entrada referente ao tamanho da população, critério de parada que pode ser o número de gerações, número de funções objetivo, número de variáveis consideradas no problema, bem como intervalo das variáveis de decisão.

Etapa 11 - Análise das soluções

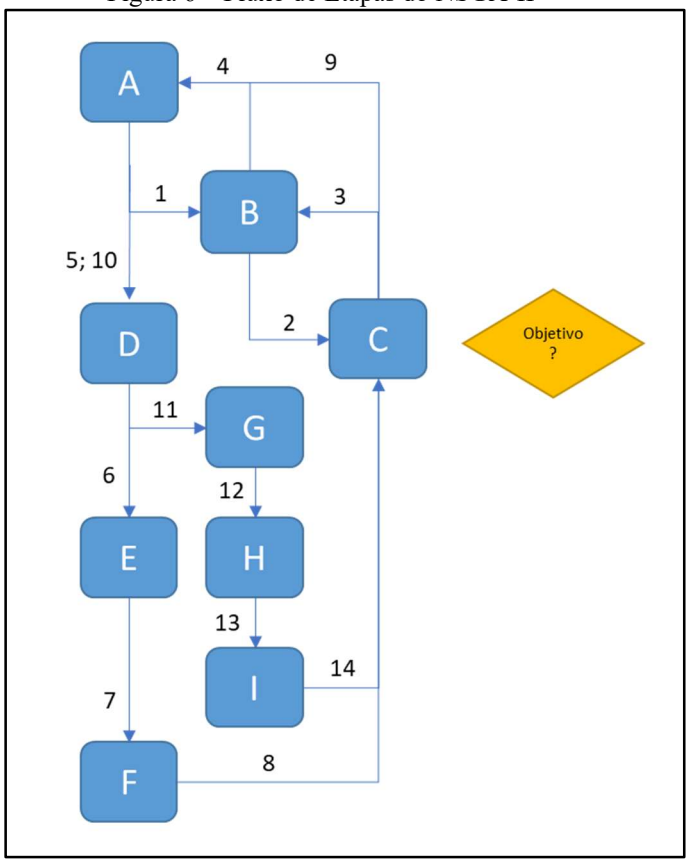
Diante do conjunto de soluções geradas ao final da operação do Algoritmo, deve ser analisada qual a que melhor se adequa às necessidades do decisor em termos dos multiobjetivos considerados, deve ser feita uma análise de orçamento disponível, nível de serviço necessário, entre outros fatores considerados na aquisição e armazenamento.

Etapa 12 – Implementação

Por fim, a solução é implementada, com inicialização do processo de aquisição, considerando os níveis de estoque disponíveis, para configurar o conjunto de sobressalentes críticos de acordo com as quantidades estabelecidas na solução.

Portanto, o algoritmo NSGA II é composto pelas nove etapas detalhadas na Tabela 5 e essas etapas seguem uma sequência ilustrada no fluxo de etapas da figura 6, o qual se repete até que seja atingido algum dos critérios de parada.

Figura 6 – Fluxo de Etapas do NSGA-II



Fonte: O Autor (2023).

Verifica-se uma sequência com ciclos internos ao longo das etapas do algoritmo, verificando a convergência em direção à função objetivo, garantindo soluções não-dominadas e mantendo uma diversidade nos indivíduos que compõe a fronteira eficiente.

4 ESTUDO DE CASO

Diante da necessidade de modernização da força terrestre e amparado pela Lei de Fomento à Base Industrial de Defesa, conforme descrito na introdução da presente pesquisa, a empresa AGL S/A (nome fictício) apresentou-se como interessada na parceria de desenvolvimento do Projeto de renovação da frota de viaturas operacionais, que culminou com a licitação centralizada e posterior aquisição de 2.500 (duas mil e quinhentas) viaturas distribuídas em Organizações Militares (OM) de todo o território nacional, sendo a 7ª Região Militar contemplada com a parcela de 273 (duzentas e setenta e três) viaturas, entre 3/4 e 1/2 Ton, as quais compõem o universo de estudo do presente trabalho. A apropriação dessa nova frota, após passado o período de garantia contemplado em contrato, logo exigiria um esforço no intuito de coordenar ações de planejamento da manutenção desses veículos, o que inclui conhecimento a respeito de sua operação, necessidade de capacitação, aquisição de equipamentos e ferramentas e provimento de peças de reposição para manter a sua disponibilidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO

4.1.1 Exército Brasileiro

O Exército Brasileiro constitui uma das três forças que compõem as Forças Armadas e possui as funções de garantir a segurança do país, defender a sua soberania, assegurar o respeito às leis, preservar a ordem e limites estabelecidos na constituição.

Com um efetivo aproximado de 360 mil militares, a Força Terrestre é integrada por diferentes áreas de especialização, abrangendo campos diversos de atividades. Essa especialidade é definida pela Arma, Quadro ou Serviço (Exército Brasileiro, 2023).

As Armas dividem-se em dois grupos: Armas-Base (Infantaria e Cavalaria) e Armas de Apoio ao Combate (Artilharia, Engenharia e Comunicações). A Infantaria define o combatente a pé que se desloca em qualquer tipo de região, para a conquista, ocupação e manutenção do terreno, em ações defensivas e ofensivas. Já a Cavalaria proporciona segurança às demais formações em combate, com meios próprios, seja blindado ou mecanizado. As Armas de Apoio complementam a missão das Armas-Base, seja pelo apoio de fogo das Artilharias de Campanha e Antiaérea, seja pela mobilidade e contra mobilidade da

Engenharia ou, pela instalação e manutenção de Sistemas de C2 (Comando e Controle) e Guerra Eletrônica das Comunicações.

Os quadros principais são: Quadros de Engenheiros Militares (trabalho técnico de engenharia não-combatente como ciência/tecnologia e produção do material bélico), Quadro de Material Bélico (atividades gerais de manutenção dos equipamentos bélicos da força, incluindo suas viaturas) e o Quadro Complementar (Administração, Direito, Informática, Letras, Comunicação Social, dentre outras).

Por fim, os Serviços de Intendência (Suprimento e Finanças) e Saúde (Médicos, Dentistas e Farmacêuticos) trabalham na paz e na guerra para a manutenção do homem, pelo atendimento às suas necessidades de sustento e sanitárias.

O Quadro de Material Bélico realiza o apoio logístico voltado para a manutenção do material, dentre os quais destacam-se os armamentos, as viaturas e as aeronaves, incluindo suprimento de peças e conjuntos de reparação destinados a esses materiais, além de suprimento de combustíveis, óleos, graxas e lubrificantes para motores e máquinas (Exército Brasileiro, 2023). Uma maior eficácia operacional da função logística possibilita um estado operacional permanente de disponibilidade e uma infraestrutura logística eficiente e rápida está diretamente relacionada ao pronto emprego das atividades de manutenção, transporte e suprimento de material bélico.

4.1.2 Parque Regional de Manutenção

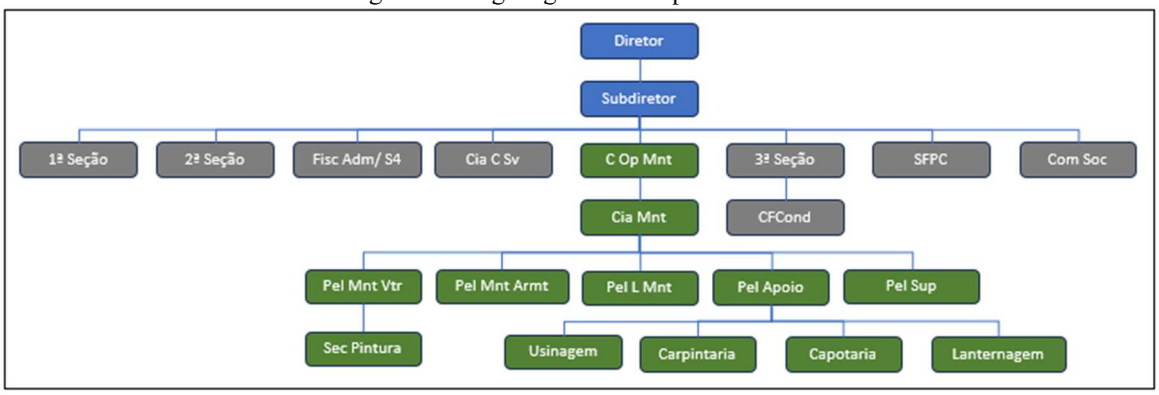
O Pq R Mnt/7 está localizado na Av. 17 de Agosto - n° 784, no bairro de Casa Forte na cidade de Recife/PE, conforme Figura 7.

Figura 7 – Localização do Parque Regional de Manutenção/7

Fonte: Pq R Mnt/7 (2023)

A organização é composta por 343 pessoas entre militares e civis e seu organograma é demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Organograma do Pq R Mnt/7

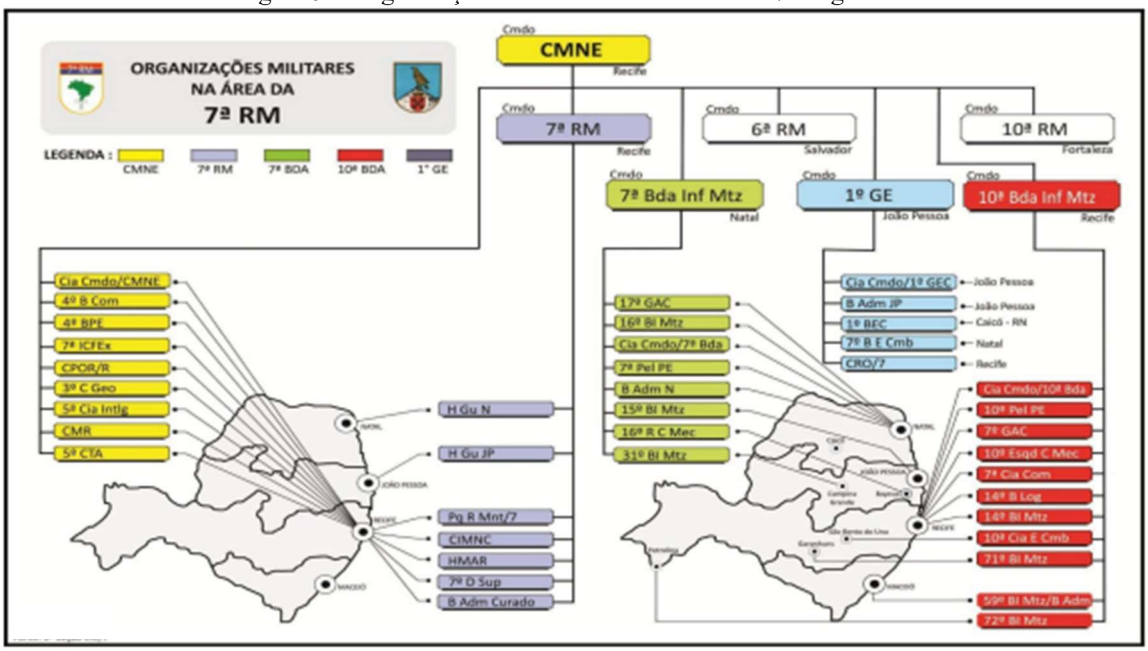


Fonte: Adaptado de C Op Mnt do Pq R Mnt/7 (2023).

A Missão do Pq R Mnt/7 é realizar apoio de manutenção de 3º Escalão, na forma de Apoio ao Conjunto, nas OM jurisdicionadas à 7ª RM, e o de 2º Escalão, na forma de Apoio Direto, às OM não apoiadas pelo 14º Batalhão Logístico, bem como, apoiar por Área as OM em trânsito nos estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio-Grande-do-Norte, contribuindo para a operacionalidade do Comando Militar do Nordeste (Missão, Parque Regional de Manutenção/7, 2023; Disponível em: <pqrmnt7.eb.mil.br>; Acesso em: 19 abr 2023).

Ao todo, o Parque Regional de Manutenção da 7ª Região Militar presta apoio a 43 Organizações Militares, distribuídas de acordo com a Figura 9.

Figura 9 – Organizações Militares subordinadas à 7ª Região Militar



Fonte: Adaptada da 3ª Seção do EM/ 7ª RM (2023).

Principais atividades desenvolvidas pelo Parque/7 são: manutenção de viaturas, manutenção de armamentos, realização do curso de formação de condutores, fiscalização de produtos controlados e blindagem veicular/arquitetônica, operações de transporte, instrução individual básica, apoio direto e desfazimento (Leilão).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

O Exército Brasileiro adota em sua doutrina, instruções e normas, um sistema de catalogação que consiste em uma codificação padronizada dos materiais, contemplando códigos, nomenclaturas, descrições, modificações, componentes intercambiáveis, fabricantes, de forma a estabelecer uma linguagem única entre os atores envolvidos. Por meio de adesão ao sistema de catalogação da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), os suprimentos são divididos em dez classes, de acordo com sua finalidade de emprego, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Classes de Suprimento

CLASSE	DESCRIÇÃO
I	Subsistência, incluindo ração animal e água
II	Material de intendência, englobando fardamento, equipamento, móveis, utensílios, material de acampamento, material de expediente, material de escritório e publicações. Inclui vestuário específico para Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (DQBRN)

II	Combustíveis, óleos e lubrificantes (sólidos e a granel)
IV	Construção, incluindo equipamentos e materiais de fortificação
V	Armamento e munição (inclusive DQBRN), incluindo foguetes, mísseis, explosivos, artifícios pirotécnicos e outros produtos relacionados
VI	Material de engenharia e cartografia
VII	Tecnologia da informação, comunicação, eletrônica e informática. Inclui equipamentos de imageamento e de transmissão de dados e voz
VIII	Saúde (humana e veterinária), inclusive sangue
IX	Motomecanização, aviação e naval. Inclui viaturas para DQBRN
X	Materiais não incluídos nas demais classes, itens para o bem-estar do pessoal, artigos reembolsáveis e equipamentos (detecção e descontaminação) DQBRN

Fonte: EB70-MC-10.238 (2018)

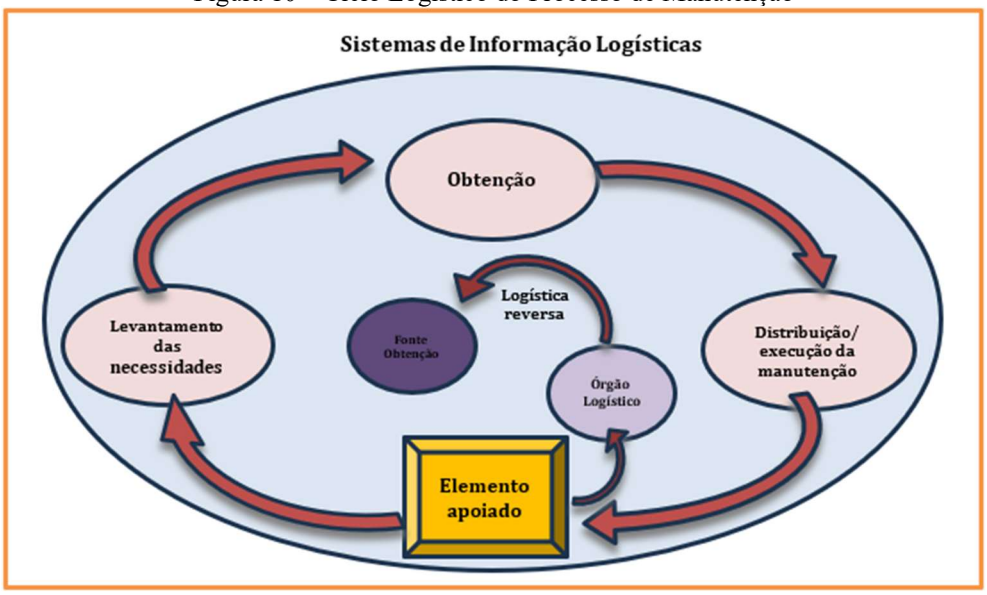
4.2.1 Logística e Manutenção

De acordo com o Manual de Campanha da Logística Militar Terrestre (EB70-MC-10.238) aprovado por meio da Portaria Nº 131-COTER, de 8 de Novembro de 2018 e publicado no Boletim do Exército nº 50, de 14 de dezembro de 2018, a Logística consiste no conjunto de atividades relativas à previsão e à provisão de meios necessários ao funcionamento organizacional do Exército e às operações da Força Terrestre e suas premissas são: a gestão das informações, distribuição, precisão e presteza do ciclo logístico e a capacitação continuada dos recursos humanos. Portanto, as atividades no âmbito da Força Terrestre estão divididas em sete funções: suprimento, manutenção, transporte, engenharia, recursos humanos, saúde e salvamento. A Função Logística de Manutenção refere-se ao conjunto de atividades que visam manter o material em condição de utilização durante todo o seu ciclo de vida, restabelecendo essa condição quando houver avarias (EB70-MC-10.238, 2018).

No que diz respeito ao ciclo de manutenção, de acordo com a Norma Administrativa Relativa aos Materiais de Gestão da Diretoria de Material - NARMAT (EB40-N-20.001) publicada por meio da Portaria Nº 105-COLOG, de 2 de dezembro de 2016, o processo de manutenção se desenvolve conforme o ciclo logístico, ou seja, na determinação de necessidades de manutenção, na obtenção de manutenção, execução de manutenção e logística reversa de manutenção. A Figura 10 mostra que esse ciclo é um processo contínuo e

suas fases são inter-relacionadas, de maneira que em determinadas situações a obtenção para um determinado escalão constitui a distribuição para o escalão superior.

Figura 10 – Ciclo Logístico do Processo de Manutenção



Fonte: Adaptado de EB70-MC-10.238 Manual de Campanha da Logística Militar Terrestre (2018).

Ainda de acordo com a NARMAT, os escalões da cadeia de manutenção, na ordem decrescente do nível de complexidade, são definidos conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Escalões de Manutenção

4º Escalão (4º Esc)	3º Escalão (3º Esc)	2º Escalão (2º Esc)	1º Escalão (1º Esc)
OM Mnt centrais: Batalhões de Manutenção (B Mnt), integrantes da Ba Ap Log Ex, e os Arsenais do Sistema de Ciência e Tecnologia	OM Mnt regionais: B Mnt e Pq R Mnt integrantes ou não dos Gpt Log	OM Log GU: B Log	OM detentoras.

Fonte: Adaptado da NARMAT (2016).

Dependendo da classe de suprimento, das capacidades de recebimento, armazenamento e entrega, bem como da identificação das fontes de obtenção, as funções de OM Mnt central e regional poderão ser atribuídas a qualquer OM da cadeia logística.

Os tipos de manutenção estabelecidas na cadeia logística são:

a) Manutenção Preventiva - procedimentos de baixa complexidade técnica, mas que por outro lado exige um alto nível de planejamento, que engloba inspeções, testes, ajustes, substituições, para evitar queda de desempenho e falha dos materiais.

b) Manutenção Corretiva - reparação e recuperação para repor a condição de uso de determinado material.
c) Manutenção Preditiva - conjunto de controles diagnósticos baseados em parâmetros técnicos e estatísticos de confiabilidade.
d) Manutenção Modificadora - atua na melhoria de aspectos que afetam positivamente na mantenabilidade, testabilidade, capacidade, disponibilidade e confiabilidade.

4.2.2 Viatura Operacional

Conforme as Normas Administrativas Relativas ao Suprimento (NARSUP), publicada na Separata n° 1 ao BE 27/02 em 5 de julho de 2002, as Viaturas Operacionais – dividem-se nas categorias abaixo descritas:

a) Viatura Operacional Categoria "1" (VOP 1) – Viaturas operacionais desenvolvidas no país ou no exterior, especialmente para emprego militar, atendendo aos Requisitos Operacionais Básicos (ROB) específicos, conforme o nível de exigência imposto pela natureza da missão;
b) Viatura Operacional Categoria "2" (VOP 2) – Viaturas operacionais com origem em viaturas produzidas em linhas de montagem civis, militarizadas conforme Portaria do Estado Maior do Exército (EME), adequadas para atuar em rodovias das classes especiais I, II, III e IV ou quaisquer terrenos com pisos similares, aproveitando-se ao máximo suas características originais, em atendimento aos ROB específicos impostos pela natureza da missão; e
c) Viatura Operacional Categoria "3" (VOP 3) – Viaturas operacionais com origem em viaturas produzidas em linhas de montagem civis, militarizadas conforme Portaria do EME, adequadas para atuar em rodovias das classes especiais I, II e III ou terrenos com pisos similares, aproveitando-se ao máximo suas características originais, em atendimento aos ROB específicos impostos pela natureza da missão.

A viatura AGL Marruá, modelo AM21, que pode ser empregada em diversas condições de operação tanto no transporte de pessoal como em operações convencionais, faz parte do projeto de renovação da frota terrestre e representa quase 11% do total de veículos da 7ª Região Militar, que possui 2.095 viaturas. Adquiridas por meio de processo licitatório centralizado pelo Centro de Obtenções do Exército, vinculado à Diretoria de Material, as

viaturas operacionais AGL Marruá foram descritas detalhadamente segundo as seguintes características:

- Viatura Operacional de Transporte Não Especializado VOP 1. Capacidade de carga: 3/4t em qualquer terreno, de uso privativo do Exército Brasileiro, empregado em atividades de rotina, exercícios de instrução e em operações militares. Adaptado com uma chave comutadora tipo Nato, que comanda um circuito elétrico acionado para deslocamentos noturnos, proporcionando uma percepção visual mínima quando em funcionamento. Motor de potência 140 CV e torque de 360 Nm, capaz de utilizar qualquer tipo de diesel, câmbio de 5 velocidades. Sistema de tomada de energia (24 volts) permitindo a instalação de rádio comunicador em sua carroceria, conectado diretamente nas baterias e, sistema elétrico de 12 V, direção hidráulica, tanque de combustível com capacidade para 100 L, pintura camuflada nas cores verde floresta fosco e vermelho terra, painel de instrumentos equipados com indicador de pressão de óleo, indicador da temperatura do motor, indicador do nível do combustível, sinalizador de luzes (alta e seta de direção), sistema de iluminação militar (luz do freio, lanternas de posição, farol de aproximação, luz de mapa, com circuitos independentes, funcionamento através da lógica de relés. Cintos de segurança para os ocupantes da cabine e da caçamba, gancho para reboque traseiro tipo engate “G”, fixado na parte central traseira do chassi. Suporte lateral com uma pá e um machado, quebra-mato dianteiro com tela de proteção para faróis, radiador e lanternas, para-brisa rebatível. Com prazo de garantia técnica de 2 anos ou 50000 Km (o que ocorrer primeiro), prazo a ser contado da data da emissão do Termo de Recebimento Definitivo (TRD), garantida manutenção gratuita dos itens constantes do manual de garantia para manutenções preventivas durante o prazo de até 20.000 km, em conformidade de especificações técnicas e acessórios do lote-piloto avaliado, aprovado e homologada pelo Departamento de Ciência e Tecnologia e adotada pelo Estado-Maior para o Exército Brasileiro (Ver descrição detalhada no ANEXO A).

4.3 ESTIMATIVA INICIAL DAS PEÇAS SOBRESSALENTES

Na execução da manutenção de uma frota veicular, a organização deve planejar a política de manutenção que será adotada, as formas de aquisição dos insumos e peças sobressalentes para que no momento em que seja necessário realizar alguma manutenção

preventiva ou quando ocorra falha de algum componente que resulte em mal funcionamento ou, em caso extremo, uma parada por pane, os itens em estoque sejam capazes de suprir as necessidades demandadas e que a viatura tenha condições de retornar ao estado pleno de funcionamento, sem a necessidade de aquisições emergenciais ou permanecendo indisponível por longos períodos aguardando a chegada dos suprimentos de manutenção.

Portanto, o grande problema está em estabelecer uma quantidade e variedade de peças de reposição que esteja adequada às estratégias, metas ou restrições orçamentárias, mas que também garantam um nível mínimo de serviço, que corresponda às probabilidades de atendimento das demandas por peças.

Uma das dificuldades é alinhar a grande variedade de componentes, em uma viatura operacional, foi levantada um quantitativo de 2.270 componentes, alguns desses com alto valor agregado, às necessidades de reposição. As funções de desgaste dos componentes podem sofrer variações devido à frequência de operação da viatura, que podem ser utilizadas em regime constante ou intercalando longos períodos sem utilização, no caso de modo operacional intermitente, assim como podem sofrer interferência da forma de utilização, a qual está associada a fatores de calibragem correta dos pneus, utilização adequada do sistema de tração, bem como da correta utilização do sistema de freios. Além disso, existe o fator do desgaste natural dos componentes, os quais não provém de uma relação de causa e efeito, portanto, no contexto de manutenção corretiva, as demandas ocorrem devido a fatores que estão alheios às ações do gestor.

Para iniciar o projeto de recuperação das viaturas foi necessário fazer uma estimativa para aquisição prévia das peças que viriam a ser utilizadas antes do recolhimento do primeiro lote de veículos para manutenção corretiva. Como não havia registro de dados estruturados referente ao histórico de demanda de peças, foi necessário elencar subsistemas os quais o projeto iria atuar e com base na opinião de especialistas da área técnica, entre equipe de planejamento, suprimentos, supervisores e mecânicos, priorizar a aquisição de peças de alta mortalidade. Os subsistemas escolhidos por meio da análise subjetivam e amostral dos históricos e registros de manutenção foram: direção, suspensão e freio. Dentre esses sistemas foram listados inicialmente 37 componentes de 4 sistemas (filtros, direção, suspensão e freio) e, multiplicado cada componente pelo total de viaturas que se pretendia atender, que no caso foi de quarenta, obteve-se a lista piloto para suprir um lote de 40 viaturas operacionais do modelo em estudo (AM21).

No período de um ano, a cada lote de 4 viaturas, foram registrados os dados de demanda de peças, inclusive das demandas reprimidas, ou seja, das peças que eram

demandadas, mas que não compunham a lista piloto. Cada veículo manutenido, acompanhava uma lista com a vista explodida dos sistemas para que fosse registrada a peça defeituosa que necessitasse de troca. A cada conjunto de quatro viaturas, a lista de peças de reposição era realimentada para compor os ajustes decorrentes do histórico de consumo de peças que passava a ser consolidado.

Portanto, observa-se que a lista de peças piloto foi importante para iniciar o projeto, mas que só a partir do registro de consumo e de demanda não atendida é que possibilitou uma aquisição mais direcionada, aplicando a ideia de percentual de consumo e mortalidade das peças.

4.4 MODELOS DE POLÍTICAS DE ESTOQUE

Ao longo deste estudo, as políticas de estoque e aquisição de peças de reposição permearam algumas possibilidades, primeiramente a política chamada de Horizonte de lote fixo, aplicada no Projeto Marruá do Pq R Mnt/7, posteriormente, com base no trabalho de Fernandes (2010) a política do Custo/Benefício e, por fim, o algoritmo NSGA II que necessitaria da utilização método exaustivo para avaliar sua eficiência na capacidade de gerar o melhor nível de estoque possível de cada componente, de maneira a proporcionar o menor custo e o melhor nível de serviço médio considerado. Essa avaliação consiste em comparar qualitativamente (por observação) a curva da fronteira eficiente obtida pelo método exaustivo com a curva gerada pelos pontos obtidos com a aplicação do algoritmo, como também comparar quantitativamente (por distância média e quantidade de pontos encontrados) nas mesmas curvas.

4.4.1 Horizonte Temporal

A política de horizonte temporal é uma política bem disseminada nas organizações militares e consiste em replicar a média de consumo histórico das peças de alta mortalidade para um período futuro fixo, geralmente um ou dois semestre, multiplicando as médias pelo horizonte de tempo que se deseja suprir, por exemplo, um item com média de consumo de 10 unidades mensais, caso fosse necessário abastecer o estoque para um semestre, dever-se-iam ser adquiridos na quantidade de 60 unidades, considerando uma taxa de consumo fixa. Essa metodologia é de simples aplicação, porém demanda altos níveis de estoque, bem como, não

retorna de forma clara a probabilidade de ruptura (de haver uma demanda maior que o nível de estoque disponível) ou nível de serviço.

A partir dos registros e históricos de manutenção foram listados 267 componentes e um valor correspondente de R$630.556,08 para manutenção corretiva de 84 (oitenta e quatro) viaturas no período de 3 anos, entre 2019 e 2021. O valor total de capital armazenado no estoque referente aos componentes empregados nessa manutenção foi contabilizado conforme inventário realizado no ano de 2022 e, correspondia a R$ 539.086,30, desse total, apenas R$147.485,78 (27,36%) correspondem a itens com histórico de consumo, ou seja, percebeu-se que grande parte das peças sobressalentes disponíveis no estoque, referem-se a itens que não foram utilizados na manutenção corretiva da frota, durante o período de análise. Isso dá indícios de que as aquisições não foram bem direcionadas para a real necessidade da demanda de sobressalentes que os veículos apresentavam.

Diante dessa grande variabilidade de peças de reposição e da necessidade de encontrar uma metodologia que convertesse as aquisições futuras de peças em uma elevação do nível de serviço para a manutenção corretiva do universo de viaturas do modelo AM21 em estudo, foi estabelecido um conjunto menor de 25 (vinte e cinco) itens críticos, os quais correspondem ao conjunto com maior valor agregado e maiores médias históricas de consumo, portanto, as peças que mais impactam no custo da manutenção corretiva. Esse conjunto de itens sobressalentes compõem o conjunto básico que será tratado neste estudo de caso e do qual serão desdobradas as ações decorrentes dos resultados que venham a ser obtidos.

4.4.2 Custo-benefício

A primeira metodologia aplicada baseada na relação de custo-benefício, conforme Fernandes (2010) o qual traz um resultado mais direto sobre o portfólio de itens que concorrem pela mesma fonte de recursos, o objetivo é obter em cada incremento, o maior benefício, ou seja, o maior nível de serviço, a um mínimo de custo, portanto, a cada inclusão unitária de um determinado item, busca-se minimizar a razão do custo de aquisição pelo aumento do nível de serviço obtido por esse incremento. No custo-benefício, cada iteração busca responder, diante da disponibilidade de recursos, qual dos itens a serem adicionados, ou seja, qual item receberá uma unidade adicional na lista de aquisições ou no estoque de peças, proporcionando o maior acréscimo no nível de serviço e ao mesmo tempo com o menor comprometimento de saldo de recurso remanescente.

Portanto, o problema consiste em obter o maior nível de serviço, com um mínimo custo total, conforme as equações (1) e (2):

$$Max \sum_{i=1}^{n} LSi \quad (1)$$

$$Min \sum_{i=1}^{n} Ci \quad (2)$$

Onde o custo C refere-se ao custo de aquisição dos itens.

Aplicando essa metodologia, por meio de planilha eletrônica com aplicações em Visual Basic nos dados do problema, com os 25 itens críticos previamente elencados, com orçamento limitado arbitrariamente em R$70.000,00, foi obtido o vetor de compra mostrado na Tabela 8. Lembrando que os itens críticos tiveram como critérios os valores unitários e médias históricas de consumo, mas em outras aplicações outros critérios podem ser considerados.

Tabela 8 – Vetor do Custo-Benefício

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Qnt	1	0	8	5	3	6	0	0	3	0	0	1	0	9	0	10	9	4	9	9	7	3	3	2	0

Fonte: O Autor (2023).

Esse vetor gera um nível de serviço médio de 64,27% a um custo de R$69.929,45. De toda forma, não se tem parâmetros suficientes para avaliar o resultado obtido pelo método do custo-benefício, dado que ele representa apenas um ponto dentro da diversidade de combinações possíveis de serem obtidas com os 25 itens críticos, o que impossibilita saber se o resultado é o mais eficiente ao custo disponível ou se o ponto encontrado por meio do vetor obtido está na fronteira de eficiente (Fronteira de Pareto) ou ao menos próximo dessa fronteira. Dessa forma, para que se tenha uma melhor referência comparativa das políticas levantadas, considerando variações dentro dos limites de combinações, adota-se o método exaustivo para gerar o espaço amostral de combinações dos 25 itens críticos, que será abordado no tópico seguinte.

4.4.3 Método Exaustivo

O método exaustivo ou método exato, conhecido na área computacional como método da força bruta, é amplamente abordado na heurística de resolução de problemas do caixeiro viajante (Pestes, 2006) e consiste em testar todas as possibilidades de combinação em busca da solução ótima. Entretanto, uma vez que o espaço de busca aumenta, a capacidade de recursos computacionais é extremamente exigida, havendo assim uma limitação quanto a sua aplicação (Gargari & Sahraeian, 2023). Portanto, para contornar tal limitação, foi estabelecido

os limites de variação das quantidades de cada item. O limite inferior, para efeitos do presente estudo, foi considerado a quantidade zero, portanto, sem estoque de segurança, o que pode variar de acordo com a especificidade de cada situação. Como limite superior foi utilizada, por meio de planilha eletrônica, a função inversa da Poisson para estabelecer a quantidade de cada item que proporcionasse o Nível de Serviço mínimo de 99%. Logo, os limites inferior e superior, resultaram nos dados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Limites Inferior e Superior

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
LI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LS	2	3	3	3	2	3	5	7	4	4	1	1	5	3	6	4	3	2	3	3	3	1	1	1	4

Fonte: O Autor (2023).

Diante dos valores obtidos na Tabela 9, é possível extrair 2,8538 x 10^{14} combinações de vetores de aquisição, que correspondem ao universo obtido pelo método exaustivo. Essa vasta quantidade, ainda assim, impôs um limite tecnológico, o que impossibilitou a geração do espaço total de combinações.

Uma alternativa foi dividir o vetor de componentes críticos em dois blocos, ordenando de forma decrescente o conjunto de acordo com as médias de consumo histórico, das maiores médias de consumo para as menores. Itens com média λ maiores que 0,8 foram agrupados no Bloco 1, enquanto os itens com média λ menores que 0,8 foram agrupados no Bloco 2. Após essa divisão, o Bloco 1 ficou constituído em 9 (nove) itens, enquanto o Bloco 2 em 16 (dezesseis) itens, possibilitando 5,04x10^6 e 5,66x10^7 combinações, respectivamente.

Nas Tabelas 10 e Tabela 11 temos a ordenação dos itens dos blocos 1 e 2, onde constam os custos de aquisição, as médias de consumo λ, bem como os limites inferior e limite superior, respectivamente:

Tabela 10 – Dados do Bloco 1

preço	149,93	118,49	149,93	281,95	283,90	283,90	323,71	278,70	1187,42
lambda	2,47619	2,04762	1,76190	1,61905	1,09524	1,09524	1,04762	0,85714	0,80952
LI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LS	7	6	5	5	4	4	4	4	3

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 10 mostra que neste momento não foi considerado o estoque inicial, portanto, todos os valores referentes ao estoque inicial estão lançados como zero. Os limites superiores, referem-se à quantidade que obtida pela inversa da Distribuição de Probabilidade

de Poisson, cujo valor corresponde a 99%. Tal valor poderá ser alterado, conforme nível de disponibilidade que se pretenda.

Tabela 11 – Dados do Bloco 2

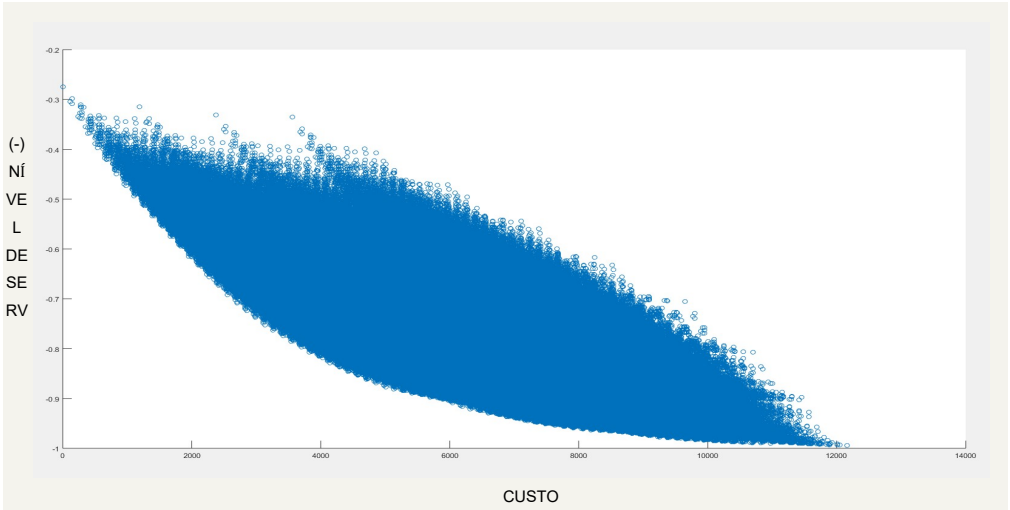
Parte 1 do Bloco 2								
preço	1.091,63	361,04	320,07	298,96	294,04	909,58	307,09	1.559,00
lambda	0,76190	0,71429	0,66667	0,66667	0,66667	0,52381	0,52381	0,47619
LI	0	0	0	0	0	0	0	0
LS	3	3	3	3	3	3	3	3
Parte 2 do Bloco 2								
preço	2.319,95	707,32	9.840,82	1.036,23	1.031,65	2.898,05	918,74	6.270,12
lambda	0,28571	0,28571	0,19048	0,14286	0,14286	0,09524	0,09524	0,04762
LI	0	0	0	0	0	0	0	0
LS	2	2	2	1	1	1	1	1

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 11 que também não considera o estoque inicial no problema apresenta as duas partes do segundo bloco e ambos, totalizam em torno de 56 milhões de combinações.

Tratando cada bloco de forma separada foi possível gerar todas as combinações e a partir desses conjuntos, possibilitando o comparativo dos vetores de sugestão de compras a serem gerados pelo algoritmo genético, tanto por meio de critérios qualitativo (observação da proximidade das curvas) e quantitativo (distância média e quantidade de pontos encontrados).

Figura 11 – Combinações Bloco 1 (Nível de Serviços x Custo)



Fonte: O Autor (2022).

O objetivo da metodologia aplicada neste estudo é encontrar soluções que se aproximem da fronteira eficiente, localizada no limite inferior esquerdo do gráfico, ver Figura 11. O formato do gráfico da Figura 11 e, consequentemente, a posição da fronteira eficiente se dá pelo fato de que o algoritmo do NSGA-II opera com função de minimização, portanto, para maximizar o nível de serviço, utilizou-se do sinal negativo na função objetivo, no entanto, nas próximas figuras, esse artifício será desfeito e a curvas das fronteiras extraídas serão apresentadas na posição correta, sem o sinal de inversão. Ao longo da fronteira é possível obter os melhores resultados em termos do custo total de aquisição e o nível de serviço proporcionado.

Diante dos dois universos de busca de cada bloco, obtidos por meio do método exaustivo, foram extraídas as duas Fronteiras de Pareto de cada bloco. A Figura 12 apresenta a fronteira de Pareto referente ao Bloco 1.

Figura 12 – Verdadeira Fronteira de Pareto do Bloco 1

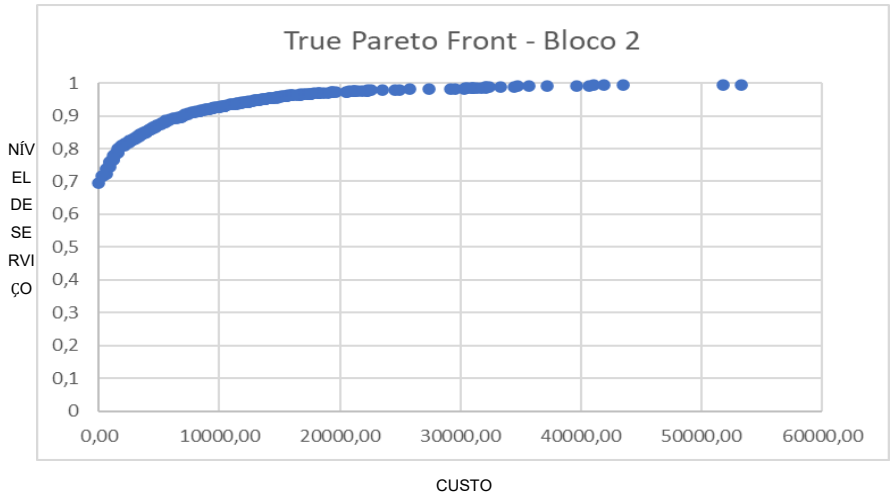
Fonte: O Autor (2022).

A Figura 12 apresenta a curva da verdadeira fronteira de Pareto referente ao bloco 1 obtida pelo cruzamento de dados do nível de serviço e custos de aquisição das soluções, observa-se que o nível de serviço inicia com aproximadamente 30% de probabilidade e vai crescendo de forma suave, mas consegue atingir um nível satisfatório de 90% com um valor relativamente baixo, em torno de 6.000 (a unidade não está em unidade monetária pois os valores foram normalizados).

A Figura 13 apresenta a curva da verdadeira fronteira de Pareto referente ao bloco 2, o nível de serviço inicia com aproximadamente 70% de probabilidade e vai crescendo de forma mais rápida do que o apresentado no bloco 1, no entanto, só consegue atingir o nível de

serviço mínimo com um valor aproximadamente 10 vezes maior, após esse ponto, mesmo com incremento maior de recursos, o nível de serviço não cresce proporcionalmente.

Figura 13 – Verdadeira Fronteira de Pareto do Bloco 2



Fonte: O Autor (2022).

A avaliação do modelo de dimensionamento de sobressalentes baseado no NSGA-II dar-se-á pelo comparativo qualitativo e quantitativo entre as curvas obtidas pelos pontos dos vetores gerados através do modelo e as curvas da verdadeira fronteira de Pareto de cada bloco.

4.5 APLICAÇÃO DO MODELO NSGA-II

Os algoritmos genéticos possuem uma estrutura básica de reprodução, variações aleatórias, competição e seleção de indivíduos mais adaptados, ou seja, com desempenhos melhores em prol de um determinado objetivo (Von Zuben, 2000). Apesar de não garantir que seja encontrada uma solução ótima, esses modelos têm a capacidade de busca iterativa de soluções cada vez melhores em problemas de otimização caracterizados por uma explosão combinatória de possibilidades (Von Zuben, 2000).

Para eventos aleatórios, como falha de um componente, no qual as falhas independem de ocorrências anteriores, a distribuição de Poisson se adequa ao modelo de previsão discreta de ocorrências no período considerado, de forma a relacionar a quantidade de peças em estoque, somadas às indicações de aquisição com o nível de serviço desejado, ou seja, o nível de serviço seria a probabilidade da demanda por determinado componente ser menor ou igual à quantidade projetada do respectivo sobressalente.

Ratificando que o ponto de partida é o pressuposto de que a Distribuição de Poisson consegue explicar o comportamento de falha dos componentes analisados. Apesar de não ter sido realizado nenhum teste de aderência, tanto pela indisponibilidade de dados, como pela variabilidade dos itens e impossibilidade de um diagnóstico imediato de ocorrência da falha, uma vasta literatura considera que a distribuição de Poisson explica comportamento de falhas na manutenção corretiva, segundo Almeida & Campello de Souza *et. al* (2001) a taxa de falhas de um equipamento durante sua vida útil pode ser representado pela distribuição de probabilidade de Poisson, caracterizadas por falhas pouco previsíveis e puramente aleatórias (Sellitto, 2005) e com função de intensidade de falhas constante no tempo (Rigdon & Basu, 2000). O fato de ser o mais difundido e aplicável em sistemas reparáveis se dá pela sua flexibilidade e do fato de ser matematicamente tratável (Almeira & Freitas, 2007). Passado o período de mortalidade infantil de um equipamento, quando ele atinge seu período de maturidade, as taxas de falhas são constantes e independentes do período anterior ao evento, seguindo, portanto, um processo de Poisson (Sellitto, 2005).

O NSGA II é um algoritmo genético de ordenação não-dominada que é utilizado para resolver diferentes problemas de critérios conflitantes e que neste estudo foi aplicado para resolver um problema de política de peças de reposição, a serem aplicadas na manutenção corretiva de viaturas militares operacionais.

Adotando como forma de cálculo a distribuição de Poisson e estabelecendo como objetivos um nível de serviço médio proporcionado pelas respectivas quantidades de cada item que compõe o vetor e o custo de aquisição associado, o algoritmo gera um número “p”, representando o tamanho da população, de combinações de genes de cromossomos, que representam a quantidade de cada item que compõe o vetor de peças, no caso as 25 peças críticas e que é determinado previamente como dado de entrada da ferramenta, elegendo os vetores de melhor qualidade, que mais se aproximam da função multiobjetivo. A cada geração são feitas misturas (crossover) de parte dos vetores para gerar uma nova população, que por sua vez são ordenadas novamente até que seja atingido o número “g” de gerações, que é um outro dado de entrada do algoritmo, proporcionado cada vez mais resultados próximos do objetivo.

No intuito de realizar a avaliação foram simulados alguns cenários a serem processados no Algoritmo Genético NSGA II, utilizando como dados de entrada o tamanho da população e o número de gerações, conforme parâmetros explicitados na Tabela 12.

Tabela 12 – Cenários NSGA-II

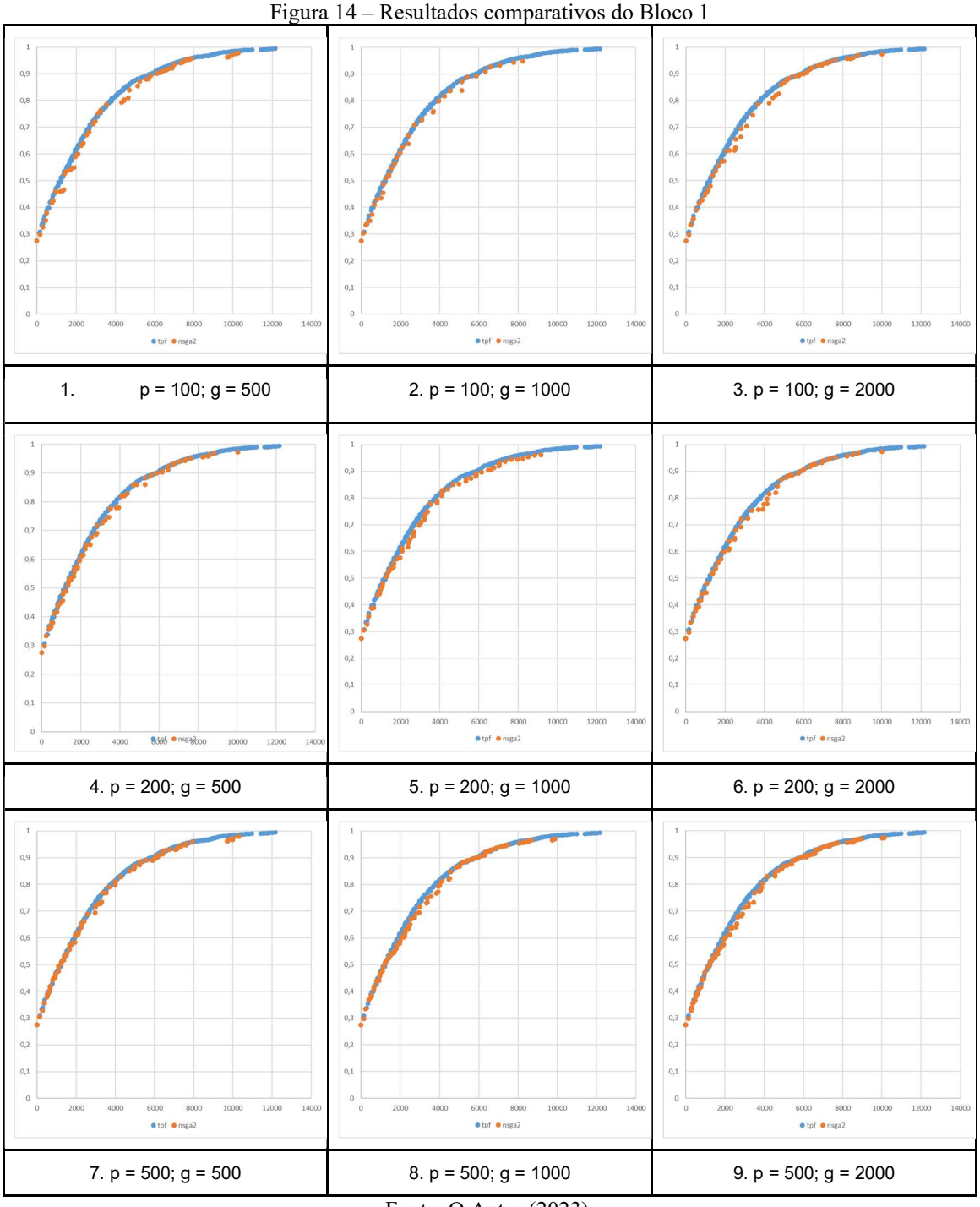
Cenários	Tamanho da População	Número de Gerações
1	100	500
2	100	1000
3	100	2000
4	200	500
5	200	1000
6	200	2000
7	500	500
8	500	1000
9	500	2000

Fonte: O Autor (2023).

A grande vantagem do NSGA-II é a simplicidade do algoritmo, que proporciona menor custo tecnológico e maior rapidez de processamento em comparação com as 4 horas do método exaustivo, tendo sido verificada uma média de 6,9 minutos de tempo de ciclo, variando de 1,1 a 22,8 minutos conforme o cenário (população e gerações), além de ter grande eficiência na busca de soluções próximas à frente de Pareto, exigindo que seja inserido como entrada apenas o tamanho da população e o critério de parada do número de gerações que será percorrido.

Os resultados obtidos em cada bloco podem ser visualizados em comparação com as respectivas TPF nas Figuras 4.8 e 4.9.

Figura 14 – Resultados comparativos do Bloco 1



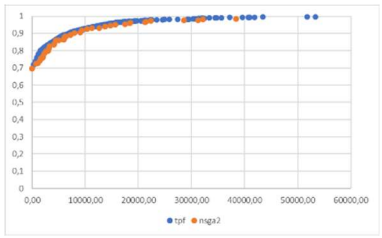
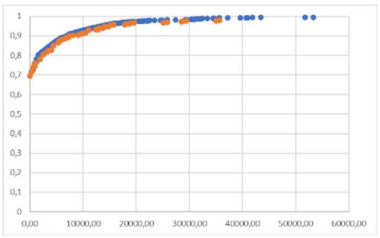
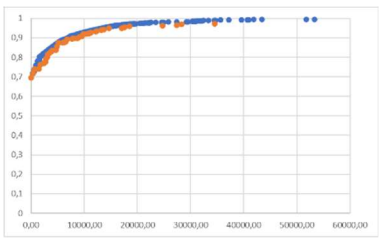
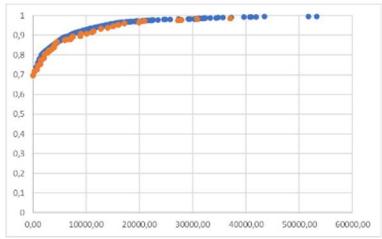
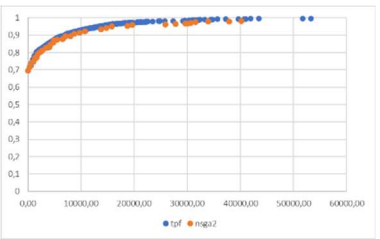
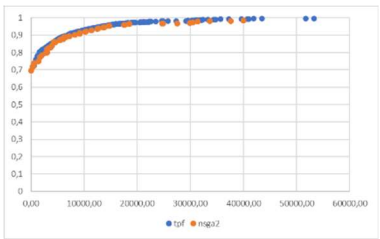
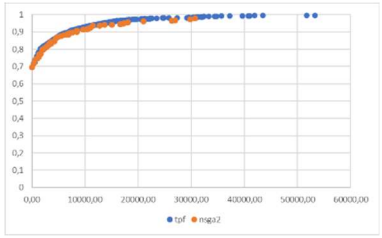
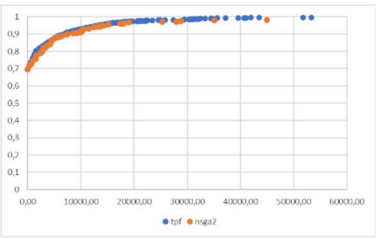
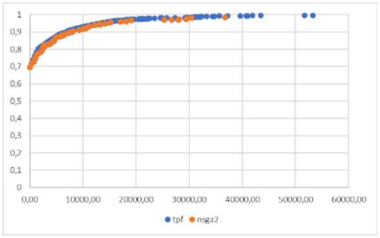
Fonte: O Autor (2023).

Os resultados apresentados na Figura 14, mostra que mesmo com variações no tamanho da população inicial e do quantitativo de gerações até a parada do algoritmo, as soluções finais encontradas se mantém bem próximas, até com trechos que remetem à sobreposição.

Para variações da população de 100 a 500 e do número de gerações de 500 a 2000, foram encontrados de 6 a 92 pontos pertencentes à verdadeira fronteira de Pareto.

Ratificando a adequação do modelo à geração de soluções que se aproximam da fronteira eficiente de Pareto, a Figura 15 traz, dentro das mesmas variações, um comportamento similar considerando um espaço de busca mais de dez vezes maior, que apesar de variar em um range menor, de 3 a 26 pontos, ainda assim apresenta proximidade significativa da fronteira de Pareto.

Figura 15 – Resultados comparativos do Bloco 2

		
1. p = 100; g = 500	2. p = 100; g = 1000	3. p = 100; g = 2000
		
4. p = 200; g = 500	5. p = 200; g = 1000	6. p = 200; g = 2000
		
7. p = 500; g = 500	8. p = 500; g = 1000	9. p = 500; g = 2000

Fonte: O Autor (2023).

Os resultados dos dois métodos foram normalizados para que fosse feita uma análise de comparação quantitativa entre eles.

A técnica de normalização utilizada foi a **Min Max** que redimensiona os valores dentro do intervalo [0, 1], de forma que o valor mínimo original seja 0 e todos os demais

valores seja obtido dividindo-se sua diferença pelo mínimo e a diferença entre máximos e mínimos originais, como mostrado na equação (3) abaixo:

$$V_{minmax} = \frac{x - min\,(x)}{max(x) - min\,(x)} \qquad (3)$$

Foi considerado como parâmetros o número de pontos da Fronteira de Pareto (TFP) encontrados pelo método e a Distância Média (Distância Euclidiana Média) entre os pontos das duas fronteiras, os quais estão consolidados na Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13 – Análise Quantitativa do Bloco 1

C	População	Geração	Quantidade Pontos	Distância Média	% Distância Máxima
1	100	500	8	0,012958447	0,92%
2	100	1000	21	0,009502473	0,67%
3	100	2000	6	0,010726067	0,76%
4	200	500	18	0,00752437	0,53%
5	200	1000	11	0,008443662	0,60%
6	200	2000	18	0,008443662	0,60%
7	500	500	48	0,007839005	0,55%
8	500	1000	92	0,009031535	0,64%
9	500	2000	68	0,008633336	0,61%

Fonte: O Autor (2023).

Os dados apresentados na Tabela 13, com variação da população de 100 (cem) a 500 (quinhentos) e do número de gerações de 500 (quinhentos) a 2.000 (dois mil), a combinação 8 encontrou o maior número de pontos da verdadeira fronteira de Pareto, enquanto as combinações 4 e 7 apresentaram as menores distâncias médias em relação à curva da fronteira eficiente.

Tabela 14 – Análise Quantitativa do Bloco 2

C	População	Geração	Qnt Pontos	Dist Média	% Dist Max
1	100	500	3	0,0199015	1,41%
2	100	1000	5	0,0180097	1,27%
3	100	2000	4	0,0230292	1,63%
4	200	500	12	0,0173034	1,22%
5	200	1000	10	0,0237509	1,68%

6	200	2000	8	0,0183034	1,29%
7	500	500	22	0,0192537	1,36%
8	500	1000	16	0,0177863	1,26%
9	500	2000	26	0,0153407	1,08%

Fonte: O Autor (2023).

Com relação aos dados da Tabela 14 que apresenta as combinações do Bloco 2, verifica-se uma quantidade menor de pontos, muito mais relacionado ao universo de busca desse segundo bloco, que é onze vezes maior que o do primeiro bloco. Apesar disso, a combinação 9 encontrou 26 pontos e manteve uma distância média de 1,08% da máxima distância normalizada.

Em ambos os blocos foi verificado quantitativamente que, quando não encontrados exatamente os pontos da verdadeira Fronteira de Pareto, os resultados ficaram bem próximos da curva que a limita, com um percentual de distância de 0,65% e 1,36% em relação à distância máxima normalizada, para o Bloco 1 e Bloco 2, respectivamente. Lembrando que no segundo bloco o universo de busca é 11 vezes maior do que o primeiro bloco.

Vale destacar que muito mais importante do que o algoritmo encontrar exatamente os pontos da curva eficiente, é sua capacidade de encontrar uma curva de soluções o mais próxima possível dessa fronteira, o que é fundamental para a boa avaliação do modelo aplicado.

Os cenários propostos não consideraram a inserção de mutação no algoritmo, tendo em vista que o resultado inicialmente apresentado já demonstra um nível satisfatório de eficiência da aplicação do método.

4.6 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados comparativos entre os cenários obtidos com o algoritmo NSGA II e os da Fronteira de Pareto obtida pelo método exaustivo mostraram uma boa aproximação, o que dá indícios de que o método genético pode ser aplicado de forma satisfatória para gerar vetores com quantidade de peças maiores e ainda assim proporcionar um elevado Nível de Serviço. Lembrando que o algoritmo busca combinações de soluções entre todas as possibilidades de combinações, elencando as de melhor desempenho conforme critérios estabelecidos pela função objetivo, quanto maior o tamanho do vetor de combinações, maior o

universo de busca em que o algoritmo genético deve fazer a varredura para encontrar as melhores soluções.

No caso prático simulado, considerando por exemplo uma população de 500 cromossomos, que convergiram para maximização da função objetivo após 1000 gerações, foi obtido um resultado do algoritmo. Extraindo do resultado supracitado uma das soluções, de acordo com um Nível de Serviço mínimo de 95%, seria contemplada sugestão de compras indicada na linha destacada da Figura 16.

Figura 16 – Resultado NSGA-II

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	Custo	NS	Fr	d
2	1	2	3	2	1	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	10779,43	0,924968	1	0
1	2	2	2	2	2	3	2	0	2	0	1	0	0	0	0	11949,15	0,929325	1	0,075804
1	2	2	2	2	2	3	2	0	2	0	1	0	0	0	0	11949,15	0,929325	1	0,037713
1	2	2	2	2	2	3	2	0	2	0	1	0	0	0	0	11949,15	0,929325	1	0
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	12726,24	0,941294	1	0,071959
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	12726,24	0,941294	1	0,049616
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	12726,24	0,941294	1	0
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	13762,47	0,949034	1	0,053695
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	13762,47	0,949034	1	0,048886
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	13762,47	0,949034	1	0
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	0	0	1	0	14681,21	0,954446	1	0,034653
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	0	0	1	0	14681,21	0,954446	1	0,022294
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	0	0	1	0	14681,21	0,954446	1	0
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	1	0	0	0	14794,12	0,956774	1	0,081366
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	1	0	0	0	14794,12	0,956774	1	0,013264
2	3	3	2	3	2	2	1	1	1	0	1	1	0	0	0	14794,12	0,956774	1	0
1	2	3	3	3	3	3	2	1	1	0	1	1	0	1	0	17334,82	0,95962	1	0,082203
1	2	3	3	3	3	3	2	1	1	0	1	1	0	1	0	17334,82	0,95962	1	0,020304

Fonte: O Autor (2023).

O resultado da Figura 16 indica as quantidades sugeridas de aquisição de cada um dos itens críticos (de 1 a 16) que compõem o cromossomo correspondente a este bloco de 16 itens. A busca poderia ser realizada utilizando o critério de custo ou qualquer outro critério que esteja sendo considerado na função objetivo, que no presente trabalho limita-se ao custo e nível de serviço.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma política de dimensionamento de sobressalentes aplicados na manutenção de veículos em operações militares.

Foi feita uma revisão de algumas metodologias de dimensionamento de sobressalentes e apresentação dos resultados da aplicação de dois métodos, entre os quais o do custo-benefício e o NSGA-II, sendo esta última aplicação a principal contribuição do trabalho.

Para possibilitar a análise comparativa do modelo de dimensionamento baseado no NSGA-II com a verdadeira Fronteira de Pareto, obtida por meio do método exaustivo, foi estabelecido um método de classificação dos componentes, classificando como mais críticos os itens com maior valor de aquisição e maiores médias históricas de demanda.

Posteriormente, com base na distribuição de Poisson, que caracteriza o comportamento de falhas aleatórias ao longo da vida útil de componentes elétricos e mecânicos, foram levantadas as probabilidades de ruptura dos estoques, ou seja, a probabilidade da demanda por um determinado item ser maior que o respectivo nível de estoque projetado do item. E, de forma complementar, a partir das probabilidades de rupturas individuais foi estabelecido o nível de serviço médio do portifólio de itens.

Por meio da aplicação do NSGA-II, foi gerado o conjunto de soluções próximas à fronteira de Pareto e para avaliar o nível de eficácia dessas soluções foram estabelecidos os critérios de medição da qualidade das soluções geradas, que corresponderam à análise comparativa da sobreposição da solução com a verdadeira fronteira de Pareto, bem como do quantitativo de pontos encontrados, juntamente com a distância média entre as curvas.

A aplicação do modelo de dimensionamento de sobressalentes promovem alguns impactos em termos econômicos, que envolvem a racionalização na aquisição das peças de reposição, os quais interferem diretamente no giro do estoque, pois quanto mais assertivo for o direcionamento das aquisições, mais as demandas estarão alinhadas com o inventário de estoque e, consequentemente, as peças serão utilizadas mais rapidamente, diminuindo o valor médio apropriado em estoque necessário para reposição dos veículos ao estado de disponibilidade, com uma estimativa de redução de 25% do nível médio de estoque de peças sobressalentes para o modelo de veículos estudado, aproximadamente 135 mil reais, verifica-se um ganho econômico decorrente de um melhor gerenciamento e controle. Além disso, a maior taxa de acerto no gerenciamento dos itens, diminui a probabilidade de ruptura do estoque, que acontece quando as demandas são maiores do que o quantitativo disponível da peça de reposição, consequentemente, diminui o chamado “back log” que é o tempo decorrido

na manutenção, desde o início do processo até a sua conclusão, melhorando o nível de serviço sem decorrer em aquisições emergenciais que, em geral, elevam o custo da operação.

Os princípios de legalidade, impessoalidade, moralidade, publicidade e eficiência, Constituição (1989), passam obrigatoriamente pelo correto uso dos recursos públicos, minimização do desperdício, o que proporciona uma maior valorização da organização, satisfação das pessoas envolvidas e retorno para a sociedade através da disponibilidade da frota e melhoria dos serviços prestados pela organização.

As melhorias na taxa de giro do estoque, faz com que o nível médio de itens armazenados seja menor, exigindo então menor espaço físico para alocação das peças de reposição. Outro aspecto relativo ao melhor uso do espaço físico é que, dado que as viaturas não ficarão aguardando na fila de espera pela chegada de peças de reposição, pode-se organizar melhor o fluxo de operações e o espaço dedicado à execução da manutenção.

Todos esses fatores apresentam-se como inovações resultantes da aplicação do modelo de política de estoque sugerido, não se leva em consideração apenas a média histórica simples de um determinado componente crítico, mas adota-se uma abordagem de modelo que acrescenta uma distribuição de probabilidade, refletida sobre a forma de nível de serviço.

Como resultado desta pesquisa e aplicação de um modelo de gestão de estoque de peças sobressalentes, será elaborado um relatório com indicativo de aquisição de peças para manutenção corretiva e de oportunidade, de acordo com a limitação de recursos financeiros e conforme o melhor custo-benefício, tomando como referência um extrato atual de inventário e a média de consumo de cada um dos itens críticos. Essas informações são de caráter ostensivo, principalmente para organizações, militares e civis, que têm como função principal a manutenção de frota, para direcionamento da composição do estoque e de futuras aquisições.

5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O Algoritmo genético é bastante abrangente em suas aplicações, no entanto há algumas situações em que não se recomenda a aplicação da metodologia. Esta pesquisa é direcionada para manutenção corretiva em que a probabilidade de falha se comporta conforme a distribuição de Poisson, portanto, para manutenção preventiva ou periódica, assim como quando a distribuição de probabilidade de falha claramente diverge de uma Distribuição de Poisson, o modelo não poderá ser aplicado.

Outra necessidade é que se tenha um registro histórico de demanda dos componentes, para fazer um dimensionamento peças sobressalentes de sistemas novos, deve ser feita uma estimativa ou uma conversão por similaridade com outros componentes em condições de uso parecidas para obtenção da taxa de falha deles.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados gráficos e quantitativos apresentados apontam para eficiência na aplicação do NSGA-II na política de dimensionamento de peças de reposição, sobretudo pelo fato de não exigir tantos recursos computacionais para sua operação e por apresentar uma sugestão final de relatório em tempo satisfatório. No entanto, pode ser destacado como sugestões para trabalhos futuros alguns métodos de inicialização do algoritmo, que nesta pesquisa está iniciando de forma aleatória. Essa aproximação inicial pode ser o vetor obtido pelo método do custo-benefício apresentado por Fernandes (2010) que poderia contribuir para uma convergência mais rápida das soluções.

Diante da comprovada eficiência na aplicação do modelo de dimensionamento de sobressalentes, o algoritmo poderia ser rodado com uma quantidade maior de componentes, porém sugere-se dividir ao menos a gestão de dimensionamento em sistemas para dar uma tratativa mais direcionada nos componentes críticos.

Em uma continuidade da pesquisa, poderiam ser feitas simulações do algoritmo considerando um percentual de mutação das soluções ao longo das gerações, para verificar seus efeitos com relação à variabilidade dos pontos ao longo do universo de busca.

REFERÊNCIAS

ANJOS, Augusto dos. **Eu e outras poesias**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1998.

A. FAKER, S. BOUSLIKHANE, Z. HAJEJ, S. DELLAGI. Machine learning approach for integrated maintenance and spare parts management strategies. **IFAC-PapersOnLine**, Volume 55, Issue 10, 2022, Pages 1386-1391, ISSN 2405-8963.

ALMEIDA, Adiel T., CAMPELLO DE SOUZA, Fernando (org.). **Gestão da manutenção**: na direção da competitividade. Recife. Ed. Universitária da UFPE, 2001.

ARROYO, José Elias Claudio et al. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) -Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: planejamento, organização e logística empresarial. São Paulo: Bookman, 2005.

BASU R, Jothi; ABDULRAHMAN, Muhammad D; YUVARAJ, M. Improving agility and resilience of automotive spares supply chain: The additive manufacturing enabled truck model. **Socio-Economic Planning Sciences**, Volume 85, 2023, 101401.

BELTRAME, Júlia Oliveira et al. **Análise da eficiência da manutenção através de indicadores chave de desempenho**. Disponível em: https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2022/02/ analise-da-eficiencia-da-manutencao-atraves-de-indicadores-chave-de-desempenho.pdf. Acesso em: jun. 2023

CAMPOS, Fernando Celso de; BELHOT, Renato Vairo. Gestão de manutenção de frotas de veículos: uma revisão. **Gestão & Produção**, v. 1, p. 171-188, 1994.

CARDEAL, Gonçalo; LEITE, Marco Leite; RIBEIRO, Inês. Decision-support model to select spare parts suitable for additive manufacturing, **Computers in Industry**, Volume 144, 2023, 103798, ISSN 0166-3615. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103798. Acesso em: ago. 2023.

CESÁRIO, Jonas Magno dos Santos. Et al. Metodologia científica: Principais tipos de pesquisas e suas caraterísticas. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 05, Ed. 11, Vol. 05, pp. 23-33.

CEVALLOS-TORRES, L.C.; NUÑES-GAIBOR, J. & LEYVA-VAZQUEZ, M. Modelo de otimização de inventário, baseado na simulação de Monte Carlo e Algoritmo Metaheurístico Genético. **Universidad y Sociedad**. Volume 14, Edição S6, Páginas 448 - 4581º de dezembro de 2022.

CORRÊA, Maria Clara Fernandes & SANTANA, Sthefan da Silva. **Gestão de estoques de peças de reposição da manutenção**: um estudo de caso em uma base de distribuição de combustíveis. Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia de Petrópolis Curso de Engenharia de Produção. Petrópolis, RJ, 2022.

CORSO, L. L; GOMES, H.M; MEZZOMO, G.P; MOLTER, A. Otimização baseada em confiabilidade para uma célula de carga multiaxial utilizando algoritmos genéticos. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería,** Volume 32, Issue 4, 2016. Pages 221-229.

COSTA FILHO, Paulo Augusto da; POPPI, Ronei Jesus. Algoritmo genético em química. **Química Nova**, v. 22, p. 405-411, 1999.

COSTA, Mariana de Almeida. **Gestão estratégica de manutenção:** uma oportunidade para melhorar o resultado operacional / Mariana de Almeida Costa. – 2013. 103 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

COSTANTINO, Francesco et al. Spare parts management for irregular demand tems. **Omega**, v. 81, p. 57-66, 2018.

DE BARROS, F. M.; GUEDES, E. F. Análise do Projeto Marruá desenvolvido pelo Parque Regional de Manutenção da 7ª Região Militar. **Programa de Pós-Graduação em Ciências Militares.** Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais. 2020.

DEB, Kalyanmoy et al. Um algoritmo genético multiobjetivo rápido e elitista: NSGA-II. **Transações IEEE sobre computação evolutiva** , v. 6, n. 2, pág. 182-197, 2002.

DIAZ, Ermilso; MUÑOZ-AÑASCO, Mariela; SALVADOR, Antonio Correcher; GARCIA, Emilio. Simulation model for the study of maintenance actions in a homogeneous multi-unit system of interchangeable components, with cannibalization, **Reliability Engineering & System Safety**, Volume 240, 2023, 109532.

DURAN, Orlando; AFONSO, Paulo Sérgio Lima Pereira. An activity based costing decision model for life cycle economic assessment in spare parts logistic management. **International Journal of Production Economics**, v. 222, p. 107499, 2020.

DURSUN, İpek; AKCAY, Alp; HUTUM, Geert-Jan van. How good must failure predictions be to make local spare parts stock superfluous? **International Journal of Production Economics**, Volume 267, 2024, 109060.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Noticiário do Exército:** Dia do Quadro de Material Bélico - 30 de outubro. 27 de Outubro de 2022. Disponível em: <https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito>. Acesso em: nov. 2022.

FENG, Haofang; ZHANG, Sheng Hao; ZHANG, Yong. Managing production-inventory-maintenance systems with condition monitoring. **European Journal of Operational Research**, Volume 310, Issue 2, 2023, Pages 698-711.

FERNANDES, Roberto Klecius Mendonça. Modelo de gerenciamento de estoques de peças de reposição para empresas de transporte urbano de passageiros / Roberto Klecius Mendonça Fernandes. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. **Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção** – Natal, RN, 2010. 120 f. : Il.

FERREIRA, Rodrigo José Pires; FREJ, Eduarda Asfora; FERNANDES, Roberto Klecius Mendonça. A Model to Select a Portfolio of Multiple Spare Parts for a Public Bus Transport Service Using NSGA II. In: Evolutionary Multi-Criterion Optimization: 8th International Conference, EMO 2015, Guimarães, Portugal, March 29--April 1, 2015. Proceedings, Part II 8. **Springer International Publishing**, 2015. p. 448-457.

FONSECA, Carlos M.; FLEMING, Peter J. Uma visão geral de algoritmos evolutivos em otimização multiobjetivo. **Computação evolutiva** , v. 3, n. 1, pág. 1-16, 1995.

FREITAS, Marta Afonso; ALMEIRA, Neander Ferreira. Estudo da Tendência na Intensidade de Falhas em Sistemas Reparáveis. **XXXIX SBPO** – A pesquisa operacional e o desenvolvimento sustentável. Fortaleza-CE, 2007.

GARGARI, Masoud Atashpaz; SAHRAEIAN, Rashed. An exact criterion space search method for a bi-objective nursing home location and allocation problem, **Mathematics and Computers in Simulation**, Volume 206, 2023, Pages 166-180.

HANBALI, A. SALEH, H. H. ALSAWAFY, O. G. ATTIA, A. M. GHAITHAN, A. M. MOHAMMED, A. Spare parts supply with incoming quality control and inspection errors in condition based maintenance. **Computers & Industrial Engineering**, Volume 172, Part A, 2022, 108534.

HAN, Dong; DU, Wenli; DU, Wei; JIN, Yaochu; WU, Chunping. An adaptive decomposition-based evolutionary algorithm for many-objective optimization, **Information Sciences**, Volume 491, 2019, Pages 204-222.

HEKIMOĞLU, Mustafa; KARLI, Deniz. Modeling repair demand in existence of a nonstationary installed base. **International Journal of Production Economics**, Volume 263, 2023, 108923.

HORN, J.; NAFPLIOTIS, N. & GOLDBERG, DE (1994) A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. Proceedings of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, **IEEE World Congress on Computational Intelligence**, Orlando, 27-29 de junho de 1994, 82-87.

HU, Qiwei; BOYLAN, John E.; CHEN, Huijing; LABIB, Ashraf. OR in spare parts management: A review, **European Journal of Operational Research**, Volume 266, Issue 2, 2018, Pages 395-414.

IFRAZ, Metin; AKTEPE, Adnan Aktepe; ERSOZ, Süleyman; ÇETINYOKUS, Tahsin. Demand forecasting of spare parts with regression and machine learning methods: Application in a bus fleet, **Journal of Engineering Research**, Volume 11, Issue 2, 2023, 100057.

JARDINE, Andrew KS; LIN, represamento; BANJEVIC, Dragan. Uma revisão sobre diagnósticos e prognósticos de máquinas implementando manutenção baseada em condições. **Sistemas mecânicos e processamento de sinais**, v. 20, n. 7, pág. 1483-1510, 2006.

JUNQUEIRA, Paulo Pinheiro. Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo baseado em Decomposição com Arquivo Externo e Adaptação de Pesos baseada em Vizinhança Local. Universidade

Federal de Minas Gerais – UFMG. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE**. 117 f. : il., color. 2021

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção - Função Estratégica**. Segunda edição. Rio de Janeiro: QualityMark, 2001.

KIAN, Ramez; BEKTAŞ, Tolga; OUELHADJ, Djamila. Optimal spare parts management for vessel maintenance scheduling. **Annals of operations research**, v. 272, n. 1, p. 323-353, 2019.

KNOWLES, J. & CORNE, D. "Estratégia Evolutiva com Pareto-Arquivado: um novo algoritmo de linha de base para a otimização multiobjetivo de Pareto". Proceedings of the 1999 **Congress on Evolutionary Computation-CEC99** (Cat. No. 99TH8406) , Washington, DC, EUA, 1999 , pp. 98-105 Vol. 1.

KUMAR, Manoj; HUSAIN, Mohammad; UPRETI, Naveen & GUPTA, Deepti. **Algoritmo Genético: Revisão e Aplicação** (1 de dezembro de 2010).

LAFETÁ, Thiago; BUENO, Marcos L.P.; BRASIL, Christiane; OLIVEIRA, Gina M.B. MEANDS: A Many-objective Evolutionary Algorithm based on Non-dominated Decomposed Sets applied to multicast routing, **Applied Soft Computing**, Volume 62, 2018, Pages 851-866.

LEE, Hanjun; KIM, Jaedong. A Predictive Model for Forecasting Spare Parts Demand in Military Logistics. In: 2018 **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management** (IEEM). IEEE, 2018. p. 1106-1110.

LEMOS, Mateus Albernaz; ALBERNAZ, C. M.; CARVALHO, Rogerio Atem de. Qualidade na manutenção. **XXXI ENEGEP**, v. 31, 2011.

LI, K; DEB, ZHANG, Q; KWONG, S. An evolutionary many-objective optimization algorithm based on dominance and decomposition. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 19(5):694–716, oct 2015.

LI, Ke. Decomposition Multi-Objective Evolutionary Optimization: From State-of-the-Art to Future Opportunities. **Department of Computer Science, University of Exeter, North Park Road**, Exeter, EX4 4QF, UK. 2021.

LIMA, Heitor Fagner Lopes de. Modelo de apoio a decisão para dimensionamento da quantidade de mangotes marítimos sobressalentes para terminais aquaviários offshore. 2022. Dissertação de Mestrado. **Universidade Federal de Pernambuco**.

LV, Lingling; SHEN, Weiming. An improved NSGA-II with local search for multi-objective integrated production and inventory scheduling problem. **Journal of Manufacturing Systems**. Volume 68, 2023, Pages 99-116.

MA, Wein; HEKIMOĞLU, Mustafa; DEKKER, Rommert. Admission control for a capacitated supply system with real-time replenishment information. **International Journal of Production Economics**. Volume 266, 2023, 109000.

MEEKER, W.Q.;ESCOBAR, L.A. (1998) **Statistical Methods for Reliability Data**. Wiley, New York.

MERCADO E CONSUMO. Economia, 29 de março de 2022. Disponível em: <https://mercadoeconsumo.com.br/29/03/2022/noticias/pandemia-inflacao-carro-avanco-17-em-12-meses/?cn-reloaded=1>. Acessado em: maio 2023;

MIRJALILI, S. (2019). Algoritmo genético. In: Algoritmos Evolutivos e Redes Neurais. **Estudos em Inteligência Computacional**, vol 780. Springer.

MOORI, Roberto Giro; KIMURA, Herbert; ASAKURA, Oscar Kenjiro. Aplicação do algoritmo genético na gestão de suprimentos. **INMR-Innovation & Management Review**, v. 7, n. 2, p. 171-192, 2010.

MOUBRAY, João. **Manutenção Centrada em Confiabilidade** – Edição Brasileira. São Paulo: SPES , 2000.

MOUSCHOUTZI, Maria; PONIS, Stavros T. A comprehensive literature review on spare parts logistics management in the maritime industry. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, Volume 38, Issue 2, 2022, Pages 71-83.

MUNIZ, Leandro Reis. Previsão de demanda, classificação multicritério e otimização no planejamento de peças sobressalentes na indústria mineral. 2020. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - **Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2002.

NETO, Gregório Koslinski; MELLO, Igor Oliveira; DUENHA, Liana D. **MultiExplorer: ferramenta para exploração do espaço de projetos de sistemas multicore na era de dark-silicon**. 2023.

PARETO, V. (1896) **Cours D'Economie Politique**, vol. 1. Lausanne: F. Rouge.

PORTARIA GM-MD Nº 5.332, DE 22 DE DEZEMBRO DE 2021. Método de Planejamento Estratégico Setorial de Defesa. Publicado em: 31/12/2021 | Edição: 247 | Seção: 1 | Página: 423. Órgão: Ministério da Defesa/Gabinete do Ministro. **Estratégia de Defesa Nacional**. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/estrategia-nacional-de-defesa-pdf> Acesso em: mai 2023.

PRESTES, Álvaro Nunes. Uma análise experimental de abordagens heurísticas aplicadas ao problema do caixeiro viajante. Dissertação (Mestrado) – **Universidade Federal do rio Grande do Norte**. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação. Natal-RN, 2006, 84 f.

RIBEIRO, Marcus Cesar Alves. **A Função Logística Manutenção nas Operações de Engenharia de Construção no contexto tecnológico do século XXI**. /Marcus Cesar Alves Ribeiro. – 2019. 33 f.; 30 cm.

RIGDON, S.E.; BASU, A.P. (*2000*) **Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

RIPPE, Christoph; KIESMÜLLER, Gudrun P. The repair kit problem with imperfect advance demand information. **European Journal of Operational Research**, Volume 304, Issue 2, 2023, Pages 558-576.

SANCHES, Iara Del'arco. S211g. Gestão da Manutenção em EHIS. Iara Del'Arco Sanches; Orientador Márcio Minto Fabrício. – São Carlos, 2010. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, 2010.

SCHAFFER, J. D. (1985) Otimização de objetivos múltiplos com algoritmos genéticos avaliados por vetores. Em: Grefenstette, JJ, et al., Eds., Algoritmos Genéticos e Suas Aplicações, Proceedings of the **1st International Conference on Genetic Algorithms, Lawrence Erlbaum, Mahwah**, 93-100.

SELLITTO, Miguel Afonso. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Universidade Federal do Vale dos Sinos** – Unisinos. Revista Produção, v. 15, n. 1, p. 044-059, Jan./Abr. 2005.

SILVA NETO, J. J.; Rodrigo José Pires Ferreira. Avaliação de uma política de dimensionamento de sobressalentes para manutenção de veículos em operações militares., in: **LIV simpósio brasileiro de pesquisa operacional**, Juiz de Fora - MG, 2022.

SILVA NETO, J. J.; Rodrigo José Pires Ferreira. Avaliação de uma política de dimensionamento de sobressalentes para manutenção de veículos em operações militares. In: **INSID INovation for Systems INformation and Decision meeting**, Recife - PE, 2022.

SILVESTRE, Carlos Dimitrius da Cruz. Gestão pública das viaturas militares do exército brasileiro: uma análise dos impactos no comando logístico. 2023. 192 f. (Mestrado Profissional em Administração Pública) - **Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa**, Brasília, 2022.

TEIXEIRA, Catarina C. P. Classificação e gestão de stocks de sobressalentes. Orientadores: Professora Doutora Isabel da Silva Lopes e Professor Doutor Manuel Carlos Barbosa Figueiredo. Tese de Doutoramento Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas. **Escola de Engenharia Universidade do Minho**, 2022.

TICONA, W. G. C.; DELBÉM, A. C. B. **Algoritmos evolutivos para otimização multiobjetivo**. Aug 2008.

TURRINI, Laura; MEISSNER, Joern. Spare parts inventory management: New evidence from distribution fitting. **European Journal of Operational Research**, Volume 273, Issue 1, 2019, Pages 118-130.

VERBERT, K; DE SCHUTTER, B; BABUSKA, R. Timely condition-based maintenance planning for multi-component systems, **Reliability Engineering & System Safety**, Volume 159, 2017, Pages 310-321.

VON ZUBEN, Fernando J. Computação evolutiva: uma abordagem pragmática. Anais da **I Jornada de Estudos em Computação de Piracicaba e Região** (1a JECOMP), v. 1, p. 25-45, 2000.

XU, Ying; ZHANG, Huan; HUANG, Lei; QU, Rong; NOJIMA, Yusuke. **A Pareto Front grid guided multi-objective evolutionary algorithm**, Applied Soft Computing, Volume 136, 2023.

ZHANG, Chen et al. Opportunistic maintenance strategy for wind turbines considering weather conditions and spare parts inventory management. **Renewable Energy**, v. 133, p. 703-711, 2019.

ZHANG, Like; DENG, Qianwang; WANG, Zhen; GONG, Guiliang; WEN, Xiaoyu; LIU, Xiaoyan. Collaborative scheduling of production resources and spare parts inventory for distributed equipment with feedback guidance and minimum capacity loss. **Swarm and Evolutionary Computation**, 2022, 101200.

ZHANG, Qin; XU, Peng; FANG, Zhigeng. Optimal age replacement policies for parallel systems with mission durations. **Computers & Industrial Engineering**. Volume 169, 2022, 108172.

ZHENG, Meimei; SU, Zhiyun; WANG, Dong; PAN, Ershun. Joint maintenance and spare part ordering from multiple suppliers for multicomponent systems using a deep reinforcement learning algorithm, **Reliability Engineering & System Safety**, Volume 241, 2024, 109628.

ZHU, Sha; JAARSVELD, Willem van; DEKKER, Rommert. Critical project planning and spare parts inventory management in shutdown maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, Volume 219, 2022, 108197.

ZHUANG, Liangliang; XU, Ancha, WANG, Xiao-Lin. A prognostic driven predictive maintenance framework based on Bayesian deep learning. **Reliability Engineering & System Safety**, Volume 234, 2023, 109181.

ZITZLER, E. & THIELE, L. "Algoritmos evolutivos multiobjetivos: um estudo de caso comparativo e a abordagem de força de Pareto", em **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, vol. 3, não. 4, pp. 257-271, novembro de 1999.

ANEXO A – DESCRIÇÃO DETALHADA DA VIATURA

Descrição detalhada da Viatura - Ata 24/2913 UASG 160069
Viatura Operacional de Transporte Não Especializado de fabricação nacional tipo Pick-up ¾ ton, VOP 1, 4x4 cabine e carroceria com teto e capota de lona. Situação de rodagem: 0 Km ano/modelo em curso ou posterior. Motor de potência 140 CV e torque de 360 Nm, capaz de utilizar qualquer tipo de diesel, câmbio de 5 velocidades sincronizadas à frente e 1 à ré. Entre eixos: 3210 mm. Sistema elétrico tipo negativo à massa dotada de sistema de iluminação civil e militar com circuitos independentes, sendo selecionados por chave comutadora e acionados por interruptores de fácil aquisição no mercado nacional, a viatura deverá conter uma tomada de energia (24 volts) permitindo a instalação de rádio comunicador em sua carroceria, conectado diretamente nas baterias (Cfme Norma MIL-STD-1275D) e, sistema elétrico de 12 V, tomadas elétricas tipo militar, segundo a norma (NEB T Pd 13A - NATO stanag 4007) para conexão com o semi-reboque, direção hidráulica, tanque de combustível com capacidade para 100 L, pintada externamente com camuflado nas cores verde floresta fosco e vermelho terra, pintura interna na cor verde floresta fosco, a lona da cabine e carroceria na cor verde floresta fosco, a pintura feita em obediência à Orientação para a Pintura Camuflada, constante da Norma de Especificação - DMB N.º 287/91, 2 espelhos retrovisores externos, 1 espelho interno central com boa visibilidade para o interior do compartimento, uma caixa de ferramentas metálica com fechadura, trinco, aldrava para cadeado fixada no interior da cabine, tapetes de borracha, indicador de pressão de óleo, indicador da temperatura do motor indicador do nível do combustível, sinalizador de luzes (alta e seta de direção), para-choque traseiro em conformidade de com a legislação vigente, além de todos os demais equipamentos e acessórios obrigatórios por lei, com cajados na carroceria para receber a capota de lona tipo trevira, composta de sistema anti-capotamento (santo antônio), removível fixado no piso com reforço tubular feito em chapa de aço, cintos de segurança para os ocupantes da cabine e da caçamba, gancho para reboque traseiro tipo engate “G”, fixado na parte central traseira do chassi, confeccionado em chapa de aço com 2 argolas de segurança, um camburão para transporte de combustível/água de 20 L, com suporte, instalado na parte externa da viatura,

uma pá e um machado na lateral da caçamba, fixados pelos respectivos suportes confeccionados em chapa de aço, sistema de iluminação militar (luz do freio, lanternas de posição, farol de aproximação, luz de mapa, com circuitos independentes, funcionamento através da lógica de relés, sendo selecionados por chave comutadora acionados por interruptores de fácil aquisição no mercado nacional, quebra-mato dianteiro com tela de proteção para faróis, radiador e lanternas, confeccionado em chapa de aço, montado através de parafusos, proteção nas lanternas traseira com barras redondas de aço, uma placa metálica no painel com informações gerais da viatura, preparação da viatura com kit para instalação de rádio veicular (24 V), para-brisa rebatível com seu devido suporte e trava do quadro de para-brisas tipo rebatível, um sistema de haste corta-fio removível, fixado no para-choque dianteiro, no preço proposto estão contemplados o fornecimento do manual de garantia, de reparação/manutenção do veículo, de operação do veículo, da rede de distribuidores autorizados, catálogo de ferramental e instrumentos necessários à manutenção, catálogo de suprimento, Listagem estatística de peças de alta mortalidade, do fabricante do motor, da caixa de câmbio, da embreagem e do diferencial da viatura, acompanhada uma foto das ferramentas numeradas, dispostas sobre um fundo de cor que contraste com a cor das ferramentas, e com a respectiva legenda, com a finalidade de facilitar seu recebimento, a viatura atende a legislação do CONTRAN, atende aos requisitos operacionais básicos específicos, ao art. da resolução CONAMA N° 315, de 29/10/2002, e ao art. 21 da resolução CONAMA N° 415 de 24/09/2009, demais especificações em pleno atendimento ao descritivo, quantificado e especificado no Anexo “A” e “B”, partes integrantes do referido Edital. O prazo de garantia técnica do Objeto deste Contrato é de 2 anos ou 50000 Km, o que ocorrer primeiro, conforme itens 5.5.5. e 5.5.6. do Edital. Prazo contado da data da emissão do Termo de Recebimento Definitivo, garantida manutenção gratuita dos itens constantes do manual de garantia para manutenções preventivas durante o prazo de até 20.000 km (Conforme Item 3.15 Anexo B). No valor ofertado serão oferecidos cursos/estágios de operação técnica, manutenção e técnica de emprego. Validade da proposta: 60 dias da abertura da sessão do pregão. O prazo de entrega limite das viaturas será de até 452 dias. A viatura está em conformidade e possui as mesmas especificações técnicas e acessórios da viatura do lote-piloto apresentada pela licitante, que foi avaliada, aprovada e homologada pelo Departamento de Ciência e Tecnologia e adotada pelo Estado-Maior para o Exército Brasileiro

Fonte: comprasgovernamentais.gov.br