



ESCOLA DE COMANDO E ESTADO-MAIOR DA AERONÁUTICA
COORDENADORIA ACADÊMICA
CURSO AVANÇADO DE COMANDO E ESTADO-MAIOR

FÁBIO AYRES CARDOSO, Ten Cel Int

**Avaliação da prontidão logística com
preposicionamento de ativos militares**

Rio de Janeiro
2021

ESCOLA DE COMANDO E ESTADO-MAIOR DA AERONÁUTICA
COORDENADORIA ACADÊMICA
CURSO AVANÇADO DE COMANDO E ESTADO-MAIOR

FÁBIO AYRES CARDOSO, Ten Cel Int

**Avaliação da prontidão logística com
preposicionamento de ativos militares**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso Avançado de
Comando e Estado-Maior da Escola de
Comando e Estado-Maior da Aeronáutica.
Linha de Pesquisa: Operações Militares.
Orientador: Ana Paula Storino Bastos
Tavares.

Rio de Janeiro
2021

RESUMO

A prontidão é um importante atributo das Forças Armadas, com impacto direto na eficiência da condução de Operações Militares e no projeto de força. Não obstante sua importância para a Segurança e Defesa nacionais, há pouca teorização sobre o assunto, particularmente sobre como mensurá-la. Considerando o emprego do preposicionamento de ativos militares como solução para reduzir tempos de reação, indaga-se como esta estratégia, de alocação antecipada de meios nas possíveis localidades de emprego, pode contribuir para a eficiência da prontidão logística. Para responder a esta questão, este trabalho foi desenvolvido, e teve por objetivo propor um modelo de otimização matemática capaz de avaliar como o preposicionamento de ativos militares contribui para maximizar a prontidão logística de arranjos de força orientados, para a condução de ações de combate ou de não-combate. O método de pesquisa foi o descritivo experimental, com a produção e resolução de modelos matemáticos, construídos como programação linear, para avaliar a prontidão logística nas condições de ausência e existência de recursos preposicionados. A prontidão foi aferida pela razão entre carga total transportada pelo tempo total gasto nos deslocamentos, tendo sido usados dados ostensivos afetos aos elementos que conformam o panorama sob investigação, como distâncias, cargas e capacidades de aeronaves. Os resultados obtidos retratam numericamente a eficiência do preposicionamento na maximização da prontidão, e suas consequências operacionais na seleção de rotas e aeronaves. A principal contribuição deste trabalho é fornecer ferramenta analítica de planejamento capaz de fundamentar quantitativamente decisões para o preposicionamento de meios militares orientados pela prontidão logística.

Palavras-chave: otimização; programação linear; transporte aéreo logístico.

ABSTRACT

Readiness is an important attribute of armed forces, with a direct impact on the efficiency of conducting military operations and on force design. Despite its importance for defense and national security, there is little theory on the subject, particularly on how it can be measured. Considering the use of the prepositioning military assets as a solution to reduce response times, it is questioned how this strategy, of anticipated allocation of resources in possible places of employment, can contribute to the efficiency of logistics readiness. In that sense, this work aims to propose a mathematical optimization model capable of evaluating how the prepositioning of military assets contributes to maximize the logistics readiness of force arrangements aimed at conducting combat actions or not. The research method was a descriptive experimental one, and involved the generation and resolution of mathematical models, built as a linear programming, to assess logistics readiness under conditions of absence and existence of prepositioned resources. Readiness was measured by the ratio between the total load transported and the total time spent on transport, using ostensive data related to the elements that make up the panorama under investigation, such as distances, loads and aircraft capacities. The results obtained numerically portray the efficiency of prepositioning in maximizing readiness, and its operational consequences in the selection of routes and aircraft. The main contribution of this work is to provide an analytical planning tool capable of quantitatively basing decisions to preposition military assets guided by logistics readiness.

Keywords: *optimization; linear programming; airlift.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipologias de Prontidão Militar	13
Figura 2 – Modelo Conceitual (Cenário 1)	20
Figura 3 – Modelo Conceitual (Cenário 2)	21
Figura 4 – Solução Gráfica (Cenário 1)	29
Figura 5 – Solução Gráfica (Cenário 2)	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos de Deslocamento, em horas (aeronaves do grupo 1)	27
Tabela 2 – Tempos de Deslocamento, em horas (aeronaves do grupo 2)	28
Tabela 3 – Mensuração da Prontidão (pacotes por hora)	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sumário de Definições (Prontidão Militar)	14
Quadro 2 – Dados sobre Bases Militares	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Prontidão Militar	12
2.2	Programação Linear	14
3	METODOLOGIA	17
4	RESULTADOS E ANÁLISE	19
4.1	Modelagens Conceitual e Científica	19
4.2	Operação Matemática	22
4.3	Análise e Interpretação	28
5	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A prontidão é um dos atributos essenciais das Forças Armadas, e uma das capacidades responsáveis pela eficiência militar no provimento da Defesa Nacional. Entendida sob o binômio “capacidade no tempo”, a prontidão visa assegurar o rápido engajamento de ativos militares – tropas, suprimentos e equipamentos – para sustentar o emprego de forças militares, seja em ações de combate, ou em ações de não-combate (JUNOR, 2017; KRESS, 2016).

Constante de marcos legais brasileiros afetos à Segurança e Defesa Nacionais, como a Política e Estratégia Nacionais de Defesa e o Livro Branco de Defesa Nacional, a prontidão é crítica no projeto de força. Isto porque orienta a seleção, a composição e a distribuição de arranjos militares, bem como sua organização no espaço territorial, em prol de requisitos que minimizem tempos de resposta no atendimento a demandas estatais. Níveis de prontidão refletem, assim, as metas da política de Defesa, bem como ajudam a justificar projetos de transformação organizacional, assim como programas de reaparelhamento e de modernização militar (JONDROW, 2014).

É de amplo conhecimento, no entanto, que o dimensionamento das forças armadas é produzido sem um projeto prévio, que articule e integre, em antecipação, conjuntos de capacidades orientadas para projetar poder com celeridade. Os patamares de prontidão militar atualmente são derivados, não de uma estrutura de força desenhada para gerar níveis elevados de pronta-resposta, mas sim de ajustamentos entre conceitos de operação (instância doutrinária) e acervos de ativos militares (instância tecnológica). Isto se deve, em grande medida, aos ônus técnicos e econômicos advindos de se alterar os desenhos organizacionais, durante o funcionamento das forças, especialmente no que toca à quantidade, à função e à localização das unidades militares, em prol de minimizar tempos de resposta de seus arranjos de força para ação em situações emergenciais.

Uma das estratégias, no escopo da Gestão de Defesa, capazes de aumentar o nível de prontidão militar, sem grandes mudanças na estrutura das Forças Armadas, é o repositonamento de ativos. Este compreende o processo de alocação antecipada de recursos militares, nas proximidades de sua provável aplicação, a fim de obter níveis de aprestamento que assegurem padrões tempestivos de reação na projeção de força (TRUNKEY, 2013; WOODHURST, 2012). Essa atividade, no entanto, demanda profunda capacidade analítica, não somente para a construção de modelo teórico

que represente adequadamente a prontidão, mas também para produzir e avaliar soluções para aferi-la, como combinações ótimas que encerram atributos de quantidade, de local e de tempo (BETTS, 1995; HERRERA, 2020). A inquietação emergiu, então, da atual ausência de meios analíticos que auxiliem planejadores militares brasileiros na otimização do preposicionamento de arranjos de força, em favor de maximizar o nível de prontidão logística, e desta estar preparada para dar conta de cenários de crise (não-combate), ou atendimento a hipóteses de emprego (combate).

Isto posto, este artigo tem por propósito identificar de que maneira o preposicionamento de ativos militares pode contribuir para maximizar a prontidão logística de um arranjo de força orientado para a condução de ações de combate ou de não-combate.

No intuito de responder a essa inquietude, foram elaboradas algumas questões norteadoras que, em conjunto aos objetivos específicos, ajudarão a responder ao objetivo geral dessa pesquisa:

- a) Quais ativos militares conformam arranjos de força empregados para a condução de ações de combate ou de não-combate?
- b) Quais variáveis intrínsecas aos arranjos de força caracterizam os níveis de prontidão logística em favor da condução de ações de combate ou de não-combate?
- c) Qual o nexó etiológico (relação de causalidade) existente entre as variáveis intrínsecas aos arranjos de força e o preposicionamento de ativos, e a maximização de níveis de prontidão logística?

A partir dessas questões norteadoras, a pesquisa objetiva propor um modelo de otimização matemática capaz de avaliar de que maneira o preposicionamento de ativos militares contribui para maximizar a prontidão logística de um arranjo de força orientado para a condução de ações de combate ou de não-combate. Para isso, propõem-se, como objetivos específicos, os seguintes (BERTRAND; FRANSOO, 2002; FERRAZ; BELHOT, 2010):

- a) Definir um modelo conceitual do problema, caracterizando seus elementos essenciais, indicando a forma como eles se articulam.
- b) Definir e justificar o método de pesquisa conveniente para resolver o problema de pesquisa, tendo por base as informações constantes da conceitualização.

- c) Construir um modelo científico (matemático) que equacione os elementos e as relações intrínsecos ao problema de pesquisa.
- d) Produzir experimentos no modelo científico, empregando o método selecionado, gerando soluções para o problema de pesquisa.
- e) Analisar e interpretar os resultados obtidos, à luz do atingimento do objetivo geral definido para a pesquisa.

A relevância deste estudo ancora-se na possibilidade de se aferir antecipadamente sucessos táticos advindos do posicionamento racional de arranjos de força orientados pela lógica da prontidão militar. Tais resultados poderão ajudar a validar decisões operacionais e estratégicas, nos ambientes de Segurança e Defesa, em panoramas que demandem o desdobramento de capacidades militares no território nacional, sob um regime de encurtamento de tempos de resposta.

As decisões operacionais em tela remetem à alocação ótima de ativos militares de toda ordem, como tropas, suprimentos, equipamentos (“pacotes de carga” a serem transportados), e até modais de transporte, na composição de unidades de resposta. Deliberações afetas ao posicionamento de aeronaves para redistribuir guarnições na fronteira, a partir de bases e aeródromos, em missões de socorro recaem sobre esta categoria. Neste contexto, resultados desse trabalho científico podem servir como ferramenta de planejamento de emprego militar.

As decisões estratégicas, por outro lado, afetam a estrutura de força, e sua arquitetura organizacional, esta um agregado de sistemas humanos, materiais, informacionais, infraestruturais e procedimentais, orientados para o propósito da Defesa Nacional. Avaliações de prontidão podem ajudar a justificar aquisições de aparatos bélicos, disciplinar a realocação de bases militares, ou até estabelecer requisitos de adestramento conjunto. Recaem nesta categoria, por exemplo, decisões relacionadas ao dimensionamento e à localização ideais de frações de tropas para atuarem como unidades de pronto-emprego. Neste contexto, os dados da pesquisa podem servir com ferramenta de gestão estratégica de força.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A presente seção, fracionada em duas partes, tem por propósito apresentar o recorte da literatura afeta à temática na qual o problema de pesquisa se aloja, bem como a estratégia metodológica orientada para a sua resolução. A primeira metade,

assim, apresenta aspectos teóricos relativos à prontidão militar, suas características e tipologias. A segunda metade, por outro lado, apresenta a técnica da otimização matemática, programação linear, selecionada e empregada para responder ao problema de pesquisa.

Para esta presente pesquisa, foram consideradas fontes de duas naturezas: livros impressos e periódicos acadêmicos eletrônicos. Esses últimos foram obtidos das seguintes bases de dados: *ScienceDirect*, *SAGE journals*, *Emerald insight*, *JSTOR*, *Defense Technical Information Center (DTIC)*, *U.S. Government Accountability Office (GAO)*, *Homeland Security Digital Library (HSDL)*, *Center for Naval Analyses (CAN)*, *Congressional Budget Office (CBO)* e o *Federation of American Scientists (FAS)*.

2.1 Prontidão Militar

A prontidão é um tema recorrente em âmbito militar, mas ainda fruto de pouca teorização. Apesar de sua importância no que toca ao nível de preparação de forças militares para responder a ações emergenciais (crises ou conflitos), não há consenso sobre sua definição, conformação e metodologia para mensurá-la. Isto é dos elementos que dificulta, em grande medida, o desenvolvimento de linhas de ação governamental em prol de estimar adequadamente o tamanho e a composição das Forças Armadas e, sequencialmente, corporificá-las (GAO, 2017; PERESTRELO, 2011).

As principais contribuições na área surgiram em instituições de pesquisas militares nos Estados Unidos, como o *Naval Postgraduate School* (GOLANY; KRESS, 2020; McLEMORE et al., 2021), o *National Defense University* (JUNOR, 2017), o *School of Advanced Military Studies* (NERI, 2019) e o *Center for Strategic & International Studies* (CANCIAN; DANIELS, 2018). Apesar das múltiplas abordagens, concernentes a formas de se criar e sustentar a prontidão militar, como tratativas relacionadas a imperativos tecnológicos, a posse de determinados sistemas materiais, a qualificação das lideranças, a maturidade gerencial e de aquisição, e até mesmo atualidade doutrinária, todos têm, entretanto, preservado o paradigma desenvolvido por Richard Betts.

O modelo conceitual selecionado, então, para orientar a pesquisa concentra-se em torno da contribuição teórica proposta por Richard K. Betts, Professor de Relações Internacionais da Universidade de Columbia, sobre prontidão militar. Em sua obra seminal, *Military Readiness: Concepts, Choices, Consequence* (1995), o autor define

prontidão militar como “capacidade no tempo”, termo normalmente afeto à habilidade de desdobrar rapidamente forças militares (BETTS, 1995). A obra busca responder a três perguntas básicas: i) *prontidão para quando?* ii) *prontidão para o quê?* e iii) *prontidão de quê?* Segundo Betts (1995), essas respostas podem ajudar na identificação de ameaças e dos tempos de alerta requeridos para uma reação efetiva, assim como na priorização dos componentes de força que requeiram preparação, em prol de altos patamares de prontidão (HARRISON, 2014; NERI, 2019).

A teoria de Betts (1995) foi a primeira a classificar a prontidão militar em três categorias básicas: operacional, estrutural e mobilizacional (Figura 1). A prontidão operacional reflete de perto a definição doutrinária do termo como o estado de preparação de uma unidade para realizar, de imediato, a missão para a qual foi preparada. A prontidão estrutural refere-se à capacidade potencial de unidades serem rapidamente desdobradas para o combate, a fim de enfrentar uma ameaça definida. Tem relação direta com a organização espacial de recursos a serem desdobrados, e os meios de transporte a serem empregados e, dessa forma, com a própria logística. A prontidão mobilizacional por fim, representa a capacidade nacional de conversão de recursos de tempo de paz em recursos de guerra, em prol de aumentar a prontidão estrutural (PERES-TRELO, 2011).

Figura 1 – Tipologias de Prontidão Militar.



Fonte: O autor.

Betts (1995) foi ainda o primeiro a estabelecer relações lógicas entre as variáveis que conformam a prontidão militar que, em tese, seriam necessárias para a sua mensuração, como massa, velocidade, eficácia e eficiência, no contexto do emprego militar (Quadro 1). Sua teoria atualmente corresponde ao paradigma que tem instruído, tanto estudos de índole analítica (BEST et al., 2020; GOLANY; KRESS, 2020; SOUTHERLAND; LOERCH, 2018) quanto inovações no gerenciamento de pessoal e treinamento de tropas, projetos de modernização tecnológica e organizacional, e até

programas de financiamento militar, afetando diretamente políticas de Defesa Nacional (GAO, 2016, 2020; JONDROW, 2014; JUNOR, 2017).

Quadro 1 – Sumário de Definições (Prontidão Militar).

Termo	Definição
Velocidade	Tempo no qual uma unidade desdobra para o combate.
Eficácia	Massa x eficiência em combate.
Massa	Capacidade potencial de uma força militar (unidades organizadas).
Eficiência	Grau do potencial das forças existentes.
Prontidão operacional	Velocidade x eficiência.
Prontidão estrutural	Velocidade x massa.
Prontidão mobilizacional	Bases econômicas e demográficas x base organizacional x planos de conversão.

Fonte: Betts (1995, p. 40).

As principais ideias contidas no corpo teórico em questão, e diretamente relacionadas à pesquisa, se resumem às seguintes: i) prontidão como variância de capacidade desdobrável, com desdobramento e tempo de resposta; e ii) categorização da prontidão estrutural como a organização de unidades intervenientes no deslocamento de meios. A primeira centraliza a relação temporal como determinante para os níveis de prontidão, a partir do atendimento de demandas em termos de tempo de reação; enquanto que a segunda concerne ao esqueleto de unidades que permite a rápida fusão de meios em prol de atender a acionamentos inopinados.

Considerando que graus de prontidão militar são o resultado da alocação estratégica de recursos materiais, como tropas, suprimentos e equipamentos, assim como do emprego eficiente de meios de desdobramento desses recursos, todos finitos por natureza, a obtenção da melhor configuração de resposta de uma Força Armada, demandará o emprego de ferramenta de otimização matemática, tendo em vista a natureza combinatória da seleção de emprego dos meios supracitados.

2.2 Programação Linear

A Programação Linear compreende uma técnica da pesquisa operacional, esta um ramo da matemática utilizada para fornecer base científica à tomada de decisão. A pesquisa operacional emprega lógica e técnicas analíticas para estudar o comportamento de sistemas em relação ao seu funcionamento geral como resultado de suas restrições funcionalmente interconectadas (HILLIER; LIEBERMAN, 2015). Ela surgiu

na Segunda Guerra Mundial, quando líderes britânicos solicitaram que cientistas buscassem soluções otimizadas para diversos problemas militares, estratégicos e táticos, como a implantação de radares, o planejamento da defesa antiaérea e o gerenciamento de operações de bombardeiros antissubmarino. Foi empregada, igualmente, na administração eficaz de alimentos, medicamentos e munição, recursos escassos no período de guerras (RAMAMURTHY, 2007; RARDIN, 2017).

O primeiro método de pesquisa operacional foi a Programação Linear, que emprega modelos expressos em termos de símbolos e expressões matemáticas para alocar recursos escassos entre atividades concorrentes. O termo *programação* refere-se a um procedimento sistemático, ou série de instruções computacionais para resolver o problema; enquanto que *linear* implica a condição de proporcionalidade e aditividade entre as expressões matemáticas. Os componentes básicos de um modelo de programação linear são (RAVINDRAN, 2019):

- a) Variáveis de decisão, que representam decisões quantificáveis inerentes ao problema, e cujos valores se deseja determinar.
- b) Restrições, que representam limitantes para os valores das variáveis de decisão, e que a solução do problema deve satisfazer.
- c) Função Objetivo, que representa a meta ou medida de desempenho que se busca otimizar (maximizar ou minimizar).

A formulação padrão de um modelo de programação linear pode ser identificada como segue:

Sejam x_1, x_2, \dots, x_n variáveis. É dada uma função linear de variáveis

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n, \quad (1)$$

chamada de função objetivo, a qual será maximizada ou minimizada. As variáveis x_j são sujeitas a um número de condições lineares, chamadas restrições, que assumem a forma

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n (\leq, =, \geq) b_i, \quad (2)$$

no qual $i = 1, 2, \dots, m$. Além disso, algumas variáveis podem ser restringidas, ou seja, não podem assumir quaisquer valores. O problema geral de programação linear, portanto, assume a seguinte forma (HILLIER; LIEBERMAN, 2015):

$$\text{Max } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \equiv c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

sujeito a:

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b_i \quad i = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

O formato padrão de representação matemática, e o empregado neste artigo, é apresentado abaixo:

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (5)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n a_{ji} x_i \leq b_j \quad (6)$$

$$x_i \geq 0, \quad \forall i \quad (7)$$

Resolver um problema de otimização empregando programação linear significa, então, determinar valores para as variáveis de decisão, de tal forma a otimizar uma função objetivo sem, no entanto, desrespeitar às restrições estabelecidas. Uma solução é considerada viável, ou seja, presente no espaço de solução, se satisfaz a todas as restrições, e será ótima se, além de viável, resultar no melhor valor possível (máximo ou mínimo) da função objetivo. Ressalta-se que todas as variáveis são de natureza determinística e contínua ($x_n \in \mathbb{R}, \forall n$); há apenas uma função objetivo; e todas as restrições são inequações lineares (RAVINDRAN, 2019; TAHA, 2016).

Para a solução de problemas de programação linear emprega-se o algoritmo *Simplex*, que é capaz de encontrar a solução ótima em um número finito de etapas. A técnica é um procedimento algébrico, e fundamenta-se na ideia de visitar os vértices de um polítopo (região contida em \mathbb{R}^n , de lados planos) convexo, com dimensão igual ao número de variáveis, a fim de encontrar os pontos de otimalidade. Se, no entanto, uma ou várias das variáveis for discreta ($x_n \in \mathbb{Z}, \forall n$), o modelo de otimização passa a ser denominado de Programação Linear Inteira, e emprega-se, para a sua resolução, outro algoritmo, como o de *Branch and Bound* (“ramificação e limite”). Esta técnica baseia-se na enumeração seletiva de todos os pontos viáveis, por meio do particionamento sucessivo do espaço de solução, e é capaz, como o *Simplex*, de oferecer soluções ótimas (TAHA, 2016).

Recentemente, a programação linear continua sendo usada para prover soluções para problemas militares, como para otimizar o direcionamento de redes multifluxos militares (LEE; CHO; PARK, 2019). No entanto, a maior parte dos problemas ainda emprega variáveis inteiras. Na atualidade, destacam-se aqueles que tratam da otimização de planos de pesquisa de itens em sistemas de armazenamento militar denso (AWWAD, 2018), da alocação programática de recursos e disciplinas em cursos militares (NGUYEN et al., 2018), de roteirização de missões de vigilância empregando aeronaves não tripuladas (MOSKAL II; BATTA, 2019), de desdobramento de forças para a condução de operações antissubmarinos (LAAN et al., 2019), de alocação de recursos para tropas de operações de paz (CHAUDRY et al., 2019), e de programação de barcos de patrulha sob condições de cobertura (CHIRCOP; SURENDONK, 2019).

3 METODOLOGIA

Tendo por base o objetivo exposto, a presente pesquisa pode ser classificada sob três rubricas. Quanto ao propósito geral, a pesquisa é descritiva, na medida em que buscará explicar, por meio de variáveis, modos de se mensurar níveis de prontidão logística, vinculado ao processo de preposicionamento de meios ativos militares. Quanto aos procedimentos metodológicos, classifica-se como experimental, pois tenciona estudar as variáveis afetas à prontidão, estabelecendo relações de causalidade com medidas de preposicionamento. E, quanto à natureza, a pesquisa classifica-se como aplicada, em função da finalidade de gerar conhecimentos para as ciências militares.

A pesquisa, assim, apresentará uma natureza quantitativa, e seu método envolverá a produção e a avaliação de um modelo de otimização matemática. Ele encerra as seguintes etapas fundamentais (RARDIN, 2017), em atendimento às questões norteadoras e aos objetivos específicos:

- a) Formulação do problema (modelagem conceitual e científica).
- b) Operação matemática (codificação e experimentação).
- c) Análise e interpretação (verificação e validação).

A primeira etapa envolve a formulação do problema, a qual abarcou, sequencialmente, o processo de conceitualização (desenho conceitual) e a construção do modelo quantitativo (tradução matemática do desenho conceitual). Neste sentido, são estabelecidas as variáveis relevantes que representam o fenômeno sob estudo, e as re-

lações causais entre eles. Com esta etapa, as questões norteadoras 1 e 2 são respondidas, assim como atendidos os objetivos específicos 1 e 2, visto que a justificação do método de resolução derivará da complexidade do modelo científico.

A segunda etapa envolve, sequencialmente, a programação matemática (codificação em linguagem computacional) e a resolução do modelo de otimização (experimentos). Do design experimental, constaram dois cenários de emprego hipotéticos, nos quais a mensuração da prontidão logística resulta da avaliação de efeitos das mudanças de localização de ativos militares e tempos de desdobramento, considerando ausência e presença do repositicionamento de meios. A experimentação será conduzida na plataforma de programação técnica, com parâmetros experimentais afetos às variáveis do modelo matemático, obtidos de fonte aberta. Exemplos desses parâmetros são a quantidade de ativos militares a serem desdobrados, e os tempos de trânsito entre unidades militares e sítios de operação. Os objetivos específicos 3 e 4 são atendidos nesta fase.

A terceira e última etapa envolve, sequencialmente, as ações de verificação-validação do modelo quantitativo, e a análise dos resultados obtidos. A primeira ação, em momento pós-experimental, afere a acurácia entre o modelo de otimização e o desenho conceitual, na qual são empregadas as técnicas de cheque de consistência e verificação preditiva. A primeira técnica avalia a conformidade do modelo a partir da análise das características da programação, linguagem e codificação, sem a necessidade de execução. A verificação preditiva, por outro lado, requer a execução do modelo matemático, e se fundamenta na comparação entre os resultados gerados pelo modelo e aqueles previstos teoricamente. A segunda ação, conseqüente à anterior, compreende a interpretação dos resultados de cada cenário, no contexto da descrição do problema, para verificar os efeitos do repositicionamento na otimização da prontidão logística de arranjos de força. Com esta etapa é respondida a questão norteadora 3, e atendido o objetivo específico 5.

Esta pesquisa limita-se, em essência, pelo arcabouço teórico selecionado, no que toca ao conceito de prontidão desenvolvido por Betts (1995) – “capacidade no tempo”. Na medida em que existem variadas definições e abordagens para o tema, assim também serão as tratativas metodológicas para resolver problemas a ele afetos. Como conseqüência, outras técnicas para se mensurar a prontidão logística poderão ser empregadas diferentes da conduzida neste trabalho.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

O presente capítulo é dividido em três partes. A primeira apresenta os resultados obtidos da aplicação do método estabelecido, no que tange à elaboração dos modelos conceitual e matemático. A segunda parte apresenta detalhes afetos à experimentação computacional e a base de dados empregada. E a terceira parte, em complemento, concentra-se em expor e discutir os resultados obtidos nos experimentos, assim como apresentar suas principais implicações.

4.1 Modelagens Conceitual e Científica

A primeira fase do método envolveu a representação esquemática do problema de pesquisa, em “objetos-modelo”, como pontos de referência para se entender os elementos e as estruturas de causalidade existentes. Nesta abstração, foram construídos dois modelos pictóricos, considerando cenários tipificados pela ausência e pela presença de bases de posicionamento. Esses cenários fundamentaram a construção dos modelos de otimização matemática que, quando comparados seus resultados, fornecem parâmetros para aferir a configuração de melhor prontidão logística militar.

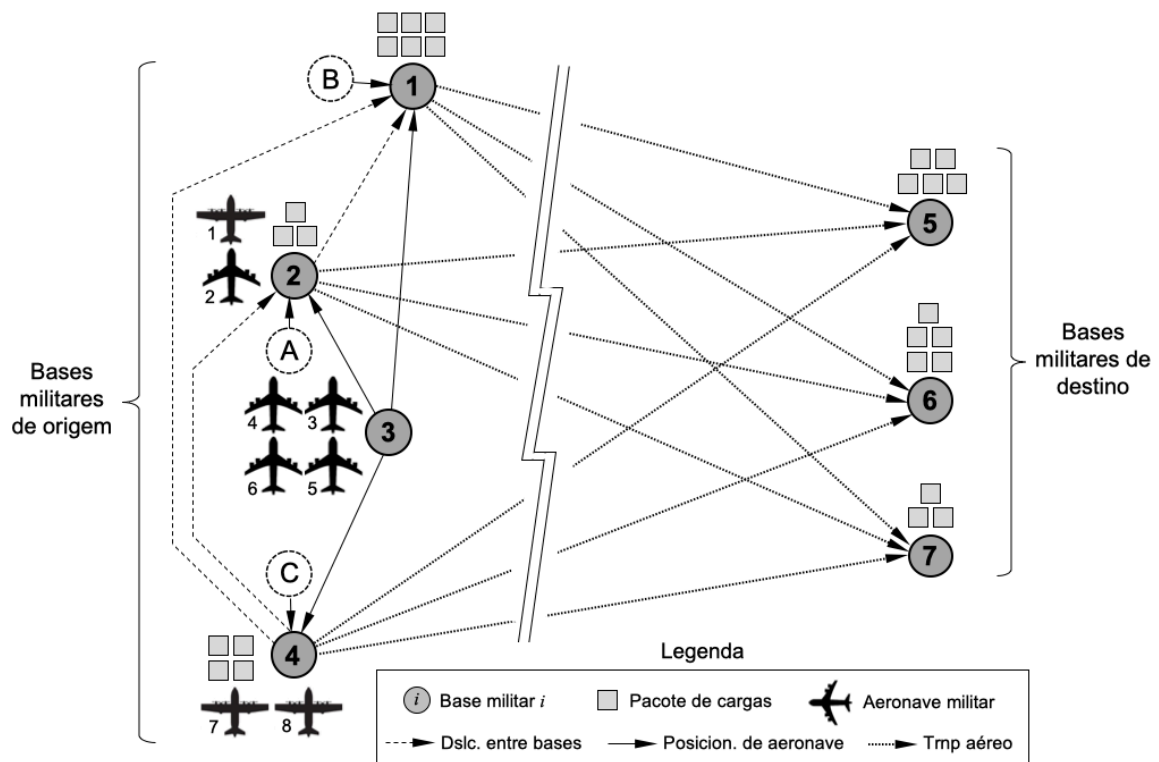
O modelo conceitual do primeiro cenário, conforme Figura 2, expõe uma realidade operacional caracterizada pelas seguintes condicionantes (variáveis-chave):

- a) Existência de duas categorias fundamentais de bases militares: i) bases de origem; e ii) bases de destino. A função das primeiras é prover suporte logístico às segundas, por meio da entrega direta de pacotes de carga, para emprego em ações de combate ou de não-combate, por meio aéreo.
- b) As bases de origem detêm recursos militares que envolvem: i) pacotes de carga, demandados pelas bases de destino; e ii) aeronaves militares, que realizarão o transporte dos pacotes.
- c) Os pacotes de carga são homogêneos, desvinculados entre si, não estando presentes em todas as bases militares de origem. A oferta e demanda por pacotes de carga se equilibram.
- d) Há dois tipos básicos de aeronaves de transporte, detentoras de diferentes velocidades e capacidades de carga.

- e) As bases de origem são heterogêneas, tanto em termos de pacotes de carga quanto de tipo e quantidade de aeronaves em sede. Bases militares sem carga podem deslocar suas aeronaves para resgatar pacotes em outras bases, a fim de apoiar as bases de destino.

Diante do contexto apresentado, deve-se selecionar a melhor combinação de aeronaves, pacotes de carga, origens e destinos, em prol de oferecer uma configuração que otimize a prontidão logística. Em outros termos, selecionar quais aeronaves transportarão quais pacotes de carga, de quais origens, e para quais destinos, de tal forma que a prontidão logística seja máxima. As bases de origem receberam designações sequenciais, de 1 a 4 – depósitos representados pelas letras A, B e C – e as bases de destino numeradas de 5 a 7, tendo as ofertas e demandas por pacotes de carga representados na Figura 2, conforme legenda. Da mesma forma, as aeronaves são também numeradas, de 1 a 8, e alocadas conforme ilustrado abaixo.

Figura 2 - Modelo Conceitual (Cenário 1).



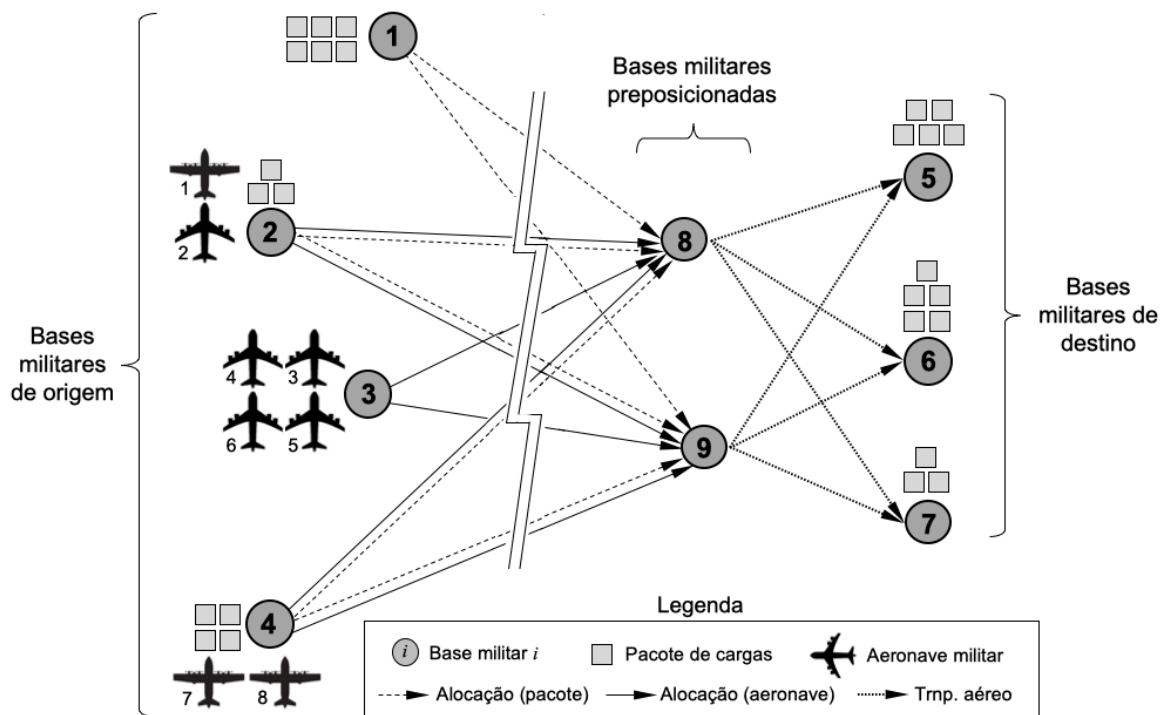
Fonte: O autor.

O modelo conceitual do segundo cenário, constante da Figura 3, diferente do primeiro, apresenta uma realidade caracterizada pela existência de bases militares de posicionamento de meios. Tipificam este cenário as seguintes condições:

- a) As bases militares preposicionadas estão posicionadas entre as bases de origem e as bases de destino.
- b) Às bases militares preposicionadas serão alocados aeronaves e pacotes de carga, constantes das origens, em prol de suportar as bases de destino.
- c) As demandas das bases de destino mantêm-se inalteradas, assim como a oferta de pacotes de carga nas bases de origem.
- d) Todos os pacotes de carga a serem entregues nas bases de origem provêm diretamente das bases preposicionadas.

Diante do contexto apresentado, e igualmente ao cenário 1, deve-se também selecionar a melhor combinação de aeronaves, pacotes de carga, origens e destinos que maximize a prontidão logística. Em outros termos, quais aeronaves e quantos pacotes de carga serão alocados a quais bases preposicionadas e, adicionalmente, quais bases de destino serão atendidas por quais aeronaves, transportando quantos pacotes de carga. Às bases de posicionamento foram atribuídos números 8 e 9, sendo mantidos os registros anteriores.

Figura 3 - Modelo Conceitual (Cenário 2).



Fonte: O autor.

Os modelos conceituais apresentados encerram as estratégias para comparar a prontidão logística. Por se caracterizarem como problemas de natureza combinató-

ria, só existe razão de cotejá-los se estiverem sob o mesmo regime de otimalidade. Ou seja, devem ser comparados tendo em vista suas melhores soluções. Para isso, buscar-se-á maximizar a prontidão logística militar, sendo esta interpretada, sob a lógica de Betts (“capacidade no tempo”), como a razão entre a quantidade total de carga transportada pelo tempo total gasto no transporte. Em outros termos, níveis ótimos de prontidão logística se expressam por máxima quantidade de carga deslocada em um mínimo intervalo de tempo.

4.2 Operação Matemática

Diante dos modelos conceituais apresentados, foram elaborados dois modelos de otimização matemática, construídos sobre os fundamentos da programação linear inteira – tendo em vista a integralidade de aeronaves e cargas.

4.2.1 Cenário 1

A primeira modelagem define-se formalmente com se segue:

Seja $\varepsilon = \{(i,j): i,j \in \nu, i \neq j\}$ o conjunto de arestas de um grafo $G = (\varepsilon, \nu)$, representando arcos que conectam bases militares, composto por um total de N pontos, $N = \{I \cup J \cup B\}$. O subconjunto I , de N , representa as bases de origem, as quais detém pacotes de carga armazenados em B , pontos vinculados diretamente à I , nas quantidades O_i (oferta de carga em i). Esses pacotes de carga serão entregues em J^+ , subconjunto de J , bases militares demandantes de carga, a fim de atender às respectivas demandas D_{j^+} . Para isto, serão empregadas aeronaves k ($k \in K$), com capacidades C_k predefinidas, oriundas de bases de origem, que poderão, inclusive, ser desprovidas de carga, I^* . Neste caso, aeronaves vazias poderão se deslocar para outras bases, a fim de recolher pacotes antes do destino final. A cada pacote de carga y_{ijk} , transportado entre o ponto i e o ponto j , ou j^+ , empregando aeronave k , é atribuído um tempo de deslocamento t_{ijk} , usado para calcular o valor da prontidão logística. Todos os deslocamentos aéreos sem carga serão penalizados, p_{i^*jk} , visto consumirem tempos de traslado, impactando na prontidão logística.

Diante da explanação, o objetivo resume-se em definir quais aeronaves serão empregadas em cada trajeto, transportando uma quantidade de pacotes específica, para atender às bases de destino, de tal forma que esta seleção maximize a prontidão

logística. Para esse propósito, são definidos, sequencialmente, os índices, os parâmetros, as variáveis estabelecidas e a composição do modelo matemático.

i) Índices:

$B = \{b\}$: conjunto de pontos artificiais, incidentes em i .

$I = \{i\}$: conjunto de pontos de origem i incidentes em j .

$I^* = \{i^*\}$: conjunto de pontos de origem i^* não detentoras de carga.

$J = \{j\}$: conjunto de pontos de destino j , oriundos de i ou i^* .

$J^+ = \{j^+\}$: conjunto de pontos de destino j^+ , oriundos de i , e que receberão cargas.

$K = \{k\}$: conjunto de aeronaves k .

ii) Parâmetros:

D_{j^+} : total de carga a ser recebida pelo ponto j^+ (demanda).

O_i : total de carga disponível no ponto i (oferta).

C_k : capacidade de carga da aeronave k .

t_{ijk}, t_{i^*jk} : tempo gasto para a aeronave k percorrer a distância entre i , ou i^* , e j .

iii) Variáveis:

y_{ijk} : carga total transportada entre os pontos i e j , empregando a aeronave k .

y_{bi} : carga disponível no ponto i , a ser transportada para o ponto j .

p_{i^*jk} : variável de penalização, por deslocamento da aeronave k sem carga, entre os pontos i^* e j .

S_{ijk} : variável binária empregada em restrições de ligação.

iv) Modelo matemático:

$$Max \sum_{i, i^* \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left[\left(\frac{y_{ijk}}{t_{ijk}} \right) - \left(\frac{p_{i^*jk}}{t_{i^*jk}} \right) \right] \quad \forall (i, i^*, j, k) \quad (8)$$

sujeito a:

$$y_{bi} \leq O_i \quad \forall (b, i) \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} y_{ij^+k} \leq D_{j^+} \quad \forall (i, j^+, k) \quad (10)$$

$$y_{bi} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} y_{ijk} = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} y_{ijk} \quad \forall (i, j, k) \quad (11)$$

$$y_{ijk} \leq C_k \quad \forall (i, j, k) \quad (12)$$

$$y_{ijk} \leq s_{ijk}M \quad \forall (i, j, k) \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} s_{ijk} \leq 1 \quad \forall (i, j, k) \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} s_{ijk} \leq 1 \quad \forall (i, j, k) \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} s_{ijk} \leq 1 \quad \forall (i, j, k) \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J} s_{ijk} = s_{i^*jk} \quad \forall (i, j, k) \quad (17)$$

$$\sum_{j \in J} s_{ijk} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} s_{ijk} \quad \forall (i, j, k) \quad (18)$$

$$y_{i^*jk} \leq s_{i^*jk}M \quad \forall (i^*, j, k) \quad (19)$$

$$p_{i^*jk} \geq \sum_{j \in J} y_{ijk} \quad \forall (i, i^*, j, k) \quad (20)$$

$$y_{bi}, y_{ijk}, p_{i^*jk} \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall (i, i^*, j, k) \quad (21)$$

$$s_{ijk}, s_{i^*jk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, i^*, j, k) \quad (22)$$

A função objetivo expressa em (8) denota a maximização da prontidão logística, traduzida pelo somatório das razões entre os pacotes de carga desdobrados e seus respectivos tempos, subtraída de penalizações afetas à deslocamentos sem carga. Para manter a dimensionalidade da expressão, cada penalidade corresponde a razão entre carga passível de transporte e o tempo gasto no traslado. As restrições (9) e (10) asseguram o atendimento à oferta, nas bases de origem, e à demanda, das bases de destino, por pacotes de carga. A restrição (11) garante o equilíbrio de fluxo na rede logística, permitindo que toda a carga das origens chegue aos destinos finais. A restrição (12) torna proibitivos transportes de carga acima das capacidades das aeronaves, enquanto que as restrições de (13) a (16), empregando variáveis de ligação, evitam que uma mesma aeronave seja empregada, simultaneamente, em mais de um trajeto. As restrições de (17) a (20) são usadas no cômputo das penalidades. A (17) e (18) garantem que, se houver deslocamento de aeronave a partir de base sem carga (aeronave vazia), haverá sequencialmente traslado de carga saindo da base (aeronave

cheia). A (19) e (20) vinculam esses deslocamentos em termos de capacidade de carga para quantificar as penalidades afetas aos deslocamentos vazios, sem agregação de valor para a prontidão. E, por fim, as restrições (21) e (22) tratam da integralidade das cargas e da binaridade das variáveis de ligação.

Finda a modelagem do cenário 1, apresenta-se a seguir o modelo matemático do cenário 2, contemplando, agora, bases de preposicionamento de meios.

4.2.2 Cenário 2

A segunda modelagem define-se formalmente com se segue:

Seja $\varepsilon = \{(i, j): i, j \in \nu, i \neq j\}$ o conjunto de arestas de um grafo $G = (\varepsilon, \nu)$, representando arcos que conectam bases militares, composto por um total de N pontos, $N = \{I \cup J \cup W\}$. O subconjunto I , de N , representa as bases de origem, que detém pacotes de carga e aeronaves que serão alocadas em W , bases de preposicionamento de meios. O subconjunto J , de N , representa as bases de destino que demandam, cada qual, uma quantidade de carga D_j . Para este suporte, serão empregadas aeronaves k ($k \in K$), originárias de W , com capacidades C_k . A cada pacote de carga transportado é atribuído um tempo de deslocamento t_{wjk} .

Igualmente ao modelo do cenário 1, o objetivo também se resume a definir quais aeronaves serão empregadas em cada trajeto, transportando pacotes de carga para atender às bases de destino, em favor de maximizar a prontidão logística. Os índices, parâmetros e variáveis empregados no modelo encontram-se na sequência:

i) Índices:

$I = \{i\}$: conjunto de pontos de origem i incidentes em w .

$W = \{w\}$: conjunto de pontos intermediários entre w e j .

$J = \{j\}$: conjunto de pontos de destino j .

$K = \{k\}$: conjunto de aeronaves k , alocadas em w , com destino a j .

ii) Parâmetros:

D_j : total de carga a ser recebida pelo ponto j (demanda).

O_i : total de carga disponível no ponto i (oferta).

C_k : capacidade de carga da aeronave k .

t_{wjk} : tempo gasto para a aeronave k percorrer a distância entre w e j .

iii) Variáveis:

x_{iw} : carga total alocada no ponto w , oriunda do ponto i .

y_{wjk} : carga total transportada para o ponto w , a partir de j , pela aeronave k .

s_{wjk} : variável binária empregada em restrições de ligação.

iv) Modelo matemático:

$$\text{Max} \sum_{w \in W} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left(\frac{y_{wjk}}{t_{wjk}} \right) \quad \forall (w, j, k) \quad (23)$$

sujeito a:

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K} y_{wjk} \leq D_j \quad \forall (w, j, k) \quad (24)$$

$$\sum_{w \in W} x_{iw} \leq O_i \quad \forall (i, w) \quad (25)$$

$$y_{wjk} \leq C_k \quad \forall (w, j, k) \quad (26)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{j \in J} s_{wjk} = 1 \quad \forall (w, j, k) \quad (27)$$

$$y_{wjk} \leq s_{wjk} M \quad \forall (w, j, k) \quad (28)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} y_{wjk} = \sum_{w \in W} x_{iw} \quad \forall (i, j, w, k) \quad (29)$$

$$x_{iw}, y_{wjk} \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall (i, j, w, k) \quad (30)$$

$$s_{wjk} \in \{0, 1\} \quad \forall (w, j, k) \quad (31)$$

A função objetivo expressa em (23) denota maximização da prontidão logística em consideração, traduzida pelo somatório da razão entre os pacotes de carga desdobrados para o destino final e seus respectivos tempos para cumprir esta tarefa, a partir de bases preposicionadas. As restrições (24) e (25) compreendem atendimento às condicionantes de demanda e oferta pelos pacotes de carga. Em (26) tem-se que os pacotes de carga transportados em cada viagem não ultrapassem a capacidade da aeronave. As restrições (27) e (28) visam garantir que uma mesma aeronave não seja empregada para entregar pacotes em diferentes pontos simultaneamente. A restrição (29), de equilíbrio de fluxo, assegura que nenhum pacote de carga permaneça na base preposicionada. E, por fim, a restrição (30) garante a não-negatividade dos valores

das cargas alocadas e transportadas, enquanto que em (31) encontram-se as restrições de binaridade para as variáveis de ligação.

Para fins de experimentação, foram empregadas informações públicas, fundadas em situações de emprego hipotético, porém realístico, para o posicionamento de bases militares, quantidade de aeronaves e de pacotes de carga, ofertados (O_i) e demandados (D_j e D_{j^+}), constantes do Quadro 2. Para ambos os cenários foram creditados dois tipos de aeronaves, com capacidades de carga, C_k , de 04 pacotes para aquelas do grupo 1, e de 02 pacotes para as do grupo 2. Os tempos de deslocamento entre as bases, calculados com base nas distâncias geodésicas, e velocidades arbitrárias de 475km/h e 870km/h, respectivamente, para as aeronaves do grupo 1 e 2, encontram-se nas Tabelas 1 e 2. Para a construção da matriz de adjacências – ligação entre as bases – e para a alocação das aeronaves por tipo nas bases militares, foram considerados os dados constantes dos modelos conceituais já apresentados.

Quadro 2 – Dados sobre as Bases Militares.

Pontos	Localidades	Sigla ICAO	Quant. aeronaves	Pacotes (un.)	
				Oferta	Demanda
1	São Paulo	SBGR	----	6	----
2	Rio de Janeiro	SBGL	3	3	----
3	Anápolis	SBAN	4	----	----
4	Campo Grande	SBCG	2	4	----
5	Manaus	SBEG	----	----	5
6	Tefé	SBTF	----	----	5
7	Belém	SBBE	----	----	3
8	Porto Velho	SBPV	----	ASD	----
9	Itaituba (Cachimbo)	SBCC	----	ASD	----

Fonte: O autor.

Nota: ASD (a ser definido): calculado pelo modelo matemático.

Tabela 1 – Tempos de Deslocamento, em horas (aeronaves do grupo 1).

Pontos de Origem	Pontos de Destino						
	1	2	3	4	5	6	7
1	----	0,7	2,0	1,9	5,7	6,2	5,1
2	0,7	----	1,8	2,5	5,9	6,6	5,3
3	2,0	1,8	----	1,6	----	----	3,5
4	1,8	0,7	1,9	----	4,2	4,6	4,6
8	----	----	----	----	1,6	1,3	4,0
9	----	----	----	----	1,9	2,7	2,3

Fonte: O autor.

Tabela 2 – Tempos de Deslocamento, em horas (aeronaves do grupo 2).

Pontos de Origem	Pontos de Destino						
	1	2	3	4	5	6	7
1	----	0,4	1,1	1,0	3,1	3,4	2,8
2	0,4	----		1,4	3,2	3,6	2,9
3	1,1	1,0	----	0,9	----	----	1,9
4	1,0	0,4	1,0	----	2,3	2,5	2,5
8	----	----	----	----	0,9	0,7	2,2
9	----	----	----	----	1,0	1,5	1,2

Fonte: O autor.

A homogeneidade experimental foi assegurada resguardando a execução de todos os testes empregando-se um único algoritmo – *Branch and Bound*, devido à integralidade das variáveis – de um único software de computação técnica, *Wolfram Mathematica*, e em um mesmo computador portátil, detentor de processador 2,53GHz, Intel Core i5, com 8GB memória RAM, para ambos os cenários estabelecidos.

4.3 Análise e Interpretação

Antes da execução computacional, foi conduzida a verificação do modelo por cheque de consistência, a fim de assegurar a logicidade e correção dos dados. Conforme apresentado na sequência (8) a (31), as expressões matemáticas representam semanticamente as regras que governam o fenômeno, sendo compatíveis com o modelo conceitual. Para a verificação preditiva foram empregados valores cuja magnitude oportunizassem a antecipação de resultados, para aferir a fidelidade da lógica computacional. Foram empregados, para esse fim, valores extremos e alteração nas grandezas das constantes, sob diferentes instâncias para cotejamento de resultados.

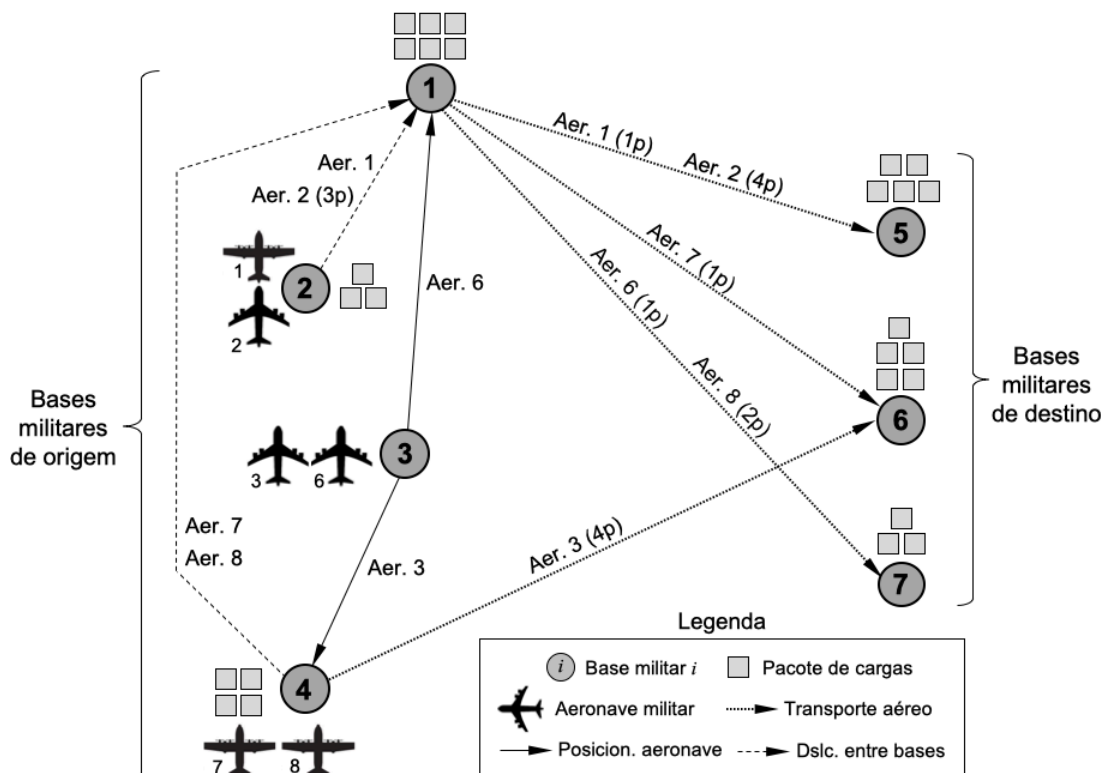
Os resultados obtidos a partir da execução dos modelos encontram-se na Tabela 3, em termos de valor da prontidão e tempo de processamento computacional. Nas próximas páginas, as Figuras 4 e 5 detalham as soluções encontradas, apresentando as aeronaves empregadas em cada rota, assim como as respectivas cargas transportadas, em termos de origens e destinos

Tabela 3 – Mensuração da Prontidão (pacotes/hora).

Cenário	Preposicionamento	Valor da Prontidão (p/h)	Tempo computacional (s)
1	Não	6,12282	0,094787
2	Sim	15,19840	0,029153

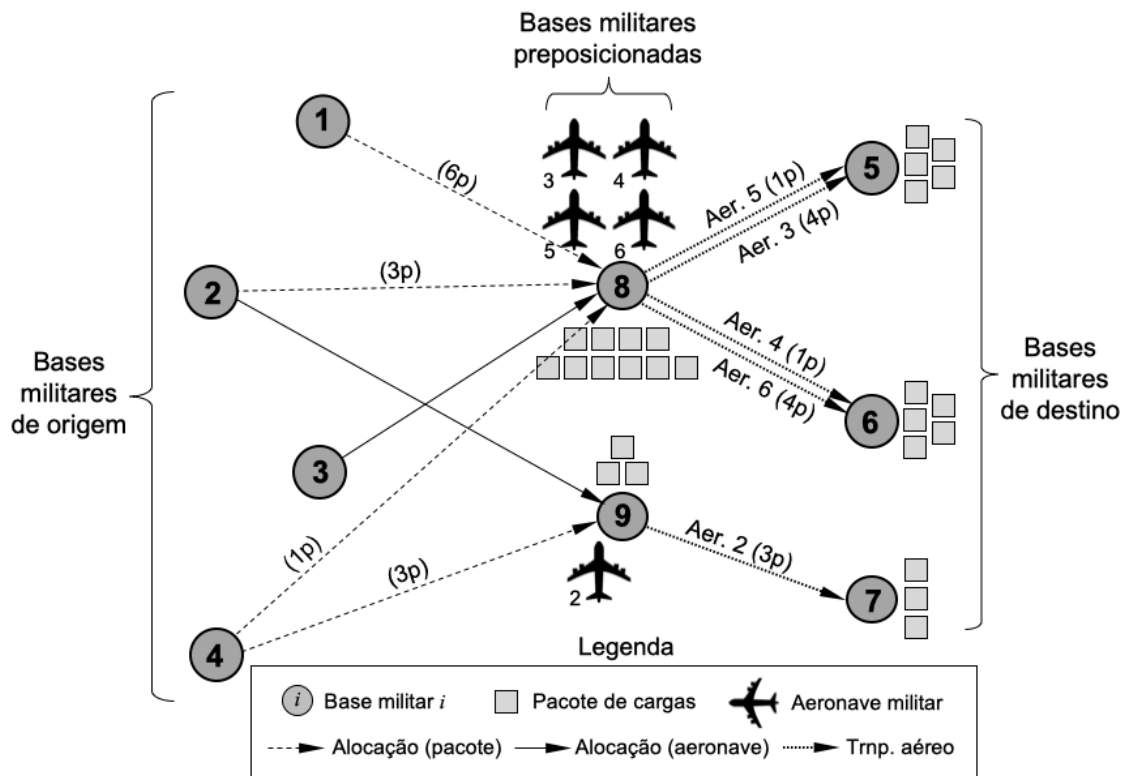
Fonte: O autor.

Como mostrado na Tabela 3, o cenário 1, caracterizado pela ausência de meios preposicionados, apresenta valor de prontidão inferior ao do cenário 2. Isso se deve, especialmente, às pequenas distâncias a serem percorridas com o preposicionamento e a seleção otimizada de aeronaves. Entretanto, não obstante a confirmação de uma solução já presumida, em termos de efetividade de se preposicionar meios para acelerar entregas, os modelos matemáticos, em conjunto, oferecem uma possibilidade de valoração (magnitude) dos níveis de prontidão dos cenários logísticos militares sob análise. Isto se mostra particularmente relevante para decisores que precisam validar, ou justificar quantitativamente, alternativas de emprego de arranjos de força, pois lhe faculta expor quais e como ferramentas de apoio à decisão, fundamentados sobre paradigmas científicos, ajudaram a instruir a seleção ótima entre opções competitivas.

Figura 4 – Solução Gráfica (Cenário 1).

Fonte: O autor.

Figura 5 – Solução Gráfica (Cenário 2).



Fonte: O autor.

Os principais aspectos operacionais observados na primeira solução foram: i) opção por empregar todas as aeronaves em sede (bases 2 e 4), a fim de reduzir penalizações por deslocamentos vazios, ao invés de optar somente pelas aeronaves mais velozes; ii) seleção de aeronaves adicionais para atender à demanda total (aeronaves oriundas da base 3); iii) otimização dos compartimentos de carga a fim de assegurar máximo traslado de carga; iv) deslocamentos de aeronaves e concentrações na base de maior oferta de pacotes (base 1), a qual proveu suporte a todas bases de destino; e v) viagem para completamento de carga, em prol de otimizar a viagem, recolhendo pacotes em duas bases, empregando a mesma aeronave (aeronave 2). Essas ações, além de validar o modelo proposto, emulam missões que também ocorrem em circunstâncias reais.

Sobre o mesmo entrecho, os principais aspectos operacionais observados na segunda solução foram: i) preponderância de alocar, nas bases de preposicionamento, somente as aeronaves mais velozes, e de maior capacidade, aumentando a carga transportada e reduzindo os tempos de deslocamentos (aeronaves 2 a 6); ii) seleção das bases de preposicionamento mais próximas para aos destinos para alocar as cargas e atender às respectivas demandas, em favor de diminuir tempos de trânsito (base

8, Porto Velho, apoia as bases 5 e 6, Manaus e Tefé; base 9, Cachimbo, apoia base 7, Belém); e iii) maximização dos compartimentos de carga, e emprego total da capacidade das aeronaves (aeronaves 3 e 6). Igualmente ao resultado anterior, apresentado no cenário 1, essas ações ajudam a validar este segundo modelo, ratificando sua utilidade para uso em planejamentos de força e de emprego operacional em situações de crise.

As soluções encontradas, assim, ajudaram a responder ao problema de pesquisa, afeto à maneira como o preposicionamento de ativos militares contribui para maximizar a prontidão logística de arranjos de força. Isto foi obtido pela integração do modelo teórico desenvolvido por Richard Betts (1995), para a prontidão militar, e o emprego de modelos matemáticos de programação linear, que deram conta da complexa estrutura de relacionamentos existente entre as variáveis que circunscrevem a problemática da alocação e transporte de recursos físicos. Por fim, o expediente de dados gerados, evidenciados nos resultados operacionais supracitados, conferiram um pragmatismo executivo ao processo de planejamento e gestão estratégica de capacidades de força militar, com a limitação de estarem restritos especialmente no emprego otimizado de vetores de transporte aéreo.

Diante do exposto, as principais implicações do emprego dos modelos de otimização na mensuração da prontidão logística militar se apresentam como as seguintes possibilidades:

- a) Fundamentar quantitativamente decisões para preposicionar meios militares (quanto e onde), em prol de altos níveis de prontidão logística.
- b) Selecionar bases militares para o preposicionamento de pacotes de carga (tropas, suprimentos, equipamentos) em função de sua contribuição para a prontidão logística.
- c) Comparar o emprego de diferentes combinações de vetores aéreos para a prontidão logística, conforme atributos intrínsecos (velocidade e capacidade de carga) e seus posicionamentos nas bases consideradas.
- d) Compreender, a partir de comprovações científicas, como diferentes combinações de meios, restringidos espacial e temporalmente, podem afetar, tanto positiva quanto negativamente, a capacidade de resposta militar.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo foi propor um modelo de otimização matemática capaz de avaliar como o repositonamento de ativos militares contribui para maximizar a prontidão logística de arranjos de força orientados para conduzir ações de combate ou de não-combate. Sua gênese emergiu da ausência de meios analíticos que auxiliassem planejadores militares a aferir a prontidão no contexto em questão, impactando no preparo das Forças Armadas para lidar com cenários regidos pelo deslocamento emergencial de recursos físicos. Neste sentido, foram consideradas questões norteadoras, que delinearam aspectos conformacionais da natureza do problema, e definidos objetivos específicos, orientados para a produção de uma solução quantitativa.

Para fundamentar cientificamente a pesquisa, foram considerados dois marcos teóricos. O primeiro, afeto à teoria da prontidão militar desenvolvida por Richard Betts (1995), delimitou o escopo de abordagem da prontidão militar como “capacidade no tempo”, e a vertente logística como prontidão de natureza estrutural. Esse referencial forneceu os alicerces para a definição das variáveis-chaves que definem o fenômeno sob estudo. O segundo marco, relativo ao processo metódico de resolução quantitativa, considerou a técnica da programação linear, na construção e resolução de modelos de otimização matemáticos, para lidar com o aspecto combinatório (múltiplas soluções) que tipifica problemas de índole logística.

Por meio do algoritmo exato de *Branch and Bound*, experimentos computacionais foram conduzidos, tendo em conta dois cenários hipotéticos que emulavam condições operacionais de ausência e presença de ativos militares repositonados. Foram empregados dados ostensivos (distâncias, capacidades, demandas etc) condizentes ao quadro operacional, para fins de comparação de resultados. A modelagem mostrou numericamente que o repositonamento aumenta sobremaneira o nível de prontidão logística, na medida em que aproxima os ativos militares dos pontos de consumo, além de otimizar o emprego das aeronaves mais velozes, conforme a seleção de cargas, maximizando a razão entre a carga total entregue e o tempo decorrido no processo.

As principais contribuições desta pesquisa se encontram, tanto na proposição de uma ferramenta analítica de planejamento estratégico-operacional, visando a uma distribuição ótima e célere de meios (aéreos e pacotes de cargas) em casos emergenciais, quanto ao planejamento e *design* de força. Suas implicações envolvem direta-

mente a mensuração da prontidão para suportar racionalmente decisões relacionadas ao posicionamento logístico, a escolha e a alocação espacial de aeronaves. Em última instância, podem abarcar o desenho de pacotes de carga militar, como tamanho e composição ideal de tropas, suprimentos e equipamentos, com o intuito de maximizar o potencial de seus deslocamentos aéreos e, por consequência, a prontidão logística.

À guisa de conclusão, como recomendação para a continuidade desta pesquisa, são sugeridas abordagens que tornem mais complexo, completo e realista o cenário operacional em questão. As principais propostas, no contexto da prontidão logística, posicionamento de ativos, e uso de modelos de otimização, envolvem: i) estabelecer requisitos que vinculem pacotes de cargas a serem transportados, de forma tal que certos fardos devam acompanhar outros para os destinos finais; ii) estabelecer requisitos de chegada temporal, simultânea ou sequencial, de forma a não sobrecarregar a gestão dos descarregamentos nos terminais de carga; iii) estabelecer requisitos que permitam o estabelecimento de ponte aérea entre as bases, analisando circunstância com poucos vetores disponíveis; e iv) estabelecer requisitos que simulem espera de aeronaves quando em chegadas simultâneas, emulando filas e atrasos que podem ocorrer em condições reais, os quais penalizam (reduzem) os patamares de prontidão logística.

Ao finalizar este trabalho, é oportuno reafirmar a importância do tema, momentaneamente no âmbito da Logística Aeroespacial, para o planejamento e gestão das capacidades de sustentação de arranjos de força desdobrados. Entende-se que a construção de alternativas de futuro exitosas, e a realização das possibilidades estratégicas do uso eficiente dos vetores aéreos em prol da logística, passa irremediavelmente por investimentos antecipatórios na análise e na avaliação crítica dos problemas operacionais. Isto visa, em última instância, instruir a produção de decisões militares cientificamente educadas, que otimizem atingimento dos objetivos militares estabelecidos, mas com uso inteligente e racional dos recursos disponíveis.

REFERÊNCIAS

- AWWAD, Mohamed. Search Plan for a Single Item in an Inverted T k-Deep Storage System. **Military Operations Research**. v. 23, n. 1, p. 5-22, 2018. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26373798>. Acesso em 12 abr 2021.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations Management Research Methodologies using Quantitative Modeling. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 22, p. 241-264, 2002. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/publication/issn/0144-3577>. Acesso em: 23 maio 2021.
- BEST, Katharina Ley.; MIKOLIC-TORREIRA, Igor; CHONDE, Seifu. Developing an Analytical Method for Assessing Readiness, Risk, and Opportunity. **Military Operations Research**. v. 25, n. 4, p. 5-21, 2020. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26957613>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- BETTS, Richard K. **Military Readiness: Concepts, Choices, Consequences**. Washington DC: The Brookings Institution, 1995.
- CANCIAN, Mark F.; DANIELS, Seamus P. **The State of Military Readiness: Is There a Crisis?** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/state-military-readiness-there-crisis>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- CHAUDRY, Nadia; VERMEDAL, Ingunn, FAGERHOLT, Kjetil; FUSKER, Maria Fleischer; SALHANE, Magnus. A Decomposition Approach to the Troops-to-Task Assignment in Military Peacekeeping Operations. **The Journal of Defense Modeling and Simulation**. v. 17, n. 4, p. 357-371, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1548512919875230>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- CHIRCOP, Paul A.; SURENDONK, Timothy J. On Integer Programming Formulation of a Patrol Boat Scheduling Problem with Complete coverage Requirements. **The Journal of Defense Modeling and Simulation**. v. 17, n. 4, p. 419-434, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1548512919883955>. Acesso em: 17 abr. 2021.
- FERRAZ, Ana Paula do Carmo Marcheti; BELHOT, Renato Vairo. Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais. **Gestão & Produção**. versão *online*. v. 17, n. 2, p. 421-431, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-530X2010000200015&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 10 abr. 2021.
- GAO (Government Accountability Office). Military Readiness: DoD's Readiness Efforts May Be at Risk Without a Comprehensive Plan. **Report to Congressional Committees**. GAO-16-841, 2016. Disponível em: <https://www.gao.gov/products/gao-16-841>. Acesso em: 11 abr 2021.

GAO (Government Accountability Office). Defining Readiness: Background and Issues for Congress. **Congressional Research Service**. R44867, 2017. Disponível em: <https://fas.org/sgp/crs/natsec/R44867.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2021.

GAO (Government Accountability Office). The Fundamentals of Military Readiness. **Congressional Research Service**. R46559, 2020. Disponível em: <https://fas.org/sgp/crs/natsec/R46559.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2021.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6a. ed. Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2017.

GOLANY, Boaz; KRESS, Moshe. Measuring Readiness and Sustainment within Analysis of Alternatives in Military Systems Acquisition. **Military Operations Research**. v. 25, n. 4, p. 63-77, 2020. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26957616>. Acesso em: 12 abr 2021.

HARRISON, Todd. Rethinking Readiness. **Strategic Studies Quarterly**. Washington: Center for Strategic and Budgetary Assessments. v. 8, n. 3, 2014. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/pdf/26270619.pdf?refreqid=excelsior%3A21dbb3f92ab4f6600258e340be6093dc>. Acesso em: 12 abr. 2021.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMANN, Gerald J. **Introduction to Operations Research**. 10. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

HERRERA, G. James. The Fundamentals of Military Readiness. **Congressional Research Service**. R46559, 2020. Disponível em: <https://fas.org/sgp/crs/natsec/R46559.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2021.

JONDROW, Jim. **Military Readiness, Budget Programming and Economic Theory**. CPP-2014-U-007332-Final. Virginia: Center for Naval Analyses, 2014. Disponível em: https://www.cna.org/CNA_files/PDF/ CPP-2014-U-007332-Final.pdf. Acesso em: 14 abr. 2021.

JUNOR, Laura J. Managing Military Readiness. **Strategic Perspectives**. v. 23, Institute for National Strategic Studies. National Defense University, 2017. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1030355.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2021.

KRESS, Moshe. **Operational Logistics: The Art and Science of Sustaining Military Operations**. 2. ed. New York: Springer, 2016.

LEE, Chungmok; CHO, Donghyun; PARK, Sungsoo. A Combinatorial Benders Decomposition Algorithm for the Directed Multiflow Network Diversion Problem. **Military Operations Research**. v. 24, n. 1, p. 23-39, 2019. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26609633>. Acesso em: 12 abr. 2021.

McLEMORE, Connor; DOHENEY, Shaun; SAVAGE, Sam; FAHRINGER, Philip. Military Readiness Modeling: Changing the Question from “Ready or Not?” to “How Ready for What?”. **Military Operations Research**. v. 26, n. 1, 2021. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26995956>. Acesso em: 12 abr. 2021.

MOSKAL II, Michael D.; BATTÀ, Rajan. Adaptive Unmanned Aerial Vehicle Surveillance Using a Prize-Collecting Vertex Routing Model. **Military Operations Research**. v. 24, n. 4, p. 5-22, 2019. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26853510>. Acesso em: 12 abr. 2021.

NERI, Philip B. **Emergence of Readiness**: The Efforts that Generate and Consume Ready Forces. 2019. Monografia – Mestrado em *Military Science*, US Army Command and General Staff College, 2019. Disponível em: <https://www.hsdl.org/?view&did=832299>. Acesso em: 10 abr. 2021.

NGUYEN, Vivian; MORAN, Bill; NOVAK, Ana; CAELLI, Terry; MAK-HAU, Vicky; HILL, Brendan; KIRSZENBLAT, David. Dancing Links for Optimal Timetabling. **Military Operations Research**. v. 23, n. 2, p. 61-77, 2018. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26553358>. Acesso em: 11 abr. 2021.

PERESTRELO, Carlos Alberto Grincho Cardoso. **O Paradigma da Prontidão**. 2011. Trabalho de Investigação Individual – Curso de Promoção a Oficial General, Instituto de Estudos Superiores Militares, Lisboa, Portugal, 2011. Disponível em: https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/12008/1/TII_COR_Perestrelo.pdf. Acesso em: 11 abr. 2021.

RAMAMURTHY, P. **Operations Research**. 2. ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2007.

RAVINDRAN, A. Ravi (Ed). **Operations Research Methodologies**. New York: CRC Press, 2019.

RARDIN, Ronald L. **Optimization in Operations Research**. 2. ed. New York: Pearson Higher Education, Inc. 2017.

SOULTHERLAND, Jason; LOERCH, Andrew. Using Approximative Dynamic Programming to Model Military Force Mix Adaptation. **Military Operations Research**. v. 23, n. 4, 2018. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26553095>. Acesso em: 14 abr. 2021.

TAHA, Hamdy A. **Operations Research: An Introduction**. 10. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2016.

TRUNKEY, R. Derek. **Implications of the Department of Defense Readiness Reporting System**. Working Paper 2013-03, Congressional Budget Office, 2013. Disponível em: <https://www.cbo.gov/publication/44127>. Acesso em: 13 abr. 2021.

WOODHURST, Melinda S. **Department of Defense Pre-Positioning Programs: A Springboard for Deployments**. BiblioScholas, 2012. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA429752>. Acesso em: 14 abr. 2021.