LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Eficiência do Transporte Aéreo na Amazônia: Reduzindo Custos e Tempo com Pesquisa Operacional

MARIO VISCARDI FILHO
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Praça Mal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos-SP
viscardi@ita.br

SÉRGIO REBOUÇAS
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Praça Mal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos-SP
reb@ita.br

ANGELO PASSARO
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Praça Mal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos-SP
angelopassaro@gmail.com

RESUMO

Para manter a soberania do Brasil na Amazônia, o Exército Brasileiro mantém Pelotões Especiais de Fronteira (PEF) em locais remotos, cujo abastecimento de materiais básicos é realizado principalmente pelo modal aéreo, com apoio da Força Aérea Brasileira. Utilizando os conceitos dos Problemas de Empacotamento da Pesquisa Operacional, o trabalho apresenta uma proposta para aumentar a eficiência das operações de suporte aos PEFs por meio de um modelo matemático para o carregamento das aeronaves nas viagens. O modelo proposto demonstrou uma redução significativa no número de viagens necessárias, otimizando a distribuição de carga e o tempo de operação. O estudo destaca a eficiência alcançada com a aplicação de um processo, considerando a utilização de um modelo de otimização exata e um algoritmo híbrido de alto desempenho, em um estudo de caso aplicado para os PEFs de Surucucu e Auaris, contribuindo para a redução de custos operacionais.

PALAVRAS CHAVE. Pesquisa Operacional, Problemas de Empacotamento, Modelagem Matemática.
Tópicos: PO em Defesa e Segurança Pública, Logística e Transportes (L&T).

ABSTRACT

To maintain Brazil's sovereignty in the Amazon, the Brazilian Army operates Special Border Platoons (PEF) in remote locations. The supply of basic materials is primarily carried out by air, supported by the Brazilian Air Force. Utilizing the concepts of Packing Problems from Operations Research, this work proposes to increase the efficiency of support operations to the PEFs through a mathematical model for aircraft loading during trips. The proposed model significantly reduced the number of trips needed, optimizing cargo distribution and operation time. The study highlights the efficiency achieved by applying a process that considers using an exact optimization model and a high-performance hybrid algorithm in a case study applied to the PEFs of Surucucu and Auaris, contributing to reducing operational costs.

KEYWORDS. Operational Research, Bin Packing Problem, Mathematical Modeling.
Topics: Operational Research in Defense and Public Safety (D&SP), Logistics and Transport (L&T).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

1. Introdução

Para manter a integração e salvaguardar a defesa do território nacional o Exército Brasileiro (EB) dispõe de pelotões distribuídos em pontos estratégicos de fronteira chamados de Pelotões Especiais de Fronteira (PEF).

O Comando Militar da Amazônia (CMA) do EB tem como missão a segurança da fronteira amazônica. Para cumprir essa missão, o CMA dispõe dos Batalhões de Infantaria de Selva (BIS), que estão estrategicamente localizados em toda a área da região amazônica do país. Cada BIS tem sob seu comando a quantidade necessária de PEF, garantindo o controle territorial da área sob sua responsabilidade [Moraes 2021].

Isolados em meio à selva amazônica, a sobrevivência dos militares que compõem esses pelotões depende diretamente de um trabalho conjunto do EB com a Força Aérea Brasileira (FAB) pois, em alguns casos, a única forma de se ter acesso ao pelotão é pelo modal aéreo. Através das aeronaves C-98A Grand-Caravan e C-105 Amazonas, a FAB provê a maior parte do suprimento enviado para essas localidades, valendo-se do Plano de Apoio à Amazônia (PAA) [Dantas e Silvestre 2020]. Os voos têm sua origem no BIS correspondente, que serve como ponto central de distribuição dos víveres e itens essenciais. Em muitas localidades, devido ao pouco espaço disponível para se construir a pista, o C-98A é o único avião da FAB capaz de conseguir realizar pousos e decolagens.

Devido às limitações de carregamento da aeronave e a grande quantidade de carga destinada aos PEFs, é necessária a realização de várias viagens para que toda a carga seja entregue ao seu destino. Um ponto também relevante nesse processo é o cálculo de distribuição da carga para o carregamento da aeronave, o qual é realizado de forma empírica. Não existe hoje um estudo voltado para um aproveitamento máximo da quantidade de material a ser carregado, a sua discriminação por peso e uma relação com a capacidade da aeronave. Como resultado, a aeronave realiza um número grande de viagens gerando um custo elevado para essa operação.

Diversos estudos acadêmicos visam maximizar os recursos na segurança pública devido à sensibilidade de suas operações e ao potencial de ampliar a eficácia. Isso inclui a otimização de rotas de resgate [Rebouças et al. 2022] e missões de transporte de carga [Viscardi et al. 2023].

Na literatura científica problemas de carregamento de veículos são objeto de estudos há bastante tempo e conhecidos como Problema de Empacotamento (BPP – do inglês *Bin-Packing Problem*). O BPP consiste na acomodação do número máximo de carga em um número mínimo de pacotes ou *bins* [Nakano et al. 2018], neste caso, aeronaves. No entanto, os BPP podem se apresentar intratáveis ou inviáveis de resolver exatamente. Para estes casos são utilizadas heurísticas ou meta-heurísticas para obter resultados satisfatórios [Fan et al. 2020].

Fundamentado no Plano Estratégico Militar da Aeronáutica (PMAER), que visa buscar a eficiência na utilização dos recursos disponibilizados [Brasil 2018], este trabalho oferece, como uma ferramenta para o cumprimento das missões do PAA [Moraes 2021], um modelo matemático para o aumento da eficiência do transporte de suprimentos aos PEFs, realizados pelas aeronaves C-98A. Inicialmente é utilizado um modelo exato para otimização dos meios de transporte, no entanto, caso não seja possível a obtenção de um resultado em um tempo razoável, apresenta como opção a adaptação de um modelo heurístico. O objetivo é transportar toda a carga necessária através de uma quantidade mínima, ou quase mínima, de viagens. Este estudo também explora como a granularidade dos itens impacta na eficiência do algoritmo proposto.

Este artigo contém 5 seções. A próxima seção contém a fundamentação do BPP para o contexto das missões mencionadas. A seção III mostra a aplicação do BPP para apoio aos PEFs. Os resultados serão apresentados na seção IV e discutidos na seção V. A seção VI encerrará este artigo com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão de literatura

2.1 Problema de Corte e Empacotamento

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

Problema de Empacotamento ou *Bin-Packing Problem* (BPP) aparecem em diversas aplicações reais, principalmente na otimização de carregamento de veículos [Arenales et al. 2007]. Para um problema associado às aeronaves, o BPP consiste na acomodação do número máximo de carga em um número mínimo de aeronaves possível.

O BPP pode ainda ser classificado quanto as suas dimensões de restrições, tais como peso, altura, largura e comprimento. No problema unidimensional, os itens a serem alocados possuem uma única variável, que neste estudo será considerada o peso, sendo que o valor dessa variável não pode ultrapassar a capacidade do recipiente, que será denominado *bin* neste trabalho [Wessa e Atia 2021].

Uma característica importante da PO que facilita o processo de análise e de decisão é a utilização de modelos que permitem a experimentação da solução proposta. Segundo Arenales et al. [2007], a forma do modelo padrão de um BPP unidimensional pode ser definido como:

a) Variáveis Definidas
- i: índice dos objetos.
- j: índice dos *bins* (aeronaves).
- w_i: peso do objeto i.
- x_{ij}: variável de decisão binária, indicando se o objeto i está alocado no *bin* j.
- C_j: capacidade do *bin* j.
- y_j: variável de decisão binária, indicando se o *bin* j é utilizado.

b) Função Objetivo - minimização
- Minimizar o número de *bins* utilizados:

$$\min FO = \min \sum_{j=1}^{n} y_j \quad (1)$$

c) Restrições:

- 1. A capacidade do *bin* não pode ser excedida:

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij}\, w_i \leq C_j y_j, \forall j \quad (2)$$

- 2. Cada objeto deve ser alocado a exatamente um *bin*:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \forall i \quad (3)$$

- 3. As Variáveis de Decisão devem ser binárias:

$$y_j \in \{0,1\}, x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \quad (4)$$

No entanto, os BPP se apresentam como problemas de otimização de alta complexidade computacional e com resoluções em tempo polinomial não determinístico [Fan et al. 2020), apresentando-se assim como um problema de solução exata intratável ou inviável. Por este motivo a maioria das referências da literatura sobre os BPP se referem a heurísticas ou meta-heurísticas que oferecem algoritmos baseados em estratégias de planejamento muito simples e que frequentemente fornecem resultados satisfatórios.

2.2 Alternativa ao Modelo Exato – Algoritmo Híbrido

Os algoritmos gulosos são comumente utilizados na resolução de BPP devido à sua eficiência e simplicidade. Eles fornecem uma abordagem pragmática, onde a obtenção de soluções exatas pode ser computacionalmente proibitiva. Apesar de não garantirem a solução ótima, esses algoritmos costumam gerar soluções suficientemente boas na prática, tornando-os uma excelente opção quando a eficiência é uma prioridade. Além disso, devido à sua natureza intuitiva, esses algoritmos são fáceis de implementar e compreender, facilitando a prototipagem rápida e a experimentação iterativa.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

Algumas heurísticas clássicas para a solução do BPP unidimensional continuam sendo objeto de estudo devido à sua implementação simples e resolução rápida. Exemplos incluem o *Next-Fit*, analisado por Saraiva e Schouery [2019], o *Best-Fit-Decreasing* por Jangiti [2020], e o *Better Fit*, desenvolvido por Bhatia e Hazra [2009]. Nessas heurísticas, os objetos são ordenados pelo fator limitante e aplicadas as regras para a alocação dos objetos às caixas. Essas heurísticas visam simplificar o processo de decisão.

No entanto, esses algoritmos podem enfrentar limitações, como a tendência a convergir para soluções locais subótimas. Para mitigar essas limitações, uma solução é integrar heurísticas com meta-heurísticas, buscando soluções mais próximas do ótimo global [Munien et al. 2020].

O *Next-Fit* (NF) é um algoritmo que, sem alterar a disposição dos itens, empacota o primeiro item no primeiro *bin* e, a partir disso, verifica se cada item a seguir cabe no *bin* no qual o último item foi colocado. Se sim, o item é incluído nesse *bin*; do contrário, fecha-se o *bin* e abre-se um novo, onde o item é adicionado [Saraiva e Schouery 2019].

O *Best-Fit-Decreasing* (BFD) [Jangiti 2020], também ordena os itens em ordem decrescente, no entanto, ao empacotá-los, tenta colocar cada um no *bin* que deixará o menor espaço vazio possível. Se nenhum *bin* existente pode acomodar o item, um novo *bin* é iniciado. O *Better-Fit* (BF), desenvolvido por Bhatia e Hazra [2009], segue a mesma lógica do BFD, incorporando uma fase de avaliação com permutação dos itens para tentar otimizar a alocação, podendo reduzir ainda mais o número de *bins* utilizados.

A lógica por trás da ordenação de forma decrescente é que, ao lidar com os itens maiores primeiro, maior a probabilidade de preencher os *bins* de forma eficiente, evitando deixar espaço "desperdiçado" que não poderá acomodar os itens menores que serão considerados posteriormente.

Tlili e Krichen [2023] também apresentam através de simulações extensas, com dados do mundo real, que o BFD revela uma superioridade consistente em termos de utilização de recursos e eficiência de empacotamento. Uma vantagem nesse algoritmo também é que, além de aproximar-se da resposta ótima, na distribuição realizada por ele o último *bin* recebe a menor quantidade de itens do total distribuído, uma característica que o diferencia dentre as demais heurísticas utilizadas para a solução dos BPP.

Meta-heurística é uma abordagem de otimização de alto nível que combina heurísticas com uma estrutura flexível que pode ser adaptada a diferentes tipos de problemas [Almufti et al. 2023]. Esses métodos equilibram a exploração de novas soluções e a exploração das melhores soluções já conhecidas, visando encontrar soluções ótimas ou quase ótimas de forma eficiente e eficaz, mesmo para problemas de grande escala e alta complexidade.

O algoritmo genético (GA) é uma meta-heurística inspirada no processo de evolução natural, utilizando operações que emulam processos de seleção, cruzamento e mutação para evoluir soluções para problemas complexos. Inicialmente, uma população de soluções candidatas é gerada aleatoriamente. As soluções são avaliadas com base em uma função de aptidão, e as melhores são selecionadas para reprodução. Durante o cruzamento, partes das soluções selecionadas são combinadas para criar novas soluções, enquanto a mutação introduz pequenas alterações aleatórias para manter a diversidade genética. Este processo iterativo continua até que uma solução satisfatória seja encontrada ou um critério de parada seja atingido, buscando sempre a otimização do problema alvo [Almufti et al. 2023], [Fan et al. 2020], [Munien et al. 2020].

Fan et al. [2020] e Munien et al. [2020] apresentam a formação de algoritmos híbridos através da combinação do GA com o BF e o BFD. Comprovam em seus trabalhos o seu alto desempenho, capaz de apresentar o resultado ótimo em mais vezes do que as demais meta-heurísticas concorrentes, além de se destacar pelo baixo tempo computacional para fazê-lo.

O modelo alternativo para desenvolvimento dos BPP neste trabalho será então, o GA combinado com o BFD e o BF, um algoritmo híbrido de alto desempenho (AHAD).

3. Materiais

Para a representação do modelo, foi utilizado como estudo de caso os PEFs de Roraima, subordinados ao 7° Batalhão de Infantaria de Selva (7° BIS), para um estudo específico. Localizado

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

na cidade de Boa Vista, o 7° BIS atua como centro de distribuição para a malha logística de suprimento dos seus PEFs subordinados.

Os PEFs da localidade de Surucucu e de Auaris apresentam as maiores dificuldades de acesso logístico, uma vez que são acessíveis apenas por via aérea. Os demais PEFs subordinados ao 7° BIS podem receber suprimentos por via terrestre, utilizando caminhões nas rodovias. Dessa forma, os PEFs escolhidos para compor o modelo foram o 4° PEF - Surucucu e o 5° PEF - Auaris.

A coleta de dados foi realizada com os operadores do C-98A da Base Aérea de Boa Vista (BABV) e do Sétimo Esquadrão de Transporte Aéreo (7° ETA), que, embora localizado em Manaus, atende toda a Região Norte. O EB foi consultado através do 7º BIS.

Os registros indicam uma demanda média de 13.873 kg de suprimentos para um PEF com 60 militares, transportados em aproximadamente 200 caixas ao longo de 25 viagens durante 15 dias.

Para avaliar o modelo proposto, foram utilizados dados do 7° BIS, que incluíam uma lista de 200 itens totalizando 13.873 kg. A partir desses dados, foram geradas listas adicionais com 50, 100, 150, 350, 500 e 750 itens, todos com pesos aleatórios, mantendo o peso total inicial de 13.873 kg. Isso permitiu analisar o impacto da granularidade no desempenho do algoritmo exato e do algoritmo proposto.

No contexto deste trabalho, onde se pretende distribuir os itens pelas viagens, o tamanho do *bin* corresponde à capacidade de carregamento da aeronave, que será considerada fixa para cada viagem. Por razões de segurança, a operação da aeronave C-98A na região amazônica é restrita a voos diurnos, limitando as viagens ao período entre o nascer e o pôr do sol. A análise dos horários de Boa Vista durante 2019-2023 (Brasil 2023), mostrou uma janela operacional constante de doze horas por dia.

Cada viagem consiste em um trajeto de ida e volta, com a aeronave retornando a Boa Vista no mesmo dia. Antes de cada decolagem, a tripulação realiza procedimentos no solo que duram 1 hora. O tempo de viagem para cada localidade é calculado somando o tempo de voo de ida e volta ao destino, acrescido do tempo de operação no solo.

Por exemplo, uma viagem de Boa Vista para Surucucu inclui 1 hora de preparo antes da decolagem de Boa Vista, 1 hora e 10 minutos de voo de ida, 1 hora de preparo em Surucucu e 1 hora e 10 minutos de voo de volta, totalizando 4 horas e 20 minutos.

Para a otimização da escala de voo, a segunda etapa deste trabalho, o *bin* será o dia de operação aérea, com “tamanho” de 13 horas, iniciando 1 hora antes do nascer do sol e terminando ao pôr do sol.

3.2 Método - Primeira Fase

O modelo proposto para o aumento da eficiência da entrega das cargas aos PEFs pelas aeronaves C-98A da FAB é dividido em duas fases. Na primeira o objetivo é descobrir qual a menor de quantidade de viagens para cada uma das duas localidades que atenda a toda a demanda de itens. A FO inicial é então a minimização da soma de todas as viagens necessárias para se transportar todos os itens. A notação deste modelo matemático é mesma apresentada na Seção 2.1.

Na próxima etapa será a de análise da possibilidade de uma viagem que passe pelas duas localidades, com intenções de minimizar ainda mais a quantidade de viagens necessárias.

Nessa etapa a menor quantidade de viagens passa a ser uma restrição do sistema, e o objetivo agora é minimizar a quantidade de itens em uma das viagens a serem realizadas. Essa segunda otimização segue o seguinte modelo:

Minimizar:	$\sum_{i=1}^{m} x_{i1} w_i$	(5)
Sujeito à:	$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} w_i \leq C y_j$, ∀ j	(6)
	$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1$, ∀ i	(7)
	$\sum_{i=1}^{n} y_j =$ Mínimo de viagens necessárias → 1ª FO	(8)
	y_i e x_{ij} , binários ∀ i e j	(9)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

A diferença nessa notação é que a FO (5) busca minimizar o peso dos itens transportados na viagem 1. Em (6) a capacidade de carregamento da aeronave é sempre constante, devido ao limite de carregamento de peso da aeronave. E a equação (8) assegura que a quantidade de viagens será exatamente aquela que foi encontrada anteriormente pela primeira FO, a de minimização de quantidade de viagens.

Fica estabelecido um limite máximo de 30 minutos (1800 segundos) para a execução do algoritmo exato. Caso esse tempo seja excedido, será considerada a resposta somente do AHAD, atentando-se ao *bin* de menor peso. Para cada localidade, será definida a quantidade mínima de viagens e a carga mínima a ser transportada em cada viagem. Em seguida, será avaliada a viabilidade de realizar uma Viagem de Aproveitamento (VA), que consiste em uma única viagem que passa por ambas as localidades, transportando a carga mínima necessária para cada uma.

A VA será viável se a soma das cargas mínimas para Surucucu e Auaris não exceder a capacidade da aeronave, que partirá de Boa Vista e passará por ambas as localidades em um único trajeto. A capacidade de carga da aeronave precisa ser reavaliada para essa rota específica devido ao percurso mais longo, o que altera a restrição de capacidade comparada às viagens anteriores.

Com a possibilidade de realizar a VA, o cálculo das viagens será ajustado, contabilizando uma viagem a menos para cada localidade e uma viagem que atenda ambas. O total de viagens necessárias será dado pela equação: $Z_{\text{Auaris}} + Z_{\text{Surucucu}} - y * Z_{Viagem\ de\ Aproveitamento}$, onde y é um valor binário que pode ser 0 ou 1, indicando se a VA foi realizada ou não. Esta solução determinará a quantidade mínima de viagens necessárias para atender a demanda dos dois PEFs.

3.3 Método - Segunda Fase

Após a primeira fase, que determina o número total de viagens necessárias para atender às localidades, busca-se alcançar a máxima eficiência na entrega da demanda. Apresenta-se agora um novo BPP, cuja Função Objetivo visa minimizar o tempo de entrega, ou seja, o número mínimo de dias necessários para realizar todas as viagens.

Neste problema, as viagens são consideradas como "itens", possuindo dois ou três valores diferentes, dependendo da ocorrência ou não da VA. O problema de otimização é encontrar a melhor distribuição das viagens, de acordo com o tempo disponível de voo em cada dia, de modo a minimizar a quantidade total de dias necessários para completar todos os voos.

Minimizar:	$\sum_{j=1}^{n} D_j$	(10)
Sujeito à:	$\sum_{i=1}^{m} v_{ij} t_i \leq HD_j$, ∀ j	(11)
	$\sum_{j=1}^{n} v_{ij} = 1$, ∀ i	(12)
	D_i e v_{ij} , binários	(13)

A Função Objetivo (FO) expressa em (10) busca minimizar o número total de dias utilizados. Em (11) é assegurado que todos os voos v_i, de tempo t_i, sejam menores ou iguais às horas H (possíveis de operação aérea) nos dias D_j, enquanto em (12) se impõe que cada voo i seja alocado a exatamente um Dia D_j. Já a restrição expressa em (13) assegura a integralidade das variáveis de decisão. E, caso não seja possível alcançar a resposta exata no tempo estabelecido, utiliza-se o AHAD.

4. Resultados

Atualmente o 7° BIS realiza a distribuição bimestral da carga para as viagens aos PEFs pelo abastecimento sequencial de itens até que se atinja o limite de carregamento, um método análogo ao NF. Por este motivo, é utilizado o NF como comparativo ao modelo proposto durante a fase de simulação. Da mesma forma, as viagens são programadas para atender as demandas em ordem cronológica, seguindo também a lógica do NF. E a VA não existe no planejamento.

Dessa forma, foram geradas as Tabelas 1 a 7, que apresentam as repostas do processo implementado. O esforço computacional foi medido com o uso de um computador com

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

processador Amd® Ryzem™ 5 1500X, Quad-Core de 3.50 GHz e 16 GB de RAM, no qual, as heurísticas NF e o modelo híbrido foram implementadas na linguagem *Python* e o modelo exato no *Software* AMPL, utilizando o solver CBC (*Coin-or branch and cut*).

Tabela 1: Resultados da lista de 50 itens

Respostas	Viagens para Auaris	Viagens paraSurucucu	Carga Auaris	Carga Surucucu	VA	Dias de Viagem
Next-Fit	35	39	*	*	Não	25
Mod. Exato	*	*	*	*	*	*
Tempo Mod. Exato	>1800s	>1800s	*	*	*	*
Heurística proposta	26	25	348	181	Não	22
Tempo - Heurística	4s	4s	*	*	*	5 s

* Não foi possível encontrar uma resposta pois o tempo de processamento do algoritmo excedeu o limite estabelecido.

Tabela 2: Resultados da lista de 100 itens

Respostas	Viagens paraAuaris	Viagens para Surucucu	Carga Auaris	Carga Surucucu	VA	Dias de Viagem
Next-Fit	34	27	*	*	Não	25
Mod. Exato	*	*	*	*	*	*
Tempo Mod. Exato	>1800s	>1800s	*	*	*	*
Heurística proposta	25	24	505	285	Não	21
Tempo - Heurística	9s	8s	*	*	*	4s

* Não foi possível encontrar uma resposta pois o tempo de processamento do algoritmo excedeu o limite estabelecido.

Tabela 3: Resultados da lista de 150 itens

Respostas	Viagens para Auaris	Viagens para Surucucu	Carga Auaris	Carga Surucucu	VA	Dias de Viagem
Next-Fit	36	30	*	*	Não	24
Mod. Exato	25	24	*	*	Não	22
Tempo Mod. Exato	02:18	02:26	>1800s	>1800s	*	23s
Heurística proposta	25	24	376	192	Não	22
Tempo - Heurística	12s	12s	*	*	*	4s

* Não foi possível encontrar uma resposta pois o tempo de processamento do algoritmo excedeu o limite estabelecido.

Tabela 4: Resultados da lista de 200 itens

Respostas	Viagens para Auaris	Viagens para Surucucu	Carga Auaris	Carga Surucucu	VA	Dias de Viagem
Next-Fit	29	26	*	*	Não	24
Mod. Exato	25	24	322	107	Sim	21
Tempo Mod. Exato	11:32	09:34	09:55	10:27	*	00:23
Heurística proposta	25	24	327	73	Sim	21
Tempo - Heurística	9s	9s	*	*	*	2s

* Não foi possível encontrar uma resposta pois o tempo de processamento do algoritmo excedeu o limite estabelecido.

Tabela 5: Resultados da lista de 350 itens

Respostas	Viagens para Auaris	Viagens para Surucucu	Carga Auaris	Carga Surucucu	VA	Dias de Viagem
Next-Fit	34	27	*	*	Não	25
Mod. Exato	25	24	289	78	Não	21
Tempo Mod. Exato	1322s	1317s	1534s	1637s	*	22s
Heurística proposta	25	24	329	78	Sim	21
Tempo - Heurística	32s	29s	*	*	*	3s

* Não foi possível encontrar uma resposta pois o tempo de processamento do algoritmo excedeu o limite estabelecido.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

Tabela 6: Resultados da lista de 500 itens

Respostas	Viagens para Auaris	Viagens para Surucucu	Carga Auaris	Carga Surucucu	VA	Dias de Viagem
Next-Fit	34	27	*	*	Não	25
Mod. Exato	*	*	*	*	*	*
Tempo Mod. Exato	>1800s	>1800s	*	*	*	*
Heurística proposta	25	24	316	91	Sim	21
Tempo - Heurística	43s	44s	*	*	*	3s

* Não foi possível encontrar uma resposta pois o tempo de processamento do algoritmo excedeu o limite estabelecido.

Tabela 7: Resultados da lista de 750 itens

Respostas	Viagens para Auaris	Viagens para Surucucu	Carga Auaris	Carga Surucucu	VA	Dias de Viagem
Next-Fit	25	24	*	*	Não	21
Mod. Exato	*	*	*	*	*	*
Tempo Mod. Exato	>1800s	>1800s	*	*	*	*
Heurística proposta	25	24	314	73	Sim	21
Tempo - Heurística	71s	62s	*	*	*	3s

* Não foi possível encontrar uma resposta pois o tempo de processamento do algoritmo excedeu o limite estabelecido.

Os resultados das Tabelas 1 a 7 serão discutidos nas próximas seções.

4.1 Distribuição de Itens por Viagens

Para todas as listas analisadas o modelo proposto melhorou o número de viagens necessárias, seja pelo modelo exato ou pelo AHAD, evidenciando uma melhoria significativa em comparação com abordagens tradicionais como o algoritmo NF. Os dados utilizados foram derivados de entrevistas com membros do EB e da FAB e incluíram variações nos itens de acordo com cinco configurações distintas: 50, 100, 150, 200, 350, 500 e 750 itens, simulando diferentes granularidades de carga.

Os resultados apontam que, para a configuração de 200 itens, que reflete mais fielmente a demanda operacional corrente, o modelo tanto heurístico quanto exato conseguiu reduzir o número de viagens necessárias em comparação com o método NF. O modelo exato foi eficaz, mas enfrentou desafios de execução quando o volume de itens foi aumentado para 500 ou mais, resultando em tempos de processamento que ultrapassaram os 30 minutos (1800 segundos) estipulados. O que reflete a realidade do algoritmo em ter que processar um número maior de variáveis no sistema. No entanto percebe-se uma dificuldade no algoritmo exato também em cenários onde a granularidade é baixa, ou seja, as dimensões dos itens são mais próximas do valor do *bin*, dificultando o modelo a encontrar a distribuição ótima.

Comparativamente, a abordagem heurística se mostrou mais ágil, com capacidade de fornecer soluções em tempo significativamente menor, geralmente em segundos. O modelo desenvolvido, AHAD, demonstrou uma elevada eficiência, apresentando resultados idênticos ao modelo exato, sempre que foi possível realizar a comparação.

Na lista de 350 itens, o modelo exato necessitou de 1322s segundos para completar, enquanto o modelo heurístico concluiu em apenas 32 segundos, destacando a utilidade prática das heurísticas em contextos operacionais onde a rapidez de decisão é prioritária. Os resultados do modelo heurístico também foram comparáveis aos do modelo exato em termos de número de viagens economizadas, mostrando uma diminuição de 3 viagens para Surucucu e 9 viagens para Auaris, em comparação com o método NF.

Estes resultados destacam a capacidade do modelo em ajustar-se a diferentes tamanhos de carga, com a heurística proposta oferecendo uma alternativa viável quando restrições de tempo são consideradas. A eficácia do modelo em termos de redução do número de viagens necessárias e otimização do carregamento são evidentes, especialmente para a lista de 200 itens, que é mais representativa da operação real.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

4.1.2 Distribuição de Viagens por Dias

Uma vez definida a quantidade de viagem a ser realizada, foi alimentado o novo modelo que define qual a menor quantidade de dias para se cumprir o total de viagens necessárias.

Dado que as viagens de Boa Vista para a localidade de Surucucu ocorrem em um tempo médio de 01:10h, o seu cálculo para o modelo será então composto pelo tempo de ida e volta, 02:20h, acrescido o tempo de solo antes da decolagem de 01:00h, acrescido o tempo de solo da localidade de Surucucu de 01:00h. Entra no modelo do BPP proposto cada viagem de Boa Vista para Surucucu como um "item" de 04:20h.

As viagens de Boa Vista para a localidade de Auaris por sua vez, ocorrem em um tempo médio de 01:40h. O seu cálculo para o modelo será então composto pelo tempo de ida e volta, 03:20h, acrescido o tempo de solo antes da decolagem de 01:00h, acrescido o tempo de solo da localidade de Surucucu de 01:00h. Entra no modelo do BPP proposto cada viagem de Boa Vista para Surucucu como um "item" de 05:20h.

A VA que parte de Boa Vista, passa em ambas as localidades e retorna, será composta pelo tempo médio de Boa Vista para a localidade de Surucucu, mais o tempo médio de Surucucu para Auaris, que é de 00:35h, mais o tempo de Auaris para Boa Vista. O seu cálculo para o modelo será então composto pelo tempo de voo completo do percurso, que é de 03:25h, acrescido o tempo de solo antes da decolagem de 01:00h e o tempo de solo da dos pousos intermediários, de 01:00h cada um. Entra no modelo do BPP proposto, cada viagem de Boa Vista para Surucucu, como um "item" de 06:25h.

Dessa forma, conforme as respostas obtidas pelas simulações anteriores, foram inseridos os dados no modelo de distribuição de viagens proposto. Como exemplo, na análise da Lista 4 (200 itens), as 24 viagens de Boa Vista para Auaris representando os "itens" de 05:20h, as 23 viagens de Boa Vista para Surucucu representando os "itens" de 04:20, e 01 VA representando o "item" 06:25h. Como *bin* para o BPP do modelo, ficou estabelecido o valor de 13:00h, dado o tempo de operação diária disponível para a realização das viagens.

Para determinar a distribuição eficiente das viagens, foi aplicado o algoritmo proposto que configura as viagens dentro dos limites operacionais do dia. Os resultados indicaram que o modelo proposto necessitou de menos dias para completar todas as viagens em comparação com a abordagem empírica. Concretamente, para a lista mencionada, o resultado foi uma economia de 3 dias comparado ao método sequencial tradicional.

Assim, o modelo matemático se mostrou eficaz ao reduzir o total de dias de operação, potencializando a utilização das aeronaves e otimizando a janela operacional diária. E novamente, sempre que foi possível a comparação, o AHAD demonstrou resultados idênticos ao modelo exato.

5. Discussão

Nesta seção, a análise será focada especificamente na lista de 200 itens, que reflete a situação atual e mais precisa das operações de carga para os PEFs, seguido de uma breve análise comparativa das demais listas de itens.

5.1 Análise da Condição de Distribuição Atual

Para comparação da eficiência do método empírico, dado pelo NF, com o modelo apresentado é utilizado o esforço aéreo necessário para a realização de uma viagem, medido em horas de voo. Não seria possível comparar, simplesmente, a quantidade de viagens realizadas haja vista que no modelo apresentado existe um perfil de viagem que o método empírico não possui, que é a VA.

A eficiência operacional do modelo proposto, quando comparada ao método NF, resultou em uma economia significativa de esforço aéreo, aproximadamente 13%, equivalendo a 20 horas e 30 minutos. Esta economia representa uma redução no uso de recursos aéreos necessários para realizar a mesma quantidade de entregas. Esses resultados indicam que o modelo proposto oferece uma alternativa superior para a execução de missões logísticas, ao otimizar o carregamento e as viagens aéreas.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

Uma limitação identificada no processo é que o modelo se concentra predominantemente no peso dos itens como variável restritiva, enquanto o volume, que geralmente é uma restrição significativa em problemas de empacotamento, não se apresentou como limitante neste contexto específico. Apesar dos resultados ótimos apresentados pelo modelo exato, o tempo de resolução ainda apresenta desafios, especialmente quando aplicado a problemas de maximização de grande quantidade de cargas.

Alternativamente, o método heurístico proposto mostrou-se altamente eficaz, gerando resultados comparáveis aos do modelo exato, mas em um intervalo de tempo substancialmente menor, normalmente na ordem de segundos para todas as simulações.

A metodologia atualmente empregada para a distribuição de viagens baseia-se em uma sequência que não otimiza o uso do tempo operacional diário, similar à aplicação do algoritmo NF em cada missão de transporte. Em contraste, o modelo proposto conseguiu uma economia de três dias no número total de jornadas necessárias, devido à otimização na alocação de cargas.

5.3 Análise das demais Listas

Através das diversas configurações de listas testadas, foi possível observar que um aumento na granularidade dos itens pode melhorar a eficiência de empacotamento. Isso ocorre porque itens mais granulares permitem um ajuste mais preciso dentro dos limites de espaço das aeronaves, reduzindo o número de viagens necessárias e, consequentemente, os custos associados.

No entanto, essa maior granularidade também traz consigo um aumento na complexidade computacional, como demonstrado nas simulações com 500 e 750 itens, onde o tempo de processamento necessário para o modelo exato ultrapassou frequentemente os limites estabelecidos. O modelo heurístico, por outro lado, manteve uma capacidade de resposta rápida e eficaz, mesmo em face de maior complexidade, confirmando a sua aplicabilidade e robustez em um contexto operacional dinâmico e exigente.

A análise das configurações de lista também evidencia que a alta granularidade dos itens, especificamente em listas que ultrapassam 500 itens com um peso combinado constante de 13.873 kg, potencializa a eficácia dos modelos heurísticos na busca por soluções ótimas. Isso se traduz em um encaixe mais preciso dos itens dentro das capacidades das aeronaves, o que contribui para a redução de viagens e de custos operacionais. Notavelmente, mesmo em configurações de listas ainda mais densas, com 750 itens, observou-se que estratégias simples como o NF conseguiam alcançar resultados comparáveis aos do AHAD, destacando a capacidade destes modelos de manejar eficientemente a complexidade aumentada, mesmo sob restrições de processamento rigorosas.

6 Conclusão

O presente estudo explorou a otimização logística do abastecimento aéreo dos PEFs do EB, concentrando-se nos situados nas localidades de Surucucu e Auaris que, devido ao seu difícil acesso, dependem exclusivamente do transporte aéreo, executado majoritariamente pela aeronave C-98A da FAB. O trabalho considerou a atual distribuição de itens por aeronave um método de distribuição que se assemelha ao algoritmo *Next-Fit*, o qual foi analisado e comparado com um modelo proposto de otimização tanto exato quanto heurístico.

As soluções propostas revelaram uma redução considerável no número de viagens necessárias e, por consequência, nos recursos aéreos empregados, se comparadas ao método tradicional. Na simulação realizada neste trabalho, a economia observada foi de 20 horas e 30 minutos de esforço aéreo e de 3 dias no cronograma de operações para atender a mesma demanda, representando uma melhoria significativa na eficiência de operação.

Este estudo confirmou que o detalhamento e variação dos tamanhos e pesos dos itens têm impacto direto sobre a capacidade de acomodação dos mesmos nas aeronaves, e, por extensão, sobre o número de viagens necessárias. Técnicas mais sofisticadas de otimização, como o modelo

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

heurístico proposto, mostraram não apenas viabilidade, mas superioridade em diversos cenários de teste, fornecendo soluções eficientes em prazos operacionais consideravelmente reduzidos.

Além disso, a aplicação do modelo de otimização de viagens ofereceu uma estrutura capaz de maximizar a utilização do espaço e do tempo de voo disponível, contribuindo para uma redução significativa no total de dias necessários para completar todas as missões logísticas. Esta otimização foi alcançada mediante a reformulação de como as cargas e as viagens são planejadas e executadas, substituindo as abordagens sequenciais e menos eficientes por estratégias que exploram as potencialidades dos algoritmos de empacotamento.

Além das aplicações aos PEFs, a abordagem desenvolvida neste estudo possui potencial significativo para ser adaptada em missões de ajuda humanitária, em que a eficiência logística é igualmente crítica. Por exemplo, a Operação Yanomami realizada em 2023 para entrega de alimentos aos índios, e as missões de apoio ao estado do Rio Grande do Sul em 2024 com entrega de doações de todo o país aos desabrigados pelas enchentes. Nesses contextos a otimização de recursos pode desempenhar um papel vital na maximização do impacto desejado, salvar vidas, aliviar o sofrimento humano e minimizar custos.

Uma proposta para estudos futuros é a realização de modelos que considerem a otimização do tamanho da carga em função da capacidade do veículo. Esses modelos poderiam ser aplicados em diferentes contextos de carregamento, como as Linhas de Transporte Aéreo Nacional e as missões de ajuda humanitária realizadas pela FAB. Analisar dados reais comparativamente nessas situações pode fornecer uma forma de melhorar ainda mais a eficiência das operações de transporte aéreo, garantindo uma utilização otimizada dos recursos disponíveis e reduzindo custos operacionais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo 307691/2020-9.

Referências

A. K. Bhatia, & M. Hazra, S. K. B. (2009, March 6). Better-Fit Heuristic for One-Dimensional Bin-Packing Problem. *International Advance Computing Conference*, 193–197.

Almufti, S. M., Shaban, A. A., Ali, Z. A., Ismael Ali, R., Dela Fuente, J. A., Almufti, M., et al. (2023). Overview of Metaheuristic Algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, 2(2), 10–32. https://doi.org/10.58429/PGJSRT.V2N2A144

Arenales, M. N., Armentano, V., Morabito, R., & Yanasse, H. (2007). Pesquisa Operacional. (Elsevier Editora Ltda., Ed.) (Primeira., Vol. 1). Rio de Janeiro.

Brasil. (2018). PCA 11-47 Plano Estratégico Militar da Aeronáutica 2018 - 2027. Ministério da Defesa Comando da Aeronáutica.

Brasil. (2023). Tabela de Nascer e Pôr do Sol. Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. `https://www.aisweb.aer.mil.br/?i=aerodromos&p=sol`. Acessado: 2023-12-10.

Dantas, J. P. de A., & Silvestre, C. A. de M. (2020). Modelo de Simulação Aplicado às Missões de Transporte na Região Amazônica. *Spectrum - Revista do Comando de Preparo*, 10–15.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br

Fan, Y., Chu, J., & Xu, H. (2020). Improvement Grouping Genetic Algorithm for Solving the Bin Packing Problem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1550(3), 032168.

Jangiti, S., Vijayakumar, V., & Subramaniyaswamy, V. (2020). Hybrid best-fit heuristic for energy efficient virtual machine placement in cloud data centers. EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 7(26). https://doi.org/10.4108/EAI.13-7-2018.162689

Moraes, C. H. A. De. (2021). A Importância dos Pelotões Especiais de Fronteira na Região Amazônica Brasileira - CAPES. *Revista Agulhas Negras*, 101–112.

Munien, C., Mahabeer, S., Dzitiro, E., Singh, S., Zungu, S., & Ezugwu, A. E. (2020). Metaheuristic Approaches for One-Dimensional Bin Packing Problem: A Comparative Performance Study. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046185

Nakano, M. K., de Almeida, R., & Steiner, M. T. A. (2018). Automotive Industry Line Board Optimization Through Operations Research Techniques. IEEE Latin America Transaction.

Rebouças, S., Rebouças, C. A., Scarpel, R. A., & Correia, A. R. (2022). Logística em Desastres: Otimização de Rotas de Unidades Aéreas de Resgate. *Spectrum:Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, 23(1), 44. https://doi.org/10.55972/SPECTRUM.V23I1.380

Saraiva, R. V, & Schouery, R. C. S. (2019). Approximation algorithms for the bin packing problem. *Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP*, (27), 1–1.

Tlili, T., & Krichen, S. (2023a). Best Fit Decreasing Algorithm for Virtual Machine Placement Modeled as a Bin Packing Problem. *9th 2023 International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, CoDIT 2023, 1261–1266.

Tlili, T., & Krichen, S. (2023b). Best Fit Decreasing Algorithm for Virtual Machine Placement Modeled as a Bin Packing Problem. *9th 2023 International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, CoDIT 2023, 1261–1266.

Viscardi, M. F., Leandro De Castro, A., Luiz, E., Senne, F., & Passaro, A. (2023). Better fit e busca tabu: Uma otimização para o apoio ao combate. *Anais do XXV Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa - SIGE*.

Wessa, E., & Atia, A. (2021). Parallelization of One Dimensional First Fit Decreasing Algorithm. Proceedings - 2021 *16th International Conference on Computer Engineering and Systems*, ICCES 2021. https://doi.org/10.1109/ICCES54031.2021.9686107.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193637
https://proceedings.science/p/193637?lang=pt-br