Otimização do Transporte Aéreo Logístico da Força Aérea Brasileira

1° Ten Av Frederico José Pradel Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celio Pereira de Mesquita (Cel. R1)

RESUMO

Este trabalho planeja iniciar o processo de otimização das capacidades do Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE), com foco nas missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL). Utilizando informações técnicas de aeronaves do Segundo Esquadrão de Transporte Aéreo (2º ETA), o estudo modela o processo de planejamento de missões TAL, considerando restrições e capacidades das aeronaves, além de outros fatores de planejamento envolvidos. O algoritmo proposto se fixa em missões a serem realizadas por uma única aeronave por vez, e serve como um subsídio para futuras otimizações que considerem um escopo mais amplo. Este trabalho é um passo inicial crucial para tornar o processo de planejamento de missões TAL mais objetivo e criterioso, fornecendo ao COMAE uma ferramenta para esboçar um planejamento de missão de maneira rápida e de forte aderência à realidade das Unidades Aéreas.

Palavras-chave: O timização de Operações Militares, Transporte Aéreo Logístico, Modelagem Matemática

ABSTRACT

This work aims to initiate the optimization process of the Aerospace Operations Command's (COMAE) capabilities, focusing on Logistical Air Transport (TAL) missions. Using technical information from the Second Air Transport Squadron (2nd ETA), the study models the planning process of TAL missions, considering aircraft constraints and capacities, as well as other involved planning factors. The proposed algorithm focuses on missions to be carried out by a single aircraft at a time and serves as a foundation for future optimizations that consider a broader scope. This work is a crucial initial step in making the TAL mission planning process more objective and rigorous, providing COMAE with a tool to quickly draft mission plans with strong adherence to the reality of the Air Units.

Keywords: O ptimization of Military Operations, Logistic Air Transport, Mathematical Modeling.

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo revisa o atual processo de recebimento e tratamento de solicitações de Transporte Aéreo Logístico (TAL), com foco no planejamento de missões realizado pelas Unidades Aéreas e pelo Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE). Visando otimizar o planejamento, este trabalho traz uma proposta de algoritmo que sistematiza as atividades que hoje são realizadas manualmente por militares da Força Aérea Brasileira.

Utilizando um método simples que visa a economia de recursos por meio da redução das distâncias, o modelo apresentado mostra-se como uma importante ferramenta para a minimização dos custos totais das missões de TAL, tornando-as mais eficientes quando comparadas aos planejamentos realizados manualmente, mais sensíveis ao erro humano.

1.1 Transporte Aéreo Logístico

O Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE) desempenha um papel central na coordenação e execução das missões aéreas da Força Aérea Brasileira (FAB). Dentre essas missões, o Transporte Aéreo Logístico (TAL) é de particular importância, por garantir o suporte logístico necessário para as operações militares e humanitárias, além de ser peça fundamental no funcionamento da Força Aérea Brasileira, funcionando como sua principal via de transporte de pessoal e carga no contexto nacional e internacional.

A título de exemplo, nas missões de cunho cotidiano como transporte de militares para cumprimento de cursos e atividades diversas, ou então, na realização de missões de emprego mais específicas, tais quais a repatriação de brasileiros em situações de risco ao redor do mundo, como pôde ser observado, em 2020 e 2023, nas operações que trouxeram os cidadãos brasileiros da China, por ocasião do COVID-19, e de Israel, devido ao conflito que se instalou no país.

A essência do Transporte Aéreo Logístico reside nas missões que são realizadas. No entanto, há um processo complexo que precede a decolagem das aeronaves. Para reduzir o consumo de recursos e aprimorar a eficácia e eficiência dos voos, é imprescindível que o planejamento seja meticulosamente executado, mas diversos são os desafios que permeiam essa fase

da operação, especialmente quando vidas humanas estão em risco e o tempo se torna um fator crucial.

Um exemplo marcante é o das missões da Operação Taquari II, que envolveram o resgate e apoio às vítimas das enchentes no Rio Grande do Sul. Portanto, é essencial adotar um método de planejamento eficaz que não consuma muito tempo, uma vez que, nesse contexto, cada segundo é decisivo.

1.2 Processo de Planejamento

Atualmente, o processo de planejamento das missões TAL, desde o recebimento dos pedidos via Sistema de Planejamento e Condução de Operações Aeroespaciais (SPCOA) até o efetivo cumprimento da missão planejada é realizado manualmente pelos militares das divisões do COMAE, com o auxílio direto das Unidades Aéreas responsáveis pela execução das missões. (BRASIL. Comando da Aeronáutica, 2023)

O Sistema de Planejamento e Condução de Operações Aeroespaciais (SPCOA) é o método primário para a solicitação de missões ao COMAE. Divisões internas do COMAE compilam todos os pedidos realizados em um determinado período e realizam um tratamento inicial, separando as solicitações por proximidade de localidade e volume/peso da carga/pessoal envolvido, fator que determinará qual tipo de aeronave será empregado, bem como qual Unidade Aérea será cumpridora da missão. Entretanto, o planejamento detalhado das missões é realizado diretamente pelas Unidades Aéreas, que possuem Células de Programação (CPROG), seções responsáveis pela programação de atividades aéreas. Essas células contam com Oficiais que elaboram o planejamento da missão solicitada, considerando todos os fatores imprescindíveis ao cumprimento de um voo operacional, resultando em um planejamento realista que, caso não haja mais alterações, servirá como informação principal para a confecção da Ordem Fragmentária (OFRAG), documento emitido pelo COMAE que formaliza a missão autorizando seu cumprimento pela Unidade Aérea escolhida.(BRASIL. Comando da Aeronáutica, 2023)

Esse processo funciona, porém, pode levar a uma subutilização das capacidades das aeronaves e do Transporte Aéreo Logístico na totalidade, pois as escolhas feitas por cada militar

variam, e nem sempre se aproximam da otimalidade ou da máxima eficiência, dado um cenário de complexas e variadas restrições.

Tendo em vista o elevado valor médio das horas de voo dos modelos de aeronave da Força Aérea Brasileira, cada minuto economizado é válido e pode fazer a diferença quando levados em consideração voos realizados ao longo de um período maior, como um ano, por exemplo. Por esta razão, faz-se necessário apoiar-se em ferramentas eficazes no momento das decisões de planejamento.

Neste contexto, este trabalho propõe um algorítmo que utiliza as capacidades de transporte das aeronaves dos Esquadrões de Transporte Aéreo (ETAs), visando a otimização individual dos planejamentos de missões TAL. O modelo apresentado busca identificar e aplicar os objetivos e restrições que devem ser considerados no planejamento das missões, e toma como base os dados de solicitação retirados do SPCOA e recebido pelo COMAE e Unidades Aéreas, gerando como resultado um esboço completo do voo a ser realizado. Espera-se que essa abordagem contribua para uma maior eficiência operacional e para o aprimoramento das decisões de alocação de recursos aéreos, visto que o processo de planejamento manual pode ser demorado e, por vezes, ineficiente, do ponto de vista operacional.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2, apresentamos a descrição do problema e o modelo matemático proposto para o planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL), detalhando as restrições e variáveis consideradas no processo. A Seção 3, de referencial teórico, explora o método Guloso e sua aplicação, além de abordar a importância da modelagem matemática no contexto de operações aéreas. Na Seção 4, descrevemos os dados utilizados e a implementação do algoritmo proposto, incluindo as bases de dados e as funções principais. O Seção 5 discute os resultados obtidos, comparando planejamentos gerados pelo algoritmo com os métodos convencionais, e analisando as vantagens e limitações do algoritmo. Finalmente, na Seção 6, apresentamos as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A programação de missões de TAL requer considerar uma variedade de restrições e capacidades das aeronaves, além de ser balizada por regras estabelecidas por órgãos reguladores da aviação, tais como normas emitidas pela International Civil Aviation Organization (ICAO), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), ou ainda, documentos internos do Comando da Aeronáutica (COMAER). BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) (2016).

A modelagem das restrições e objetivos relativos à realidade do cotidiano das Unidades Aéreas da FAB permite um planejamento mais preciso e eficiente das missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL).

Nesta Seção, apresentaremos uma visão detalhada do processo de pedido e planejamento de missões de TAL para que se entenda quais são as oportunidades de melhoria durante o processo. Para isso, descreveremos o processo manual tradicional, conforme previsto na NOREMP/C2/10 "Módulo Rotina do Sistema de Planejamento e Condução de Operações Aeroespaciais" e na Norma Padrão de Ação (NPA) da CPROG do 2º ETA. Após, será realizada a modelagem matemática de todo o processo descrito. Para isso, primeiramente, faz-se necessário familiarzarmo-nos com algumas expressões e abreviaturas importantes.

2.1 Acrônimos e expressões utilizadas

Disponibilidade (DISP): É quanto peso se pode carregar além do peso vazio básico, da carga já considerada e do combustível.

Peso Básico Operacional (PBO): O peso da aeronave vazia somado ao peso da tripulação e dos equipamentos necessários.

Peso Máximo de Decolagem (PMD): É o limite de peso com o qual a aeronave pode decolar.

Aeródromo de Origem: É o aeroporto de onde se inicia a missão.

Aeródromo de Destino: É o aeroporto para onde se destina a missão.

Aeródromo de Pouso Intermediário: Localidades onde se faz necessário o pouso com intuito de alcançar o destino por limitações de alcance da aeronave.

Aeródromo de Alternativa: Localidade para onde a aeronave se direciona caso não seja possível o pouso no local previsto por qualquer motivo. É obrigatório em todo planejmento de voo.

Etapa: Cada voo realizado entre duas localidades.

Missão: Conjunto de uma ou mais etapas com o objetivo de transportar algo ou alguém.

Projeto: Modelo de aeronave.

DEP: *Departure* (Decolagem).

ARR: *Arrival* (Chegada ou pouso).

TEV: Tempo de voo.

2.2 Planejamento Manual

Para compreendermos os cálculos que envolvem os planos de voo precisamos observar cada etapa de um planejamento. Atualmente, os planos são confeccionados por Oficiais das Unidades Aéreas por solicitação do COMAE, que utilizam planilhas com as fórmulas pré-prontas, contudo, que ainda dependem de diversos julgamentos e decisões do usuário para resultarem, ao final, em um plano de voo exequível. As decisões individuais são importantes para a confecção dos planejamentos, entretanto, diferentes visões podem levar a resultados que se afastam consideravelmente da eficiência e, com isso, da otimalidade. Por esta razão, este trabalho apresenta a transcrição matemática das atividades realizadas durante o processo de planejamento que antecede as missões aéreas.

2.2.1 Solicitação de Missão

O processo inicia-se com a solicitação de transporte de pessoal e/ou carga. A solicitação é registrada no Sistema de Planejamento e Condução de Operações Aeroespaciais (SPCOA), e deve incluir:

- Tipo e quantidade de material ou número de passageiros
- Peso total
- Origem e destino
- Data e hora desejadas

2.2.2 Análise das Solicitações pelo COMAE

Conforme BRASIL. Comando da Aeronáutica (2023), as divisões de planejamento do COMAE recebem as solicitações e realizam um tratamento inicial, agrupando-as por urgência, proximidade de localidade e volume/peso da carga/pessoal envolvido. Após a análise inicial, o COMAE seleciona a Unidade Aérea responsável pelo planejamento e execução da missão. Objetivando minimizar os custos da operação sem comprometer o cumprimento da missão, são considerados os seguintes fatores:

- Disponibilidade das aeronaves e horas de voo
- Capacidades das aeronaves
- Localidade
- Aproveitamento de missão

Feita a análise, é escolhida a Unidade Aérea que melhor se adequar aos fatores anteriormente citados.

2.2.3 Planejamento pela CPROG

A Célula de Programação (CPROG) da Unidade Aérea recebe a solicitação via COMAE e elabora o planejamento detalhado da missão, conforme o que prevê sua Norma Padrão de Ação - NPA 965, considerando os seguintes fatores, entre outros:

- Disponibilidade das aeronaves: verificação da disponibilidade das aeronaves da unidade para a missão.
- Limite de carga e passageiros: verificação dos limites de carga e passageiros que cada aeronave pode transportar.

- Autonomia de cada aeronave: avaliação da autonomia de voo de cada aeronave, determinando seu alcance máximo.
- Janela temporal para o cumprimento da missão: consideração do período disponível para completar a missão.
- Restrição de pouso e decolagem em determinados aeródromos: Avaliação das limitações específicas de cada aeródromo, como altitude, temperatura, horário de funcionamento, tamanho da pista e material constituinte, apoio de combustível e fonte de força.
- Fadiga de voo das tripulações: consideração dos períodos de descanso e fadiga das tripulações para garantir segurança e conformidade com as normas.
- Disponibilidade dos tripulantes: verificação da disponibilidade dos tripulantes para a missão.
- Necessidade de adestramento dos pilotos: consideração da necessidade de adestramento dos pilotos para determinados tipos de missões ou operações específicas.

2.2.4 O Plano de Voo

Os militares pertencentes à CPROG de cada unidade têm por atribuição definir, considerando todos os fatores mencionados, uma rota a ser seguida pela aeronave para cumprir a missão estabelecida pelo pedido recebido no SPCOA, gerando assim um plano de voo.(COMPREP. Comando de Preparo. Base Aérea de Natal, 2023)

A definição do plano de voo inicia-se pelo cálculo de disponibilidade para abastecimento da aeronave, fator que determinará seu alcance máximo para aquele determinado pedido. Feita esta definição, o militar escolhe, baseado em sua própria experiência e informações disponíveis, um aeródromo de destino intermediário, o mais próximo possível do destino desejado, desde que seja compatível com o alcance calculado no passo anterior. Além disso, precisa considerar que o combustível deve ser o suficiente para chegar ao aeródromo, arremeter, ir a um aeródromo de alternativa e voar mais 45 minutos em velocidade de cruzeiro, conforme preconizado na RBAC-91 da ANAC para voos IFR.(BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), 2020)

Para a realização deste último passo, as Unidades Aéreas costumam utilizar planilhas que fazem os cálculos automaticamente, contudo, a escolha das localidades depende do militar, que repete esse passo até que a aeronave tenha como destino possível o aeródromo solicitado no pedido, sempre atento às limitações de cada localidade, pois fatores como altitude do campo, temperatura do ar, tamanho da pista e material constituinte, apoio de combustível e fonte de força, pátio, NOTAM e existência de procedimentos IAC convencionais podem ser determinantes para a operação de algumas aeronaves.

Definido o plano, é feita uma última checagem geral nas informações de todos os aeródromos selecionados, tanto para destino como para alternativa, com o intuito de evitar quaisquer surpresas indesejadas no momento do voo. Após isso, a CPROG confirma o planejamento junto ao elo do COMAE, que ficará responsável por elaborar e emitir a OFRAG.

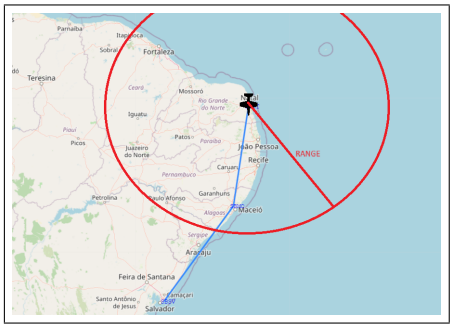

Figura 1: Representação gráfica do alcance de uma aeronave. Fonte: O Autor.

2.2.5 Emissão da Ordem Fragmentária (OFRAG)

Após o planejamento detalhado, o COMAE revisa e aprova o planejamento, emitindo a Ordem Fragmentária (OFRAG), que formaliza e autoriza a execução da missão.

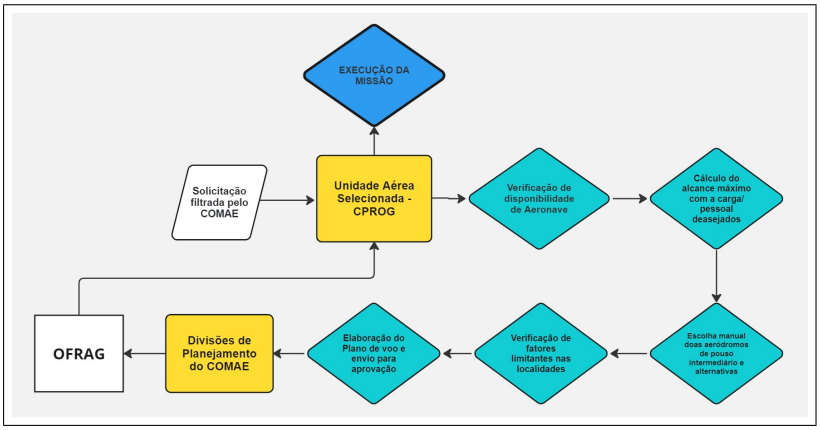

Figura 2: Fluxo normal do Planejamento Manual de missão TAL. Fonte: O Autor.

2.3 Lista de Variáveis e Símbolos

Símbolo	**Descrição**
K	Carga Total
P_i	Peso de cada item ou passageiro
O	Localidade de Origem
D	Localidade de Destino
S	Localidade da Aeronave (Sede)
$H_{\text{solicitada}}$	Data e Hora da Solicitação
Z	Custo Total
P_a	Custo da hora de voo da Aeronave
d	Distância entre pontos
L_a	Limite de Carga e Passageiros
$H_{\text{início}}$	Horário de início da jornada diária
H_{fim}	Horário de fim da jornada diária
T_{voo}	Tempo de voo
J_{max}	Tempo máximo de missão (Jornada máxima)
ϕ_1, ϕ_2	Latitudes
λ_1, λ_2	Longitudes
$\Delta\phi$	$\phi_2 - \phi_1$
$\Delta\lambda$	$\lambda_2 - \lambda_1$
R	Raio da Terra (6,371 km)
C_{disp}	Combustível disponível
PMD	Peso Máximo de Decolagem
PBO	Peso Básico Operacional
v	Valor original
u_1	Unidade de origem
u_2	Unidade de destino
C_{rem}	Combustível remanescente
C_{cons1h}	Combustível consumido na primeira hora
C_{cap}	Capacidade dos tanques da aeronave
A	Alcance
A_{1h}	Alcance da primeira hora
V	Velocidade da aeronave
C_{razao}	Razão de consumo de combustível
I_x	Aeródromos intermediários
$d(A, B)$	Distância total voada para ir de A para B

Tabela 1: Lista de Variáveis e Símbolos

2.4 Modelagem Matemática

A modelagem matemática do planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL) envolve a tradução de cada etapa do processo manual descrito anteriormente em um conjunto de equações matemáticas. A seguir, são apresentadas as equações que representam as principais etapas do planejamento, desde a solicitação da missão até a definição do plano de voo.

2.4.1 Análise da Solicitação de Missão

A solicitação de uma missão inclui a soma de pesos de todos os passageiros e cargas, tal qual:

$$K = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{P}_i \tag{1}$$

O objetivo é minimizar o custo total da missão, que pode ser representado como:

$$Z = P_a \times T_{voo} \tag{2}$$

Para garantir que a aeronave selecionada seja a de menor custo de hora de voo, a minimização é definida como:

$$\min P_a \tag{3}$$

A minimização do custo total pode ser alcançada através da minimização das distâncias voadas entre S, O e D:

$$\min[d(S, O) + d(O, D)] \tag{4}$$

2.4.2 Planejamento

O planejamento detalhado da missão envolve a consideração de várias restrições operacionais. Uma importante restrição é que o somatório dos pesos não pode ultrapassar o limite estabelecido pela aeronave:

$$\sum_{i=1}^{n} \mathrm{P}_i \leq L_a \tag{5}$$

A Fadiga de voo também é fator primordial no planejamento, e pode ser modelada da seguinte maneira:

$$H_{\text{fim}} - H_{\text{início}} \leq J_{\text{max}} \tag{6}$$

2.4.3 O Plano de Voo

A definição do plano de voo pode ser modelada considerando o alcance máximo da aeronave e a escolha de aeródromos intermediários, para isso faz-se necessário o cálculo de distâncias.

As distâncias são calculadas por meio da fórmula de *Haversine*, uma equação usada para calcular a distância mais curta entre dois pontos na superfície de uma esfera, dadas suas latitudes e longitudes.

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \tag{7}$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right) \tag{8}$$

$$d = R \cdot c \tag{9}$$

O combustível disponível em função da carga em Kg é calculado da seguinte forma:

$$C_{disp} = PMD - PBO - K \tag{10}$$

Como diferentes aeronaves podem ter seus atributos expressos em diversas unidades de medida, faz-se necessária a conversão de unidades.

$$\text{Converter}(v, u_1, u_2) = \begin{cases} v & \text{if } u_1 = u_2 \\ v \times 2.20462 & \text{if } u_1 = \text{Kg e } u_2 = \text{Lb} \\ v/2.20462 & \text{if } u_1 = \text{Lb e } u_2 = \text{Kg} \\ v \times 1.852 & \text{if } u_1 = \text{kt e } u_2 = \text{km/h} \\ v/1.852 & \text{if } u_1 = \text{km/h e } u_2 = \text{kt} \end{cases} \tag{11}$$

O cálculo do alcance é realizado da seguinte forma:

O combustível remanescente é o total menos 45 min considerados para o planejamento de voos IFR:

$$C_{rem} = C_{disp} - C_{razao} \times 0.75 \tag{12}$$

É importante garantir que o cálculo do combustível total disponível não ultrapasse a capacidade dos tanques da aeronave.

$$C_{rem} = \min\big((C_{cap} - C_{razao} \times 0.75),\ C_{rem}\big) \tag{13}$$

Cálculo do alcance da primeira hora.

$$A_{1h} = \min\big(1h \times V,\ \frac{C_{rem}}{C_{cons1h}} \times V\big) \tag{14}$$

Cálculo do alcance total:

$$A = A_{1h} + \ max\Big(0,\ \frac{(C_{rem} - C_{cons1h})}{C_{razao}} \times V\Big) \tag{15}$$

Para a regra de escolha dos aeródromos de pouso intermediário deve-se minimizar a distância

entre os aeroportos escolhidos e o destino:

$$\min d(I_x, D) \tag{16}$$

2.4.4 Considerações Finais

A modelagem matemática das etapas do planejamento de missões de TAL fornece uma estrutura sistemática e rigorosa para a tomada de decisões. Ao traduzir os julgamentos e decisões manuais em equações formais, o processo de planejamento torna-se mais objetivo, transparente e passível de otimização por métodos computacionais.(Baker et al., 2002)

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta Seção, serão abordados estudos que ratificam a importância da modelagem de ambientes operacionais de transporte aéreo. Além disso, será demonstrado o Método Guloso - *Greedy Method*, os ganhos e óbices dessa abordagem e exemplos de sua aplicação em situações similares à apresentada no presente trabalho. Finalizaremos com a retomada do problema específico de planejamento no Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE) à luz das informações aqui expostas.

3.1 Modelagem do Ambiente Operacional

A otimização de operações militares é um campo de estudo que tornará mais eficientes e eficazes as operações militares através da aplicação de métodos matemáticos e computacionais. Baker *et al.* discutem em detalhe a aplicação de programação linear para otimizar o transporte aéreo militar dos Estados Unidos. O estudo destaca a importância de se considerar as diversas restrições operacionais para garantir um planejamento robusto e eficiente.

A modelagem de capacidades operacionais envolve a criação de modelos matemáticos que representem as capacidades e restrições de um sistema operacional da melhor maneira possível. Esta abordagem permite uma análise detalhada e a otimização do uso dos recursos disponíveis.Baker et al. (2002)

A modelagem de restrições é crucial para refletir as condições reais enfrentadas durante o planejamento de missões. Baker *et al.* (2002) destacam que as restrições podem incluir:

- **Capacidade das Aeronaves:** Limites de carga e passageiros que cada aeronave pode transportar.
- **Disponibilidade das Aeronaves:** Número de aeronaves disponíveis em um dado momento.
- **Restrição de Tempo:** Janela temporal para o cumprimento das missões, incluindo horários de decolagem e pouso.
- **Capacidade dos Aeródromos:** Limitações dos aeródromos em termos de espaço e infraestrutura.
- **Combustível e Alcance:** Quantidade de combustível disponível e alcance máximo das aeronaves.

Essas restrições são essenciais para garantir que o planejamento seja realista e executável. Baker *et al.* observaram e aplicaram esses princípios em um modelo de programação linear para otimizar o transporte aéreo militar dos Estados Unidos. Eles mostram como a consideração detalhada das restrições melhora significativamente a eficiência das operações. A inclusão de restrições no modelo de planejamento traz vários benefícios como:

- **Maior Precisão:** Garante que o planejamento reflete as capacidades e limitações reais das aeronaves e dos aeródromos.
- **Eficiência Operacional:** Permite a otimização do uso dos recursos disponíveis, reduzindo custos e melhorando a eficiência das missões.
- **Planejamento Objetivo:** Facilita a tomada de decisões baseada em dados, tornando o processo de planejamento mais objetivo e menos sujeito a erros humanos.

Modelar o ambiente é vital para iniciar o processo de otimização. Todavia, para se obter respostas ótimas, apoiar-se somente na experiência dos planejadores nem sempre é o suficiente, sendo necesário o auxílio de alguma ferramenta como um algoritmo operado computacionalmente.

3.2 O Método Guloso - (Greedy Method)

O Método Guloso, ou Greedy Method, é uma estratégia de otimização que toma decisões localmente ótimas em cada etapa, com a esperança de encontrar uma solução globalmente ótima. Conforme descrito por Cormen et al. (2009), o método é caracterizado por três aspectos principais:

- **Escolha Localmente Ótima:** Em cada passo do processo, a decisão tomada é a que parece ser a melhor naquele momento, sem considerar os efeitos a longo prazo. Esta escolha é baseada em algum critério de otimização aplicado localmente.
- **Irrevogabilidade:** As decisões tomadas em cada etapa são definitivas e não podem ser desfeitas. Uma vez que uma decisão é tomada, ela é fixada e o processo continua para a próxima etapa.
- **Objetivo de Otimização Global:** Embora o foco seja em escolhas locais ótimas, o objetivo final é encontrar uma solução que seja globalmente ótima ou, pelo menos, próxima do ótimo. A eficácia do método depende de quão bem as escolhas locais se alinham com o objetivo global.

Muitos exemplos clássicos da literatura utilizam esse método para gerar respostas, abaixo serão listados alguns deles:

- **Problema do Caixeiro Viajante (TSP):** Neste problema, um vendedor deve visitar um conjunto de cidades exatamente uma vez e retornar à cidade de origem, minimizando a distância total percorrida. Um algoritmo Guloso típico para o TSP é o algoritmo do vizinho mais próximo, onde o vendedor sempre escolhe a cidade mais próxima como o próximo destino.
- **Problema da Mochila (Knapsack Problem):** Dado um conjunto de itens, cada um com um peso e um valor, o objetivo é determinar o número de itens a incluir em uma mochila de capacidade limitada para maximizar o valor total. O algoritmo Guloso para este problema ordena os itens pela razão valor/peso e seleciona os itens com as maiores razões até que a capacidade da mochila seja atingida.

- **Problema da Atividade de Seleção:** Dado um conjunto de atividades, cada uma com um tempo de início e de término, o objetivo é selecionar o maior número possível de atividades que não se sobreponham. O algoritmo Guloso seleciona a atividade que termina mais cedo e, em seguida, escolhe a próxima atividade que começa após o término da atividade selecionada.

3.2.1 Aplicações do Método Guloso

Além dos exemplos clássicos, o método Guloso pode ser aplicado em diversas áreas, tais como:

- **Redes de Computadores:** Em algoritmos de roteamento e redes sem fio, onde a escolha do próximo salto é feita com base na menor distância ou maior eficiência energética.
- **Codificação de Dados:** Em algoritmos de compressão, como o algoritmo de Huffman, que utiliza uma abordagem gananciosa para construir uma árvore de codificação ótima.
- **Grafos e Redes:** Em problemas como o algoritmo de *Prim* e o algoritmo de Kruskal para encontrar árvores de menor custo (Minimum Spanning Trees) em grafos.

3.2.2 Vantagens do Método Guloso

- **Simplicidade:** Fácil de entender e implementar.
- **Eficiência:** Rápido e geralmente eficiente em termos de tempo de execução.
- **Bons Resultados:** Frequentemente produz soluções boas, mesmo que não sejam ótimas, especialmente para problemas onde as escolhas locais se aproximam bem da solução global.

3.2.3 Desvantagens do Método Guloso

- **Sub-Otimização Global:** Pode falhar em encontrar a solução globalmente ótima.
- **Miopia:** As decisões são baseadas apenas em informações locais, o que pode levar a escolhas sub-ótimas no contexto global.

- **Irrevogabilidade:** Decisões não podem ser revisadas, o que pode ser uma limitação em problemas onde ajustes posteriores seriam benéficos.

3.2.4 Considerações Teóricas

O método Guloso é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficiência computacional. Ele é fácil de implementar e muitas vezes produz soluções bastante satisfatórias em um curto período. No entanto, a abordagem gananciosa nem sempre garante uma solução globalmente ótima.(Cormen et al., 2009)

O sucesso do método Guloso depende de uma propriedade chamada "subestrutura ótima". Um problema exibe subestrutura ótima se uma solução ótima do problema pode ser construída a partir de soluções ótimas de seus subproblemas. Quando esta propriedade está presente, os algoritmos Gulosos são mais propensos a encontrar a solução globalmente ótima.

Em conclusão, o método guloso é uma ferramenta poderosa em problemas de otimização, oferecendo um equilíbrio entre simplicidade e eficiência. No entanto, deve-se estar ciente de suas limitações e considerar a natureza específica do problema ao decidir sua aplicação.

A seguir, será demonstrado um exemplo de uso deste método, com o intuito de otimizar a transmissão de rede em um ambiente dotado de restrições.

3.3 Aplicação do Método Guloso Em Um Problema Real

Um bom exemplo de aplicação do método Guloso é o trabalho de Hao *et al.* (2022), que propõe um algoritmo de roteamento eficiente para redes de sensores sem fio com colheita de energia (EH-WSN). Este estudo é significativo ao abordar o desafio de otimizar a transmissão de dados em uma rede de sensores limitada por energia, utilizando uma estratégia gananciosa para maximizar a eficiência energética e minimizar o tempo de transmissão.

O protocolo desenvolvido pelos autores utiliza uma abordagem gananciosa para selecionar o próximo salto com base em múltiplos fatores, incluindo energia residual, taxa de colheita de energia, distância e tempo de transmissão. A lógica por trás do algoritmo Guloso é tomar a melhor decisão local possível em cada etapa do processo, escolhendo o nó de sensor que

oferece a melhor combinação de fatores mencionados para transmitir dados ao próximo ponto na rede (Hao et al., 2022)

3.3.1 Estrutura do Algoritmo Guloso de Hao et al. (2022)

- **Energia Residual:** O algoritmo dá preferência a nós de sensores que possuem maior energia residual, garantindo que o nó selecionado suporte a transmissão de dados sem esgotar sua energia.
- **Taxa de Colheita de Energia:** Nós com maior taxa de colheita de energia são preferidos por poderem recarregar suas baterias mais rapidamente, sustentando operações prolongadas.
- **Distância:** A distância entre os nós é minimizada para reduzir o consumo de energia durante a transmissão e o tempo de transmissão.
- **Tempo de Transmissão:** O algoritmo também considera o tempo necessário para a transmissão de dados, selecionando nós que garantem a entrega rápida das informações.

3.3.2 Implementação e Resultados

O cenário de teste envolve uma rede de sensores sem fio composta por 50 nós de sensor distribuídos aleatoriamente em uma área de 100m x 100m. Cada nó de sensor possui uma capacidade inicial de energia e uma taxa de colheita de energia variável. O objetivo do algoritmo é encontrar uma rota de comunicação que minimize o consumo de energia e maximize a longevidade da rede.

As principais métricas de avaliação utilizadas no estudo foram:

- **Consumo Total de Energia**: A quantidade total de energia consumida pelos nós de sensor durante a comunicação.
- **Tempo de Vida da Rede**: O tempo até que o primeiro nó de sensor fique sem energia.
- **Número de Nós Ativos**: O número de nós que permanecem ativos ao longo do tempo.

Os resultados obtidos pelo algoritmo de Hao et al. (2022) foram comparados com outros algoritmos de roteamento, como o algoritmo de roteamento baseado em energia residual (ER)

e o algoritmo de roteamento baseado em distância mínima (DM). A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados:

Tabela 2: Comparação dos Resultados dos Algoritmos de Roteamento

Algoritmo	Consumo Total de Energia (J)	Tempo de Vida da Rede (s)	Nós Ativos
ER	1200	600	40
DM	1150	650	42
Proposto (GS)	900	800	45

Interpretação dos Resultados

- **Consumo Total de Energia**: O algoritmo proposto (GS) reduziu significativamente o consumo total de energia em comparação com os algoritmos ER e DM, demonstrando uma melhoria de aproximadamente 22% em relação ao algoritmo ER.
- **Tempo de Vida da Rede**: O tempo de vida da rede também foi estendido pelo algoritmo proposto, resultando em um aumento de 33% em comparação com o algoritmo ER.
- **Número de Nós Ativos**: O algoritmo proposto conseguiu manter mais nós ativos ao longo do tempo, indicando uma distribuição de carga mais equilibrada e eficiente.

Esses resultados mostram a eficácia do algoritmo proposto por Hao et al. (2022) em melhorar a eficiência energética e a longevidade das redes de sensores sem fio com colheita de energia. O exemplo ilustra como a aplicação do Método Guloso pode levar a soluções mais eficientes em termos de consumo de energia e tempo de vida da rede, destacando a relevância e aplicabilidade dessa abordagem em cenários reais.

A implementação do algoritmo Guloso no contexto de EH-WSN demonstrou várias vantagens significativas, contudo, o modelo baseado neste método também apresenta limitações. São elas, respectivamente:

Vantagens

- **Eficiência Computacional:** A simplicidade do algoritmo permite rápidas decisões sobre o próximo salto, resultando em baixo consumo de recursos computacionais. Esta característica é crucial em redes de sensores, onde a capacidade de processamento é limitada.

- **Desempenho em Tempo Real:** A estratégia gananciosa é particularmente útil em cenários onde decisões em tempo real são críticas, como em redes de sensores e operações logísticas ao garantir resultados eficazes em um curto período e com a alocação de poucos recursos. A capacidade de tomar decisões rápidas é essencial para manter a operação contínua e eficiente da rede.
- **Adaptabilidade:** O algoritmo pode ser facilmente adaptado para considerar diferentes critérios, como energia residual ou restrições específicas da operação. Essa flexibilidade permite que o algoritmo seja ajustado para diferentes cenários e requisitos operacionais, tornando-o versátil para várias aplicações.

Limitações

- **Sub-Otimização Global:** Embora o algoritmo encontre soluções ótimas localmente, ele pode não garantir a solução ótima globalmente, o que pode levar a caminhos sub-ótimos. Isso ocorre porque as decisões locais não consideram o impacto global no sistema, podendo resultar em eficiência reduzida em alguns casos.
- **Dependência de Critérios Locais:** A eficácia do método Guloso depende fortemente dos critérios locais utilizados para a tomada de decisão, podendo não capturar completamente as complexidades do cenário global. A dependência excessiva de critérios locais pode limitar a capacidade do algoritmo de se adaptar a mudanças dinâmicas na rede.

O estudo de Hao et al. (2022) ilustra de maneira eficaz como o Método Guloso pode ser aplicado para resolver problemas complexos. A abordagem permite que decisões rápidas e eficientes sejam tomadas com base em restrições locais, resultando em uma operação mais eficiente e sustentável da rede. No entanto, é importante reconhecer que, embora o método Guloso ofereça vantagens, ele também tem limitações inerentes, como a potencial sub-otimização global e a dependência de critérios locais.

Essas observações são relevantes para o contexto do planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL) da Força Aérea Brasileira (FAB), em que decisões rápidas e eficientes são vitais. A aplicação de um método Guloso adaptado às especificidades do cenário operacional da FAB pode contribuir significativamente para a otimização do uso dos recursos

aéreos, melhorando a eficiência operacional e reduzindo custos, desde que as limitações do método sejam adequadamente gerenciadas.

3.4 Considerações Finais

A fundamentação teórica desta Seção explora o método Guloso, detalhando suas vantagens e limitações, e destaca a importância da modelagem matemática e da consideração das restrições operacionais no planejamento de operações aéreas. A revisão da literatura demonstra que a inclusão cuidadosa dessas restrições melhora a precisão, a eficiência operacional e a objetividade do planejamento, otimizando o uso dos recursos, reduzindo custos e aprimorando a eficiência das missões. No contexto da Força Aérea Brasileira (FAB) e das operações de Transporte Aéreo Logístico (TAL), a aplicação do método Guloso no planejamento de rotas de voo envolve a escolha do próximo aeródromo de reabastecimento ou destino com base em critérios como distância mínima, consumo de combustível ou tempo total de voo, visando maximizar a eficiência operacional e minimizar custos. Esta fundamentação teórica oferece uma base sólida para a aplicação dessas metodologias no COMAE, visando a otimização do planejamento das missões das Unidades Aéreas da FAB.

Na próxima Seção, discutiremos a metodologia adotada para a aplicação do Método Guloso com o algoritmo proposto para o planejamento de missões TAL no COMAE, detalhando como as restrições e capacidades são incorporadas para gerar soluções eficientes e práticas num curto período.

4 DADOS E MÉTODOS

Nesta Seção, apresentaremos os dados e métodos utilizados para otimizar o processo de planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL) na Força Aérea Brasileira (FAB). O foco principal será a descrição do algoritmo desenvolvido para minimizar os custos operacionais através da otimização dos planejamentos.

4.1 Algoritmo Proposto - *Greedy Path Planner*

O presente trabalho propõe um algoritmo para auxiliar o COMAE e as Unidades Aéreas a planejarem as missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL) da Força Aérea Brasileira (FAB). O código foi implementado utilizando o Método Guloso, ou *Greedy Method*, utilizando bibliotecas para otimização e manipulação de dados extraídos da AISWEB e dos manuais técnicos das aeronaves do 2º Esquadrão de Transporte Aéreo.

O algoritmo é constituído basicamente por 3 processos: Seleção de Aeronave e Unidade, Definição de Plano de Voo Viável e Cálculo de Tempo e Custos.

Para atingir os objetivos propostos, o algoritmo utiliza informações técnicas das aeronaves e localidades, balizadas pela mesma modelagem matemática utilizada no planejamento convencional.

4.1.1 Bases de dados

A base de dados utilizada para os cálculos do algoritmo foi retirada das mesmas fontes usadas diariamente pela CPROG do 2° ETA, são elas:

- **Aeronaves:** Dados técnicos das aeronaves contidos nos seus respectivos manuais e utilizados para fins de planejamento pela CPROG do 2º ETA.
- **Aeródromos:** Dados dos aeródromos constantes na planilha de aeroportos onde a FAB possui contrato de combustível, consultados através da AISWEB e do CELOG.
- **Solicitações de missão:** Pedidos que chegaram à CPROG do 2º ETA e foram utilizados como exemplo neste trabalho.
- **Planejamentos manuais:** Planejamentos elaborados pela CPROG do 2º ETA em situação real, atendendo ao que foi solicitado pelo COMAE.
- **Projetos de cada Unidade Aérea:** Para este trabalho foram considerados os projetos voados por cada Esquadrão de Transporte Aéreo (ETA) sediados em 6 diferentes localidades no território nacional, no total são 3 possibilidades de projetos: C-98A "Grand Caravan", C-95M "Bandeirante"e C-97 "Brasilia".

4.1.2 Variáveis de Entrada

Para realizar um processo completo de planejamento utilizando-se o algoritmo, faz-se necessária a entrada de 3 tipos de dado, são eles:

- **Tipo de Aeronave:** Modelo de aeronave (projeto) a ser empregado no planejamento.
- **Carga total:** Peso da carga somada ao peso dos passageiros a serem transportados.
- **Aeroportos de Origem e Destino:** Códigos ICAO dos aeroportos de origem e destino.
- **Distância Mínima de Alternativa:** Distância mínima aceitável para escolha de aeródromo de alternativa.
- **Desvio Lateral Máximo:** Máxima distância entre os aeródromos do plano de voo e a reta que une a origem ao destino.
- **Data e Hora:** Data e hora desejadas para início da missão.

4.1.3 Principais funções

O algorítmo conta com funções de cálculo que respeitam o modelo matemático de planejamento, permitindo a obtenção de um plano de voo realista, fiel ao que se estabelece no COMAE e nas Unidades Aéreas atualmente.

Seleção de aeronave e unidade: Para o processo de seleção de aeronave e Unidade Aérea realizado pelo COMAE, é proposto um código que tem como variáveis de entrada os dados da solicitação, e apresenta duas funções:

- Verificação de viabilidade: confere quais projetos comportam a solicitação de missão através da verificação de peso máximo suportado por cada modelo de aeronave.
- Cálculo de custos e ordenação: calcula os custos da missão estabelecida pelo pedido com cada aeronave viável disponível. Neste passo é realizada a medição de distâncias entre as localidades a serem visitadas, associada ao custo por hora de voo de cada projeto, ordenando os resultados obtidos ao final.

Com isso, é possível selecionar uma aeronave que comporte a carga e ter uma noção do

custo aproximado para o cumprimento daquela missão, considerando todos os deslocamentos necessários desde a saída da aeronave de sua sede, até seu retorno. Além disso, torna-se simples a comparação entre as possibilidades, conforme a Tabela 3:

Tabela 3: Comparação dos Resultados de Custo por Aeronave

Unidade	Projeto	Localidade	Custo (US$)
5 ETA	C-97	SBCO	42397.54
3 ETA	C-97	SBGL	49977.28
6 ETA	C-97	SBBR	53255.98
7 ETA	C-97	SBMN	63596.31
2 ETA	C-97	SBNT	63777.44
1 ETA	C-97	SBBE	64045.42

Determinação do plano de voo: Esta parte do algoritmo é a aplicação do Método Guloso propriamente dita. Inicialmente, é realizado o cálculo de alcance máximo, posteriormente o plano de voo é definido da seguinte maneira:

O algoritmo *Greedy Path With Alternatives* busca, dentre todos os aeródromos no raio de alcance calculado para a aeronave selecionada e com a carga solicitada, qual aeródromo permitirá maior aproximação com o destino, desde que, após isso, ainda haja combustível para ir a outro aeródromo (de alternativa) e ainda voar mais 45 minutos. A escolha dos aeródromos é restringida pelas distâncias escolhidas pelo usuário. Além disso, o algoritmo considera se a aeronave tem capacidade de realizar aproximação por procedimento instrumento não convencional, excluindo os aeroportos não compatíveis. Após a escolha do próximo aeroporto, onde ocorrerá um pouso intermediário, a localidade atual é alterada para tal, e o algoritmo repete sua função, até que encontre como pouso viável o destino selecionado pela solicitação de missão.

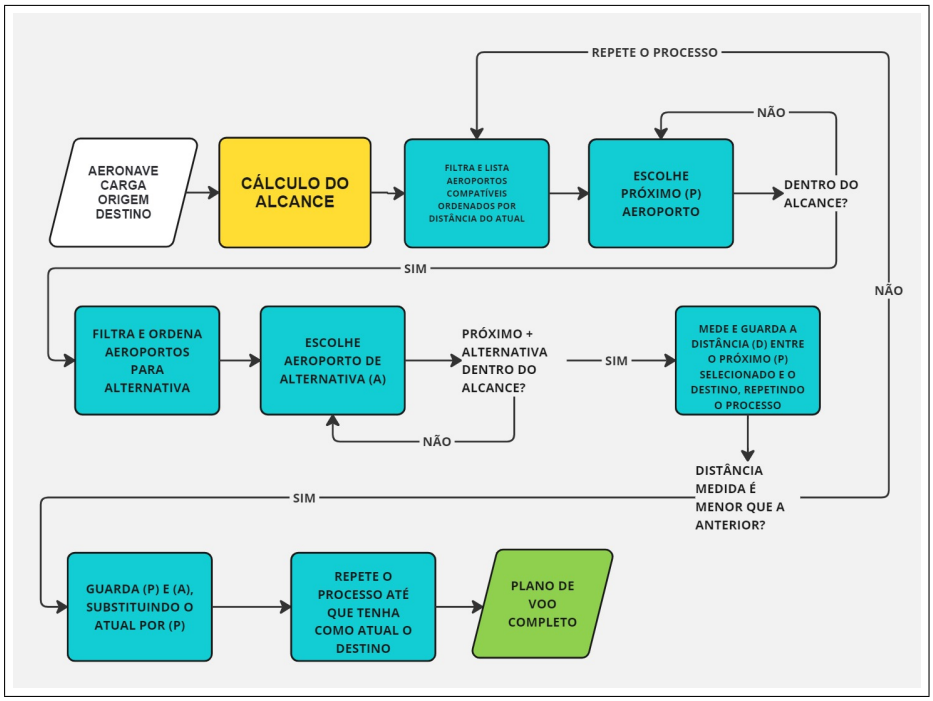

Figura 3: Fluxograma para o algoritmo *Greedy Path with Alternatives*. Fonte: O Autor.

A função é composta por *loopings* que testam os aeródromos contidos no banco de dados até que se satisfaça todas as condições estabelecidas pelo usuário, guardando os aeroportos selecionados ao final.

Esta parte do algoritmo é gerenciada por outra função que consegue lidar com múltiplos destinos e diferentes cargas, realizando todos os cálculos necessários um seguido do outro, montando, assim, uma missão completa, com diversas demandas. A Tabela 4 mostra um exemplo de como o algoritmo dá o resultado:

Tabela 4: Exemplo de Resultado obtido pela função *Greedy Path With Alternatives*.

Etapa	Data	**DEP**	**ARR**	**ALT**	TEV	DISP (Kg)	COMB (Lb)
01	20/07/2024	SBNT	SBAR	SBMO	01:40 h	181	1839
02	20/07/2024	SBAR	SBPS	SBVC	01:50 h	112	1991
03	20/07/2024	SBPS	SBSC	SBGW	02:30 h	20	2194
04	21/07/2024	SBSC	SBFL	SBJV	02:00 h	131	1949
05	21/07/2024	SBFL	SBCO	SBPK	01:00 h	359	1446

Tempo total de voo: 09:00 h
Tempo total de missão: 1 dia 04:00 h
Custo total (US$): $13778.37

Calculadora: Calcula, com base nos dados das aeronaves e no plano de voo anteriormente determinado, o tempo de voo por etapa, bem como o tempo total de voo na missão e o período de envolvimento, que considera os momentos no solo para reabastecimento, e o descanso da tripulação em caso de missões que extrapolam o período máximo de operação diário. Além disso, efetua o cálculo da disponibilidade, combustível necessário por etapa e dos custos da missão, em dólares americanos, embasados pelo custo logístico da hora de voo de cada aeronave, emitidos pelo EMAER semestralmente, conforme previsto em BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico (DIRMAB) (2010). A Tabela 5 destaca as partes do resultado calculadas pela função:

Tabela 5: Exemplo de Resultado obtido pela Calculadora.

Etapa	Data	DEP	ARR	ALT	TEV	**DISP (Kg)**	**COMB (Lb)**
01	20/07/2024	SBNT	SBAR	SBMO	01:40 h	181	1839
02	20/07/2024	SBAR	SBPS	SBVC	01:50 h	112	1991
03	20/07/2024	SBPS	SBSC	SBGW	02:30 h	20	2194
04	21/07/2024	SBSC	SBFL	SBJV	02:00 h	131	1949
05	21/07/2024	SBFL	SBCO	SBPK	01:00 h	359	1446

Tempo total de voo: 09:00 h
Tempo total de missão: 1 dia 04:00 h
Custo total (US$): 13778.37

4.2 Visão Geral do processo estabelecido pelo algoritmo

O processo estabelecido pelo algoritmo é subdividido em três partes principais, cada uma representando uma etapa essencial do planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL). Primeiramente, ocorre a seleção da aeronave e da unidade responsável pela missão. Esta etapa envolve a verificação da viabilidade da solicitação, considerando as capacidades de carga e a disponibilidade das aeronaves. Em seguida, o algoritmo define um plano de voo viável, utilizando métodos matemáticos para calcular o alcance máximo da aeronave, escolher aeródromos intermediários adequados e garantir que todas as restrições operacionais sejam respeitadas. Finalmente, a última etapa consiste no cálculo do tempo total de voo, do tempo total de missão, e dos custos operacionais associados. Este processo é gerenciado por uma série de funções matemáticas implementadas no algoritmo, que rapidamente geram resultados completos e de-

talhados, conforme demonstrado na Figura 4.

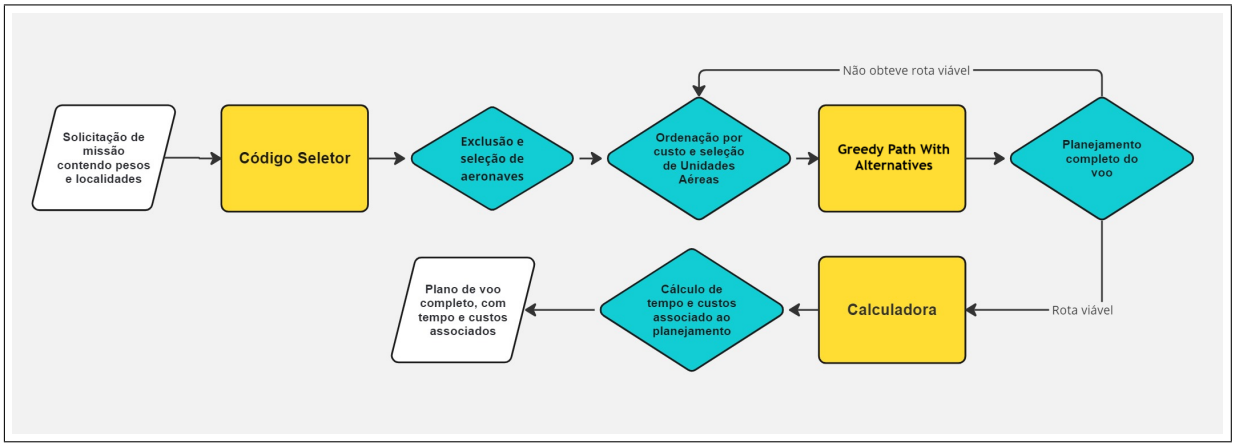

Figura 4: Fluxo estabelecido pelo Modelo Proposto. Fonte: O Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do modelo criado no planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL) na Força Aérea Brasileira (FAB) apresenta um conjunto de vantagens e desvantagens que devem ser consideradas. Esta análise permite uma melhor compreensão das capacidades e limitações do método, ajudando a orientar seu uso de maneira eficiente e eficaz.

5.1 Análise Comparativa entre Métodos de Planejamento

Neste subtópico, serão analisados planejamentos referentes a uma mesma solicitação: um utilizando o método convencional e outros dois empregando o modelo proposto. O objetivo desta análise é verificar as semelhanças e discrepâncias entre os processos, destacando os pontos positivos e negativos de cada abordagem no planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL).

Os planejamentos em questão são referentes a um pedido de transporte de 7 passageiros (667 kg) de Natal (SBNT) a Brasília (SBBR), seguido de 3 passageiros (300 kg) de Brasília (SBBR) a São José dos Campos (SBSJ), finalizando com a volta da aeronave vazia para a localidade de origem. Para o referido voo, foi solicitado pelo COMAE o uso da aeronave C-95M “Bandeirante”.

Para esta análise, serão considerados:

- **Planejamento 1:** Realizado pela CPROG para o C-95M
- **Planejamento 2:** Realizado pelo modelo para o C-98A
- **Planejamento 3:** Realizado pelo modelo para o C-95M

Inicialmente, será verificada a rota real proposta pela CPROG da Unidade Aérea (2º ETA), em seguida serão mostrados os resultados encontrados pelo algoritmo.

Tabela 6: Planejamento 1.

Etapa	Data	DEP	ARR	ALT	TEV	DISP (Kg)	COMB (Lb)
01	20/07/2024	SBNT	SBPL	SBAR	02:00 h	76	2364
02	20/07/2024	SBPL	SBBR	SBAN	03:05 h	19	2489
03	20/07/2024	SBBR	SBSJ	SBKP	02:25 h	556	2116
04	21/07/2024	SBSJ	SBVT	SBME	01:55 h	833	2056
05	21/07/2024	SBVT	SBSV	SBAR	02:25 h	763	2320
06	21/07/2024	SBSV	SBNT	SBMS	02:25 h	764	2317

Tempo total de voo: 14:15 h
Tempo total de missão: 1 dia 08:45 h
Custo total (US$): 21815.75

Agora, a possibilidade de planejamento obtida pelo uso do algoritmo, utilizando-se as mesmas quantidades de peso e localidades de origem e destino:

Inicialmente, verifica-se o resultado do seletor para observarmos as aeronaves viáveis ordenadas por custo total da missão.

Tabela 7: Resultado do seletor.

Unidade	Projeto	Localidade	Custo (US$)
2 ETA	C-98A	SBNT	16302.01
2 ETA	C-95M	SBNT	21115.73
1 ETA	C-98A	SBBE	21513.33
6 ETA	C-98A	SBBR	22249.64
7 ETA	C-98A	SBMN	25568.07
5 ETA	C-98A	SBNT	26878.52
1 ETA	C-95M	SBBE	27865.87
6 ETA	C-95M	SBBE	28819.59
1 ETA	C-97	SBNT	32953.71
6 ETA	C-95M	SBBR	34815.31
5 ETA	C-95M	SBCO	43488.14
1 ETA	C-97	SBNT	32953.71
6 ETA	C-95M	SBBR	34815.31
5 ETA	C-95M	SBCO	43488.14
3 ETA	C-97	SBGL	44976.54
6 ETA	C-95M	SBGL	46981.63
7 ETA	C-95M	SBMN	51684.59
5 ETA	C-95M	SBCO	54333.61

Pela leitura do seletor, interpreta-se que todas as aeronaves da base de dados são capazes de embarcar a solicitação. Contudo, fica evidente que escolher uma aeronave sediada em Natal (SBNT) é uma opção econômica. Nesse caso, os dois modelos menos custosos são: C-98A "Grand Caravan"e C-95M "Bandeirante".

Para o pedido específico, o COMAE solicitou que fosse cumprida com o C-95M, entretanto, abaixo será demonstrado o planejamento feito pelo algoritmo com os dois modelos mais econômicos para que sejam feitas as devidas análises comparativas.

Para o C-98A "Grand Caravan":

Tabela 8: Planejamento 2.

Etapa	Data	DEP	ARR	ALT	TEV	DISP (Kg)	COMB (Lb)
01	20/07/2024	SBNT	SBAR	SBMO	02:10 h	30	1289
02	20/07/2024	SBAR	SBVC	SBPS	02:10 h	3	1349
03	20/07/2024	SBVC	SBMK	SBCF	01:20 h	99	1137
04	21/07/2024	SBMK	SBBR	SBAN	01:35 h	172	976
05	21/07/2024	SBBR	SBSJ	SBKP	03:05 h	304	1493
06	22/07/2024	SBSJ	SBVC	SBPS	03:50 h	407	1927
07	22/07/2024	SBVC	SBNT	SBMS	04:15 h	349	2055

Tempo total de voo: 18:25 h
Tempo total de missão: 2 dias 09:05 h
Custo total (US$): 17184.59

Para o C-95M "Bandeirante":

Tabela 9: Planejamento 3.

Etapa	Data	DEP	ARR	ALT	TEV	DISP (Kg)	COMB (Lb)
01	20/07/2024	SBNT	SBPL	SBAR	02:00 h	76	2364
02	20/07/2024	SBPL	SBBR	SBAN	03:05 h	19	2489
03	20/07/2024	SBBR	SBSJ	SBKP	02:25 h	556	2116
04	21/07/2024	SBSJ	SBIL	SBPS	03:20 h	560	2768
05	21/07/2024	SBIL	SBNT	SBMS	03:05 h	590	2700

Tempo total de voo: 13:55 h
Tempo total de missão: 1 dia 07:25 h
Custo total (US$): 21305.44

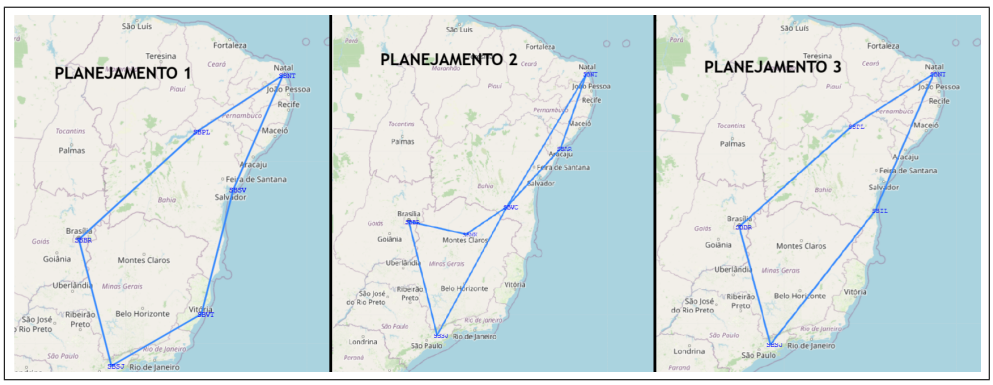

Figura 5: Visualização geográfica dos Planejamentos. Fonte: O Autor.

Analisando-se as Tabelas 6, 8 e 9 podemos verificar que há grande semelhança entre os

métodos, contudo é importante ressaltar as diferenças observadas.

Para os Panejamentos 1 e 3, o trecho entre SBNT, SBBR e SBSJ ficou idêntico. Entretanto, o retorno para a localidade de SBNT diferenciou os planos de voo obtidos pelos diferentes métodos. No Planejamento 1, verifica-se o pouso intermediário em Vitória (SBVT) e Salvador (SBSV), enquanto o Planejamento 3 obteve o retorno passando por apenas um aeroporto intermediário, Ilhéus (SBIL). No caso do Planejamento 2, devido à diferença de desempenho da aeronave, fez-se necessário mais pousos intermediários no trajeto total.

Agora, analisaremos a tabela comparativa entre os valores dos três planejamentos realizados.

Tabela 10: Comparação dos Resultados dos Planos de Voo

Plano	Horas de Voo	Tempo de Missão	Custo Total (US$)
Planejamento 1	14:15 h	1 dia 08:45 h	21815.75
Planejamento 2	18:25 h	2 dias 09:05 h	17184.59
Planejamento 3	13:55 h	1 dia 07:25 h	21305.44

A tabela 10 apresenta uma comparação dos resultados dos diferentes planos de voo em termos de horas de voo, horas de missão e custo total. Observa-se que o Planejamento 3 é o mais eficiente em termos de tempo, com 13:55 horas de voo e 1 dia e 07:25 horas de missão, resultando em um custo total de US$21305.44. Em contrapartida, o Planejamento 2, embora apresente o menor custo total de US$17184.59, requer um tempo significativamente maior de 18:25 horas de voo e 2 dias e 09:05 horas de missão, podendo não ser operacionalmente viável para a demanda. Já o Planejamento 1, com 14:15 horas de voo e 1 dia e 08:45 horas de missão, tem o custo mais elevado, totalizando US$21815.75.

Além disso, pela análise da Figura 5, percebe-se a semelhança gráfica entre as rotas realizadas por C-95M, o que pode demonstrar a dificuldade na percepção dessas oportunidades de economia de meios, as quais são difíceis de serem implementadas sem o auxílio de um modelo.

É importante ressaltar que as localidades escolhidas pelo modelo ainda demandam ser verificadas quanto às restrições não consideradas pelo algoritmo, tais como: disponibilidade de horário da pista e do pátio, meteorologia, NOTAM, entre outras situações cotidianas que

possam impedir a operação ou torná-la ineficiente. Contudo, após essas verificações, caso haja necessidade de alteração da rota, o desgaste de tempo e energia não é grande, exigindo apenas algumas mudanças nas variáveis de entrada ou na base de dados dos aeródromos utilizáveis, conforme veremos no exemplo a seguir:

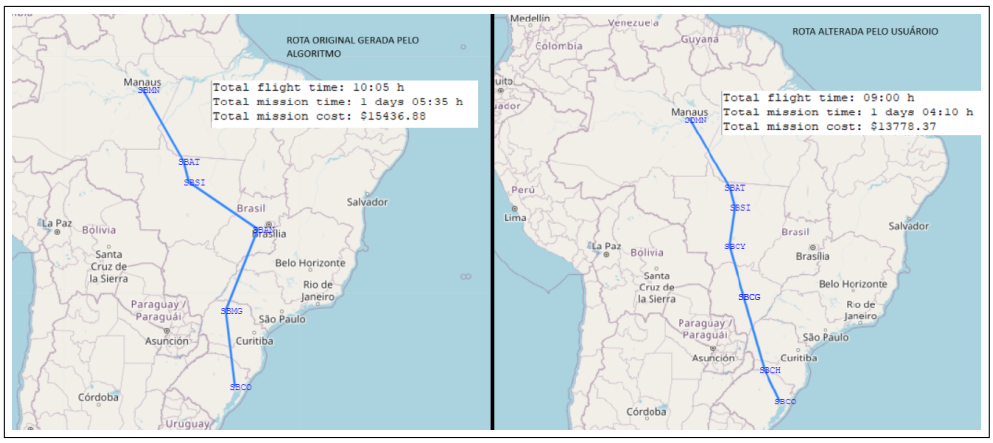

Figura 6: Necessidade de alteração na rota. Fonte: O Autor.

A Figura 6 apresenta dois planejamentos realizados pelo modelo, ambos para a mesma solicitação: 800 Kg de C-95M entre as localidades de Manaus (SBMN) e Canoas (SBCO). Pela visualização do primeiro (esquerda), percebe-se que há um desvio considerável na rota, pois o algoritmo entendeu que, naquela etapa específica, a escolha de Anápolis (SBAN) como aeroporto intermediário seria a melhor possível para aproximá-lo do destino. Contudo, este é um exemplo da "miopia"do Método Guloso, pois evidencia que escolhas ótimas locais podem não ser a melhor no contexto geral. Em situações como essa, a resolução é simples e rápida, demandando apenas o input de redução do desvio lateral, que orientará a rota para uma possibilidade mais eficiente. Neste caso, o usuário precisou reduzir o desvio para 200 Km, obtendo a rota da direita como resultado e reduzindo significativamente os valores de tempo e custo calculados para a missão.

A análise comparativa entre os métodos de planejamento convencional realizado pela CPROG do 2º ETA e o algoritmo proposto revela que, apesar das semelhanças nas rotas principais, o algoritmo oferece ganhos potenciais significativos em termos de tempo de voo e custos operacionais no exemplo analisado. Além disso, a dependência dos militares da CPROG em rotas já conhecidas, devido à familiaridade ou à frequente utilização das informações, pode levar

à inobservância de opções valiosas que poderiam resultar em uma maior economia de custos. A implementação do algoritmo proporciona um planejamento potencialmente mais eficiente e econômico, destacando-se como uma ferramenta valiosa para o COMAE no gerenciamento de missões de Transporte Aéreo Logístico.

5.2 Análise de Vantagens e Limitações do Algoritmo

A seguir, são apresentadas as principais vantagens e limitações associadas à implementação deste método no contexto operacional da FAB.

Vantagens

- **Simplicidade na Implementação:** O método Guloso é conhecido por sua simplicidade e facilidade de implementação. As regras para escolher a próxima etapa são claras e diretas, permitindo que o algoritmo seja desenvolvido e ajustado rapidamente. Isso é particularmente vantajoso em contextos onde o tempo de desenvolvimento é limitado.
- **Velocidade de Resultado:** Devido à sua natureza heurística, o método Guloso fornece resultados rapidamente. Em vez de explorar exaustivamente todas as possibilidades, ele toma decisões localmente ótimas em cada etapa, acelerando significativamente o processo de planejamento. Essa velocidade é crucial em situações onde decisões rápidas são necessárias, como em operações militares e logísticas.
- **Aproximação da Otimalidade:** Embora o método Guloso não garanta uma solução globalmente ótima, ele frequentemente se aproxima bastante da otimalidade. Em muitos casos práticos, as soluções encontradas são suficientemente boas para atender às necessidades operacionais, proporcionando um equilíbrio entre eficiência e precisão.
- **Robustez:** O método é robusto no sentido de que pode lidar com uma variedade de cenários e restrições sem necessitar de modificações significativas. Ele se adapta bem às diferentes demandas das missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL), considerando fatores como: capacidade de carga, alcance da aeronave, tipo de procedimentos e disponibilidade de aeródromos de reabastecimento.

- **Facilidade de Manutenção:** Devido à simplicidade do algoritmo, ele é fácil de manter e atualizar. Novas regras ou mudanças nas restrições podem ser incorporadas sem grandes complicações, garantindo que o método permaneça relevante e eficaz ao longo do tempo.
- **Eficiência Computacional:** O método Guloso requer relativamente poucos recursos computacionais, tornando-o adequado para ser executado em sistemas com capacidade limitada. Isso é especialmente útil em cenários operacionais onde a infraestrutura de TI pode ser básica.
- **Explora rotas de difícil percepção:** O modelo proposto também destaca a possibilidade de explorar rotas menos convencionais que podem ser ignoradas pelos militares da CPROG devido à familiaridade ou à recorrência de determinadas rotas consideradas tradicionais. Esta capacidade de identificar opções mais econômicas reforça a utilidade do modelo como uma ferramenta complementar valiosa no planejamento de missões TAL.

Limitações

- **Não considera Aeródromos em que não haja reabastecimento:** O método proposto limita-se a considerar apenas aeródromos onde há capacidade de reabastecimento. Isso pode restringir as opções de rota e, potencialmente, levar a subutilização de aeródromos que poderiam ser viáveis como pontos de destino ou de contingência, ainda que, para muitas Unidades Aéreas, este tipo de operação seja minoritária.
- **Limitação na Integração de Dados Externos:** O algoritmo não possui a capacidade de ajustar-se automaticamente a mudanças inesperadas nos aeródromos ou aeronaves, como condições meteorológicas adversas, fechamento de aeroportos para manutenção ou questões organizacionais. Essas variáveis exigem intervenção humana para ajustar o planejamento conforme as condições atuais.
- **Simplificação da fadiga de voo:** A fadiga das tripulações é um fator crítico em operações aéreas, e a simplificação deste aspecto pelo modelo pode não refletir a realidade operacional em sua totalidade.
- **Pode Não Gerar a Resposta Ótima:** Embora o método Guloso frequentemente encontre

soluções próximas da ótima, ele não pode garantir que a solução encontrada seja a melhor possível. Em alguns casos, isso pode significar que existem rotas ou planos mais eficientes que não foram considerados pelo algoritmo, demandando intervenção do usuário.

- **Dependência de Critérios Locais:** A eficácia do método depende fortemente dos critérios locais utilizados para a tomada de decisão, podendo não capturar completamente as complexidades do cenário global. A dependência excessiva de critérios locais pode limitar a capacidade do algoritmo de se adaptar a mudanças dinâmicas na rede.

Embora o método possa não garantir sempre a solução ótima, um dos principais destaques do algoritmo é a sua capacidade de gerar resultados bons e coerentes em questão de segundos. Comparado ao método convencional, que pode levar minutos ou até horas para processar uma solicitação complexa, o algoritmo proposto oferece uma vantagem significativa em termos de eficiência temporal. Esta rapidez na geração de planos de voo permite uma resposta mais ágil às demandas operacionais, reduzindo o tempo de espera e aumentando a prontidão das missões. Além disso, como pôde ser observado anteriormente, o modelo pode achar rotas mais eficientes que as planejadas manualmente, levando a operações mais econômicas.

Uma boa opção é mesclar os métodos, utilizando o modelo matemático para gerar um plano inicial otimizado e, em seguida, avaliá-lo e ajustá-lo com a competência dos militares da CPROG. Esta abordagem híbrida permitiria combinar a eficiência do algoritmo com a experiência e conhecimento dos operadores, garantindo que os planos de voo sejam não apenas otimizados, mas também viáveis e seguros.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma abordagem sistêmica para o planejamento de missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL) na Força Aérea Brasileira (FAB), utilizando um algoritmo baseado no Método Guloso (*Greedy Method*). A análise detalhada dos ganhos e limitações dessa metodologia, em comparação com o método convencional, evidenciou as vantagens significativas em termos de simplicidade, eficiência temporal e redução de custos operacionais.

A implementação do algoritmo proposto mostrou-se eficaz em gerar planos de voo coeren-

tes em pouco tempo, contrastando com o método tradicional que pode demorar muito, dependendo da complexidade da solicitação. Embora o modelo Guloso possa não garantir sempre a solução globalmente ótima, ele frequentemente se aproxima significativamente da otimalidade, identificando rotas que reduzem o tempo de voo e os custos operacionais.

Apesar das limitações, como a necessidade de verificação manual de certas restrições, o modelo proposto destaca-se como uma ferramenta valiosa no planejamento de missões TAL. Recomenda-se a continuidade dos estudos e o aperfeiçoamento do modelo, integrando dados em tempo real e outras restrições operacionais para expandir sua aplicabilidade e eficácia.

Disponibilidade dos dados

Os dados e o código estão disponíveis em: *www.aerologlab.ita.br/datafiles*

Referências

S. F. Baker, D. P. Morton, R. E. Rosenthal, and L. M. Williams. Optimizing military airlift. *Operations Research*, 50(4):582–602, aug 2002.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Regulamento brasileiro da aviação civil - rbac nº 91: Requisitos gerais de operação para aeronaves civis, 2020. URL `file:// /mnt/data/rbac%2091.pdf`. Disponível em: `file:///mnt/data/rbac%2091.pdf`.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Noremp/c2/10: Módulo rotina do sistema de planejamento e condução de operações aeroespaciais. Technical report, Comando de Operações Aeroespaciais, [Brasília], 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Instrução do comando da aeronáutica - ica 100-12: Regras do ar, 2016. URL `file:///mnt/data/ICA%20100-12.pdf`. Disponível em: `file:///mnt/data/ICA%20100-12.pdf`.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico (DIRMAB). Instrução do comando da aeronáutica - ica 400-2: Custo logístico da hora de voo, 2010. URL `file:///mnt/data/ICA%20400-2%20-%20Custo%20Log%C3%ADstico%20da%20Hora%20de%20Voo%20-%202010%20(2).pdf`. Disponível em: `file:///mnt/data/ICA%20400-2%20-%20Custo%20Log%C3%ADstico%20da%20Hora%20de%20Voo%20-%202010%20(2).pdf`.

COMPREP. Comando de Preparo. Base Aérea de Natal. Processo de funcionamento da célula de programação (cprog) do 2º eta. Technical report, BRASIL. Comando da Aeronáutica., 2023. NPA/ETA2_GOP/965, 22 maio 2023. Documento ostensivo. Validade permanente.

T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 3rd edition, 2009.

S. Hao, Y. Hong, and Y. He. An energy-efficient routing algorithm based on greedy strategy for energy harvesting wireless sensor networks. *Sensors*, 22(4):1645, 2022. doi: https://doi.org/10.3390/s22041645.