

Otimização no posicionamento de Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento para a Aviação de Caça na Amazônia brasileira

Murillo Santilli Szvaticsek¹, Thales Vilas Bôas Araújo¹, Rodrigo Arnaldo Scarpel¹ e Cesar Augusto Cavalheiro Marcondes¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo - A proteção da Amazônia brasileira tem pronunciada relevância nas estratégias de garantia da soberania do Brasil. A fim de aproximar os vetores de caça dessa região, este trabalho objetivou auxiliar na criação de uma doutrina para a Aviação de Caça por meio da identificação de Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento (FARP), capazes de aumentar o tempo em cena das aeronaves e contribuir com a estratégia protetiva do país. Para isso, foi executada uma otimização combinatória com vistas à minimização de ativação dos pontos FARP existentes na região amazônica, considerando as relações de compromisso entre o custo de implantação desses pontos, o gasto de combustível e o dimensionamento de aeronaves de caça. O estudo gerou resultados e discussões para apoiar o planejamento de missões de defesa aérea no território amazônico ao identificar a mínima quantidade de aeródromos ótimos para o suporte destacado exigido por essas missões.

Palavras-Chave – Defesa Aérea, Problema de Cobertura de Conjuntos, Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento.

I. INTRODUÇÃO

O Brasil, por meio de sua constituição, preza pela soberania nacional como princípio básico de manutenção do Estado, de modo a permitir a conservação da intangibilidade do país [1]. De modo a desenvolver e exercer esse princípio, o estado brasileiro conduz políticas e estratégias nacionais de defesa com propósito de garantir condições para que não haja a possibilidade de que o país sofra uma hostilidade de outras nações [1]-[2].

A Amazônia brasileira integra um dos pontos de grande relevância para a defesa [1]. Não obstante, em contrapartida ao interesse do Congresso Nacional no direcionamento de esforços para a proteção da região amazônica, atualmente as bases principais da Aviação de Caça da Força Aérea Brasileira (FAB) encontram-se a distâncias consideráveis das fronteiras amazônicas, de modo que a operação das aeronaves de caça para condução de missões de garantia da soberania nacional próximas a esses extremos é prejudicada pela restrição na autonomia de voo advinda do deslocamento até o a fronteira nacional, fator limitante à quantidade de tempo em cena permitido às aeronaves.

Dessa forma, uma maneira de reduzir o tempo de deslocamento das aeronaves é estar mais próximo da área de interesse. A concentração de forças em áreas de operação destacadas por meio de Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento (*Forward Arming and Refueling Points* – FARP) provê a independência do apoio direto das bases aéreas principais relativas aos vetores empregados na missão a fim de

suportar a projeção de poder nacional [3], de modo que a utilização desse conceito pela Aviação de Caça da FAB permitiria aumentar o tempo de policiamento do espaço aéreo próximo às fronteiras da região amazônica, atividade fundamental à manutenção da soberania nacional, dada a significância da Amazônia para o Brasil.

Nesse tocante, a fim de auxiliar os tomadores de decisão de missões militares a otimizarem as relações de compromisso entre a quantidade de aeronaves necessárias, o gasto com combustível, e os custos de ativação de pontos FARP em uma missão de defesa aérea, este artigo visa responder à seguinte pergunta: como aumentar o tempo em cena dentro de uma região de interesse nacional coberta integralmente pela defesa provida por vetores aéreos da Aviação de Caça, utilizando o menor subconjunto possível de *Forward Arming and Refueling Points*?

Considerando a premissa de um estabelecimento ideal do conceito FARP dentro do escopo do problema, formulam-se hipóteses de pesquisa de que a alocação do menor subconjunto de pontos FARP pode: a) Aumentar a proporção entre o tempo de voo dentro dessa área e o tempo total do voo, que compreende a distância total percorrida pela aeronave entre a base principal de operação e a região requerida à missão, diminuindo assim a proporção do gasto com combustível atrelado ao deslocamento das missões; b) Diminuir a quantidade de aeronaves necessárias para o cumprimento de uma operação de defesa aérea e; c) Otimizar os custos de implantação dos pontos para a Força Aérea Brasileira.

Este artigo tem como objetivo auxiliar na criação de uma doutrina por meio da identificação de Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento, com foco em Aviação de Caça, considerando as relações de compromisso entre o custo de implantação desses pontos, o gasto de combustível e o dimensionamento de aeronaves em missões militares de interesse nacional.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Forward Arming and Refueling Points: Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento (FARP)

Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento (FARP) são estruturas logísticas temporárias, estabelecidas em locais avançados, que permitem o pouso, abastecimento, municiamento e decolagem de aeronaves. Tais pontos ampliam o raio tático de operação, bem como proporcionam um aumento no tempo total engajado na área de interesse do conflito, de modo a dirimir a necessidade de retorno de aeronaves à base principal de operação para o abastecimento e o rearmamento [4]. Tal vantagem operacional infere que as

M. S. Szvaticsek, szvaticsek@ita.br; T. V. B. Araújo, thalestvba@gmail.com; R. A. Scarpel, rodrigo@ita.br; C. A. C. Marcondes, cmarcondes@ita.br.

FARP aumentam o raio de ação das aeronaves no território de interesse, de modo a assegurar uma presença contínua na área de operação [5].

A operação do conceito FARP para a Aviação de Caça é aplicável a qualquer cenário em que haja superfícies de pouso aceitáveis, bem como manutenção certificada, armamento, combustível e uma equipe especializada em conduzir as operações logísticas de rearmamento e de reabastecimento. Os locais adotados como adequados para pouso e consequente operação FARP podem ser supridos, em caso de falta de estrutura logística fundada na área designada para operação do conceito, por meio de uma aeronave de transporte com todo o aparato logístico necessário à operação FARP [3].

Percebe-se, assim, que as vantagens propostas pela utilização de Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento podem expandir a capacidade militar global, na medida em que expandem as possibilidades da logística militar [6].

B. As Zonas de Interesse de Defesa Aérea (ZIDA) e Medidas de Policiamento do Espaço Aéreo (MPEA)

As Zonas de Interesse de Defesa Aérea (ZIDA) foram definidas pelo Comando da Aeronáutica, por meio do Departamento do Controle do Espaço Aéreo (DECEA), como espaços aéreos específicos e delimitados, onde as aeronaves precisam seguir procedimentos especiais de identificação e de notificação, bem como os procedimentos relacionados aos serviços de tráfego aéreo prestados, com o objetivo de garantir a Defesa Aérea [7].

As aeronaves interceptadas podem ser submetidas às Medidas de Policiamento do Espaço Aéreo (MPEA) aplicadas pelas aeronaves de caça da FAB. Essas ações visam impedir o prosseguimento de voos não autorizados em uma região específica [8].

C. O Problema de Cobertura de Conjuntos (Set Covering Problem)

Dentre os problemas de localização da Pesquisa Operacional (PO) situam-se os problemas de cobertura de conjuntos (Set Covering Problem - SCP), resolvidos por meio de programação linear inteira.

O objetivo dessa classe de problemas é determinar a combinação menos onerosa de atividades capazes de possuir (cobrir) em conjunto cada uma das atividades existentes ao menos uma vez [9]. Em outras palavras, nessa classe de problemas de PO, considera-se, por exemplo, que diversas instalações dispõem de serviços sobrepostos a diversas localidades, de modo que o objetivo fim é determinar a quantidade mínima de instalações capazes de cobrir cada uma das localidades [10].

III. MATERIAL E MÉTODOS

A. Modelo Conceitual

Hipoteticamente, foi ativada uma operação denominada Escudo ZIDA continental sobre a porção da região

compreendida pela ZIDA continental (definida a partir da fronteira brasileira até 80 milhas náuticas para o interior do território nacional [7]) com dois países vizinhos ao Brasil, com vistas à garantia da preservação contínua do território amazônico, bem como à coibição da entrada de tráfegos aéreos ilícitos.

Para cumprimento das missões, foi designada uma Base principal como Unidade Aérea de Defesa Aérea (UAe DA) fictícia, localizada no aeródromo Governador Jorge Teixeira de Oliveira (SBPV), em Porto Velho (RO), contendo 6 aeronaves fictícias de caça, para a realização de vigilância aérea em pontos de interesse dentro do espaço aéreo da ZIDA continental considerada.

A área de operações foi composta pela faixa da ZIDA continental expressa na Fig. 1. Foram estabelecidos 6 pontos de vigilância aérea dentro da região separados em 300km de distância para promover a possibilidade de apoio mútuo entre os meios aéreos adjudicados para a missão em cada um dos pontos, em função de suas capacidades operacionais, para o caso de necessidade de interceptação de qualquer tráfego aéreo ilícito.

De modo a possibilitar maior tempo em cena para o cumprimento das missões acionadas, foram ativados, mediante a demanda de tempo de vigilância nos pontos especificados para a missão em cada fase da operação, Pontos Remotos de Abastecimento e Municiamento (FARP) no cenário de operação, que deveriam ser minimizados devido aos custos de implantação. Os aeródromos públicos, privados e militares do cenário foram mapeados [11] e encontram-se expressos na Fig. 1.

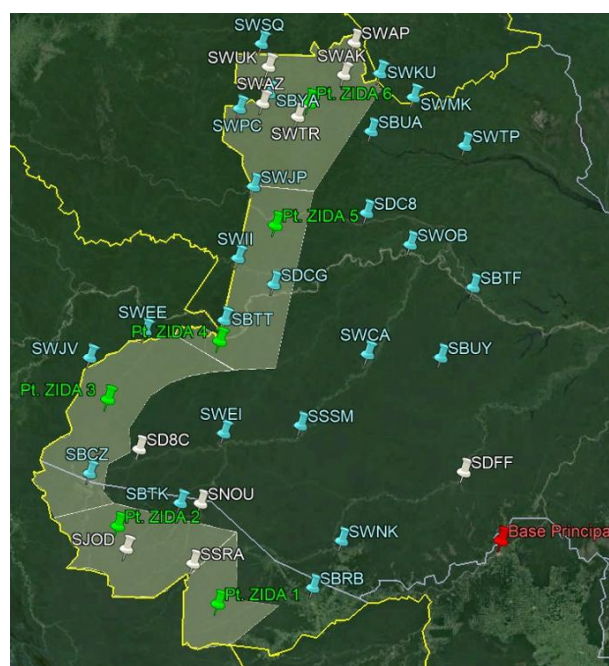


Fig. 1. Cenário da Operação simulada Escudo ZIDA Continental

Para a realização da operação, o ponto de partida do modelo foi a base principal: UAe DA SBPV, de latitude 8°42'59.61"S e longitude 63°54'7.46"O.

A aeronave de caça pertencente à UAe DA considerada para o modelo possui as seguintes características: a) Caça

monomotor, turboélice; b) Configuração: tanque subalar; c) Quantidade para a missão: 6; d) Autonomia (R): 4,5h; d) Velocidade (v): 400 km/h; e) Alcance (A): 1800 km; f) Comprimento mínimo de pista de pouso: 1200m (asfalto, concreto ou piçarra); f) Preço da hora de voo: 3000 USD.

Os pontos de vigilância previstos foram denominados como “pontos ZIDA” no modelo, e suas coordenadas estão expressas na Tabela I.

TABELA I – PONTOS ZIDA DO MODELO

Pontos ZIDA	Latitude	Longitude
Ponto ZIDA 1	10°18'1.36"S	69°56'9.04"O
Ponto ZIDA 2	8°42'11.51"S	72° 8'25.17"O
Ponto ZIDA 3	5°59'49.82"S	72°23'35.12"O
Ponto ZIDA 4	4°41'29.38"S	70° 1'15.70"O
Ponto ZIDA 5	2°12'46.78"S	68°55'38.91"O
Ponto ZIDA 6	0°25'53.75"N	68°18'47.86"O

O conjunto de pistas de pouso possíveis de serem ativadas como pontos FARP foram selecionadas e tratadas, organizadas na Tabela II.

TABELA II – PISTAS DE POUSO DENTRO DOS REQUISITOS OPERACIONAIS DA AERONAVE DO MODELO

Pontos FARP	Latitude	Longitude
SBCZ	7°35'59.86"S	72°46'23.12"O
SBRB	9°52'12.82"S	67°53'44.23"O
SBTF	3°22'53.95"S	64°43'31.20"O
SBTK	8° 9'19.10"S	70°46'59.25"O
SBTT	4°15'17.38"S	69°56'16.52"O
SBUA	0° 8'54.41"S	66°59'7.90"O
SBUY	4°53'3.53"S	65°21'19.72"O
SBYA	0°36'37.00"N	69°10'48.00"O
SDC8	1°53'46.00"S	67° 1'10.00"O
SDCG	3°28'9.00"S	68°55'16.00"O
SSSM	6°24'55.64"S	68°15'27.08"O
SWCA	4°52'16.95"S	66°53'51.03"O
SWEE	4°32'48.81"S	71°33'53.55"O
SWEI	6°38'19.22"S	69°52'47.79"O
SWII	2°56'15.97"S	69°41'37.99"O
SWJP	1°24'19.09"S	69°25'18.40"O
SWJV	5° 7'39.22"S	72°48'35.85"O
SWKU	1° 7'11.98"N	66°50'29.59"O
SWMK	0°37'41.35"N	66° 6'54.64"O
SWNK	8°50'8.27"S	67°18'44.89"O
SWOB	2°31'56.74"S	66° 4'59.50"O
SWPC	0°15'57.00"N	69°47'40.00"O
SWSQ	1°42'1.00"N	69°23'22.00"O
SWTP	0°22'42.72"S	64°59'32.96"O

Definidos todos os pontos do modelo conceitual, as distâncias entre eles foram calculadas computacionalmente a

partir do ambiente de desenvolvimento integrado para R, o *software* RStudio versão 2023.12.1+402, por meio da fórmula de distância *Harversine*, que calcula a distância entre dois pontos de um grande círculo (assim como o globo terrestre), dadas as suas longitudes e latitudes [12].

B. Modelo Científico

De modo a simplificar a realidade para a formulação do problema, assumiram-se premissas ao modelo científico: a) Todas as aeronaves da UAe DA relacionada para a Operação simulada Escudo ZIDA continental foram consideradas disponíveis durante todas as fases da operação; b) A velocidade (v) foi considerada constante em todas as fases de voo (decolagem, subida, voo de cruzeiro, descida e aproximação); c) O itinerário das aeronaves em todas as missões do modelo foi composto da rota direta de SBPV – ponto FARP ativado e atribuído à aeronave (para abastecimento) – ponto ZIDA atribuído à vigilância da aeronave pelo tempo requerido na missão – ponto FARP ativado e atribuído à aeronave (para novo abastecimento) – pouso final em SBPV; d) Os tempos de pouso nos pontos FARP, bem como o reposicionamento para abastecimento, rearmamento e nova decolagem a partir desses pontos foi desconsiderado; e) A capacidade integral de autonomia de voo foi considerada como limitante direto relativo à aeronave em vigilância no ponto ZIDA mais distante coberto por um ponto FARP; f) O custo de implantação dos pontos FARP foi considerado via ótica da enumeração necessária para o cumprimento de uma missão. Assim, todo o aparato logístico necessário para a operação FARP foi considerado ideal em todos os aeródromos.

Assim exposto, a apresentação do problema se dá a partir da notação matemática onde:

I : Conjunto de pontos FARP;

J : Conjunto de pontos ZIDA;

d_{ij} : Distância entre o ponto FARP $i \in I$ e o ponto ZIDA $j \in J$ [km];

T : Tempo de vigilância necessário para cada ponto ZIDA [h];

v : velocidade da aeronave de caça fictícia [km/h];

R : Autonomia máxima de voo da aeronave de caça fictícia [h];

A : Alcance máximo da aeronave de caça fictícia [km];

$D_{max}(T)$: Distância máxima permitida entre um ponto FARP e um ponto ZIDA, em função do tempo de vigilância T ;

$x_i \in \{0,1\}$: Variável binária que indica se o ponto FARP i é utilizado (1) ou não (0);

$y_{ij} \in \{0,1\}$: Variável binária que indica se o ponto ZIDA j é coberto pelo ponto FARP i (1) ou não (0);

$c_i \equiv$ custo unitário associado à ativação do ponto FARP i .

A relação matemática que expressa a distância máxima $D_{max}(T)$ permitida em função do tempo de vigilância necessário T é indicada em (1), em que a aeronave, após decolar do ponto FARP ativado, prossegue para o ponto ZIDA a realizar a vigilância prevista até a necessidade de retorno para novo abastecimento devido à restrição de autonomia de voo (R):

$$D_{\max}(T) = \frac{A - T \cdot v}{2} \quad (1)$$

A função objetivo (FO) Z consiste em minimizar a quantidade de pontos FARP necessários para a cobertura de todos os pontos ZIDA, em função do tempo de vigilância necessário à missão designada no contexto da Operação simulada Escudo ZIDA Continental. Assim, a formulação matemática é representada por:

FO de minimização:

$$Z = \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I} y_{ij} \cdot x_i \geq 1, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$y_{ij} \leq x_i, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4)$$

$$d_{ij} \leq D_{\max}(T) \Rightarrow y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5)$$

$$x_i \in \{0,1\}, \quad y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

Em que:

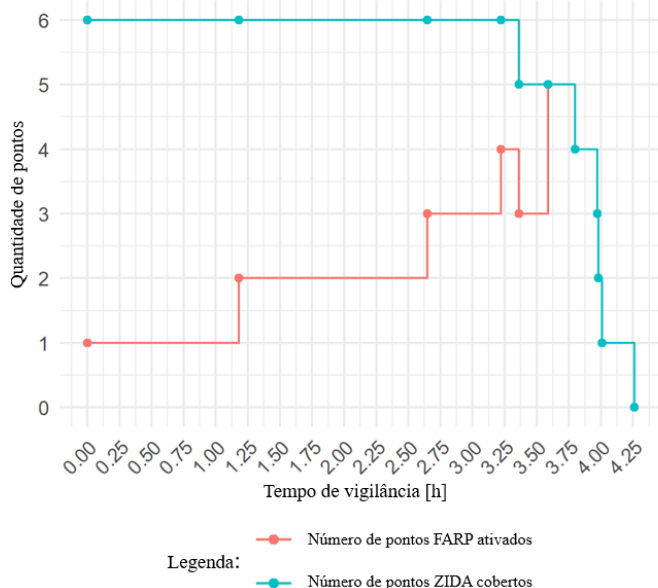
- (2) Representa a função objetivo;
- (3) Representa a cobertura de todos os pontos ZIDA: cada ponto ZIDA deve ser coberto por pelo menos um ponto FARP;
- (4) Representa a ativação dos pontos FARP, isto é: um ponto FARP só pode cobrir pontos ZIDA se ele for utilizado;
- (5) Representa a distância permitida em relação ao ponto FARP i e o ponto ZIDA j em função do tempo de vigilância necessário. Isto é: a distância entre os pontos deve ser menor ou igual à distância correspondente ao tempo de vigilância necessário para a missão;
- (6) Representa as restrições de inteireza de um problema de otimização combinatória em programação linear inteira, de modo que as variáveis consideradas sejam binárias.

A implementação do modelo se deu utilizando a biblioteca de programação linear linprog versão 0.9.4 contida no *software* R versão 4.3.2 como *solver* de otimização combinatória.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A relação entre o tempo de vigilância previsto para uma missão da Operação simulada Escudo ZIDA continental, o número de pontos FARP necessários para a consecução de cada missão prevista à fase da operação, e a capacidade de cobertura dos pontos ZIDA pelas 6 aeronaves da UAe DA está

expressa na Fig. 2. Evidencia-se a viabilidade de vigilância ininterrupta dos 6 pontos ZIDA por até 3,35 horas em uma missão da operação. A partir de 3,36 horas, a autonomia das aeronaves se tornou o fator limitante para cobertura de todos os pontos, reduzindo gradualmente a capacidade de cobertura na medida em que o tempo de vigilância se aproximou da



autonomia máxima das aeronaves (4,5 horas).

Fig. 2. Relação entre o tempo de vigilância, número de pontos FARP ativados e a respectiva cobertura dos pontos ZIDA

Ademais, a Tabela III discerne as pistas de pouso a serem ativadas como pontos FARP em missões específicas da operação a depender do tempo de vigilância a ser cumprido, o tempo de deslocamento das aeronaves para os pontos ZIDA e a proporção máxima da autonomia de voo dedicada integralmente ao policiamento do espaço aéreo nesses pontos.

TABELA III. CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS

Intervalo tempo de vigilância [h]	Pontos FARP ativados	Tempo de deslocamento total [h]	Autonomia máxima de voo em cena [%]
0 a 1,17	SWEE	41,70	26,00
1,18 a 1,84	SWNK/SDCG	30,38	40,89
1,85 a 2,07	SBRB/SDCG	30,45	46,00
2,08 a 2,64	SBTK/SWJP	33,84	50,67
2,65 a 3,00	SBTK/SWJP/SSSM	30,98	66,67
3,01 a 3,21	SBTK/SWJP/SWEE	33,04	71,33
3,22 a 3,35	SBRB/SBCZ/SDCG /SWKU	31,20	74,44

Depreende-se, assim, que missões com necessidade de até 1,17 horas de vigilância são cobertas por somente 1 ponto FARP ativado: SWEE.

Devido à relação de compromisso com o gasto de combustível total das aeronaves, missões realizadas entre 1,18 e 1,84h deveriam ser alocadas aos aeródromos SWNK e SDCG, de modo a minimizar o tempo total de voo das missões.

A partir de 1,85 horas, SWNK não permitiria mais a cobertura do ponto ZIDA 2 e, portanto, os aeródromos a serem ativados até 2,07 horas seriam SBRB e SDCG.

Por fim, a última configuração otimizada de 2 pontos FARP ativados seria composta por SBTK e SWJP, desde missões de 2,08 até 2,64 horas de vigilância.

Devido à restrição de cobertura de SWJP ao ponto ZIDA 4, a ativação de 3 pontos FARP se fez necessária a partir de 2,65 horas de vigilância.

A fim de otimizar o consumo de combustível total das aeronaves, o aeródromo SSSM deveria ser ativado em conjunto com SBTK e SWJP para missões de até 3,00 horas de vigilância, minimizando assim o tempo total de voo das missões. Essa configuração permitiria até 66,67% da autonomia de voo das aeronaves para a vigilância em uma missão.

Não obstante, a aeronave abastecida no ponto FARP SBTK com destino à vigilância no ponto ZIDA 3 chegaria ao limite de sua autonomia de voo com 3,00 horas de vigilância, de modo que o ponto FARP SWEE deveria passar a cobrir os pontos ZIDA 3 e 4 para missões realizadas entre 3,01 e 3,21 horas. Os aeródromos SBTK, SWEE e SWJP então permitiriam até 71,33% da autonomia de voo das aeronaves disposta para o objetivo fim da missão.

Vale ressaltar que, em uma vultuosa operação militar, o desdobramento logístico para a mudança na localização de um ponto FARP poderia aumentar sobremaneira a complexidade de toda a operação, composta por várias missões. Assim, a utilização de SBTK, SWEE e SWJP para missões com tempos de vigilância entre 2,65 e 3,00 horas seria uma opção viável como auxílio à escolha dos tomadores de decisão, na medida em que proporcionaria uma simplificação nas complicações logísticas de desdobramento dos meios à ativação dos pontos FARP para uma gama maior de possíveis missões, com a contrapartida de um aumento de 6,65% no tempo de deslocamento das aeronaves por missão para cumprimento das vigilâncias desse intervalo.

Por fim, a última configuração de pontos FARP implantados que cumpriu integralmente as restrições da formulação matemática do SCP foi o subconjunto de 4 pontos FARP ativados. A partir de 3,22 horas, o aeródromo SBTK não seria mais capaz de cobrir o ponto ZIDA 1, e a configuração ideal de ativação de 4 pontos, tendo em vista o menor tempo de deslocamento total (31,20 horas), seria composta por SBRB, SBCZ, SDCG e SWKU, com proporção da autonomia aplicada em cena de até 74,44%.

Cabe considerar que outra configuração possível para missões com tempos de vigilância entre 3,22 e 3,30 horas, poderia ser composta pelos aeródromos SBRB, SBTK, SWEE e SWJP, a despeito de não conferirem a configuração ótima no que tange ao tempo de deslocamento total para vigilância, ou mesmo à capacidade de cumprimento de mais do que 3,30 horas de vigilância. Essa alternativa requer discussão pois contempla todos os pontos pertencentes à configuração de ativação de 3 pontos FARP prevista entre 3,01 e 3,21 horas de vigilância (SBTK, SWEE e SWJP).

Como os 3 pontos citados já estariam ativados em caso de condução de uma gama de missões entre 3,01 e 3,21 horas, a simplificação de utilização da configuração de 4 pontos FARP

utilizando esses mesmos aeródromos e ativando SWEE como quarto aeródromo poderia facilitar os desdobramentos requeridos na implantação de novos pontos FARP, na medida que missões utilizando a configuração ótima de 4 pontos FARP (SBRB, SBCZ, SDCG e SWKU) obteriam um acréscimo diferencial de tempo de vigilância de somente 0,4 horas (de 3,31 a 3,35 horas), com a necessidade de ativação de 3 novos pontos em relação à configuração anterior – os pontos SBCZ, SDCG e SWKU –, enquanto a solução alternativa proporcionaria até 73,33% de autonomia dedicada em cena, apenas 1,11% a menos do que a configuração ótima.

A partir de 3,36 horas, os pontos FARP disponíveis na região de interesse não seriam mais capazes de cobrir todos os pontos ZIDA, devido à restrição de autonomia das aeronaves de caça do modelo, e o dimensionamento das aeronaves da operação deveria aumentar, de modo que outras aeronaves continuassem a vigilância iniciada pelas 6 aeronaves originais do modelo, permitindo assim tempos ininterruptos de vigilância dos pontos ZIDA maiores do que 3,35 horas.

Assim, a utilização dos pontos FARP como apoio destacado à operação habilitou até 74,44% do tempo máximo de voo das aeronaves destinado efetivamente ao tempo em cena para vigilância. Por conseguinte, a capacidade de cumprimento de missões em regiões de interesse nacional distantes de bases principais de operação das unidades aéreas de caça, como no caso de um país com dimensões continentais como o Brasil, pôde ser efetivada por meio da ativação de pontos FARP, possibilitando um aumento significativo no poder de influência das aeronaves em regiões de alta relevância para a defesa nacional, como a Amazônia.

A. Discussão quantitativa acerca dos gastos com combustível das missões

O gráfico da Fig. 3 expressa o tempo total de voo executado pelas 6 aeronaves relativo aos tempos de vigilância correspondentes cumpridos por cada um dos vetores de caça, tendo em consideração as configurações ótimas obtidas para cada intervalo de tempo necessário às missões.

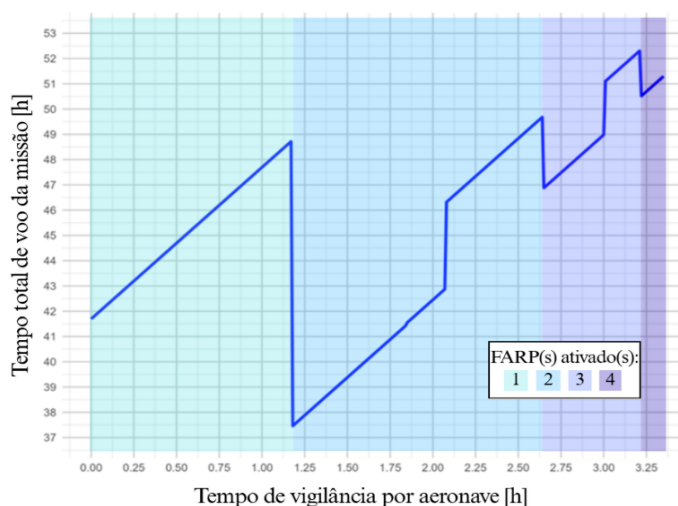


Fig. 3. Gráfico do tempo total de voo de uma missão, em função do tempo de vigilância realizado por aeronave

Da Fig. 3, considerando o gasto de combustível diretamente proporcional ao tempo de voo, a análise do gráfico evidenciou que o acréscimo de um ponto FARP a partir de 1,18 horas de tempo de vigilância proporcionou uma redução total de 23,24% no tempo de voo total por missão.

Em caso de necessidade de vigilância maior que 1,17 horas, a modificação da quantidade de pontos FARP seria compulsória, de modo que, se a redução do tempo total de horas de voo compensasse o custo atrelado à implantação de um ponto FARP (custo esse fora do escopo desse artigo), o tomador de decisão poderia considerar a ativação de 2 pontos FARP para missões com tempos de vigilância menores que 1,18 horas, para assim economizar combustível nas missões.

A redução de custo de voo para 2 pontos FARP, em um tempo de vigilância estabelecido, seria de 33960 USD para cada missão, e a ativação de 2 pontos FARP para tempos de vigilância menores que 1,18 horas só seria justificável caso o custo de implantação de uma FARP adicional, conjuntamente com o desdobramento logístico da ativação, não superasse esse valor.

Dessa maneira, a relação de compromisso entre custo de implantação e gasto com combustível poderia vir a ser modificada em favor da implantação de um ponto adicional. Não obstante, como os custos logísticos de ativação dos pontos não foram contemplados dentro do recorte de pesquisa deste trabalho, essa discussão é apresentada como sugestão de possibilidade de pesquisas posteriores sobre o assunto.

A primeira mudança de configuração já com 2 pontos FARP ativados (a partir de 1,85 horas de vigilância) não provocou mudança significativa no total de horas de voo. Já a segunda mudança, a partir de 2,08 horas de vigilância, provocou um aumento de 8,00% no tempo total de voo.

A necessidade de aumento para 3 pontos FARP a partir de 2,64 horas provocou uma diminuição no total de horas de voo de 5,76% para cada missão. A contar do intervalo de 3,01 a 3,21 horas, a configuração composta dos aeródromos SBTk, SWEE e SWJP provocaria um aumento compulsório nas horas de voo totais de 4,11% em relação à configuração anterior: SBTk, SSSM e SWJP.

A partir de 3,22 horas de vigilância, a ativação mandatória de 4 pontos FARP para cumprimento de vigilância ininterrupta, conduziu à diminuição do tempo total de voo de 3,54% em relação à implantação da configuração anterior de 3 pontos FARP.

Por fim, a partir da análise realizada, percebe-se que a maior economia em combustível ocorre na transição de 1,17 para 1,18 horas de vigilância, por meio da implantação de 2 pontos FARP, devido à diferença de maior magnitude entre os tempos totais de deslocamento relativos ao cumprimento de missões com 1 e 2 pontos FARP ativados: 41,70 e 30,38 horas, respectivamente.

V. CONCLUSÕES

Mediante resolução do Problema de Cobertura de Conjuntos com programação linear, foram obtidas respostas para apoiar a tomada de decisão de comandantes responsáveis pela condução de missões da Aviação de Caça em cenários de atuação nos quais a autonomia de voo das aeronaves se torna um fator limitante para seu cumprimento.

A alocação do menor subconjunto de pontos FARP pôde aumentar a proporção entre o tempo de voo dentro da área de operação e o tempo total de voo, diminuir o dimensionamento das aeronaves, bem como otimizar os custos de implantação dos pontos para a FAB, a partir da identificação precisa de quais e quantos aeródromos deveriam ser utilizados, a depender do contexto da operação consumada em território amazônico.

Assim, foi concebível aumentar o tempo total dedicado à concretização da finalidade das missões - o cumprimento da vigilância aérea nos pontos ZIDA - e, por conseguinte, o tempo em cena dentro de uma região de interesse nacional coberta integralmente com aeronaves de caça, utilizando o menor subconjunto de pontos FARP.

REFERÊNCIAS

- [1] Brasil. Ministério da Defesa. Livro Branco de Defesa Nacional. Brasília: MD, 2020.
- [2] Dantas, J. P. de A.; Silvestre, Caio A. de M. "Modelo de simulação aplicado às missões de transporte na região amazônica", *Spectrum*, vol. 21, nº 1, p. 10–15, jul. 2020.
- [3] Davis, Robert. "Forward Arming and Refueling Points for Fighter Aircraft: Power Projection in an AntiAccess Environment". *Air & Space Power Journal*, v. 28, n. 5, set./ out, p. 5-28, 2014. Disponível em: <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Volume-28_Issue-5/F-Davis.pdf>. Acesso em: 04/04/2024.
- [4] Lubiejewski, Sylwester. "Conclusions from the use of aviation in the first half of the first year of the Ukrainian-Russian war". *Security and Defence Quarterly*, v. 42, n. 2, p. 68-104, 2023. Disponível em: <<http://doi.org/10.35467/sdq/161959>>. Acesso em: 01/06/2024.
- [5] Murrmans, Philip. "Modeling and Simulation for Forward Arming and Refueling Points: Enhancing efficiency and Decision-making in Military Operations". *Försvarssystem*, 2023.
- [6] Lewis, Jeremy R. "Performance Evaluation of a Forward Arming and Refueling Point (FARP) Using Discrete Event Simulation". Graduate Research Project AFIT/MLM/ENS/05-08. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Institute of Technology, 2005.
- [7] Brasil. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento do Controle do Espaço Aéreo. "Mudança nos critérios de apresentação de plano de voo: AIC N 16/17". Rio de Janeiro, 4 ago. 2017. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/aic-n-1617>>. Acesso em: 30/05/2024.
- [8] Ministério da Defesa. "Entenda como funcionam as medidas de policiamento do espaço aéreo para combate ao garimpo ilegal". 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/defesa/pt-br/centrais-de-contenido/noticias/entenda-como-funcionam-as-medidas-de-policiamento-do-espaco-aereo-para-combate-ao-garimpo-ilegal>>. Acesso em: 04/06/2024.
- [9] Hillier, Frederick S.; Lieberman, Gerald J. "Introduction to operations research". 7. ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2001.
- [10] Taha, Hamdy A. Pesquisa operacional: uma visão geral. Tradução de Arlete Simille Marques; revisão técnica de Rodrigo Arnaldo Scarpel. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [11] Brasil. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento do Controle do Espaço Aéreo. Instituto de Cartografia Aeronáutica. "ROTAER: publicação auxiliar de rotas aéreas. 6. ed. Rio de Janeiro: DECEA-AIM", 2018. Disponível em: <https://aisweb.decea.mil.br/download/?public=30bdf88f-5f8d-429d-85c2cd81184459b3.pdf&p=ROTAER_Completo>. Acesso em: 01/06/2024.
- [12] Toydas, Murat; Saraç, Tugba. "A mixed integer nonlinear model for air refueling optimization to save fuel in military deployment operations". *International Journal of Industrial Engineering*, v. 27, n. 4, p. 627-644, 2020.