

Otimização Multiobjetivo para Seleção de Redes Logísticas de Combate Eficientes

Fábio Ayres Cardoso, Rodrigo Arnaldo Scarpel.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – São José dos Campos – SP

Resumo — No decurso de qualquer operação militar real (situações de crise), a efetividade das unidades desdobradas em um dado Teatro de Operações subordina-se diretamente ao nível de suporte logístico oferecido. O dimensionamento da cadeia que o conforma, responsável pelo deslocamento dos itens críticos demandados pelas tropas (combustíveis, munição e ração), deve, no entanto, ser antecedido de criteriosa análise sobre a sua eficiência, ainda em tempos de normalidade. Empregando-se otimização multiobjetivo é possível mensurar a idoneidade de redes logísticas de apoio ao combate, integrando as múltiplas facetas que a tipificam – como custos, resiliência e flexibilidade – oferecendo condições para se avaliar desenhos alternativos e exequíveis de suporte a respostas militares, quando essas se fizerem necessárias. Como principais resultados destacam-se a definição de elementos da rede logística (rotas e terminais) cuja configuração potencializa o atendimento a objetivos militares.

Palavras-Chave — logística, otimização multiobjetivo.

I. INTRODUÇÃO

O principal papel das Forças Armadas ao longo da história tem sido instrumentalizar seus meios de força – seja de forma dissuasiva, seja coercitiva – para contribuir, tão eficientemente quanto possível, para o atingimento do estado de segurança politicamente definido pelo Estado. Não obstante as variadas matizes pelas quais as ameaças à segurança possam se apresentar, o espectro de alternativas da ação bélica para lidar com elas é função das condições de possibilidade que a logística autoriza, seja movimentando tropas, seja sustentando-as ao longo do tempo. E isso se torna ainda mais significativo em um Teatro de Operações (TO), espaço físico no qual as ações de combate ditas cinéticas são empreendidas, e cuja eficácia é limitada pelo potencial de acesso e de emprego de itens críticos como munição, combustíveis, medicamentos e ração.

Nesse contexto, e considerando que cabe à logística de combate o desdobramento e a sustentação dos arranjos de força dentro de um TO, análises afetas à idoneidade da rede que a conforma requer especial atenção, ainda em tempos de normalidade. Na ausência de parâmetros que sinalizem para patamares da eficiência do sistema logístico existente, a formulação e a gerência de opções otimizantes para lidar com situações de crise, seja na alocação de meios militares (ou recursos civis mobilizados), seja na seleção de rotas de transporte para movimentá-los, podem se encontrar seriamente comprometidas. Ponderar, então, sobre o mérito das preferências de desdobramento aéreo de ativos, circunscritas essas ao apoio a unidades em terra, assevera-se fundamental para a configura-

ção antecipada do arsenal de alternativas de apoio ao combate que sejam, simultaneamente, responsivas e sustentáveis no tempo.

Ao longo dos últimos anos, esforços acadêmicos que, direta ou indiretamente, vem discutindo a competência de sistemas vocacionados para o apoio ao combate têm sinalizado para três conjuntos de métricas para a sua aferição. A primeira medida – *custos* – encerra a tradução monetária de qualquer empreendimento humano. Por imposição da lógica do capital, as possibilidades de ação militar estão intrinsecamente relacionadas à estrutura de financiamento (dotação orçamentária e programação de dispêndios), de condição inescapável. A segunda métrica – *resiliência* – sintetiza a habilidade de lidar eficientemente com as perturbações ambientais, por intermédio de ações de antecipação, resposta e recuperação [1]. Nesse escopo, encapsula a habilidade de gestão sobre os entes estáticos da rede logística (vias e terminais) – passíveis esses de interdição (por ação inimiga) – com a finalidade de manter inalterável o fluxo de ativos para o TO. A última dimensão – *flexibilidade* – refere-se à capacidade de produzir tempestivamente opções alternativas para se adaptar às incertezas e à heterogeneidade ambiental [2]. Denota, assim, no âmbito desse estudo, a capacidade de vincular o emprego do portfólio de entes dinâmicos da rede (modais de transporte), momentaneamente disponíveis, às evoluções conjunturais do cenário operacional.

Na medida em que essas abordagens (econômica, estrutural, e de gestão de meios) têm sido tratadas singularmente ou, no máximo *par-a-par* na literatura especializada, iniciativas para integrá-las se apresentam como um incremento de tratativas de intentos discretos de uma rede logística que, na realidade, impressionam-se mutuamente. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é, estão, oferecer uma *opção* de ferramenta capaz de auxiliar na seleção de cadeias logísticas militares eficientes, destinadas ao apoio ao combate, incorporando simultaneamente as três métricas. Isso se efetivará por intermédio de um modelo de otimização matemática que, congruente ao escopo da problemática supracitada, apresentar-se-á multiobjetivo.

A principal contribuição deste artigo resume-se em trazer à luz um ferramental analítico alternativo, de índole intragadora das dinâmicas que atualmente regem a estrutura de percepção que conforma o contexto da “eficiência de redes logísticas de combate”. Investindo na relação de condicionalidades cruzadas, a partir da presente análise, a formulação de opções estratégicas de apoio em situações de crise poderá assim ser elaborada pela especificação de sua *qualidade global*, evitando considerações abreviadas ou simplistas – como redução de custos somente.

O conteúdo deste trabalho encontra-se organizado sob quatro momentos distintos. Primeiramente, na Seção II, detalhes atinentes à construção do modelo são pormenorizados, assim como o filtro de percepções (discernimentos) que o sustenta. Em seguida, na Seção III, o modelo é aplicado a um cenário militar hipotético, fins verificação e validação, conjugado a discussões dos resultados auferidos. Por fim, a Seção IV encerra este trabalho, elencando os principais aspectos de destaque que o completam e rematam.

II. MATERIAL E MÉTODO

O conceito de eficiência, como uma ferramenta de contabilidade, auditoria e controle, tem tido papel central nas engenharias industrial e pós-industrial, em função das preocupações com a gestão de recursos e redução de desperdícios [3]. Por intermédio de uma compreensão intelectual da racionalidade entre meios e fins, da suficiência e da disciplina na produção de efeitos (materiais) desejados, esse constructo – eficiência – tem suscitado profundas implicações a todas as atividades humanas, inclusive a militar. A lógica que condiciona as opções de ação para se atingir os resultados previamente estabelecidos passa a ser o índice (ou grau) de performance para alcançá-lo. Como consequência, a construção de arranjos de capacidade para atendimento à missão constitucional de defesa deve subordinar-se a um particionamento controlado e equilibrado de recursos, a fim de assegurar respostas militares condicionalmente adequadas, exequíveis e aceitáveis.

Atualmente, a condição definidora da competência de sistemas vocacionados para criar e manter o poder de combate das unidades desdobradas em um TO atenta para ponderação simultânea a três condicionantes fundamentais: *custos*, *resiliência* e *flexibilidade*. Essa multidimensionalidade da performance, na qual seus fatores interagem (e se conflitam) mutuamente para a criação de valor organizacional, emerge das múltiplas perspectivas de análise passíveis de serem empreendidas pelo corpo de decisores. Sob essa ótica, inexistente uma medida única capaz de garantir uma *solução ótima*, visto que a melhoria de uma (métrica) acarretará degradação das demais [4]. A opção por entregar suprimentos em combate empregando rotas mais resilientes (resistentes à interdição), por exemplo, negligenciará preferências econômicas (menos dispendiosas), ou percursos mais flexíveis (versáteis no uso). O que sucede, então, é uma *solução eficiente*, de compromisso, que minimiza os desvios no atendimento concomitante a três metas, quais sejam: *minimizar custos*, *maximizar resiliência*, e *maximizar flexibilidade*.

No que concerne à primeira medida – *custos* – o traslado de suprimentos ou o desdobramento de tropas impacta a eficiência de um sistema logístico de combate no grau (intensidade) do emprego dos meios de transporte disponíveis para o pacote de missões estabelecido. Não obstante os investimentos infraestruturais (terminais e vias) – de custos fixos – maior sobrecarga ainda recai sobre a mobilidade (combustível, manutenção, tripulação etc) [5], atualmente com elevada ênfase no emprego aéreo. Isso tem se justificado, tanto pela tempestividade no recebimento de itens em campanha, como na salvaguarda de comboios contra emboscadas, exposição a artefatos explosivos improvisados (IED – *Improvised Explosive Device*),

contato com patrulhas inimigas e franco-atiradores (*snipers*), ou ofensivas de *drones*. Custos com transporte aéreo militar são medidos em termos do tempo de comprometimento com a missão aérea, ou *hora de voo (H)*, pré-definida para cada categoria de aeronave. Esse parâmetro sintetiza o dispêndio médio para se manter a operacionalidade (horária) de um vetor aéreo, cujo custo abarca, dentre outras, expensas com derivados do petróleo, esforços com manutenção, disponibilidade de sobressalentes, e serviços de solo [6]. Como consequência, minimizar custos também acarreta minimização do tempo de deslocamento, na escolha das rotas mais curtas até o destino final.

A segunda medida – *resiliência* – notabiliza-se pela necessidade de se reduzir vulnerabilidades frente a possibilidades de interferência na cadeia de suprimentos militar, mesmo na retaguarda, ou território controlado. Quando do escalonamento de crises, ou durante sua permanência, operações clandestinas contra alvos sensíveis ou pontos críticos em áreas urbanas (entroncamento de vias, pontes, portos, terminais rodoviários) são práticas historicamente reconhecidas. Articulações similares verificam-se também na interdição de aeródromos, seja por ações de comandos, seja por ataques em profundidade (mísseis de cruzeiro ou *drones*), todas visando interromper ou degradar as operações em curso, cujos efeitos reverberam por todo o sistema logístico. Redes resilientes, assim, são função do número de caminhos confiáveis, sejam eles obtidos de forma proativa (planos de contingência, posicionamento de meios, reforçadores de rede), seja reativamente (escalões de reparo, prontidão de resposta, geração de soluções *ad hoc*). Entretanto, não obstante os múltiplos tratamentos pelos quais a resiliência tem sido discutida na literatura, envolvendo tanto atributos operacionais quanto topológicos, a dimensão *redundância* (rotas alternativas) tem se afigurado recorrente [7]. Tal inclinação conservativa fundamenta-se tanto na garantia (tangível) de confiabilidade, como na facilidade de aferir quantitativamente a resiliência. Fiel a essa assertiva, resiliência no transporte aéreo traduz-se na existência de aeródromos – e, conseqüente, caminhos – alternativos, passíveis de serem explorados (respeitando o alcance das aeronaves), até o destino final. Destarte, maximizar a resiliência sugere a seleção de itinerários mais densos em termos de instalações aeronáuticas e campos de pouso.

Por fim, no que toca à terceira medida – *flexibilidade* – sua pertinência justifica-se pela necessidade incontornável de suceder frente às vicissitudes, especialmente fricção e incerteza, reinantes no ambiente de combate. Como categoria da adaptabilidade [8], a flexibilidade capacita seu depositário a responder às oscilações do ambiente, amoldando-se aos novos desafios que se apresentarem, mantendo-se estável (consistente), sem comprometimento a sua performance [2]. Tal atributo, por exemplo, deve concorrer para o manejo da pluralidade de circunstâncias pelas quais as demandas por suprimentos poderão emergir em uma operação militar (real) – variados volumes, classes, prazos, destinos – a serem trabalhados por um acervo finito de meios (materiais e organizacionais). Nesse sentido, remete, para uma malha aeroviária, a máxima versatilidade em seu aproveitamento, a fim de gerar resultados comprometidos com o propósito que instrui sua criação e manutenção: fazer chegar oportunamente suprimento para as

tropas, a despeito da configuração de recursos logísticos, intensamente concorridos no âmbito de um vasto portfólio de missões a serem executadas. Em vista disso, maximizar a flexibilidade da rede de transporte aéreo militar, aspirando a sua maior utilidade – ou eficiência – no apoio ao combate – acarretará a seleção de rotas abreviadas (entre terminais contíguos), susceptíveis ao emprego de um maior agregado de meios aéreos, especialmente, aeronaves de pequeno alcance existentes na frota, e capazes de serem empregados no suporte às tropas em solo.

Admitido como lícito o recorte das propriedades que conferem eficiência a uma cadeia de suprimentos militar, de perfil aéreo, a construção de uma ferramenta analítica para aferir sua idoneidade orientou-se por uma abordagem linear multi-objetiva, na forma de otimização de redes. A partir da conversão dos múltiplos objetivos a uma única meta (minimizar o maior desvio dos objetivos ótimos), tenciona-se alcançar uma *justa medida*, ou equilíbrio competitivo, para a obtenção de uma solução balanceada. No âmbito das categorias multi-objetivo atualmente existentes, optou-se pelo *método dos pesos* (ponderação), em função de sua aderência na tratativa de problemas reais, sempre multifacetados. Na medida em que diferentes alternativas podem emergir conforme perspectivas dos decisores – as quais podem variar ao longo do tempo – ferramentas exitosas (úteis) precisam responder às demandas por análises (valoradas) das diferentes preferências, no contexto do factual. Outra vantagem deve-se à garantia da obtenção de Pareto Ótimo (fronteira eficiente), contanto que as ponderações sejam positivas [9]. Por fim, a opção pela linearização reduz a complexidade do problema – aumentando sua inteligibilidade – permite atingimento de ótimos globais, assim como a redução de esforço computacional.

A tradução matemática do objeto de estudo em questão compreendeu três estágios básicos:

- Enunciação matemática.
- Coleta de dados.
- Aplicação do modelo.

No que concerne a primeira etapa, a temática classifica-se como um problema de rede, visto que apresenta estrutura gráfica (forma de grafo), nós e arcos atribuídos (conexões, traços ou propriedades), um objetivo definido (afeto ao fluxo na rede), e um conjunto de restrições que precisa ser respeitada. A evidenciação de seus conformadores (índices, parâmetros e variáveis), pode ser identificada a partir das próximas linhas:

i) Índices:

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

$I_o = \{i_o\}$: conjunto unitário referente à origem do fluxo.

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

$J_f = \{j_f\}$: conjunto unitário referente ao destino final do fluxo.

$K = \{k\}$: conjunto de quaisquer pontos incidentes em i .

ii) Parâmetros:

c_{ij} desembolso financeiro para percorrer o itinerário entre os nós i e j , medido em termos de custo de hora de voo do modal selecionado para a missão.

r_{ij} resiliência existente no itinerário entre os nós i e j , avaliada em termos do número de aeródromos alternativos dentro do alcance da vetor aéreo, tomados a partir de j .

- f_{ij} flexibilidade do itinerário entre os nós i e j , medida em termos do montante de diferentes tipos de aeronaves passíveis de percorrê-lo.
- t_{ki} tempo de deslocamento aéreo entre os nós k e i .
- t_{ij} tempo de deslocamento aéreo entre os nós i e j .
- C_{\min} menor custo possível para percorrer a rede, da origem (i_o) até o destino final (j_f).
- R_{\max} máxima resiliência possível para percorrer a rede, da origem (i_o) até o destino final (j_f).
- F_{\max} máxima flexibilidade possível para percorrer a rede, da origem (i_o) até o destino final (j_f).
- T tempo máximo de voo permitido entre nós contíguos (e conectados), considerando não somente deslocamento efetivo, mas também tempo de procedimentos (pouso, espera, abortiva) e de traslado até pista alternativa (expediente de segurança).

iii) Variável de decisão:

x_{ij} : identificador de seleção de rota entre os pontos i e j , conectados, podendo tomar valores unitários ou nulos, em atendimento ao conjunto de restrições estabelecido – (5), (6), (7) e (9).

iv) Função objetivo:

$$\text{Min } Q \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\frac{w_1 \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} - C_{\min} \right)}{C_{\min}} \leq Q \quad \forall (i, j) \quad (2)$$

$$\frac{w_2 \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} r_{ij} x_{ij} - R_{\max} \right)}{R_{\max}} \leq Q \quad \forall (i, j) \quad (3)$$

$$\frac{w_3 \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} x_{ij} - F_{\max} \right)}{F_{\max}} \leq Q \quad \forall (i, j) \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} - \sum_{k \in K} x_{ki} = 0 \quad \forall (j, k) \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_{i,j} = 1 \quad \forall j \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij_f} = 1 \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} t_{ki} x_{ki} + \sum_{j \in J} t_{ij} x_{ij} \leq T \quad \forall (i, j, k) \quad (8)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \forall (i, j) \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall (i, j) \quad (10)$$

$$w_1, w_2, w_3 > 0 \quad (11)$$

A função objetivo expressa em (1) denota a minimização de Q , representativo do máximo desvio percentual ponderado – Chebyshev ponderado (*Weighted Chebyshev*) [9] – em relação à cada uma das soluções ótimas – mínimo custos, máxima resiliência e máxima flexibilidade (previamente calculados). Constituinte de uma abordagem *a posteriori* (geração de soluções Pareto ótimas) – uma vez conhecidos os melhores resultados individuais – esse tratamento permite encontrar soluções não-dominadas correspondentes a cada pacote de preferências. As restrições (2), (3) e (4) indicam que os desvios (normalizados e ponderados), associados a cada uma das soluções ótimas, devem ser menores ou iguais a Q (desvio máximo). A normalização visa garantir a homogeneidade dimensional das equações, na ordem da unidade, permitindo que sejam comparadas, enquanto que a ponderação atribui graus de importância consoante ao discernimento dos decisores. Em (5) tem-se a restrição de equilíbrio de fluxo, atribuída para evitar descaminho ou interrupção do escoamento da totalidade de carga através da rede. As equações (6) e (7) garantem a existência de fluxo, desde o ponto inicial (base aérea na qual a aeronave reabastecedora se encontra), até o destino final (força terrestre requerente de suprimentos). A restrição (8) fora estabelecida em atendimento a protocolos de segurança atualmente vigentes na aviação de transporte militar, segundo o qual o volume de combustível definido para cada deslocamento deve considerar tempos adicionais até quaisquer aeródromos alternativos (não necessariamente vinculados à rota). Nesse termo, a soma dos arcos que incidem em cada nó, com aqueles que procedem do mesmo não pode ultrapassar seu tempo máximo de permanência em voo. A condição (9) demarca a proibição de se percorrer o mesmo itinerário em ambos os sentidos; opção néscia, se apreciada sob a ótica operacional, e de resultados contraproducentes na maximização da flexibilidade e da resiliência. Em (10) encontra-se a restrição de não-negatividade da seleção de rotas, enquanto que a restrição (11) estabelece que os níveis de aspiração (preferências) atribuídos pelo corpo de decisores não podem ser negativos ou nulos.

A partir do modelo construído, as etapas subsequentes de coleta de dados e aplicação do modelo tencionaram-se a verificá-lo e validá-lo (processos de auditoria), no âmbito do cenário operacional atribuído. Quanto à acurácia transformacional, foram empregadas técnicas de verificação informal (*desk checking*, para averiguação da completude, correção e ausência de ambiguidades); verificação estática (análise de dependência de dados); e verificação dinâmica (análise de causa-efeito); todas com o fito de avaliar a consistência da sintaxe e da lógica computacionais com as especificações do modelo conceitual. No que tange à acurácia representacional, optou-se pela validação preditiva, no exame de variados comportamentos (*outputs*), diante de diferentes entradas (*inputs*), particularmente valores extremos ou condições reais específicas, de alta plausibilidade de ocorrência; seu objetivo é verificar a confiabilidade do modelo em termos de sua aderência ao mundo real. Nesse esforço, e objetivando produzir resultados tangíveis, contou-se com uma base de dados ostensiva (de domínio público), obtidas na *internet* (atributos de aeronaves militares) e em Cartas Aeronáuticas (distâncias entre aeródromos), afeta a um quadro de referência hipotético de reabaste-

cimento de tropas desdobradas em território nacional, percorrendo malha aeroviária oficial, e empregando aeronaves pertencentes ao acervo da Força Aérea Brasileira.

Nesse recorte fictício, o desenho da rede logística selecionada para validação do modelo (Fig. 1) considerou um conjunto de itinerários homologados em cartas aeronáuticas recentes, com origem no aeródromo de Campo Grande (SBCG), e destino final em Iauaretê (SBYA), incorporando uma circunstância operacional particular, arbitrariamente escolhida, mas alojada no espectro de ações militares potenciais. Os terminais selecionados, registrados em códigos ICAO (*International Civil Aviation Organization*), caracterizam-se por sua condição operacional IFR (*Instrument Flight Rules*) – voo por instrumentos, diurno e noturno – e comprimento de pista não inferior a 1.500 metros, garantido manobra a uma parcela específica de meios aéreos. Este posicionamento condiciona um ambiente cujos atributos garantem articulação de missões de transporte aéreo logístico sob quaisquer condições visuais, incluindo ações na madrugada, assim como o emprego de aeronaves de médio e grande porte. No que concerne ao fluxo de suprimentos a ser conduzido ao longo da cadeia, tomou-se a aeronave C-105 Amazonas como referência de transportador, face ao seu perfil operacional, às possibilidades de configuração e performance, bem como ao grau de aprestamento das tripulações que a operam na região Amazônica. A delimitação de um modal justifica-se, não somente por questões de custeio, mas também pelas especificidades de velocidade e de capacidade de carga que impactam no cotejamento dos trajetos. Esse quadro encapsula a totalidade de fatores, necessários e suficientes, para gerar opções de redes logísticas eficientes, circunscritas essas ao conjunto de percepções dentro do qual “eficiência para apoiar o combate” é atualmente entendida.

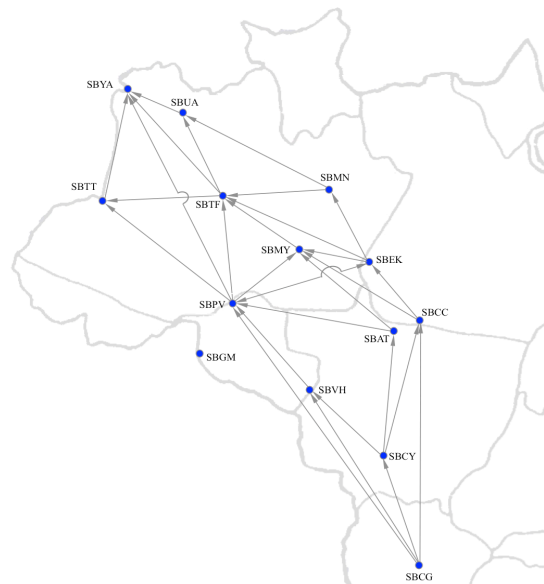


Fig. 1. Configuração da Rede Logística.

III. RESULTADO E DISCUSSÕES

A partir dos alicerces conceituais apresentados, o modelo matemático foi alimentado a partir de informações públicas,

atinentes tanto à rede (distâncias entre aeródromos) quanto ao modal (velocidade de cruzeiro, capacidade de carga e custo de hora de voo).

A métrica “custo da rede” foi avaliada pelo produto entre tempo do deslocamento terminal-terminal e o custo da hora de voo. Na medida em que a seleção da rota depende do alcance da aeronave, a qual é fator da quantidade de combustível existente, e este, do volume a ser transportado, considerou-se, para esse último, uma carga (máxima) permissível pela “faixa verde” de operação. Esse protocolo de segurança determina que os planos de voo devam contemplar capacidade de deslocamento adicionais aos estabelecidos entre terminais, abrangendo também, trânsito até aeródromo alternativo, somado a quinze minutos para procedimentos – configurando o tempo máximo de voo permitido. O valor para a métrica “resiliência da rede” foi obtido pela soma, terminal-terminal, do

montante de aeródromos passível de ser acessado – mesmo que fora da rota – dada a possibilidade de inoperância de cada terminal de destino (subsequente, durante o trânsito pela rede), respeitando a cobertura oferecida pelo tempo máximo de voo permitido. Por fim, para a métrica “flexibilidade da rede” atentou-se para o somatório, terminal-terminal, do número de diferentes categorias de aeronaves militares capazes de percorrê-los.

O processamento, a partir daí, foi conduzido empregando o algoritmo de Branch and Bound, por intermédio do software de computação técnica *Mathematica*, versão 10, em dois momentos distintos, típicos de otimizações multiobjetivo. Inicialmente foram calculados os itinerários ótimos, nas conjunturas de mínimos custos, máxima resiliência e máxima flexibilidade, nos moldes da solução de problemas de programação linear, a fim de se estabelecer os valores-referência (Fig. 2).

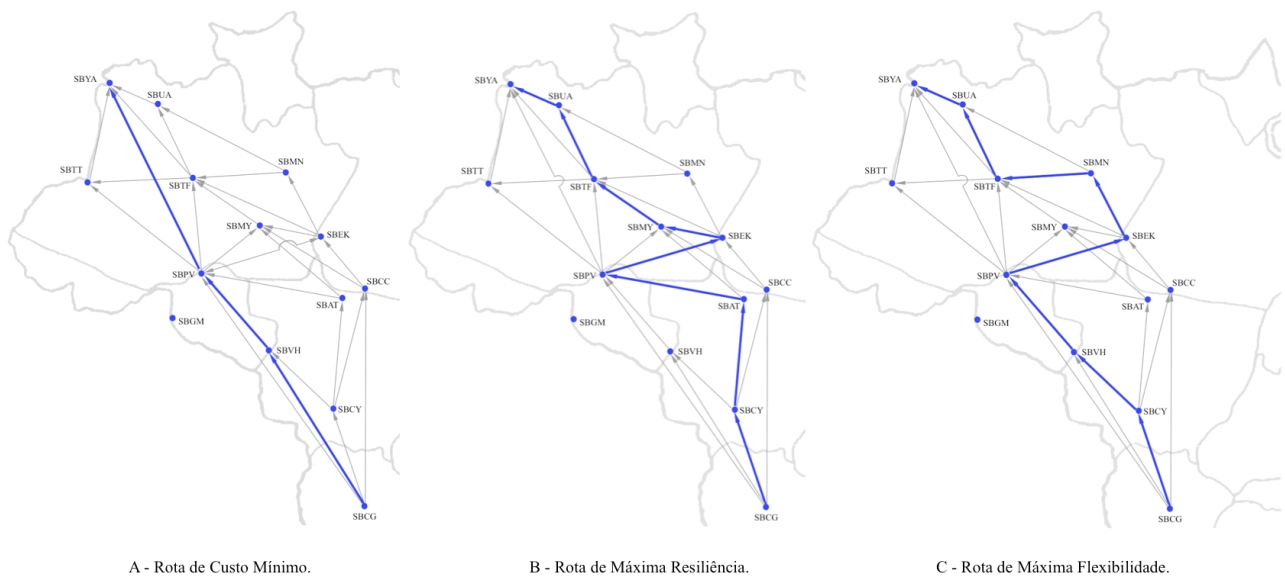


Fig. 2. Rotas (singularmente) ótimas.

Perante as soluções encontradas, é possível identificar, para cada circunstância em estudo, e no exercício da obtenção das respectivas otimalidades, a projeção causal das múltiplas opções de trajeto – validação preditiva. Enquanto que a minimização dos custos (A) pondera pela rota mais rápida e direta, a maximização da resiliência (B) defende alternância na rede, a fim de potencializar sua grandeza – tomando tantos itinerários quanto possível até o destino final; a maximização da flexibilidade (C), no entanto, elege, para cada surtida terminal-terminal, aquela de menor trajeto, negligenciando itinerários dilatados, percorridos essencialmente por aeronaves grandes, detentoras de maior alcance. Assim, para cada acepção de eficiência, um plano de voo singular é construído, capaz de dar conta das circunstâncias que a moldura selecionada encerra.

De posse das cifras ótimas, o modelo é reconfigurado para um formato multiobjetivo, no qual os “valores utópicos” passam a conformar seu conjunto de restrições, com os respectivos níveis de aspiração decisoria. Considerando que essas preferências refletem o exercício de julgamento dentro de um escalão hierárquico – nem sempre permanente – e que segue

critérios de aceitabilidade subjetivos, elas podem tomar quaisquer medidas imagináveis. As dimensões das preferências podem, destarte, para fins de estimar o mérito da modelagem na consecução de seu propósito, ser tratadas ora como variáveis, ora como importâncias predefinidas.

Na condição de ponderações cambiantes, o esforço computacional converge para a busca da melhor eficiência global, em termos matemáticos – menor desvio possível dos valores de referência – ajudando a balizar demais análises em termos de seu distanciamento. A rota escolhida nesse intercurso (Fig. 3) adota uma trajetória equilibrada – *justa medida* – evitando os extremos da rede, assim como sinuosidades, optando por um caminho predominante interno à rede. Na hipótese de se valorar os pesos dos atributos – com infinitas combinações admissíveis – a opção pela paridade (Fig. 4) atribuiu um itinerário no qual – dada a confirmação visual – a primeira metade favorece a relação custo-flexibilidade, enquanto que a segunda, flexibilidade-resiliência, evidenciando a relevância de cada predicado para a eficiência global da cadeia. Independente da perspectiva que se adote, ou do número de experi-

mentos que se efetue, assevera-se patente (notória) a valência de determinados terminais e rotas, de índoles estratégicas para a conjuntura de apoio ao combate, em função de sua incidência recorrente nos diversos cenários considerados. Podem ser, assim, objetos de consideração frente a necessidade ininterrupta de se cerrar lacunas de capacidade militar, ainda em tempos de normalidade, para lidar eficientemente com situações de crise, não importa quão improvável elas se apresentem. Um projeto de capacidades assim alinhado pode ajudar a orientar planejamentos para alocação de estoques estratégicos,

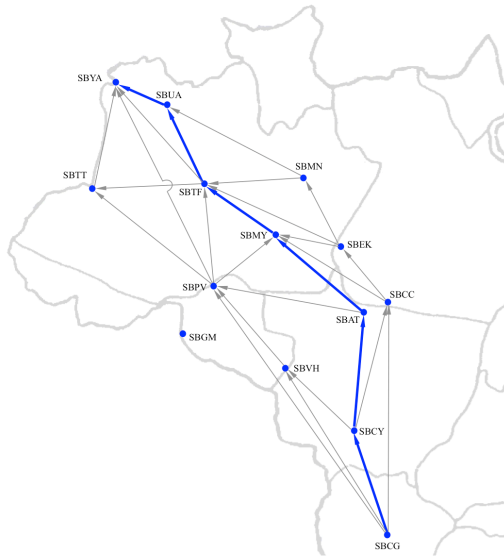


Fig. 3. Rota de melhor eficiência global.

posicionamento de FARP (*Forward Arming and Refueling Point* – ponto de reabastecimento remoto), adestramento de equipagens, aposição de escoltas aéreas, melhorias infraestruturais em aeródromos (pátio, pista, iluminação, abastecimento), dentre outras. Ou seja, instruir e dar consistência (justificação) às decisões afetas ao planejamento, ou (re)desenho da Força, para o cumprimento de sua missão de sustentar o combate, a fim de mantê-la em condições de responder prontamente quando a nação demandar.



Fig. 4. Rota eficiente (em paridade de pesos).

IV. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por foco oferecer uma proposta de ferramenta analítica capaz de ajudar na seleção de redes logísticas de combate eficientes. Empregando otimização multiobjetivo, foi possível, atentando para as três dinâmicas percebidas como influentes na idoneidade de uma cadeia de suprimentos militar (custos, resiliência e flexibilidade), encontrar desenhos alternativos de suporte, conforme conjunto de preferências decisoriais estabelecidas. A verificação e validação foram conduzidas em cenário militar hipotético, mas empregando base de dados reais e ostensivos, o qual viabilizou ilustrar a utilidade das soluções geradas nos diferentes arranjos. No que concerne à continuidade dos trabalhos, sugerem-se investidas em quadros que considerem trajetos circulares (ida e volta), múltiplos destinos, fracionamento da rede com transbordo de cargas, e restrições afetas à elevação de aeródromos em relação ao nível do mar. Recomenda-se, ainda, explorar outras interpretações para resiliência – capacidade de reparo local, nível de risco ou probabilidade de danos – assim como para a flexibilidade – número de pistas alternativas no aeródromo ou capacidade multimodal local, visando a interoperabilidade quando da saturação na oferta de meios aéreos. Por fim, especial agradecimento aos Capitães Aviadores Nicolas e Ariane, respectivamente, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e do Núcleo do Instituto de Aplicações

Operacionais (NuIAOp), pela excelente contribuição para este trabalho, a partir de suas expertises na esfera da aviação de transporte.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Carlson *et al*, Resilience: Theory and Applications. Argonne National Laboratory, Decision Information Sciences Division, Oak Ridge, Tennessee, 2012.
- [2] K. Yu, J. Cadeaux, B. N. Luo, “Operational Flexibility: Review and Meta-Analysis”, *International Journal of Production Economics*, vol. 169, p. 190-202, 2015.
- [3] R. Färe, S. Grosskopf, C. A. Know Lovell, *The Measurement of Efficiency of Production*, *Studies in Productivity Analysis*, Springer, 2013.
- [4] H. A. Taha, *Operations Research: An Introduction*, 8th Edition, Prentice Hall, 2006.
- [5] S. F. Baker, D. P. Morton, R. E. Rosenthal, L. M. Williams, “Optimizing Military Airlift”, *Military Operations Research*, vol. 18, no. 3, 2010.
- [6] S. Holloway, *Straight and Level: Practical Airline Economics*, 3rd Edition, Ashgate Publishing, Ltd, 2012.
- [7] D. G. Dessavre, J. E. Ramirez-Marquez, K. Barker, “Multidimensional Approach to Complex System Resilience Analysis”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 149, p. 34-43, 2016.
- [8] A. M. Grisogono, M. Spaans, “Adaptive use of Networks to Generate an Adaptive Task Force”, In: *Proceedings of 13th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS)*, Washington, 2008.
- [9] J. Branke, K. Deb, K. Miettinen, R. Słowiński, *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*, Springer, 2008.