MODELAGEM DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL COM BASE EM VOOS REAIS

Ramiro de Paiva Fagundes[1], Davi Rosa Pinto[1], Matheus Monteiro de Siqueira Santos[1], Ricardo Suterio[1], Daniel Alberto Pamplona[1] e Níssia Carvalho Rosa Bergiante[1]
[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo **− No contexto das missões de Transporte Aéreo Logístico (TAL) da Força Aérea Brasileira (FAB), onde os acionamentos tempestivos são comuns, este artigo avalia se o consumo real de combustível da aeronave C-97 diverge das equações de previsão dos Manuais de Procedimentos (MAPRO), comprometendo sua validade operacional. Foram ajustados modelos de regressão linear sobre dados reais de missões de 2023 e 2024, com os pressupostos estatísticos validados por testes formais e os intervalos de confiança corrigidos por estimador robusto a heterocedasticidade e autocorrelação (HAC). Os resultados mostram que a taxa de consumo real é estatisticamente inferior à prevista pelo MAPRO, porém esse caráter conservador não é uniforme: nos voos mais curtos, decorre principalmente da reserva regulamentar (RBAC 121); nos voos mais longos, só se confirma a partir de aproximadamente 2 horas. O protocolo permanece válido para o seu propósito, abrindo espaço para estudos futuros com variáveis adicionais.**

Palavras-Chave **− Regressão Linear; Consumo de Combustível; Aeronaves.**

I. INTRODUÇÃO

O planejamento dos voos de aeronaves requer uma grande atenção por parte dos tripulantes. O gerenciamento de combustível na aviação envolve variáveis críticas de segurança e peso de decolagem: a aeronave deve decolar com a quantidade necessária para cumprir a rota principal, prever a alternância para um aeródromo de contingência e manter uma reserva técnica para esperas em voo. No Brasil a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) estabelece estes valores mínimos de acordo com as particularidades do voo através dos seus regulamentos [1].

Porém, o combustível, assim como qualquer outra carga e passageiro a bordo, ocasiona um acréscimo no peso da aeronave e, por consequência, um acréscimo no consumo de combustível propriamente dito o qual é refletido no custo de operação da aeronave. Este efeito é tão notável que as grandes companhias aéreas possuem setores dedicados para o planejamento de voo, visando uma otimização do abastecimento de forma a diminuir os custos sem afetar a segurança [2]. Estes setores gerenciam as rotas que as empresas aéreas já atuam para indicar para a tripulação a quantidade de combustível segura para o voo [3].

Já no contexto de uma organização militar, como a Força Aérea Brasileira (FAB), a realidade é um pouco diferente. A FAB possui em sua missão síntese a tarefa de integrar o território brasileiro com vistas à defesa da pátria. Uma das formas que a FAB cumpre essa tarefa é por meio da Ação de Transporte Aéreo Logístico (TAL) que é realizada pelas aeronaves de transporte da FAB [4].

Por ser uma força armada, a FAB precisa estar pronta para atuar a qualquer hora, o que torna o planejamento de rotas e horários fixos inviável. Suas demandas vão do transporte de equipamentos de manutenção, como no apagão do Amapá em 2021 [5], [6], [7], ao transporte de órgãos, missões em que aeronaves turboélice menores [8], como o C-97, C-98 e C-95, são empregadas.

Essa característica parcialmente previsível das demandas, associadas à necessidade de pronta resposta das tripulações da FAB no contexto de missões intempestivas, motivou os esquadrões a desenvolverem Manuais de Procedimentos (MAPRO) das suas aeronaves de modo a auxiliar os pilotos a realizarem planejamentos rápidos com cálculos simplificados de consumo de combustível. Nesse contexto, este estudo visa explorar o MAPRO do C-97 e testar, através de análise de regressão dos dados extraídos de missões cumpridas pela aeronave nos anos de 2023 e 2024, a precisão do cálculo de consumo de combustível do MAPRO, avaliando a sua adequação de uso nos planejamentos tempestivos da FAB.

Este artigo está estruturado em três seções, para além desta, de caráter introdutório. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre a modelagem de consumo de combustível e o papel do MAPRO no planejamento da FAB. A Seção 3 detalha a metodologia, incluindo os fatores que podem alterar o consumo ao longo da vida útil da aeronave, e a discussão dos resultados. Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões do estudo.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

O consumo de combustível no setor de transporte aéreo possui uma série de contribuições acadêmicas com a aplicação de diversos métodos para construção de modelos preditivos de consumo de combustível. Singh e Sharma [9] mencionam em sua revisão bibliográfica sobre Otimização de Consumo de Combustível, diversos artigos os quais uma das áreas se trata de técnicas de otimização, como programação linear, modelos de simulação e outros.

Na literatura internacional, a modelagem do consumo de combustível a partir de dados reais de operação por meio de regressão é uma abordagem consolidada: Khadilkar e Balakrishnan [10] modelam o consumo no táxi como função linear do tempo e do número de acelerações, com significância estatística testada em dados reais de FDR; Yanto e Liem [11] ajustam um modelo de regressão por tipo de

R. Fagundes, ramiro@ita.br; D. Pinto, davidrpfab@gmail.com; M. Santos, matheus.monteiro@ccm-ita.org.br; R. Suterio, suterio@lit.inpe.br;D. Pamplona, pamplona@ita.br; N. Bergiante, nissia@ita.br. O presente trabalho foi realizado com o apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

aeronave, validado contra o consumo reportado por companhias aéreas (erro < 6%); e Baumann et al. [12] alertam que erros de medição e turbulência podem introduzir vieses e más interpretações em avaliações estatísticas de consumo, reforçando a cautela necessária na leitura desses resultados.

Porém, na realização das missões da FAB, existem algumas demandas intempestivas, como transporte de órgãos vivos, que não existe margem para um planejamento detalhado e otimização de combustível. Os principais objetivos dessas missões são rapidez e segurança com informações apenas de origem e destino da missão e pouco tempo de resposta [13], [14]. Para este tipo de missão, a segurança é o objetivo principal e para isso, as unidades aéreas redigiram os Manuais de Procedimento (MAPRO) [15] com regras simples e lineares para calcular o combustível mínimo para a rota.

Nesse cálculo, são considerados os seguintes dados: distância da origem para o destino, distância de destino para o aeródromo alternativo e velocidade de solo média. Os dados de distância são obtidos através de medição em mapas de navegação considerando o arco terrestre ligando o ponto de origem e o destino. Com os dados de distância, a autonomia de voo necessária para a missão é determinada, considerando o tempo estimado de voo entre a origem e o destino, o tempo de deslocamento até o aeródromo de alternativa e a reserva de segurança prevista para a operação. É utilizado o modelo estipulado em MAPRO para cálculo do combustível necessário acrescido com a reserva de segurança estipulada pelo RBAC 121 [1].

Com a finalidade de auxiliar o planejamento, Nascimento [14] utilizou a técnica de regressão linear para construir um modelo preditivo de consumo de combustível de outra aeronave da FAB. A regressão linear estima o quanto uma variável resposta varia em função de outras variáveis, com os coeficientes obtidos pelo método dos mínimos quadrados, a curva que minimiza a soma dos quadrados dos erros entre o valor observado e o valor ajustado [16]. No caso deste trabalho, será ajustado um modelo linear sob esse mesmo princípio.

Para que o ajuste em regressão linear seja válido, é necessário que a distribuição dos erros possua distribuições normais, cuja média seja próxima ou igual a 0, possua homocedasticidade e seja independente de outros fatores.

Diferentemente desses trabalhos, voltados à construção de novos modelos preditivos de consumo ou à otimização de custos operacionais [2], [3], a contribuição deste artigo é de natureza metodológica: aplicar um procedimento de validação estatística, baseado em regressão linear e testes formais dos seus pressupostos, para auditar a confiabilidade de um protocolo heurístico simplificado (MAPRO) já em uso operacional, concebido para respostas rápidas em missões intempestivas. O estudo não busca substituir o MAPRO por um modelo mais complexo, mas sim preencher a lacuna de validação estatística periódica desses protocolos de decisão rápida frente a dados reais de operação.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

No caso do C-97, considera-se a velocidade média de 260 kt para o planejamento; dividindo a distância em milhas náuticas por esse valor, obtém-se o tempo de voo em horas, acrescido de 45 minutos de reserva mínima da categoria. Esse tempo total é então aplicado ao modelo do MAPRO, que estipula 500 kg de combustível na primeira hora e 400 kg nas demais [15].

A aeronave C-97 possui nos seus manuais tabelas de consumo detalhadas para diversas altitudes, regimes de motor, pesos e temperaturas para o cálculo de consumo de combustível [17]. Porém para a ocasião de um acionamento de missão tempestiva como as executadas pela FAB, é necessária uma simplificação destes cálculos para permitir um planejamento rápido para a maioria dos acionamentos de missão. Este protocolo consiste no cálculo de combustível explicado no parágrafo anterior, sendo que este trabalho se propõe a verificar a sua aderência com os voos realizados. Para simplificar a análise, foram adotadas as seguintes hipóteses nulas:

Equação 1: Primeira hora:

$$H_0 \rightarrow Comb(kg) = T(h) * 500 \quad (1)$$

Equação 2: Demais horas:

$$H_0 \rightarrow Comb(kg) = 100 + T(h) * 400 \quad (2)$$

Considerando que este trabalho deseja testar como o consumo real das aeronaves em comparação com a equação proposta no MAPRO, adota-se como hipótese nula a igualdade do consumo por hora com os coeficientes angulares das equações (1) e (2). Ou seja, para a primeira hora, adota-se como hipótese nula o consumo ser igual a 500 kg/h, e na segunda hora adota-se como hipótese nula o consumo ser igual a 400 kg/h.

Ao colocar em teste esta hipótese, através de intervalos de confiança dos coeficientes angulares que multiplicam a variável tempo (T), será possível obter evidências se o consumo real da aeronave condiz com o previsto pelo modelo da hipótese nula ou se fatores como idade do projeto ou outros alteraram a performance dos motores a ponto de causar diferenças significativas de aumento de consumo [18].

A. Mudança de consumo de combustível

Como qualquer componente mecânico, os motores estão sujeitos ao tempo de uso e à temperatura, que alteram seu funcionamento originalmente projetado, a idade do projeto pode, de fato, influenciar o consumo [18]. Considerando que o C-97 é um projeto iniciado em 1987 na FAB, com mais de quatro décadas de uso contínuo, este trabalho avalia se o cálculo utilizado pelos pilotos permanece válido mesmo após esse tempo de operação.

B. Extração de dados

Os dados obtidos foram de missões de transporte aéreo logístico feitos pela aeronave C-97 da FAB nos anos de 2023 e 2024. Os dados extraídos do banco de dados dos relatórios de missão preenchidos pelas tripulações cujos dados consistem em: número de ordem do voo, Modelo de aeronave, Esquadrão responsável pelo voo, Matrícula de aeronave, Localidade de origem, data e hora de decolagem, Localidade de destino, data e hora de pouso, Tempo de voo, Combustível consumido, Passageiros transportados e Carga transportada. Todos esses campos totalizaram 5053 registros em que cada linha representa uma decolagem e um pouso.

De todos esses dados, percebe-se que a distância, o principal fator de planejamento, não ficou evidente nessa coleta inicial. Para resolver isso, foram obtidas as coordenadas geográficas da maior parte das localidades para

posterior cálculo das distâncias de *haversine* entre aeródromo de origem e destino [19].

Uma vez encontradas as distâncias, algumas localidades não tiveram suas coordenadas geográficas encontradas pelo banco de dados utilizado, reduzindo dos 5053 para 5043 registros válidos. Estes dados foram organizados no *software* R na sua versão 4.3.2 através dos pacotes "*readr*" e "*dplyr*" para leitura e organização dos dados, utilizou-se o pacote "*lubridate*" para manejo de variáveis cronológicas e início das análises. As variáveis efetivamente utilizadas na análise final são apresentadas na TABELA I.

TABELA I - DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DA BASE DE DADOS

Variável	Tipo	Descrição
Tempo de Voo	Tempo (time)	Duração total da etapa de voo
Combustível	Numérico (dbl)	Quantidade de combustível consumida (kg de querosene de aviação)

Das variáveis originalmente extraídas do banco de dados, apenas Tempo de Voo e Combustível integraram a análise estatística final (Equações 3 e 4), apresentadas na TABELA I. Número de Ordem, Modelo, Esquadrão e Matrícula são campos de identificação; Localidade, Data e Hora de decolagem/pouso e as coordenadas geográficas foram utilizadas exclusivamente para o cálculo de distância descrito acima, que não se mostrou necessário no modelo final; e Passageiros e Carga, embora coletados, não foram utilizados nesta análise, sendo retomados como possível fator para trabalhos futuros na Seção IV.

C. Pré-processamento de dados

Com todos os dados devidamente organizados, primeiramente gerou-se o gráfico de consumo e tempo de voo para identificar possíveis anomalias de preenchimento dos relatórios, conforme Fig. 1(a).

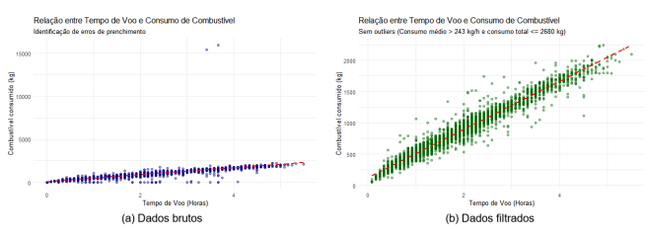

Fig. 1 - Dados brutos (a) e filtrados (b)

A partir da análise visual da Fig. 1(a), foram identificadas inconsistências nos registros de consumo de combustível, que podem estar relacionadas a erros de preenchimento nos relatórios de missão. A fim de mitigar o impacto dessas anomalias na modelagem estatística, os dados foram submetidos a uma filtragem baseada nos limites físicos e operacionais da aeronave, conforme os seguintes critérios:

- **Limite Superior (Capacidade Máxima):** Eliminação de registros com consumo total reportado superior a 2.680 kg, valor que excede a capacidade máxima dos tanques da aeronave.
- **Limite Inferior (Consumo Mínimo Operacional):** Exclusão de voos cuja taxa média de consumo apresentou-se inferior a 243 kg/h. Este patamar reflete o menor consumo horário possível estimado em manual para o regime de *Long Range Cruise* em condições de baixa temperatura atmosférica, desconsiderando a etapa de decolagem.

A remoção dessas observações fisicamente impossíveis garantiu que o escopo da análise ficasse restrito ao envelope operacional real da aeronave, reduzindo os 5043 registros para 4701 registros passíveis de análise conforme Fig. 1(b).

Os dados pré-processados foram então separados em registros dos voos cuja duração foi menor ou igual a 1 hora (1090 registros) e outra para voos com duração superior a 1 hora (3611 registros) no intuito de testar a hipótese nula contidas nas equações 1 e 2.

D. Ajuste de modelos

Após o pré-processamento dos dados, foram ajustados dois modelos de regressão linear por meio do software R, resultando nas Equações (3) e (4):

Modelo 1 (Voos até 1 hora):

$$Comb_i = 86.1 + 432.928\,T_i + \epsilon_i \quad (3)$$

Modelo 2 (Voos com mais de 1 hora):

$$Comb_i = 136.352 + 381.801\,T_i + \epsilon_i \quad (4)$$

Onde:

$Comb_i$ representa o consumo (kg) de querosene de aviação da observação i;

T_i representa o tempo de voo (h) tempo de voo da observação i;

e ϵ_i representa o termo de erro aleatório do modelo. Os demais dados são apresentados na TABELA II.

TABELA II - MODELOS AJUSTADOS

Variáveis Independentes	Modelo 1: Voos até 1h	Modelo 2: Voos mais de 1h
Consumo (kg/h)	432,928*** (8,260)	381,801*** (1,667)
Intercepto (Constante)	86,100*** (6,432)	136,352*** (3,906)
Métricas de Ajuste		
Observações (N)	1090	3611
R^2	0,7163	0,9357
R^2 Ajustado	0,7161	0,9356
Erro Padrão Residual (RSE)	59,25 (gl=1088)	82,78 (gl=3609)
Estatística F	2.747*** (gl=1;1088)	52.490*** (gl=1;3609)

Nota: Os valores entre parênteses dos coeficientes de regressão representam o erro padrão. O asterisco triplo (***) representa níveis de significância $p < 0,0001$.

Ao analisar os resíduos dos dois modelos na Fig. 2, observa-se que ambos os gráficos apresentam dispersões concentradas na linha ajustada de valor 0. Nos voos de até 1 hora, existe uma maior concentração dos resíduos na grandeza de aproximadamente 100 kg para cada valor ajustado. Nos voos de mais de 1 hora a mesma observação vale até próximo dos valores ajustados de 1500 kg, após isso,

percebe-se ocorrências mais esparsas devido à diminuição de ocorrências de voos com este grau de consumo.

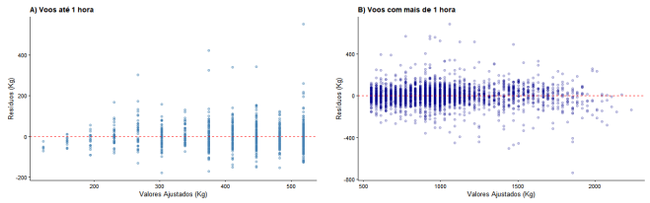

Fig. 2. Resíduos até 1 hora (a) e mais de 1 hora (b).

Nos testes de normalidade Shapiro [20], observou-se um valor menor que o nível de significância de 5%, este comportamento é atribuído ao elevado tamanho das amostras ($n_1 = 1090$, $n_2 = 3611$), cenário no qual o teste apresenta sensibilidade inflacionada a pequenos desvios. Porém pode-se observar que através dos gráficos QQ-plot da Fig. 3, que os resíduos se ajustaram na distribuição normal entre os quantis -2 e 2, apresentando um descolamento maior nas suas pontas. Embora o teste de Shapiro-Wilk rejeite a hipótese de normalidade, os QQ-plots indicam que os principais desvios estão concentrados nas caudas.

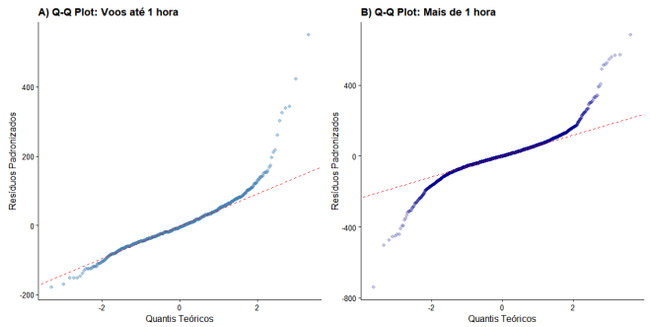

Fig. 3. QQ-plot dos resíduos

E. Validação dos Pressupostos Estatísticos

Na intenção de tornar mais robusta a análise, foram realizados testes complementares dos três pressupostos da regressão linear apresentados na Seção II: normalidade, homocedasticidade e independência dos resíduos.

Além do teste de Shapiro-Wilk já discutido, foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov (correção de Lilliefors), Anderson-Darling, Jarque-Bera e Cramér-von Mises sobre os resíduos dos dois modelos, cujos resultados constam na TABELA III. Todos os testes rejeitaram a hipótese de normalidade, com p-valor inferior a 10^{-9} em todos os casos, padrão consistente com a sensibilidade inflacionada desses testes em amostras do tamanho das utilizadas neste trabalho, já discutida para o teste de Shapiro-Wilk.

Foram utilizados os testes de Breusch-Pagan, Goldfeld-Quandt e de variância não constante (NCV) nos dois modelos, reportados na TABELA III. Em cada modelo, um teste diferente não rejeitou a hipótese de homocedasticidade, Breusch-Pagan no Modelo 1 (p = 0,372) e Goldfeld-Quandt no Modelo 2 (p = 0,937), consistente com os padrões de dispersão visíveis na Fig. 2. Como a maioria dos testes (2 de 3) rejeita a hipótese nula em ambos os modelos, adota-se a heterocedasticidade como a hipótese mais consistente com a evidência.

Foi aplicado o teste de Durbin-Watson para verificar a independência dos erros, pressuposto também citado na Seção II, mas até então não testado formalmente. Os resultados constam na TABELA III. Em ambos os modelos, o teste rejeitou a hipótese nula de ausência de autocorrelação (Modelo 1: DW = 1,797, p < 0,001; Modelo 2: DW = 1,772, p < 0,001), indicando a presença de autocorrelação positiva de primeira ordem nos resíduos.

TABELA III - TESTES DE VALIDAÇÃO DE PRESSUPOSTOS

Pressuposto	**Teste**	**Modelo 1 — estatística / p-valor**	**Modelo 2 — estatística / p-valor**
Normalidade	Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors)	D = 0,0774 / p < $2{,}2\times10^{-16}$	D = 0,0863 / p < $2{,}2\times10^{-16}$
Normalidade	Anderson-Darling	A = 14,795 / p < $2{,}2\times10^{-16}$	A = 64,363 / p < $2{,}2\times10^{-16}$
Normalidade	Jarque-Bera	X^2 = 7695,1 (df=2) / p < $2{,}2\times10^{-16}$	X^2 = 15780 (df=2) / p < $2{,}2\times10^{-16}$
Normalidade	Cramér-von Mises	W = 2,417 / p < $7{,}37\times10^{-10}$	W = 10,525 / p < $7{,}37\times10^{-10}$
Homocedasticidade	Breusch-Pagan	BP = 0,798 (df=1) / p = 0,372	BP = 58,384 (df=1) / p = $2{,}16\times10^{-14}$
Homocedasticidade	Goldfeld-Quandt	GQ = 1,543 (543;543) / p = $2{,}40\times10^{-7}$	GQ = 0,930 (1804;1803) / p = 0,937
Homocedasticidade	NCV	χ^2 = 5,759 (df=1) / p = 0,0164	χ^2 = 357,025 (df=1) / p < $2{,}22\times10^{-16}$
Independência	Durbin-Watson	DW = 1,797 / p = 0,000387	DW = 1,772 / p = $3{,}21\times10^{-12}$

Diante da rejeição de normalidade, homocedasticidade e independência nos dois modelos, e consistente com a cautela recomendada por Baumann et al. [12] quanto à interpretação de diagnósticos estatísticos isolados, os erros-padrão e intervalos de confiança dos coeficientes foram recalculados com o estimador robusto a heterocedasticidade e autocorrelação de Newey e West [21]. Essa correção preserva as estimativas pontuais, não-viesadas mesmo sob as violações identificadas, e afeta apenas a variância estimada, mantendo o modelo linear original (Equações 3 e 4) e sua comparabilidade com o MAPRO. Os intervalos corrigidos constam na TABELA IV (subseção F).

F. Construção de intervalos de confiança dos coeficientes

A fim de comparar os modelos ajustados com o modelo inicial, foram calculados os intervalos de confiança dos coeficientes estimados, cujos resultados são analisados e discutidos na subseção G. Os intervalos foram construídos através do software R conforme descrito na TABELA IV, contemplando tanto o erro-padrão da regressão por mínimos quadrados ordinários (OLS) quanto o erro-padrão robusto a heterocedasticidade e autocorrelação (HAC, Newey-West), adotado como referência conforme justificado na Seção E.

TABELA IV - INTERVALOS DE CONFIANÇA DOS COEFICIENTES AJUSTADOS (95%)

Modelo	Coeficiente	Estimativa	IC 95% OLS	IC 95% HAC
Modelo 1 (≤1h)	Intercepto	86,10	[73,48; 98,72]	[73,67; 98,53]
Modelo 1 (≤1h)	Tempo de Voo (T)	432,93	[416,72; 449,13]	[416,59; 449,26]
Modelo 2 (>1h)	Intercepto	136,35	[128,69; 144,01]	[127,67; 145,03]
Modelo 2 (>1h)	Tempo de Voo (T)	381,80	[378,53; 385,07]	[377,64; 385,96]

G. Resultados da pesquisa e Discussão

Através dos coeficientes ajustados e indicados na TABELA IV, pode-se dizer que para voos de até 1 hora de duração, o consumo médio é de 432,93 kg de combustível por hora. E que após uma hora de voo, o consumo de combustível passa a ser, em média 381,8 kg, a cada unidade de hora.

Analisando os intervalos de confiança dos coeficientes estimados dos dois modelos ajustados e comparando com a hipótese nulas dadas pelas equações (1) e (2), observa-se que ambos os intervalos, tanto sob erro-padrão OLS quanto sob o erro-padrão robusto HAC, encontram-se abaixo dos valores dos coeficientes da hipótese nula de 500 kg/h até a primeira hora e abaixo dos 400 kg/h da primeira hora em diante.

Sob a perspectiva estritamente estatística, pode-se, então, rejeitar a hipótese inicial de igualdade com os valores de 500 kg/h na primeira hora e de 400 kg/h nas demais horas — resultado que se mantém sob o erro-padrão robusto (Seção E). Vale ressaltar que essa rejeição avalia apenas a taxa de consumo, coeficiente angular da equação ajustada. Uma comparação rigorosa do planejamento deve incluir também os interceptos dos modelos, apresentados na Fig. 4.

A Fig. 4 compara as equações completas, intercepto e inclinação, do MAPRO e dos modelos ajustados em função do tempo de voo. Para voos de até 1 hora, o modelo ajustado (86,10+432,93T) permanece acima do MAPRO (500T) ao longo de todo o intervalo: em T=1h, por exemplo, o modelo ajustado indica 519,03 kg contra 500 kg do MAPRO. Nesse trecho, portanto, o MAPRO não se mostra conservador frente à tendência média de consumo observada nos dados reais.

Para voos com mais de 1 hora, a comparação se inverte ao longo do tempo: as retas do MAPRO (100+400T) e do modelo ajustado (136,35+381,80T) se cruzam em T ≈ 2,0 h (mais precisamente T ≈ 1,998 h, correspondendo a aproximadamente 899,95 kg). Antes desse ponto, o modelo ajustado permanece ligeiramente acima do MAPRO; a partir dele, o MAPRO passa a superar a tendência ajustada, tornando-se conservador a partir de então. Esses resultados mostram que o caráter conservador do MAPRO não é universal, mas concentrado nos voos de maior duração, o que qualifica a rejeição da hipótese de igualdade dos coeficientes angulares apresentada anteriormente, já que esta, isoladamente, não implica que o MAPRO seja mais conservador em toda a extensão do voo.

Contudo, o modelo ajustado neste trabalho, apesar de mostrar que o consumo da aeronave não aumentou ao ponto de tornar a equação do MAPRO inválida, apresenta problemas com os seus resíduos, pois não apresentam distribuição normal em sua totalidade. Os desvios observados nos resíduos indicam que o modelo linear simplificado pode não capturar integralmente a variabilidade do consumo. Variáveis adicionais, como peso, altitude e condições atmosféricas, poderão ser investigadas em trabalhos futuros.

Fig. 4 - Comparação do MAPRO e modelos ajustados

O MAPRO tem como propósito ser um protocolo de fácil utilização, permitindo planejamentos rápidos sem risco de abastecimento insuficiente. Essa margem de segurança se confirma estatisticamente a partir de ~2h de voo; para voos mais curtos, ela decorre principalmente da reserva RBAC 121 somada ao combustível de viagem do MAPRO, não deste último isoladamente. O protocolo permanece adequado ao seu propósito, cabendo ao tripulante checar os manuais de performance quando o planejamento fornecer valores marginais.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho indicou uma forma de avaliar o consumo de combustível de uma frota de aeronaves com dados estatísticos, bem como comparou os dados de planejamento com um modelo linear ajustado baseado em dados de voos reais. Nesta comparação, foi possível observar que o modelo oficial (MAPRO) prioriza a segurança operacional ao reduzir o risco de abastecimento insuficiente, embora seu caráter conservador não se verifique de forma uniforme ao longo do tempo de voo, como detalhado a seguir.

Além da validação estatística do modelo do MAPRO, este trabalho produziu, como contribuições secundárias, uma metodologia de extração e depuração de dados de consumo a partir de relatórios de missão, incluindo o cálculo de distâncias por meio da fórmula de haversine e critérios de filtragem baseados nos limites físicos e operacionais da aeronave, e uma caracterização estatística do envelope operacional do C-97 em missões de Transporte Aéreo Logístico ao longo de dois anos de operação.

Existem, portanto, outros fatores nos dados dos relatórios de missão que possuem uma possível margem para análises futuras, como o peso das cargas transportadas e quantidade de passageiros transportados. Porém, para este artigo não foi necessário utilizá-los pois o intuito foi testar a eficácia dos fatores de planejamento previstos nos manuais de procedimento (MAPRO) da aeronave.

Como limitação da análise deste artigo, não foi possível encontrar evidências estatísticas suficientes para afirmar que a idade do projeto da aeronave C-97 aumentou o seu consumo. Para isso, seria necessário fazer uma análise mais detalhada e considerar outros fatores como altitude de cruzeiro, temperatura atmosférica e peso de decolagem da aeronave, bem como realizar uma análise minuciosa dos dados previstos no manual de performance da aeronave, o que extrapolaria o objetivo delimitado neste artigo.

Para os operadores do C-97, é natural que o consumo real seja inferior ao planejado, já que este incorpora as reservas do RBAC 121. A conclusão se limita ao fato de que, a partir de ~2h de voo, o MAPRO passa a apresentar valores superiores à tendência média observada, confirmando seu caráter conservador para esse perfil de missão; para voos mais curtos, essa margem vem principalmente da reserva regulamentar, não do cálculo de viagem isolado. Recomenda-se que os tripulantes consultem os manuais de performance ao planejar voos de maior distância, otimizando o planejamento.

REFERÊNCIAS

[1] ANAC, *RBAC 121 EMD 25 — Agência Nacional de Aviação Civil ANAC*. 2026. Acesso em: 14 de junho de 2026. [Online]. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-121

[2] A. V. M. Oliveira, R. R. Narcizo, T. Caliari, M. A. V. Morales, e R. Prado, "Estimating fuel-efficiency while accounting for dynamic fleet management: Testing the effects of fuel price signals and fleet rollover", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 95, p. 102820, jun. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.102820.

[3] D. Lax *et al.*, "Quantifying operating cost reduction from aircraft performance optimization", em *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA: IEEE, abr. 2018, p. 3C4-1-3C4-12. doi: 10.1109/ICNSURV.2018.8384860.

[4] Brasil, *DCA 1-1 - Doutrina Básica da FAB*, v. BCA 232 de 2024. 2024. [Online]. Disponível em: https://www.sislaer.fab.mil.br/TerminalWebCENDOC/Busca/Download?codigoArquivo=38837&tipoMidia=0

[5] M. G. Gazola, F. L. J. Pádua, e D. B. T. P. A. Ferrari, "A STATISTICAL APPROACH TO AIRCRAFT CARGO LAUNCHING TO SUPPORT HUMANITARY AID OPERATIONS", *Pesqui. Oper.*, v. 44, p. e274910, 2024, doi: 10.1590/0101-7438.2023.043.00274910.

[6] L. O. Gaviao, A. P. SantAnna, G. B. A. Lima, P. A. De Almada Garcia, S. Kostin, e B. Asrilhant, "Selecting a Cargo Aircraft for Humanitarian and Disaster Relief Operations by Multicriteria Decision Aid Methods", *IEEE Trans. Eng. Manage.*, v. 67, n. 3, p. 631–640, ago. 2020, doi: 10.1109/TEM.2019.2956356.

[7] F. A. B. FAB, "FAB transporta equipamentos para o Amapá", Força Aérea Brasileira. Acesso em: 13 de abril de 2026. [Online]. Disponível em: https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/36562

[8] R. S. Rodrigues, "TRANSPORTE ÁEREO DE ÓRGÃOS NO BRASIL: A LOGÍSTICA PARA O TRANSPLANTE".

[9] V. Singh e S. K. Sharma, "Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications", *Eur. Transp. Res. Rev.*, v. 7, n. 2, p. 12, jun. 2015, doi: 10.1007/s12544-015-0160-x.

[10] H. Khadilkar e H. Balakrishnan, "Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 17, n. 7, p. 532–537, out. 2012, doi: 10.1016/j.trd.2012.06.005.

[11] J. Yanto e R. P. Liem, "Aircraft fuel burn performance study: A data-enhanced modeling approach", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 65, p. 574–595, dez. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.09.014.

[12] S. Baumann, T. Neidhardt, e U. Klingauf, "Evaluation of the aircraft fuel economy using advanced statistics and machine learning", *CEAS Aeronaut J*, v. 12, n. 3, p. 669–681, ago. 2021, doi: 10.1007/s13272-021-00508-8.

[13] M. da D. Brasil Comando da Aerpnáutica, "ICA 55-97 - ACIONAMENTO DE MISSÕES DE APOIO DE TRANSPORTE AÉREO". COMAER, Brasília-DF, 2015.

[14] M. P. do Nascimento, "Modelagem do Consumo de Combustível de Combustível da Aeronave KC-390 em Missões de Transporte Aéreo Logístico", *Trabalho de Conclusão de Curso em Análise Operacional 2023*, p. 61, 2023.

[15] IPEV, "Manual de Procedimentos da Aeronave C-97". Instituto de Provas e de Ensaio em Voo., São José dos Campos, 2022.

[16] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2017.

[17] EMBRAER, "SPM120-1090 - Supplementary Performance Manual". EMBRAER, São José dos Campos, 1999.

[18] B. Venediger, "CIVIL AIRCRAFT TRAJECTORY ANALYSES - IMPACT OF ENGINE DEGRADATION ON FUEL BURN AND EMISSIONS", 2013.

[19] R. W. Sinnott, "Virtues of the Haversine", *Sky and Telescope*, v. 68, p. 158, dez. 1984.

[20] J. P. Royston, "An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples", *Applied Statistics*, v. 31, n. 2, p. 115, 1982, doi: 10.2307/2347973.

[21] W. K. Newey e K. D. West, "A Simple, Positive Semi-Definite, Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent Covariance Matrix", *Econometrica*, v. 55, n. 3, p. 703, maio 1987, doi: 10.2307/1913610.