

UM MODELO PARA A MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS TOTAIS DE ABASTECIMENTO CONSIDERANDO AS MÚLTIPLAS ESCALAS DAS AERONAVES NAS ROTAS DE UMA EMPRESA AÉREA DOMÉSTICA BRASILEIRA

Engº José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani

Prof. Dr. Carlos Müller

Prof. Dr. Anderson Ribeiro Correia

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Departamento de Transporte Aéreo e Aeroportos (EIA-T)

Setembro de 2007

RESUMO

Neste trabalho propõe-se um modelo de programação linear cujo objetivo é determinar o abastecimento de quantidades ótimas de combustível ao longo de uma malha de vôos de uma empresa aérea doméstica brasileira. Assumindo que não há restrições de venda de volume ou capacidade de armazenamento em cada localidade, efetua-se a análise para o caso de uma aeronave em um dia de sua programação, extrapolando os resultados para projeções mensais e anuais. Através do modelo proposto, verifica-se que tal técnica de tanqueamento de combustível provê ganhos econômicos da ordem de 5%, porém produz um consumo adicional de combustível da ordem de 1%. Uma discussão do impacto ambiental de tal procedimento também é proposta.

ABSTRACT

This paper presents a linear programming model designed to determine the optimum fuel loading quantities along a route network considering a Brazilian domestic airline. Assuming that there are no volume purchase or storage capacity restrictions on each station, the analysis is carried out for one aircraft in one day of its schedule. Results are extrapolated to monthly and yearly basis. Through the proposed model, it is verified that such fuel tankering technique provides 5% economical savings, but produces 1% of additional fuel burn. An environmental impact discussion is also proposed for such procedure.

1) INTRODUÇÃO

De acordo com recentes estudos realizados pela IATA (2004), o consumo de combustível representa o segundo maior componente dos custos diretos operacionais das empresas aéreas, seguindo apenas os custos referentes à mão de obra. Estima-se que a participação do consumo de combustível atinja 20% ou mais sobre os custos diretos operacionais totais de qualquer tipo de empresa aérea.

O ramo da aviação comercial tem como característica própria de se fazer presente em mercados extremamente competitivos e com baixas margens de lucro. Desta forma, as empresas aéreas que conseguirem gerenciar o consumo de combustível de forma eficiente apresentarão, sem dúvida, vantagens competitivas que poderão determinar sua sobrevivência. Estima-se atualmente que, para cada dólar consumido em combustível, as empresas aéreas tenham que gerar de 15 a 20 dólares em receita para obter a mesma margem de lucro. Além disso, o preço do barril de petróleo tem experimentado um dramático aumento desde o ano 2000.

Apesar dos avanços tecnológicos da indústria petrolífera haver possibilitado a descoberta de novas fontes deste recurso, outros fatores de influência, sobretudo de natureza geopolítica no Oriente Médio ou mesmo influências não convencionais, tais como catástrofes naturais, têm contribuindo para a instabilidade e aumento destes preços ao longo dos últimos anos. A evolução dos preços do combustível de aviação segue sempre acoplada aos preços do barril de petróleo e, portanto, atenção redobrada ao consumo de combustível tem sido dada por parte das empresas aéreas nos últimos anos. Na Figura 1, pode-se verificar a tendência de aumentos de preços médios anuais do barril de petróleo e do combustível de aviação até 2006, de acordo com a Air Transport Association. Observa-se um aumento no preço médio do barril de petróleo de US\$ 26,01 no início de 2002 para US\$ 66,02 ao final de 2006, ou seja, um

acréscimo de 152,95% em quatro anos, ou 3,19% ao mês. Estima-se que, ao final de 2007, o preço do barril de petróleo possa atingir a marca dos US \$ 90,00 caso tal tendência se mantenha.

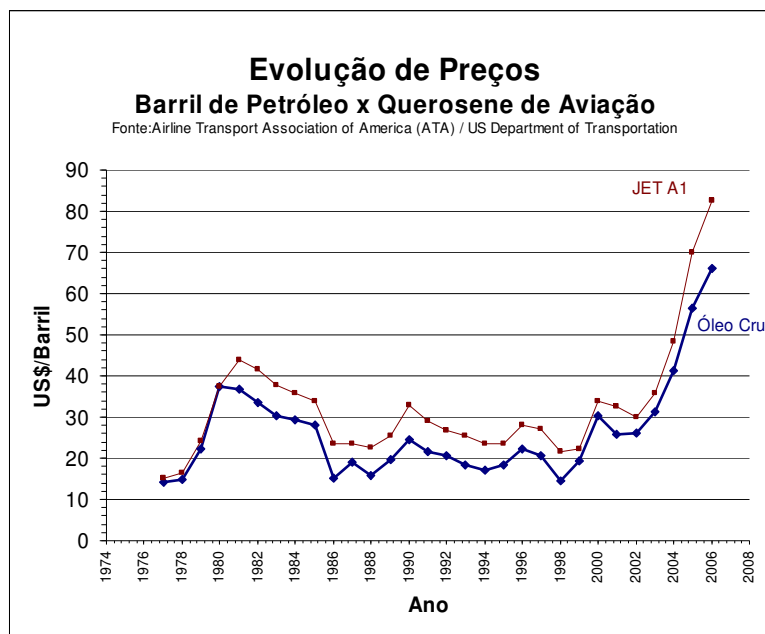


Figura 1: Evolução dos preços do barril de petróleo e querosene de aviação.

É prática cada vez mais comum nas empresas aéreas o estabelecimento de programas de conservação de combustível, onde um conjunto de medidas envolvendo as áreas de operações e de manutenção é criado com o objetivo de se minimizar o consumo. De acordo com estudos efetuados pela EMBRAER (2005), 1% de economia de combustível pode ser facilmente atingido através de práticas operacionais coerentes. Procedimentos operacionais com foco em conservação de combustível são de fácil execução e não envolvem grandes investimentos, na maioria das vezes concentrando-se apenas no treinamento de pilotos e despachantes operacionais. Um dos procedimentos mais comuns adotado pelas empresas aéreas é o chamado “Abastecimento Econômico” ou “Tanqueamento de combustível”, a ser apresentado a seguir.

2) Procedimento para tanqueamento de combustível

Variações de preço de combustível em cada localidade, uma eventual ausência deste recurso (como, por exemplo, operações em aeroportos remotos) ou restrições contratuais com as empresas abastecedoras ao longo de malha de vôos pode resultar em se transportar maior quantidade de combustível que o mínimo requerido pela regulamentação a partir de determinadas localidades, de modo a se minimizar os custos de abastecimento. A prática de carregar uma quantidade extra de combustível é denominada de “Tanqueamento de Combustível” ou “Abastecimento Econômico”.

Como a quantidade de combustível extra carregado resulta em peso extra na aeronave e, portanto, produz um consumo adicional de combustível na referida etapa, é importante se analisar os custos de transporte deste peso adicional de combustível. Geralmente, as empresas aéreas analisam a viabilidade econômica de transporte de combustível etapa por etapa, para cada aeronave. Em cada etapa, caso o tanqueamento seja viável, programa-se abastecer a aeronave na origem com tal quantidade de combustível extra de modo que o combustível

remanescente no destino seja exatamente o combustível regulamentar mínimo para a próxima etapa, calculado de acordo com o item 121.645 do Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) parte 121. Além disso, devido ao peso adicional que a operação impõe às aeronaves, alguns requisitos devem ser respeitados em cada etapa onde o combustível extra é tanqueado: o Peso Máximo de Decolagem (PMD) no aeroporto de origem não pode ser excedido, o Peso Máximo de Pouso (PMP) no aeroporto de destino não pode ser excedido e a capacidade máxima de abastecimento da aeronave não pode ser excedida

No Brasil, o procedimento de tanqueamento de combustível é uma prática bastante comum, uma vez que existe uma grande variação de incidência da alíquota de ICMS sobre combustíveis de aviação entre estados (variações de 4% a 25% são esperadas). As empresas aéreas geralmente recorrem à análise pontual, etapa por etapa, para estudarem a viabilidade de efetuarem o tanqueamento de combustível. Efeitos de rede, tais como a minimização do custo de todos os abastecimentos ao longo da programação de uma aeronave em uma malha de vôos, de forma integrada e simultânea, não são ainda avaliados. Muitas vezes, a análise de preço *break even* não é sistematizada e geralmente efetua-se a operação de tanqueamento de combustível apenas onde os preços de combustível são mais baratos. Preocupações por consumos adicionais são ignoradas por certos operadores.

3) Revisão Bibliográfica

A EMBRAER (2006b) sugere a análise de viabilidade econômica para tanqueamento de combustível em uma única etapa comparando-se o preço *break even* (P_{deq}), determinado através de ábacos e tabelas no manual de operações das aeronaves, com o preço real de combustível no destino (P_d). Caso o preço real do combustível no destino seja superior ao preço *break even*, é economicamente viável o tanqueamento de combustível extra no aeroporto de origem. Sugere-se que a quantidade abastecida na origem seja tal que, ao se pousar no destino, o combustível remanescente seja exatamente o combustível mínimo regulamentar para a etapa seguinte. O preço *break even* no destino é determinado pelas seguintes relações:

$$P_{deq} = \frac{P_o}{(1-f)} \quad (1) \qquad f = \frac{dWf}{dW} \quad (2)$$

Onde P_{deq} : Preço *break even* no destino.

P_o : Preço do Combustível na origem.

f : Fator de ajuste de consumo de combustível.

dWf : Variação de combustível consumido [kg].

dW : Variação de peso da aeronave em [kg].

O fator f é sensível ao tamanho da etapa, altitude e velocidade de cruzeiro e vento médio da etapa. Geralmente é um fator informado pelos sistemas informatizados de planejamento de navegação como Fator de Ajuste de Consumo (ou *Fuel Burn Adjustment*) sob a forma de percentual. Valores entre 3% e 5% são esperados para etapas curtas e médias (até 1.000 NM) para aeronaves regionais com capacidade para 70 a 110 assentos. Nos manuais de vôo destas aeronaves, encontram-se ábacos para a determinação do fator f , bem como P_{deq} .

Saboya (1992) sugere a comparação entre os preços *break even* e real do combustível no destino, de maneira idêntica ao fabricante de aeronaves, ou seja, etapa por etapa. Porém desenvolve um algoritmo para a produção do fator f a partir das informações disponíveis nos manuais de vôo de quaisquer tipos de aeronaves. Tal algoritmo consiste na determinação do acréscimo percentual médio de consumo em relação a um peso de pouso de referência inferior

ao Peso Máximo de Estrutural de Pouso (PMEP) para uma determinada etapa. Para isto, leva em conta a hipótese que o consumo adicional percentual nesta faixa de pesos é aproximadamente constante. Os percentuais obtidos serão os próprios valores do fator f . Padilla (1996) sugere que se faça a verificação de viabilidade econômica de se transportar quantidades adicionais de combustível através da análise da área abaixo da curva de alcance específico em função do peso.

Stroup e Lackey (1975) provêm modelo de decisão para indicar onde efetuar o procedimento de tanqueamento de combustível ao longo de uma malha de vôos. Consideram restrições de localidade e fornecedores, além do preço dos combustíveis. Utilizam o fator f constante em sua análise. Darnell e Loflin (1977) determinam uma estratégia ótima para abastecimento a ser usada a curto e médio prazo. Desenvolvem um modelo de escolha que fornece os melhores lugares e fornecedores para cada etapa baseando-se em: preços, disponibilidade, consumo, custos de tanqueamento (considerando fator f constante) e dados reais dos vôos em questão. Stroup e Wollmer (1991) apresentam um modelo genérico que minimiza os custos de abastecimento de uma malha de vôos suprida por vários tipos de aeronave, através de um modelo de programação linear, assumindo fator f constante. As decisões de abastecimento são baseadas em preços de combustível e em restrições de fornecimento nos aeroportos. Caso o problema seja limitado apenas a preços de combustível, o problema pode ser transformado em um problema de rede puro. Neste modelo, estimam de 5% a 6% de economia em abastecimento utilizando este tipo de resolução. Zouein *et. al* (2002) apresentam um modelo de decisão para determinação da quantidade de combustível a ser abastecida em uma aeronave ao longo de cada aeroporto de sua programação, considerando-se um determinado horizonte de planejamento no tempo. Tal problema é modelado como um problema de inventário de período múltiplo e resolvido usando-se programação linear. As restrições de peso e capacidades consideradas em cada trecho são as seguintes: Peso Máximo de Decolagem (PMD), Peso Máximo de Pouso no destino (PMP), Capacidade Total de Combustível e Combustível de Segurança Mínimo (remanescente no destino). Efetua-se uma análise para cada aeronave de uma frota ao longo das escalas de sua programação diária. O fator f é determinado como função linear do peso para cada etapa, obtendo ganhos econômicos da ordem de 10%. Finalmente, Abdelghany *et. al* (2004) desenvolveram um modelo de programação linear para abastecimento em múltiplas localidades, considerando um fator f constante o e aplicando-o a vários cenários de preços. Analisam os cenários de múltiplo abastecimento e o de trecho a trecho. Obtém valores de ganhos econômicos na faixa de 0.5% para a análise de trecho a trecho e 3% para a análise de múltiplos trechos.

4) Modelo Proposto

Seja a programação diária para um conjunto de aeronaves em uma malha de vôos de uma empresa aérea. Para cada aeronave, é definida uma programação diária com N aeroportos e i trechos a serem cumpridos, com $i = 1, \dots, N-1$, de acordo com a Figura 2.

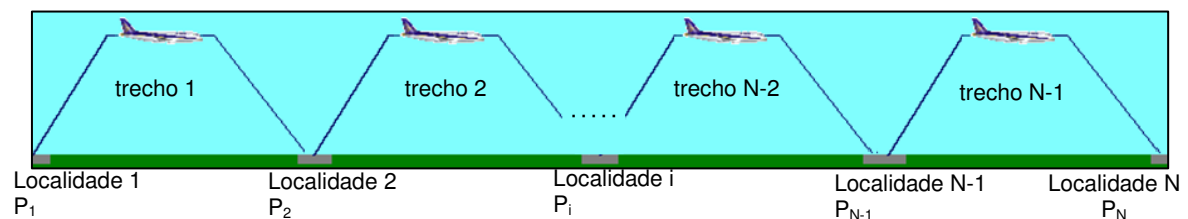


Figura 2: Programação de vôos para cada aeronave em uma malha aérea

Considera-se também que, para cada aeroporto, é pré-definido o preço do combustível P_i [kg]. O problema consiste em se determinar qual é a quantidade de combustível que se deve abastecer em cada aeroporto a fim de se minimizar o custo total da operação de cada aeronave. As seguintes restrições operacionais devem ser obedecidas:

- i. O Peso Máximo de Decolagem nos aeroportos de origem não deve ser excedido.
- ii. O Peso Máximo de Pouso nos aeroportos de destino não deve ser excedido.
- iii. A Capacidade Máxima de Combustível da aeronave não deve ser excedida.
- iv. O combustível abastecido não deve ser inferior ao mínimo requerido pela regulamentação.
- v. O combustível remanescente nos destinos não deve ser inferior ao combustível de reserva mínimo definido pela política operacional da empresa.

Consideramos ainda as seguintes hipóteses:

- i. Haverá um único fornecedor de combustível, determinado contratualmente, em cada localidade. Tal hipótese é bastante razoável, uma vez que as empresas aéreas sempre optam pelo fornecedor mais barato.
- ii. Não haverá restrições contratuais de volume total de combustível comprado ao longo da malha de vôos para um determinado fornecedor. Ou seja, a venda de combustível é ilimitada.
- iii. Todas as localidades serão capazes de prover a quantidade necessária de combustível para todos os vôos. Ou seja, não haverá restrições de capacidade de armazenamento de combustível para atender a todas as aeronaves que passem por cada localidade.

Desta forma, o abastecimento de cada aeronave não interfere no abastecimento das outras ao longo da malha de vôos. Isso permite tratar cada aeronave separadamente em sua programação. O custo de abastecimento total da malha de vôos será a somatória dos custos de abastecimento de cada aeronave. A resolução deste problema será efetuada através de um modelo de programação linear para minimização do custo total de abastecimento ao longo das N localidades da programação diária de cada aeronave. A variável de decisão é a quantidade de combustível a se abastecer (X_i) para cada trecho i , na localidade i , com $i=1,...,N-1$.

Para cada aeronave, em sua programação diária, pode-se formular o seguinte modelo de programação linear:

$$\text{Função objetivo: } \mathbf{Min Z = \sum P_i * X_i} \quad \text{para } i = 1,...,N-1 \quad (3)$$

Obedecendo às seguintes restrições:

$$\begin{aligned} \text{i. Restrição de Peso Máximo de Decolagem (PMD):} \\ \mathbf{PZC_i + FOB_i \leq PMD_i} \quad \text{para } i = 1,...,N-1 \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ii. Restrição de Peso Máximo de Pouso (PMP):} \\ \mathbf{PD_i - TRIP_i \leq PMP_i} \quad \text{para } i = 1,...,N-1 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{iii. Restrição de máxima capacidade de combustível da aeronave:} \\ \mathbf{REM_i + X_i \leq MAXF} \quad \text{para } i = 1,...,N-1 \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{iv. Restrição de combustível regulamentar mínimo para a etapa i:} \\ \mathbf{REM_i + X_i \geq FOB_0_i} \quad \text{para } i = 1,...,N-1 \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{v. Restrição de combustível remanescente mínimo no destino:} \\ \mathbf{FOB_{i-1} - TRIP_{i-1} \geq MINF_i} \quad \text{para } i = 2,...,N \quad (8) \end{aligned}$$

vi. Ajuste de consumo pelo fator f :

$$f_i = \frac{dWf}{dW} \approx (\text{TRIP}_i - \text{TRP0}_i)/(\text{FOB}_i - \text{FOB0}_i) \quad \text{para } i = 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

vii. Definição de combustível a bordo na localidade de origem:

$$\text{FOB}_i = \text{REM}_i + \text{X}_i \quad \text{para } i = 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

viii. Definição do combustível remanescente no destino:

$$\text{REM}_i = \text{FOB}_{i-1} - \text{TRIP}_{i-1} \quad \text{para } i = 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

ix. Positividade dos valores de abastecimento:

$$\text{X}_i \geq 0 \quad (12)$$

Onde:

- f_i : Constante de Ajuste de Combustível.
- FOB0_i : Combustível regulamentar mínimo no trecho i [kg].
- FOB_i : Combustível total a bordo no trecho i [kg]
- MAXF : Máxima Capacidade de Combustível nos tanques [kg].
- MINF_i : Combustível remanescente mínimo do trecho i [kg].
- PD_i : Peso de decolagem no trecho i em [kg].
- P_i : Preço do combustível no aeroporto de origem no trecho i [US\$/kg].
- PMD_i : Peso Máximo Estrutural de Decolagem [kg].
- PMP_i : Peso Máximo Estrutural de Pouso [kg].
- PMZC_i : Peso Máximo Zero Combustível [kg].
- PP_i : Peso de Pouso no trecho i [kg].
- PZC_i : Peso Zero Combustível no trecho i [kg].
- REM_i : Combustível remanescente após o pouso no trecho i [kg].
- TRIP0_i : Consumo da etapa i com combustível mínimo regulamentar [kg].
- TRIP_i : Consumo da etapa no trecho i [kg].
- X_i : Combustível a ser abastecido no trecho i [kg].

Observa-se que as equações referentes a uma etapa i são combinações lineares das equações referentes à etapa anterior $(i-1)$, provendo ao modelo um caráter recursivo. Verifica-se também que o número de restrições é função do número de localidades envolvidas: para N localidades, são geradas $5.(N-1)$ restrições, considerando-se as equações 4 a 8. Quanto às equações 9 a 11, estas apenas definem algumas das variáveis envolvidas nestas restrições. Considerando que as malhas de vôos de empresas aéreas regionais e domésticas brasileiras apresentam tipicamente de 4 a 12 etapas diárias para cada aeronave, observa-se que o modelo de programação linear proposto apresenta de 20 a 60 equações de restrições. Isto nos leva à conclusão de que um algoritmo robusto de resolução se faz necessário. No modelo proposto, a novidade em relação aos demais encontrados na literatura será a forma com que o fator f será modelado: representação polinomial em função da distância e altitude de cruzeiro para um determinado perfil de velocidades em cada trecho considerado. A influência do peso da aeronave estará embutida em tal modelagem.

5) Aplicação do Modelo

A partir de uma malha de vôos fornecida por uma empresa aérea doméstica brasileira e sua respectiva programação para uma aeronave para um dia, utilizamos o modelo proposto para determinar o abastecimento ótimo em doze trechos. Os preços de combustível em cada base

também foram fornecidos, já convertidos para custo por kg, utilizando-se para isto uma densidade de 0,785 kg/l. Os valores foram informados em dólares americanos.

Consideramos a utilização de um único modelo de aeronave regional com capacidade para 108 assentos, equipada com motores GE CF34-10E6 que desenvolve 18500 lbf de tração máxima de decolagem ao nível do mar, em condições ambientais ISA (*International Standard Atmosphere*). O Software de modelagem *Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software* (AIMMS) foi usado como ferramenta para a resolução do problema de programação linear, devido sua natureza recursiva. O custo total de abastecimento obtido (extrapolado para o período de um mês) foi comparado ao custo total do abastecimento “convencional”, onde cada localidade é abastecida com a quantidade de combustível mínimo regulamentar.

As seguintes fontes de dados de entrada foram consideradas:

- **Informações de Aeroportos:** Provenientes do manual AIP Brasil ou informadas pelo administrador de aeroporto.
- **Características das aeronaves:** Retiradas do Manual de Operações as seguintes informações: Pesos Máximos Estruturais Zero Combustível (PMEZC), de Decolagem (PMED), de Pouso (PMEP) e Capacidade de combustível máxima (MAXF). O gráfico de Planejamento de Vão Simplificado em regime de *Long Range Cruise* (Anexo I) foi utilizado para a determinação do consumo envolvido cálculo do fator *f*.
- **Peso Zero Combustível (PZCi):** Foi estimado através do *Load Factor* médio de 65% e 500 kg de carga nos porões em todas as etapas. Foi adotado o peso médio do passageiro de 85 kg, com 5 kg de bagagem de mão e 20 kg de bagagem despachada e Peso Básico operacional (PBO) de 27400 kg. O valor de PZC considerado para todas as etapas foi de 35600 kg.
- **Pesos Máximos de Decolagem e Pouso (PMDi e PMPi) :**Foram determinados através do software específico para cálculo de desempenho de decolagem e pouso produzido pelo fabricante da aeronave. Para este cálculo, foram consideradas as temperaturas de referência, vento calmo e as cabeceiras estatisticamente mais utilizadas em cada aeroporto.
- **Consumo sem Tanqueamento (TRIP0i) e Combustível Mínimo Regulamentar (FOB0i):** Foram determinados através do software específico para cálculo de planejamento de navegação produzido pelo fabricante da aeronave. Para efeito de planejamento do voo as seguintes premissas foram consideradas:
 - i. As altitudes de cruzeiro, na medida do possível, corresponderam àquelas de menor consumo específico. Entretanto foram respeitadas as altitudes mais adequadas para os rumos e limites superiores das aerovias utilizadas, bem como as altitudes máximas permitidas pelo desempenho da aeronave.
 - ii. As reservas regulamentares foram calculadas de acordo com o RBHA 121.645 referentes a vôos por instrumento em empresas aéreas regulares de transporte de passageiros.
 - iii. Os aeroportos de alternativa foram considerados distantes, no máximo, 200 NM do aeroporto de destino.
 - iv. Para cada rota considerada foram utilizados ventos e temperaturas em cruzeiro de estatística anual com significância de 85%. Para isto foi consultada referência BOEING (1992).
 - v. As distâncias em aerovia foram retiradas das cartas de navegação por instrumentos publicados pelo DECEA para o espaço aéreo superior (H1) e inferior (L1).

- **Combustível Remanescente:** O combustível mínimo de pouso no destino (MINFi) foi considerado 2.000 kg em todas as etapas. Este valor foi também adotado como remanescente na primeira etapa (REM₁).

A determinação do fator f para cada trecho i considerado é essencial para a resolução do problema. Para isto, adotamos a metodologia citada por Saboya (1992):

- Escolher um valor de peso de pouso de referência. Foi considerado como referência 36000 kg, que corresponde aproximadamente ao PZC do estudo.
- Utilizando-se do gráfico de Análise de Rota Simplificados para o regime de Long Range Cruise presente no Manual de Operações da aeronave, calcular o consumo para cada combinação de pesos de pouso, altitudes e distâncias previamente estabelecidas. Os seguintes intervalos foram considerados:
 - Distâncias: 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 NM.
 - Altitudes: 15000, 20000, 25000, 30000, 35000, 39000 e 41000 ft.
 - Pesos: 36000 (peso de referência), 38000, 40000, 42000 e 43000 (PMEP) kg.
- Para cada conjunto de pesos para um dado par distância e altitude, calcular a diferença percentual de consumo em relação ao peso de referência neste conjunto. A média dos desvios percentuais será o fator f referente à respectiva combinação de altitude e distância. Nota-se que, desta forma, a variável peso não tem mais papel direto nos cálculos de f .

Esta metodologia assume a hipótese de que a influência do peso tem menor magnitude do que a influência da distância e/ou altitude no consumo adicional de combustível. Desta forma pode-se adotar um valor médio do fator f para um conjunto de pesos próximos ao Peso Máximo de Pouso, dada combinação de altitude e distância. Na Tabela 1, apresentamos o resultado completo para todas as altitudes.

Dist [NM]	Altitude [ft]							
	15000	20000	25000	30000	35000	37000	39000	41000
200	1,30%	1,19%	1,07%	0,99%	0,94%	-	-	-
400	2,94%	2,68%	2,43%	2,24%	2,12%	2,10%	2,10%	2,12%
600	4,60%	4,19%	3,81%	3,50%	3,30%	3,26%	3,24%	3,26%
800	6,28%	5,71%	5,19%	4,77%	4,51%	4,45%	4,43%	4,45%
1000	7,96%	7,24%	6,58%	6,06%	5,75%	5,71%	5,72%	5,78%
1200	9,67%	8,79%	7,97%	7,35%	7,05%	7,05%	7,14%	7,32%

Tabela 1: Fator f em função de distância e altitude

A fim de tornar o cálculo exato do fator f mais exequível do ponto de vista computacional, a Tabela 2 pode ser então modelada convenientemente sob a forma polinomial (cúbica) através do seguinte conjunto de equações:

$$f = A_0 + A_1 \cdot di + A_2 \cdot di^2 + A_3 \cdot di^3 \quad (14)$$

$$A_0 = A_{00} + A_{01} \cdot Hi + A_{02} \cdot Hi^2 + A_{03} \cdot Hi^3 \quad (15)$$

$$A_1 = A_{10} + A_{11} \cdot Hi + A_{12} \cdot Hi^2 + A_{13} \cdot Hi^3 \quad (16)$$

$$A_2 = A_{20} + A_{21} \cdot Hi + A_{22} \cdot Hi^2 + A_{23} \cdot Hi^3 \quad (17)$$

$$A_3 = A_{30} + A_{31} \cdot Hi + A_{32} \cdot Hi^2 + A_{33} \cdot Hi^3 \quad (18)$$

Para $i = 1, \dots, N-1$

Onde d_i : Distância na etapa i [NM].
 H_i : Altitude de cruzeiro na etapa i [ft].
 A_{mn} : Coeficientes de ajuste. Para $m=[0..3]$ e $n=[0..3]$.

Aplicando o método dos Mínimos Quadrados para duas dimensões, os valores de A_{mn} para o caso analisado podem ser determinados. A Tabela 2 mostra seus valores. O Coeficiente de Correlação (R^2) considerando estes coeficientes é de 0,9998, o que julgamos ser adequado para a resolução do problema proposto.

A_{mn}		m			
		0	1	3	3
n	0	-3,7858E-03	3,2574E-09	2,9702E-12	-5,4218E-17
	1	8,1052E-05	1,7169E-09	-1,5362E-13	2,4814E-18
	2	5,0303E-08	-6,6826E-12	2,9830E-16	-4,3019E-21
	3	-3,0389E-11	4,3148E-15	-1,9807E-19	2,9187E-24

Tabela 2: Coeficientes de interpolação (A_{mn}) da função $f = f(d, H)$.

De acordo com a BOEING (1998a), se considerarmos o efeito do vento médio ao longo da rota, a distância (d_i) considerada nas tabelas acima deve ser interpretado como sendo a distância percorrida pela aeronave dentro na massa de ar, o que é diferente da distância percorrida pela aeronave no solo em função do vento em rota. É necessária uma correção na distância percorrida em relação ao solo (ou distância total da rota) a fim de se prover um valor de “d” equivalente, levando em conta a componente do vetor de vento médio projetado ao longo do eixo longitudinal da aeronave (V_w) e a velocidade verdadeira média (TAS) ao longo da rota. A seguinte relação é aplicável:

$$d_i = D_i \cdot \left(\frac{TAS_i}{TAS_i + V_{w_i}} \right) \quad (19)$$

Onde TAS_i : Velocidade verdadeira média da aeronave para o trecho i [kt].

V_{w_i} : Componente do vetor de vento médio de cruzeiro projetado no eixo longitudinal da aeronave para o trecho i [kt]. Valores negativos representam ventos de proa e positivos representam ventos de cauda.

D_i : Distância percorrida no solo (ou em aerovia) em NM para o trecho i . Adotamos os valores publicados nas cartas de navegação em altitude para vôos por instrumentos.

O valor de TAS deve ser provido pelo sistema de planejamento de navegação produzido pelo fabricante da aeronave. Valores negativos de V_w significam componentes de vento de proa. Valores positivos significam componentes de ventos de cauda. Adicionalmente, é necessário o ajuste de consumo para condições de temperatura média em rota diferente do padrão. A temperatura padrão é definida como temperatura estática do ar na referida altitude de acordo com o modelo de atmosfera padrão definido pela OACI (denominada condição ISA, ou seja, na *International Standard Atmosphere*). Maiores detalhes podem ser verificados das referências em Padilla (1996) e BOEING (1998a).

De acordo com o Manual de Operações da Aeronave, para cada 1°C acima do valor da temperatura ISA, acrescenta-se 0,4% no consumo horário da aeronave. Como o fator f é diretamente proporcional ao consumo total (que é a integração do consumo horário), então o mesmo pode ser também ajustado para este desvio com razoável aproximação através da seguinte equação:

$$f_i^* = f_i \cdot (1 + 0,004 \cdot \text{DELTA_ISAI}) \quad (20)$$

Onde f_i^* : Fator de ajuste de consumo de combustível em condições de temperatura diferente da temperatura padrão (ISA) para o trecho i.

f_i : Fator de ajuste de consumo de combustível em condições de temperatura padrão (ISA) para o trecho i.

DELTA_ISAI : Desvio da temperatura na altitude de cruzeiro em relação à temperatura padrão (ISA) para o trecho i [°C].

6) Resultados

Considerou-se que, no início da programação, a aeronave encontrava-se com 2.000 kg, geralmente determinada como a quantidade de combustível mínima a bordo conforme a política operacional da empresa aérea. Na Tabela 3 encontram-se todos os dados de entrada necessários para a resolução do problema.

Na Tabela 4, apresentam-se os resultados contendo a estratégia de abastecimento convencional, onde se procura decolar na medida do possível com o combustível mínimo regulamentar, e os valores de abastecimento obtidos a partir da aplicação do modelo proposto. Uma exceção é feita na etapa REC-MCZ onde o combustível mínimo regulamentar foi inferior ao remanescente da etapa. Nesta tabela, verificam-se também os valores abastecidos em cada base (X_i), bem como os custos associados a cada abastecimento de acordo com os preços de combustível informados.

i	DE	PARA	Pi	D	ALT CRZ	ISA Dev CRZ	VENTO CRZ	TAS	d	f^*	PZCi	PMDi	PMPi	MFOB0i	TRIP0i
			[US\$ / kg]	[NM]	[ft]	[°C]	[Kt]	[Kt]	[NM]		[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
1	FOR	REC	1,26	339	39000	4	-11	404	348	1,80%	35600	50300	43000	4870	1957
2	REC	MCZ	1,01	98	15000	17	-5	310	100	0,46%	35600	50300	43000	2639	1143
3	MCZ	AJU	1,16	116	20000	17	-9	330	119	0,57%	35600	50198	43000	2841	964
4	AJU	SSA	1,16	137	24000	16	-9	347	141	0,67%	35600	50300	43000	3093	1085
5	SSA	GRU	1,05	846	38000	6	-44	439	940	5,31%	35600	50300	43000	6818	4395
6	GRU	CWB	0,96	194	30000	12	-52	386	224	1,13%	35600	50300	43000	3707	1400
7	CWB	GRU	0,93	221	31000	12	5	377	218	1,07%	35600	46971	43000	3520	1382
8	GRU	SSA	0,96	787	39000	4	2	432	783	4,33%	35600	50300	43000	5941	3675
9	SSA	AJU	1,05	137	25000	16	-17	353	144	0,68%	35600	50300	43000	3093	1098
10	AJU	MCZ	1,16	116	19000	17	-10	325	120	0,58%	35600	50300	43000	2750	973
11	MCZ	REC	1,16	98	18000	17	-10	319	101	0,45%	35600	50198	43000	2633	867
12	REC	FOR	1,01	337	38000	6	-22	408	356	1,84%	35600	50300	43000	4875	1986

Tabela 3: Dados de entrada.

i	DE	PARA	ESTRATÉGIA CONVENCIONAL							ESTRATÉGIA COM TANQUEAMENTO						
			REMi	Xi	FOBi	Pdi	TRIPi	PPi	CUSTO	REMi	Xi	FOBi	Pdi	TRIPi	PPi	CUSTO
			[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[US\$]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[US\$]
1	FOR	REC	2000	2870	4870	40470	1957	38513	3.604,53	2000	2870	4870	40470	1957	38513	3.604,53
2	REC	MCZ	2913	0	2639	38513	1143	37370	0	2913	5657	8570	44170	1170	43000	5.737,21
3	MCZ	AJU	1770	1071	2841	38441	964	37477	1.243,64	7400	0	7400	43000	990	42010	0
4	AJU	SSA	1877	1216	3093	38693	1085	37608	1.407,17	6410	0	6410	42010	1107	40903	0
5	SSA	GRU	2008	4810	6818	42418	4395	38023	5.042,84	5303	1515	6818	42418	4395	38023	1.588,56
6	GRU	CWB	2423	1284	3707	39307	1400	37907	1.227,57	2423	1284	3707	39307	1400	37907	1.227,57
7	CWB	GRU	2307	1213	3520	39120	1382	37738	1.124,01	2307	6532	8839	44439	1439	43000	6.052,70
8	GRU	SSA	2138	3803	5941	41541	3675	37866	3.635,86	7400	1355	8755	44355	3797	40558	1.295,40
9	SSA	AJU	2266	827	3093	38693	1098	37595	867,03	4958	0	4958	40558	1111	39447	0
10	AJU	MCZ	1995	755	2750	38350	973	37377	873,69	3847	0	3847	39447	979	38468	0
11	MCZ	REC	1777	856	2633	38233	867	37366	993,74	2868	0	2868	38468	868	37600	0
12	REC	FOR	1766	3109	4875	40475	1986	38489	3.152,93	2000	2875	4875	40475	1986	38489	2.915,62
TOTAL							20925		23.173,01					21199		22.421,60

Tabela 4: Estratégias de abastecimento

Na Tabela 5, encontra-se um comparativo final entre os dois métodos. As estimativas mensais e anuais são projetadas para uma única aeronave efetuando esta programação seis dias por semana. Na Figura 3, pode ser vista claramente a estratégia de abastecimento. Os valores entre parênteses são os preços de combustível nas localidades de origem.

ITEM	VALOR DIÁRIO	PROJEÇÃO MENSAL	PROJEÇÃO ANUAL
ECONOMIA [US\$]	751,41 (3,24%)	19.322,08	231.865,00
ECONOMIA MÉDIA POR TRECHO [US\$]	62,62		
CONSUMO EXTRA [kg]	1096 (1,31%)	28.191	338.294
CONSUMO EXTRA POR TRECHO [kg]	23		

Tabela 5: Resultados comparativos finais

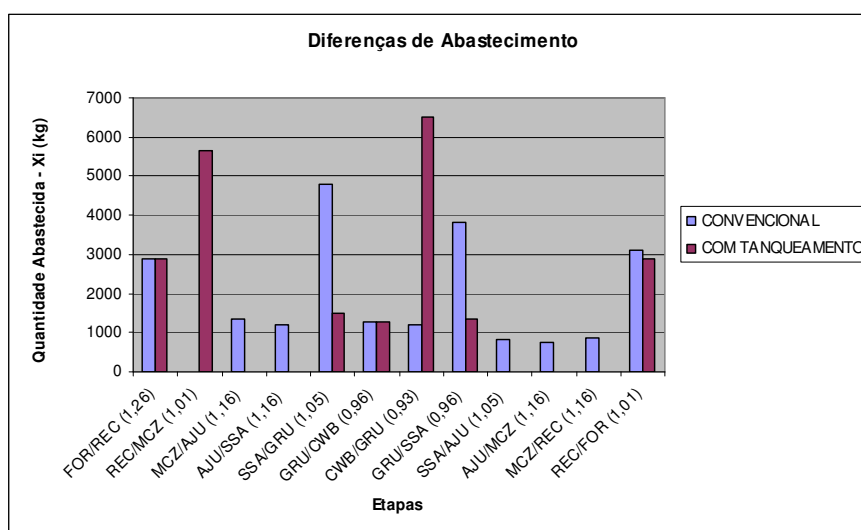


Figura 3: Diferença de quantidade de abastecimento (Xi) ao longo das rotas entre a estratégia convencional e o tanqueamento de combustível.

7) CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que o modelo proposto está consistente com os resultados encontrados por Stroup e Wollmer (1991), quando aplicam seu modelo sem restrição de quantidade de combustível abastecida nos aeroportos. Todos os resultados encontrados são válidos considerando-se as premissas adotadas pelo modelo. Obteve-se um ganho de 3,24% para as doze etapas analisadas, o que é considerado bastante satisfatório na indústria aeronáutica, onde reduções de custos operacionais da ordem de 1% são usuais. Para o cenário analisado, uma frota de dez aeronaves, voando seis vezes por semana, traria economias anuais estimadas em US\$ 2.318.650,00 caso tal procedimento fosse adotado.

Entretanto, deve-se ressaltar que o procedimento de tanqueamento de combustível traz, além dos ganhos econômicos, um grande impacto ambiental. No exemplo analisado, existe um consumo adicional médio de combustível de 23 kg por etapa voada, ou 338 toneladas de consumo adicional anual por aeronave. Este consumo adicional também implica na emissão de poluentes que serão liberados nas camadas superiores da troposfera e tropopausa, onde as aeronaves comerciais a jato geralmente voam. De acordo com estudos recentes do FAA (2004), para cada 1.000 kg de combustível JET-A1 queimado, a combinação aeronave/motor em questão gera como produto de sua combustão as seguintes quantidades de gases na atmosfera é mostrada na Tabela 6:

Elemento	Emissão [kg]
NO _x	23,957
CO	3,547
HC	0,312
CO ₂	3155,933
H ₂ O	1311,297
SO _x	0,799

Tabela 6: Emissão de poluentes para cada 1000 kg de combustível consumido

Ou seja, apenas considerando o CO₂, tal operação implicaria a emissão de 1067 toneladas adicionais anuais na atmosfera, apenas considerando-se uma única aeronave. Nos tempos atuais, discute-se fortemente a influência do aquecimento global como consequência da emissão de gases provenientes da atividade industrial humana. Análises da contribuição da atividade aérea no efeito estufa estão cada vez mais apuradas, estimando-se que a mesma participe atualmente em aproximadamente 2,5 % nas emissões totais de CO₂ ou 12% das emissões efetuadas pelos meios de transporte que utilizam combustíveis fósseis.

De acordo com a ICAO (2006), começa-se a estudar a possibilidade da adoção de taxas de pouso e permanência baseadas em níveis de emissões das aeronaves, assim como hoje é aplicado ao ruído aeroportuário em alguns lugares do mundo. Os aeroportos internacionais em Zurique e Estocolmo foram os primeiros a ensaiar tais medidas. Nos próximos anos, é previsto que o Anexo XVI da OACI já contenha recomendações para a determinação de tais tarifas e classificação de grupos de aeronaves poluentes. Empresas aéreas que operarem aeronaves com altos níveis de emissão pagarão mais por seu prejuízo ecológico. Portanto, um objetivo para investigação futura é a avaliação do procedimento de tanqueamento de combustível à luz dos impactos causados por esta técnica ao meio ambiente.

8) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELGHANY, K.; ABDELGHANY, A.; RAINA, S. (2004). *A model for the airlines' fuel management strategies*. Journal of Air Transport Management 11 (2005) 199-206.
- BOEING COMPANY. *Fuel Conservation News Letters*. Seattle, 1992.
- BOEING COMPANY. *Wind and Temperature Route Statistical Information*. Seattle, 1992.
- BOEING COMPANY. *Jet Transport Performance Methods*. Seattle, 1998.
- COMANDO DA AERONÁUTICA. Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) 121 – REQUISITOS OPERACIONAIS: OPERAÇÕES DOMÉSTICAS, DE BANDEIRA E SUPLEMENTARES. Rio de Janeiro, 2003.
- CORDINA, E. *A study on ways to limit the environmental harm caused by engine emissions and an assessment of the future environmentally friendly aircraft technologies*. London City University. Londres, 2002.
- DARNELL, D.W.; LOFLIN, C. (1977). *National Airlines Fuel Management and Allocation Model*. Interfaces. Vol. 7, pp. 1-16, 1977.
- EMBRAER. *Embraer 170/190 Fuel Conservation*. São José dos Campos, 2005.
- EMBRAER. *Embraer 170/190 Flight Operations Engineering Course Notes*. São José dos Campos, 2006.
- EMBRAER. *Embraer 190 Operations Manual Vol.1. Chapter 6 – Flight Planning*. São José dos Campos, 2006.
- FAA. SAGE - APPENDIX "D" MODAL AIRCRAFT FUEL BURN AND EMISSIONS FOR 2004. Seattle, 2004.
- INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). *Guidance Material and Best Practices for Fuel and Environmental Management*. 1st Edition Effective. Montreal, 2004.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Annex 16 "International standards and recommended practices, Environmental protection", Volume II "Aircraft engine emissions", 2nd Edition. Montreal, 1993.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). CAEP/7 Issue Paper No.7: Cost Effectiveness on Local Air Quality Charges. Montreal, 2006.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. *A tributação dos combustíveis no Brasil*. Departamento de Combustíveis e Derivados do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. Brasília, 2006.
- PADILLA, C.E. *Optimizing Jet Transport Efficiency – Performance, Operations and Economics*. McGraw-Hill, New York, 1996.
- SABOYA, E.W. *Airline Flight Operations Handbook*. VARIG. Porto Alegre, 1992.
- STROUP, J. W.; LACKEY, W. J. (1975). *Fuel management model(for aircraft fuel costs and requirements)*. Operations Research Society of America and Institute of Management Sciences, Joint National Meeting, Las Vegas, Nevada (USA), 1975.
- STROUP, J.S. & WOLLMER, R.D. (1991). *A Fuel Management Model for the Airline Industry*. Operations Research, Vol. 40, No. 2, pp. 229-237.
- ZOUEIN, P.P., ABILLAMA, W.R. & TOHME, E. (2002). *A multiple period capacitated inventory model for airline fuel management: a case study*. Lebanese American University. Beirute, Líbano.

Anexo I: Gráfico de Planejamento de Rota Simplificado em Long Range Cruise para consumo de combustível.

