



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise e otimização da distribuição de combustíveis da aviação no Brasil

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

Autor

Luís Miguel Ferreira Gonçalves

Orientadores

António José Pais Antunes

Hugo Miguel Varela Repolho

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Tendo terminado de escrever a minha dissertação de mestrado resta-me agradecer a todas as pessoas que tornaram possível a sua realização.

Em primeiro agradeço ao meu orientador, Professor Doutor António José Pais Antunes, pela disponibilidade, prontidão e sapiência com que sempre me recebeu, esclarecendo e orientando as minhas dúvidas, sempre de forma crítica e exigente. Quero também agradecer ao meu coorientador, Professor Doutor Hugo Miguel Varela Repolho, pelas suas ideias e sugestões.

Agradeço à minha namorada Joana por toda a compreensão, paciência e carinho com que me ajudou a concluir este processo.

Agradeço aos meus pais por tudo aquilo que me ensinaram a ser.

A todos um Muito Obrigado.

Luís Gonçalves

Coimbra 8 de Julho de 2015

RESUMO

Nos últimos anos, o setor do transporte aéreo no Brasil apresentou uma taxa de crescimento muito elevada. Estima-se que esse desenvolvimento prossiga a um ritmo elevado. Uma consequência direta desta tendência é o aumento do consumo dos combustíveis da aviação. No entanto, a capacidade de oferta das refinarias não acompanhou o crescimento da procura. Neste estudo são descritos modelos de otimização determinísticos, a curto e longo prazo, e um modelo estocástico a longo prazo. Estes visam identificar e resolver os estrangulamentos existentes na cadeia de distribuição de combustíveis de aviação no Brasil, apoiando a tomada de decisão sobre a melhor forma de distribuição e localização de infraestruturas. Para cada solução, o modelo de otimização procura as rotas e modos de transporte com custo mínimo que garantam o abastecimento dos aeroportos em estudo. O tratamento estatístico do tráfego de passageiros em cada aeroporto permite estimar a procura e estabelecer diversos cenários. O modelo estocástico inclui, no processo de decisão, a incerteza associada ao consumo de combustíveis de aviação, através da análise de cenários.

Palavras-chave: Otimização; Modelo Determinístico; Modelo estocástico; Análise de cenários; Apoio à decisão; Cadeia de distribuição; Combustíveis de aviação.

ABSTRACT

In recent years, the air transport industry in Brazil presented a very high growth rate. It is estimated that this development will continue at a high pace. A direct consequence of this trend is the increased consumption of jet fuel. However, refineries supply capacity did not follow the demand growth. This study describes deterministic optimization models, for short and long term, and a stochastic model for long term. These models aim to identify and solve bottlenecks in the Brazilian jet fuel supply chain, supporting decision-making on the distribution routes and infrastructure location. For each solution, the optimization model searches for minimum cost routes and transport modes that ensure the supply of jet fuel to the airports in study. Statistical analysis of passenger traffic at each airport allows to estimate the demand and to create several scenarios. The stochastic model includes, in decision-making, the uncertainty associated with jet fuel consumption, through scenario analysis.

Keywords: Optimization; Deterministic model; Stochastic model; Scenario analysis; Decision support; Supply chain; Jet fuel.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo.....	2
1.2	Estrutura do trabalho.....	2
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	4
2.1	A indústria do petróleo.....	4
2.2	Distribuição de derivados do petróleo.....	7
2.3	Distribuição de combustíveis da aviação.....	8
3	TRABALHOS RELACIONADOS.....	10
3.1	Modelos de redes de distribuição.....	10
3.1.1	Modelos de fluxos em redes de transporte.....	10
3.1.2	Modelos de localização de centros de distribuição.....	12
3.2	Aplicações à distribuição de derivados de petróleo.....	14
4	MODELOS MATEMÁTICOS.....	17
4.1	Hipóteses e limitações dos modelos.....	17
4.2	Modelo de curto prazo.....	18
4.3	Modelos de longo prazo.....	20
4.3.1	Modelo determinístico.....	20
4.3.2	Modelo estocástico.....	21
5	ESTUDO DE CASO: Distribuição de combustíveis da aviação no Brasil.....	25
5.1	Caracterização do setor da aviação.....	25
	Situação atual.....	25
	Perspetivas de evolução.....	28
	Consumo de QAV.....	37
5.2	Rede de distribuição.....	39
	Refinarias.....	39
	Terminais.....	40
	Transportes.....	43
5.3	Análise de curto prazo das soluções de distribuição.....	46
5.4	Análise de longo prazo das soluções de distribuição.....	48
5.4.1	Resultados da aplicação do modelo determinístico.....	49
5.4.2	Resultados da aplicação do modelo estocástico.....	51
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da indústria do petróleo.....	5
Figura 2: Diagrama simplificado do processo de refinação.....	6
Figura 3: Tráfego de passageiros nos 32 aeroportos em estudo, no ano 2012.....	28
Figura 4: Distribuição geográfica da produção de QAV admitida.....	40
Figura 5: Distribuição geográfica da capacidade de armazenamento de QAV, no Brasil...	43
Figura 6: Fluxo ótimo de abastecimento dos aeroportos de São Paulo e Guarulhos, 20 2015.....	48
Figura 7: Localização dos equipamentos propostos (50% de confiança).....	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Quadro resumo dos modelos revistos.....	16
Quadro 2: Lista dos 32 aeroportos considerados no estudo.....	27
Quadro 3: Fator de ponta mensal do movimento de passageiros no Brasil, em 2013.....	30
Quadro 4: População na Região Metropolitana de São Paulo, entre 2003 e 2012.....	31
Quadro 5: PIB <i>per capita</i> na Região Metropolitana de São Paulo, entre 2003 e 2012.....	32
Quadro 6: Valores usados no modelo estatístico de previsão do número de passageiros no aeroporto de Guarulhos.....	32
Quadro 7: Valores obtidos para a população, o PIB <i>per capita</i> e número de passageiros, em 2015 e 2025.....	33
Quadro 8: Valores dos coeficientes, valores estatísticos das regressões e valores médios esperados para o tráfego diário de passageiros em cada aeroporto, nos anos 2015 e 2025...	35
Quadro 9: Valor médio esperado para o tráfego diário de passageiros em cada aeroporto, no primeiro cenário.....	36
Quadro 10: Valores médios esperados para o consumo diário de QAV em cada aeroporto, nos anos 2015 e 2025.....	38
Quadro 11: QAV produzido anualmente em cada refinaria, entre 2005 e 2014.....	39
Quadro 12: Capacidades de armazenamento em cada terminal.....	42
Quadro 13: Custos de transporte de cargas no Brasil.....	46
Quadro 14: Utilização dos terminais, em 2015.....	47
Quadro 15: Utilização dos terminais em 2025, sem alteração na infraestrutura.....	50
Quadro 16: Custo total de transporte para as várias soluções estudadas, em US\$.....	51
Quadro 17: Solução com acréscimo de duas refinarias e um terminal, em 2025.....	51
Quadro 18: Comparação dos resultados obtidos pelos modelos a longo prazo.....	52
Quadro 19: Custos de transporte para cada cenário, em 2025 (50% confiança).....	54

1 INTRODUÇÃO

O transporte de cargas trata-se do elemento mais importante, em termos de custos logísticos, das empresas envolvidas na indústria do petróleo. A movimentação de cargas representa entre um e dois terços dos custos logísticos totais. O que explica a extrema importância que vem sendo atribuída a esta área pelos investigadores acadêmicos e pelos gestores empresariais (Ballou, 2006).

A indústria do petróleo engloba o conjunto de atividades relacionadas com a exploração, produção, processamento, transporte, refinação e distribuição de petróleo e seus derivados. Os setores da exploração e produção são conhecidos como *upstream*, os de transporte e processamento como *midstream*, e os de refinação e distribuição como *downstream*. O presente trabalho foca-se no setor downstream desta indústria, nomeadamente na cadeia de distribuição de combustíveis de aviação no Brasil, onde o principal fornecedor é a Petrobras. As áreas de maior consumo situam-se na região sudeste, nomeadamente nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Espírito Santo e Minas Gerais.

O consumo de combustíveis da aviação, o querosene de aviação (QAV ou *jet fuel*) e a gasolina de aviação (GAV ou *avgas*), tem vindo a aumentar significativamente neste país, sendo consequência direta do crescimento do setor do transporte aéreo. Para este desenvolvimento têm contribuído fatores como a liberalização da aviação, a evolução da economia e a realização de eventos de dimensão internacional, tais como o Campeonato do Mundo de Futebol de 2014 e os Jogos Olímpicos de 2016. Nos próximos anos é esperado que o consumo de querosene de aviação continue a crescer a um ritmo elevado, conjeturando-se para 2025, uma procura anual de 1,2 viagens aéreas por pessoa, uma característica dos países mais desenvolvidos.

Contudo, a procura por combustíveis da aviação é superior ao que pode ser produzido nas refinarias. Nos últimos anos, verificou-se um aumento de 84% no consumo (ANP, 2015a), face um acréscimo de 43% na produção (ANP, 2015b). O défice destes produtos é compensado com importações.

1.1 Objetivo

A presente dissertação tem como objetivo analisar e otimizar a cadeia de distribuição de QAV no Brasil, que consiste em transportar o produto das refinarias para os aeroportos. A tomada de decisão sobre a localização de equipamentos e a forma de distribuição de uma empresa pode ser um problema complexo e com múltiplas soluções, sendo impossível proceder-se à avaliação individual de cada uma. Neste trabalho são construídos e resolvidos modelos matemáticos realistas da cadeia de distribuição de QAV no Brasil, que permitem identificar os principais estrangulamentos com que a mesma se confronta e propor formas de os resolver ou atenuar. Desenvolveram-se modelos de otimização determinísticos, a curto e longo prazo, e um modelo estocástico, a longo prazo, baseados em modelos de fluxo em redes de transporte e modelos de localização de centros de distribuição. Para o efeito, recorreu-se a um método geral de otimização linear (*Branch-and-Bound*), com recurso a um programa informático (FICO ® Xpress), que permite obter a solução ótima de maneira exata (ótima global) e simples. Estes modelos procuram minimizar os custos totais envolvidos na distribuição de QAV, considerando a procura atual e a incerteza associada à procura em 2025. As variáveis do modelo representam as decisões a tomar relativamente ao fluxo de produto, modo de transporte, locais de produção e armazenamento, e localização para novas infraestruturas.

A admissão da incerteza, inerente à procura a longo prazo, possibilita efetuar análises mais racionais, a partir dos resultados de modelos estocásticos. De facto, a população e o PIB *per capita*, são parâmetros que, em função da sua variação ao longo do tempo, podem influenciar o número de passageiros. Esta oscilação quanto ao número de passageiros caracteriza-se pela existência de uma parcela aleatória, pelo que pode ser estimada com alguma incerteza. De maneira a estimar a procura, bem como a incerteza a ela associada, elaborou-se um modelo estatístico de previsão do número de passageiros, aplicando uma regressão múltipla com recurso ao método dos mínimos quadrados. Procurou explicar-se a movimentação de passageiros em cada aeroporto com base na população e no PIB *per capita* da respetiva região. Além disso, foi gerado um conjunto de cenários usado no modelo estocástico de otimização apresentado, de maneira a abranger a incerteza associada aos erros da regressão na análise.

1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos, sendo o primeiro dedicado à introdução, apresentando o a importância do tema, o objetivo e a metodologia adotada.

O segundo capítulo introduz noções básicas sobre o conjunto de atividades relacionadas com a indústria do petróleo. Descreve a cadeia de distribuição de derivados do petróleo e realça algumas particularidades da cadeia de distribuição de combustíveis da aviação.

O Capítulo 3 expõe uma breve revisão de trabalhos relacionados com modelos de otimização de redes de distribuição. Neste âmbito distinguem-se modelos de fluxos em redes de transporte, onde a infraestrutura é dada, e modelos de localização de centros de distribuição, onde a infraestrutura é objeto de decisão.

Em seguida, o Capítulo 4 descreve os modelos de otimização determinísticos, a curto e longo prazo, e um modelo estocástico, a longo prazo, desenvolvidos para identificar e resolver estrangulamentos na cadeia de distribuição de combustíveis da aviação.

O Capítulo 5 consiste na aplicação dos modelos desenvolvidos, a um problema baseado na cadeia de distribuição de combustíveis da aviação no Brasil, apresentando os dados admitidos no modelo e a análise dos resultados.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais da dissertação e sugere trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo tem a importante função de introduzir noções básicas sobre o conjunto de atividades relacionadas com a indústria do petróleo, tendo como base o livro “*The Universe of the Oil and Gas Industry: From Exploration to Refining*” de Gomes e Alves (2011). Além disso, descreve a cadeia de distribuição de derivados do petróleo e realça algumas particularidades da cadeia de distribuição de combustíveis da aviação.

2.1 A indústria do petróleo

O termo petróleo refere-se aos vários tipos de hidrocarbonetos encontrados na natureza, sendo mais habitualmente usado para se referir ao petróleo bruto. Em função do estado do petróleo na sua essência, este pode ser denominado de diferentes formas. O petróleo bruto apresenta-se no estado líquido, o gás natural, no estado gasoso, e os betumes ou asfaltos, no estado sólido. No presente trabalho apenas será abordado o tema do petróleo no estado líquido.

A indústria do petróleo engloba o conjunto de atividades relacionadas com a exploração, produção, processamento, transporte, refinação e distribuição de petróleo e seus derivados. Os setores da exploração e produção são conhecidos como *upstream*, os de transporte e processamento são conhecidos como *midstream*, e os de refinação e distribuição são conhecidos como *downstream* (Figura 1).

As operações de exploração visam procurar reservas de petróleo em quantidades suficientes para justificar a sua produção nesse local, sendo o conhecimento geológico sobre as bacias, um fator fundamental para a atividade. Depois de localizado, o petróleo é então extraído recorrendo a equipamentos, tais como bombas e compressores. Numa fase subsequente, este é processado de maneira a separar e remover produtos indesejados, tais como a água, obtendo assim o petróleo cru.

Existem vários tipos de petróleo cru, sendo alguns mais desejados que outros, dependendo da sua composição, densidade e local de produção. *Brent Blend*, *West Texas Intermediate* (WTI) e *Dubai/Oman* são os principais tipos de petróleo que servem de referência aos mercados financeiros.

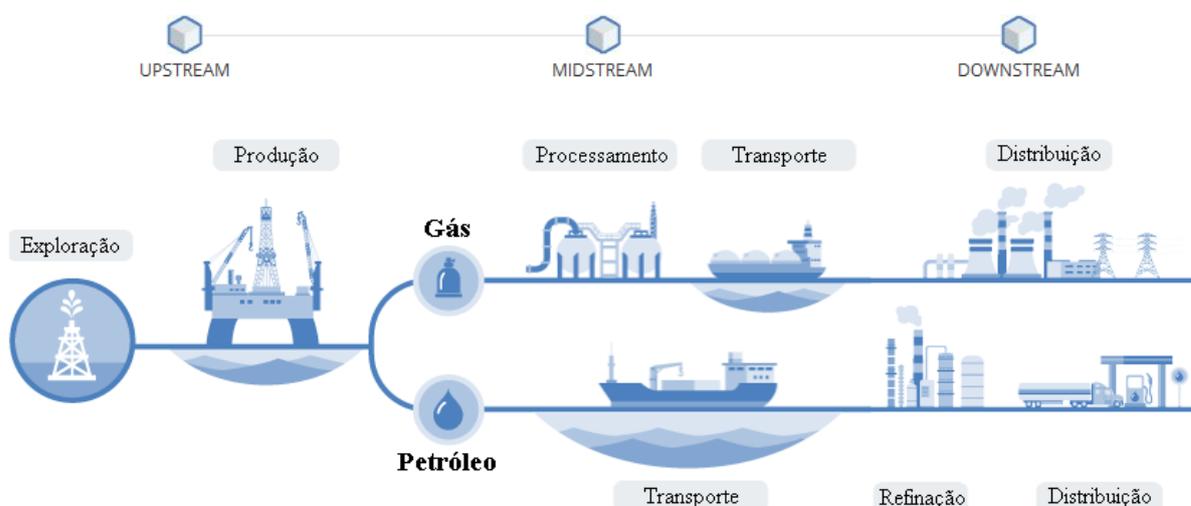


Figura 1: Esquema da indústria do petróleo. (Fonte: Quintiq, 2015)

Após a obtenção do petróleo cru, este é enviado para tanques de armazenamento em refinarias ou terminais através de oleodutos ou petroleiros. A partir desses tanques é efectuado o abastecimento contínuo de refinarias, permitindo-lhes que funcionem a um ritmo constante independentemente das oscilações na produção ou na importação de petróleo. As refinarias realizam o processo químico de transformação de petróleo cru, produzindo diversos derivados de petróleo como o gás, nafta, gasolina, querosene, gasóleo, óleo lubrificante, gasóleo pesado e resíduo sólido. Conforme se verifica na Figura 2, a refinação de petróleo é um processo ininterrupto, que se inicia com a sua destilação. Nesta fase, o petróleo é separado em diversas frações de acordo com a respetiva temperatura de ebulição, que de seguida são encaminhadas para outras unidades de processamento.

Numa segunda fase, as frações mais pesadas e de menor valor são convertidas em frações mais leves dando origem a derivados de maior valor. Este processo, designado de craqueamento (*cracking*), pode ser feito por meio de catalisadores (craqueamento catalítico) ou recorrendo a hidrogénio (hidrocraqueamento). Na fase final ocorre o tratamento dos produtos obtidos, de forma a cumprir com a qualidade exigida pelo mercado. Este tratamento obedece a vários processos: conversão, separação e isomeração. O primeiro concebe produtos de alta octanagem, o segundo remove componentes prejudiciais ao produto e o terceiro promove o rearranjo molecular para formar um produto específico (Petrobras, 2002).

Os produtos acabados são transportados através de oleodutos até aos terminais primários (distribuição primária), a partir de onde são feitas as entregas até aos terminais secundários do mercado revendedor (distribuição secundária). Os países, onde a produção é superior ao consumo exportam os seus excedentes para países que necessitam de petróleo. Para o efeito,

eles recorrem geralmente a petroleiros, sendo necessária a existência de tanques de armazenamento tanto na origem como no destino.

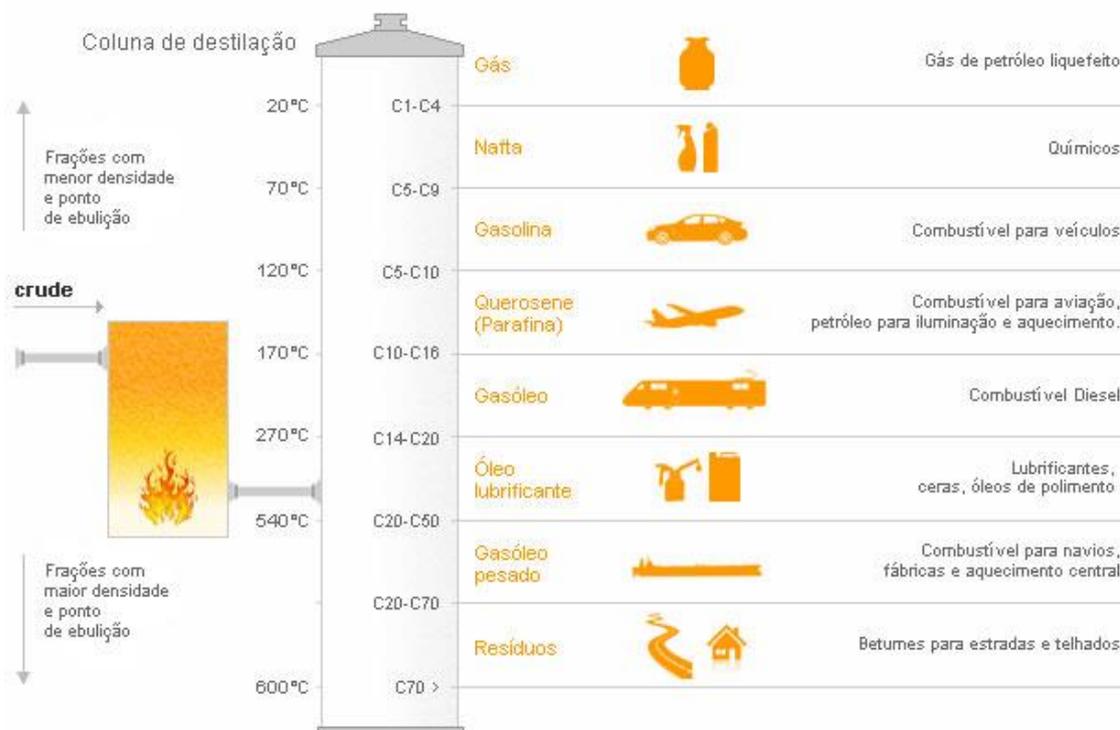


Figura 2: Diagrama simplificado do processo de refinação. (Fonte: Galp, 2015)

Um terminal pode definir-se como uma instalação com as condições necessárias para receber, armazenar, misturar, embalar e distribuir um dado produto. Os terminais representam os pontos de distribuição de derivados do petróleo e são responsáveis por armazenar os produtos das distribuidoras. A distinção entre terminal primário e secundário depende do ponto de origem do produto. Se a fonte de abastecimento é uma refinaria, o terminal é classificado de primário. Quando a fonte é um terminal primário, o terminal é considerado de secundário (Soares *et al*, 2003).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2014), as reservas mundiais de petróleo atingiram os 1,69 trilhões de barris em 2013, mantendo-se no mesmo patamar de 2012, após um pequeno aumento de 0,04%. É na região do Médio Oriente que se concentra a maior parte das reservas mundiais, cerca de 48% do total mundial. Já o volume de petróleo produzido no mundo aumentou em 550,8 mil barris/dia (0,64%), passando de 86,3 milhões de barris/dia para 86,8 milhões de barris/dia, no mesmo período. A Arábia Saudita é a maior produtora

mundial de petróleo, com um volume médio de 11,5 milhões de barris/dia, o que corresponde a 13,3% do total mundial.

Em 2013, o consumo mundial de petróleo atingiu os 91,3 milhões de barris/dia, representando um aumento de 1,6% relativamente a 2012. Os Estados Unidos foi o país que mais aumentou o seu consumo, com uma subida de 2,1% (+397 mil barris/dia). O segundo foi a China, com uma subida de 3,8% (+390 mil barris/dia), seguindo-se o Brasil com uma subida de 5,9% (+166 mil barris/dia). No mesmo período, a capacidade efetiva de refinação instalada no mundo foi de 94,9 milhões de barris/dia, o que constitui um aumento de 1,5% relativamente a 2012. Os Estados Unidos destaca-se pela maior capacidade de refinação com 17,8 milhões de barris/dia, o que traduz 18,8% da capacidade mundial (ANP, 2014).

2.2 Distribuição de derivados do petróleo

O conceito de “gestão de cadeia de distribuição” teve origem com a “logística”. De acordo com Ballou (1993), a logística empresarial “trata de todas as atividades de movimentação e armazenagem que facilitam o fluxo de produtos/serviços, desde o ponto de aquisição da matéria-prima até ao ponto de consumo final, assim como dos fluxos de informação que colocam os produtos em movimento com o propósito de providenciar níveis de serviço adequados aos clientes a um custo razoável”. Neste sentido, a gestão de cadeias de distribuição retrata o esforço em integrar os vários participantes da cadeia de distribuição (fornecedores, produtores, distribuidores, consumidores, etc) através da administração compartilhada de processos e partilha de informação (Drummond, 2008).

Segundo Ballou (2006), o problema do planeamento da cadeia de distribuição consiste em especificar a estrutura através da qual os produtos irão fluir, dos pontos de origem até aos consumidores finais. Neste sentido deverão ser determinadas quais as instalações a utilizar, a quantidade ideal das mesmas e a sua localização. É importante definir ainda, quais produtos e clientes lhes devem ser atribuídos e quais os serviços de transporte preteridos, para serem utilizados entre elas.

A cadeia de distribuição de derivados do petróleo corresponde a uma rede complexa gerida por empresas produtoras e de distribuição, englobando equipamentos (refinarias e terminais), modos de transporte e rotas, de forma a satisfazer a procura dos clientes de retalho. No âmbito desta rede estão incluídos: a refinação, o transporte e a comercialização de produtos derivados do petróleo (Fernandes *et al*, 2013).

As empresas produtoras fornecem os produtos através de refinarias ou terminais primários (terrestres e marítimos), a partir dos quais as distribuidoras transportam os produtos para

terminais secundários, onde estes são colocados à disposição dos consumidores finais. O transporte pode ser feito através dos modos rodoviário, ferroviário, dutoviário, marítimo e/ou fluvial dependendo do tipo de produto e dos equipamentos de transporte disponíveis.

Em 1976, Zierer refere que a cadeia de distribuição de derivados envolve tomadas de decisão sobre rotas de transporte e localização de equipamentos. Para alcançar uma solução com benefícios simultâneos para as empresas produtoras e distribuidoras, o problema deve ser abordado na sua totalidade, considerando as infraestruturas de transporte e os equipamentos das várias entidades envolvidas em conjunto, ao invés de o fazer separadamente. Cabe a estas empresas a função de dimensionar, construir e gerir redes colaborantes que maximizem os lucros de toda a cadeia de distribuição. Para o efeito é crucial atender às localizações e capacidades das diferentes infraestruturas de transporte e equipamentos.

A variedade e quantidade de produtos a produzir e transportar afeta diretamente a capacidade ótima que é necessária nas refinarias, terminais e infraestruturas de transporte. De acordo com Fernandes *et al* (2013), o problema da distribuição de derivados de petróleo consiste em determinar a logística da cadeia de distribuição. Para o efeito considera-se que um conjunto de empresas fornece vários produtos, a partir de um dado conjunto de refinarias (produção) e terminais marítimos (importação) e os comercializam para diversos locais através de um conjunto de terminais e ligações de transporte. O objetivo é determinar a cadeia de distribuição ótima considerando o custo de transporte, as rotas e modos de transporte, a capacidade de armazenamento dos terminais, a capacidade de produção das refinarias e a procura para cada produto. Ao analisarem-se as restrições de produção, armazenamento e transporte pretende-se satisfazer a procura e minimizar custos.

2.3 Distribuição de combustíveis da aviação

Existem dois tipos de combustível de aviação, o querosene de aviação (QAV) e a gasolina de aviação (GAV). O QAV é o combustível usado por motores do tipo turbina, existindo diversas especificações do mesmo a nível internacional (ex: Jet A, Jet A-1, TS-1 e Jet fuel). Já a GAV é usada para abastecer aviões de menores dimensões (ICAO, 2012).

A produção de QAV é realizada nas refinarias, mais especificamente em unidades especializadas na adsorção de n-parafinas. Trata-se de um processo de separação que consiste na adsorção de cadeias lineares presentes na fração querosene que elevam a temperatura de congelamento do mesmo, sendo extremamente prejudiciais. Este procedimento consiste em fazer passar esta fração por peneiras moleculares, permitindo especificar o QAV. Esta técnica é complexa, pelo que requer um elevado número de equipamentos, resultando num

investimento de cerca de US\$100-150.000.000,00 para a implantação de uma unidade com estas características (Petrobras, 2002).

Para a produção de gasolina de aviação é necessária uma unidade de alcoilação catalítica para efectuar-se o processo de conversão. Este recorre a um catalisador para proceder à junção de duas moléculas leves e formar uma de maior peso molecular, permitindo a formação da gasolina de aviação (GAV). Para a criação de uma unidade desta natureza é necessário um investimento de cerca de US\$30-60.000.000,00 (Petrobras, 2002).

Estes produtos são enviados das refinarias, através de oleodutos, para terminais primários ou diretamente para terminais de armazenamento, localizados dentro dos aeroportos, se a infraestrutura o permitir. Após a chegada dos combustíveis aos terminais primários, estes são transportados, pelas distribuidoras, para os terminais secundários, de acordo com os modos de transporte disponíveis. Já nos aeroportos, o abastecimento das aeronaves é feito através de hidrantes ou camiões-tanque. No caso do abastecimento por camião-tanque, as distribuidoras têm de possuir uma frota de camiões robusta porque é necessário abastecer diversas aeronaves, em simultâneo e não é admissível atrasar o abastecimento de uma aeronave por falta de camiões (Brichi, 2014).

Ao longo da cadeia de distribuição, pode ocorrer a contaminação destes combustíveis. Segundo a *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2012), os principais tipos de contaminação são a água, partículas e material microbiológico. No entanto, no caso de sistemas que permitem o transporte e armazenamento de múltiplos produtos pode ocorrer contaminação proveniente dos mesmos. Estes problemas podem ocorrer em várias fases da cadeia de distribuição, nomeadamente nas refinarias por motivo de má limpeza dos tanques, falta de manutenção ou testes de qualidade mal efetuados. Um mau dimensionamento dos terminais de armazenamento pode tornar difícil ou impossível a remoção de água ou partículas sólidas dos mesmos. Verifica-se o mesmo problema em relação aos oleodutos. Entre os modos de transporte existentes destacam-se as seguintes contrariedades: a escolha incorreta dos tanques usados ou sequências de carga/descarga inadequadas, no transporte hidroviário; as avarias, o uso indevido de equipamentos ou falha nos procedimentos de descarga, nos transportes rodoviário e ferroviário. Para evitar que o combustível contaminado chegue às aeronaves devem ser elaboradas verificações de qualidade, nas várias fases referidas.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta uma breve revisão de trabalhos relacionados com modelos de otimização de redes de distribuição, de entre os quais se podem distinguir modelos de fluxos em redes de transporte e modelos de localização de centros de distribuição. Além disso, expõe alguns exemplos da aplicação destes modelos à distribuição de derivados de petróleo.

3.1 Modelos de redes de distribuição

É possível encontrar na literatura um trabalho vasto relacionado com modelos de redes de distribuição. Entre estes modelos podem distinguir-se modelos de fluxos, onde a infraestrutura é dada, e modelos de localização de equipamentos, onde a infraestrutura é objeto de decisão. Os primeiros modelos são tratados com profundidade no livro “*Linear programming and network flows*” de Bazaraa *et al* (2011), já os segundos são descritos no livro “*Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*” de Daskin (1995). Nas subsecções seguintes exploramos os conceitos fundamentais de cada um.

3.1.1 Modelos de fluxos em redes de transporte

Os modelos de fluxos em redes de transporte permitem resolver o problema de encontrar o caminho de custo mínimo ou de fluxo máximo para entregar uma certa quantidade de um produto, num destino, a partir de uma origem.

Em geral, a rede de transporte é composta por um grafo e por fluxos que o percorrem. O grafo é composto por um conjunto de nós e um conjunto de arcos. Os nós correspondem a origens, onde se localiza a oferta (ex: refinarias), destinos, onde se situa a procura (ex: aeroportos) e outras localizações, onde não existe oferta nem procura (ex: entroncamentos rodoviários). Os arcos representam as possibilidades de movimento entre os nós. Aos nós podem estar associadas capacidades de oferta e/ou procuras e aos arcos podem estar associadas distâncias, tempos, custos e/ou capacidades.

Os modelos de fluxo de custo mínimo em redes de transporte podem ser formulados, recorrendo a programação linear, de acordo com a notação apresentada de seguida.

Conjuntos

- N nós, $N = \{1, \dots, N\}$
- A arcos, $A = \{1, \dots, A\}$

Parâmetros

- c_{ij} custo por unidade de fluxo no arco ij
- b_i procura e oferta de fluxo no nó i (valores negativos para a procura e positivos para a oferta)
- u_{ij} capacidade de fluxo no arco ij
- l_{ij} quantidade mínima de fluxo no arco ij

Variáveis de decisão

- x_{ij} fluxo no arco ij

A formulação geral e compacta destes modelos é a seguinte:

$$\min F = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{ji} = b_i, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij}, \quad \forall \{i, j\} \in A \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq l_{ij}, \quad \forall \{i, j\} \in A \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \mathbf{R}_0^+, \quad \forall \{i, j\} \in A \quad (5)$$

O objetivo (1) é minimizar os custos totais de transporte. A restrição (2) estabelece a continuidade do fluxo. O fluxo que passa no arco ij tem que ser menor ou igual à capacidade de fluxo no arco (restrição 3). Já o fluxo que passa no arco ij tem que ser maior ou igual ao fluxo mínimo no arco (restrição 4). Por fim, a restrição (5) estabelece que não podem existir fluxos negativos.

Para além dos modelos simples existem modelos mais avançados, tais como os modelos de *Multi Commodity Network* ou os modelos de *Network Service Desing*. Os primeiros diferem dos modelos mais simples, por considerarem o transporte de vários tipos de produto. Já os segundos consideram vários níveis de serviço (ex: o transporte entre refinarias e terminais, e o transporte entre terminais e aeroportos). São exemplo disso os trabalhos revistos de seguida.

Hu (1963) propôs um modelo de fluxo máximo em redes de transporte com o objetivo de encontrar a forma de distribuição que permite o fluxo máximo na entrega de dois produtos distintos. Este modelo considera dois tipos de fluxos, um para cada produto, que partilham a capacidade da rede.

Feng *et al* (2011) desenvolveram um modelo de fluxo de custo mínimo e multi-serviço de apoio à decisão com o objetivo de selecionar um conjunto de fornecedores, de acordo com vários tipos de serviço pretendidos.

3.1.2 Modelos de localização de centros de distribuição

Os modelos de localização de equipamentos permitem resolver o problema de encontrar a localização ótima, para um ou mais equipamentos (ex: refinarias ou terminais). De entre estes modelos podem distinguir-se modelos da p-mediana, modelos FLP (*Facility Location Problem*) e modelos MCP (*Maximum Cover Problem*), em função do seu objetivo. Os modelos da p-mediana pretendem determinar a localização ótima, de um dado número de equipamentos, de forma a minimizar os custos de transporte. Os modelos FLP permitem determinar a quantidade ótima de equipamentos, bem como a sua localização, tendo como múltiplos objetivos minimizar os custos de transporte e os custos associados à implantação de equipamentos. Os modelos MCP têm como objetivo determinar a localização ótima de um dado número de equipamentos que maximize a cobertura.

Os modelos da p-mediana podem ser formulados, de acordo com a seguinte notação:

Conjuntos

- J origens, $J = \{1, \dots, J\}$
- K destinos, $K = \{1, \dots, K\}$

Parâmetros

- d_{jk} distância entre a origem j e o destino k
- u_j procura na origem j
- P número de equipamentos a localizar

Variáveis de decisão

- x_{jk} fluxo da origem j para o destino k
- y_k existência ou não de um equipamento no destino k (se $y=1$ existe equipamento, se $y=0$ não existe equipamento)
- z_k capacidade necessária no destino k

A formulação geral e compacta destes modelos é a seguinte:

$$\min F = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_{jk} x_{jk} \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} x_{jk} = u_j, \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$x_{jk} \leq u_j y_k, \quad \forall j \in J, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jk} = z_k, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} y_k \leq P, \quad \forall k \in K \quad (10)$$

O objetivo (6) é minimizar as distâncias percorridas. A restrição (7) estabelece que toda a procura deve ser satisfeita. Só existe fluxo da origem j para o destino k se existir procura na origem j e equipamento no destino k (restrição 8). A capacidade ótima necessária em cada equipamento é estabelecida na restrição (9). Por fim, a restrição (10) estabelece o número máximo de equipamentos.

Para além dos modelos simples de localização de equipamentos existem ainda, modelos hierárquicos, dinâmicos, estocásticos e várias combinações dos anteriores, conduzindo a modelos mais avançados.

Os modelos hierárquicos diferem dos modelos mais simples, pois consideram vários níveis de equipamentos que prestam diferentes tipos de serviço (ex: refinarias e terminais). O problema da otimização dinâmica permite que as decisões sejam tomadas ao longo de um determinado número de intervalos de tempo (ex: construção de uma refinaria no presente e outra ao fim de um determinado número de anos). É exemplo disso o trabalho de Antunes *et al* (2009), que apresentaram um modelo hierárquico e dinâmico de localização de equipamentos coletivos para planeamento urbano, aplicado ao caso da Região Centro de Portugal. Neste âmbito foram considerados múltiplos períodos, uma ligação explícita entre as decisões de localização e alterações na população, múltiplos níveis de hierarquia e níveis mínimos de procura para garantir a viabilidade dos equipamentos dos vários níveis. O objetivo foi maximizar a acessibilidade da população aos serviços prestados nesses equipamentos.

Já os modelos estocásticos, analisam um conjunto de cenários de forma a ter em conta a incerteza. É exemplo disso o trabalho de Yu e Li (2000), que estudaram um modelo de otimização que integra os objetivos clássicos das técnicas de programação, com parâmetros

baseados em cenários, concluindo que com esta abordagem é possível tomar decisões mais prudentes.

Os centros de distribuição são equipamentos caros que, geralmente, funcionam durante anos ou décadas, durante os quais o ambiente em que operam pode mudar substancialmente. Nestes casos, parâmetros como custos, procuras, tempos de viagem, entre outros, usados em modelos de localização de equipamentos podem ser altamente incertos. Por essa razão os investigadores têm vindo a desenvolver modelos de localização de equipamentos considerando a incerteza. Nesse sentido, Snyder (2006) elaborou uma revisão da literatura relevante sobre a investigação que tem vindo a ser feita relativamente a modelos estocásticos e robustos de localização de equipamentos. Concluiu que o interesse nestes problemas tem vindo a crescer, existindo dois objetivos mais comuns, a minimização dos custos (problemas estocásticos) e a minimização do arrependimento máximo (problemas robustos), além de uma grande variedade de outras abordagens. Em acréscimo, nos problemas de programação estocástica é necessário decidir quais são as variáveis de decisão de primeira fase e quais são as variáveis de decisão de segunda fase, ou seja, que decisões devem ser tomadas agora e que decisões devem ser tomadas depois de se resolver a incerteza. Quando não existe informação sobre a probabilidade de ocorrência de parâmetros incertos deve recorrer-se a modelos robustos.

3.2 Aplicações à distribuição de derivados de petróleo

A cadeia de distribuição de petróleo é um sistema altamente competitivo que motiva estudos complexos de tomada de decisão, envolvendo diferentes problemas, tais como os abordados na literatura revista de seguida.

Zierer *et al* (1976) analisaram uma aplicação prática de programação linear ao problema da cadeia de distribuição *downstream* de produtos da Shell, nos Estados Unidos da América. Foi utilizado um modelo que engloba vários produtos, refinarias, terminais, custos de operação e modos de transporte, procurando satisfazer a procura e minimizar os custos. Este modelo permitiu decidir a melhor localização, para construir uma nova refinaria ou aumentar uma existente. Escolher a melhor localização para a implementação de novas alternativas de transporte, tais como a construção de um novo porto E ainda, decidir a localização ótima para abertura/encerramento de terminais, e estabelecer os requerimentos para a frota de petroleiros.

Escudero *et al* (1999) exploraram uma metodologia de otimização estocástica, com base na análise de cenários, elaborando um modelo para o abastecimento, transformação e otimização da distribuição de petróleo, considerando a incerteza associada à procura, custo de abastecimento local e preço de venda local para vários períodos, operadores e produtos.

Neiro e Pinto (2004) elaboraram um modelo estocástico e dinâmico, para o planeamento operacional da cadeia de distribuição de derivados do petróleo, no sudeste do Brasil. Mostraram a necessidade da existência um planeamento coordenado na produção de modo a equilibrar o comportamento dinâmico de toda a cadeia face a diferentes cenários. Sugeriram ainda que o uso de métodos de decomposição do problema, de maneira a obter problemas de menor dimensão, pode trazer benefícios ao nível de capacidade de análise de mais cenários e períodos de tempo.

MirHassani (2008) resalta como um modelo de planeamento operacional pode ser usado para analisar a logística de produtos derivados do petróleo, determinando a melhor forma de distribuição dos vários produtos e identificando gargalos na cadeia de distribuição. O modelo lida com vários produtos, armazéns e refinarias, e em simultâneo com a incerteza associada à procura.

O abastecimento das refinarias, o processamento do petróleo e a distribuição de produtos derivados de petróleo são três problemas que geralmente são resolvidos separadamente. Tal como Escudero *et al*, Guyonnet *et al* (2008) estudaram as vantagens de considerar os três em conjunto, obtendo um planeamento integrado e com melhores resultados. Para isso, propuseram três modelos interligados, um para cada problema, aplicados a um caso hipotético. O modelo proposto para a distribuição de derivados de petróleo admite vários períodos de tempo e vários tipos de produto, para determinar a melhor forma de distribuição.

Fernandes *et al* (2013) desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista determinístico para o dimensionamento estratégico da cadeia de distribuição de derivados do petróleo, em Portugal. Com o objetivo de determinar as localizações de equipamentos, capacidades, modos de transporte e rotas ideais, e comparando a participação individual e em parceria, de empresas. O modelo proposto foi o primeiro a considerar, em simultâneo, múltiplas empresas, escalões e produtos na sua formulação matemática, concluindo que a distribuição feita por uma empresa individualmente é mais económica do que a distribuição feita por várias empresas com estratégias individualistas. No seguimento do seu trabalho, Fernandes *et al* (2014) aprofundaram o estudo acerca da colaboração de entidades, na cadeia de distribuição *downstream* de petróleo, recorrendo a um modelo de programação linear inteira mista dinâmico. Este modelo determina o dimensionamento ótimo da cadeia de distribuição que maximiza o lucro das entidades envolvidas, considerando recursos partilhados. Concluíram que a colaboração entre entidades melhora a performance de toda a cadeia obtendo resultados próximos da distribuição gerida por apenas uma empresa.

	Modelo usado	Objetivo	Estudo de caso
Zierer <i>et al</i> (1976)	Modelo hierárquico e multi-produto.	Determinar a localização de equipamentos. Dimensionar a frota de petroleiros.	Cadeia de distribuição de produtos da Shell nos Estados Unidos.
Escudero <i>et al</i> (1999)	Modelo hierárquico, dinâmico, estocástico e multi-produto.	Determinar a melhor forma de distribuição	-
Neiro e Pinto (2004)	Modelo hierárquico, dinâmico, estocástico e multi-produto.	Determinar a melhor forma de distribuição	Cadeia de distribuição de derivados do petróleo no sudeste do Brasil.
MirHassani (2008)	Modelo hierárquico, estocástico e multi-produto.	Determinar a melhor forma de distribuição. Identificar gargalos.	-
Guyonnet <i>et al</i> (2008)	Modelo dinâmico e multi-produto.	Determinar a melhor forma de distribuição	Caso hipotético.
Fernandes <i>et al</i> (2013)	Modelo hierárquico, multi-entidade e multi-produto.	Determinar a localização e capacidade de equipamentos. Determinar a melhor forma de distribuição. Comparar a participação individual e em parceria de empresas.	Cadeia de distribuição de derivados do petróleo em Portugal.
Fernandes <i>et al</i> (2014)	Modelo dinâmico, hierárquico, multi-entidade e multi-produto.	Dimensionar a cadeia de distribuição de derivados de petróleo. Estudar a colaboração de entidades.	Cadeia de distribuição de derivados do petróleo em Portugal.

Quadro 1: Quadro resumo dos modelos revistos.

Além disso, Shah *et al* (2010) avaliaram os problemas chave, os avanços e as oportunidades nas operações de refinação de petróleo. Estudaram metodologias direcionadas para a calendarização, planeamento e gestão da cadeia de distribuição, e apontaram como um dos desafios para o futuro a melhoria dos modelos relativamente à gestão da cadeia de distribuição, abandonando aproximações baseadas em simulação e optando por modelos de otimização. Já An *et al* (2011) elaboraram uma revisão da literatura relevante da última década sobre investigação relativa à cadeia de distribuição de biocombustíveis e combustíveis derivados do petróleo, e ainda, modelos genéricos de cadeia de distribuição, apontando a tendência para a internacionalização da localização de equipamentos, o aumento do uso de tecnologias de informação, o aumento da sustentabilidade da cadeia e gestão da perecibilidade dos produtos.

4 MODELOS MATEMÁTICOS

Este capítulo descreve modelos de otimização determinísticos, a curto e longo prazo, e um modelo estocástico, a longo prazo, desenvolvidos para identificar e resolver estrangulamentos na cadeia de distribuição de combustíveis da aviação.

4.1 Hipóteses e limitações dos modelos

Assume-se que existe um abastecimento contínuo de petróleo nas refinarias, permitindo uma produção contínua de querosene de aviação.

Coloca-se a hipótese de que a capacidade de armazenamento nas refinarias (quer de petróleo quer de derivados) está dimensionada de acordo com a capacidade de refinação das mesmas, não representando gargalos, logo, esta não foi considerada nos modelos.

Nos modelos desenvolvidos assume-se que a capacidade de armazenamento de combustível nos aeroportos está dimensionada em conformidade com a capacidade de tráfego nos mesmos, não representando gargalos, logo, esta não foi considerada nos modelos.

Hipoteticamente só se recorre a importação caso não exista produção suficiente nas refinarias, para isso, admite-se um nó fictício (correspondente ao mercado externo), com oferta infinita, e que se encontra a uma distância muito grande dos terminais marítimos.

Assume-se que as frotas de camiões, navios e comboios, bem com a capacidade dos oleodutos estão dimensionadas de acordo com as necessidades e não representam gargalos. Não tendo sido considerados limites de capacidade ao nível do transporte.

Não são considerados muitos dos fatores que influenciam o custo total de transporte, tais como variações no custo de transporte para curtas e longas distâncias, assaltos, acidentes, manutenção, armazenagem, estado das vias, diferentes taxas, entre outros.

Como não é tida em conta a construção de novos aeroportos ou o aumento dos existentes, as localizações para centros de distribuição, propostas pelos modelos a longo prazo, podem não ser as ótimas.

Não sendo considerada a distribuição de outros derivados de petróleo, as localizações para centros de distribuição, propostas pelos modelos a longo prazo, podem não ser as ótimas.

Não se considera uma quantidade mínima a ser transportada pelos vários modos, e, apesar de se assumir que a dimensão das frotas não é um gargalo, isto pode levar a viagens com baixo aproveitamento e custo elevado.

4.2 Modelo de curto prazo

O modelo de otimização proposto permite identificar quais equipamentos estão a trabalhar no limite da sua capacidade (estrangulamentos), qual a quantidade de produto que é necessário importar e estabelece a forma mais económica de distribuição do produto.

Trata-se de um modelo de fluxo de custo mínimo, onde se consideram múltiplos modos de transporte, tipos de serviço e tipos de equipamento. O conjunto “nós” é composto por pontos localizados nas sedes de município, onde existe algum tipo de equipamento e por entroncamentos rodoviários, ferroviários, hidroviários e dutoviários considerados no modelo. O conjunto “modos de transporte” representa os vários modos de transporte disponíveis no sistema. A importação e as distribuições primária e secundária estão estabelecidas no conjunto “tipos de serviço”. Os tipos de equipamento existentes são refinarias, terminais e aeroportos. As suas localizações são definidas pelas matrizes de oferta (op_i), capacidade de armazenamento (cap_i) e procura (p_i), respetivamente.

As decisões a tomar são a quantidade de produto a enviar de cada nó para cada nó, por cada modo de transporte. O objetivo é minimizar os custos de transporte, relacionando as variáveis de decisão com o valor da solução. O modelo pode ainda ser facilmente adaptado para uma situação em que se pretenda analisar a distribuição de outro produto ou de múltiplos produtos.

Para formular o modelo foi considerada a seguinte notação:

Conjuntos

- N nós, $N = \{1, \dots, N\}$
- M modos de transporte, $M = \{1, \dots, M\}$
- S tipos de serviço, $S = \{1, \dots, 3\}$

Parâmetros

- D_{ijm} comprimento do arco que liga o nó i ao nó j pelo modo de transporte m ($D_{ijm}=0$ se não existir ligação e expressa em quilómetros)

- p_i procura no nó i (expressa em metros cúbicos)
- op_i quantidade máxima a produzir no nó i (expressa em metros cúbicos)
- oi_i quantidade disponível para importação no nó i (expressa em metros cúbicos)
- cap_i capacidade de armazenamento no nó i (expressa em metros cúbicos)
- ct_m custo de transporte pelo modo m (expresso em euros por metro cúbico por quilómetro)

Variáveis de decisão

- x_{ijms} fluxo a enviar do nó i para o nó j pelo modo de transporte m através do serviço s (se $s=1$ trata-se de distribuição primária, se $s=2$ trata-se de distribuição secundária, se $s=3$ trata-se de importação)

De acordo com a notação apresentada, a formulação usada foi a seguinte:

$$\min F = \sum_{\{i,j\} \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} D_{ijm} \times x_{ijms} \times ct_m \quad (11)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{ijms} + p_i \leq op_i + oi_i + \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{jim_s}, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm1} \leq op_i + \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{jim1}, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (13)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm2} + p_i \leq cap_i + \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{jim2}, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm3} \leq oi_i, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (15)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{jim2} \geq p_i, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (16)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm2} + p_i \leq \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{jim_s}, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (17)$$

$$x_{ij11} = 0, \quad \forall \{i,j\} \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (18)$$

$$x_{ijms} \in \mathbf{Z}_0^+, \quad \forall \{i,j\} \in N; m \in M; s \in S \quad (19)$$

O objetivo (11) é minimizar os custos totais de transporte. As restrições (12, 13, 14, 15, 16 e 17) em conjunto obrigam a que exista conservação de fluxo. A restrição (12) estabelece que o fluxo total que sai do nó i mais a procura no mesmo nó seja menor ou igual à oferta produzida ou disponível para importação no nó i mais o fluxo total que entra no mesmo nó. O fluxo de distribuição primária que sai do nó i tem que ser menor ou igual à oferta produzida no nó i mais o fluxo de distribuição primária que entra no mesmo nó (restrição 13). O fluxo de distribuição secundária que sai do nó i mais a procura no mesmo nó tem que ser menor ou

igual à capacidade de armazenamento no nó i mais o fluxo de distribuição secundária que entra no mesmo nó (restrição 14). O fluxo de importação que sai do nó i tem que ser menor ou igual à oferta disponível para importação no mesmo nó, como estabelecido na restrição (15). A restrição (16) obriga a que a procura seja satisfeita por fluxo de distribuição secundária. O fluxo de distribuição secundária que sai do nó i mais a procura no mesmo nó tem que ser menor ou igual ao fluxo total que entra no nó i (restrição 17). A restrição (18) garante que a distribuição primária seja feita por oleoduto ou hidrovía, impedindo a utilização do modo rodoviário (considerado $m=1$). Por fim, a restrição (19) garante que os fluxos são valores inteiros e positivos.

4.3 Modelos de longo prazo

Os modelos de longo prazo propostos permitem identificar quais equipamentos vão estar a trabalhar no limite da sua capacidade (estrangulamentos), fixando o número de refinarias e terminais (P_e) de forma a corresponder à infraestrutura existente. Permitem determinar a melhor localização para abertura de novas refinarias e/ou terminais e a sua dimensão ótima, igualando o número de refinarias e/ou terminais (P_e) à quantidade pretendida. E ainda, estabelecem a forma mais económica de distribuição do produto, de acordo com a infraestrutura em estudo.

Alguns dos parâmetros de um modelo determinístico podem ser incertos. Nesses casos é apropriado considerar programação estocástica para resolver o problema. Em adição às faculdades fornecidas pelo modelo determinístico de longo prazo, o modelo estocástico faculta a análise de um conjunto de cenários, em simultâneo, cada um com uma probabilidade de ocorrência associada ($prob_c$) e de acordo com o nível de confiança pretendido (nc). Dado que o cenário futuro não é conhecido, este modelo deverá apresentar uma solução mais adequada do que o modelo determinístico.

4.3.1 Modelo determinístico

O modelo determinístico de longo prazo é baseado no modelo determinístico de curto prazo apresentado anteriormente, ao qual se combinou um modelo de localização de equipamentos (p-mediana hierárquico), e onde se consideram adicionalmente, múltiplos tipos de equipamento. O conjunto “tipos de equipamento” representa os vários tipos de equipamento sobre os quais se pretende decidir sobre a localização ótima. As possíveis localizações e capacidades de novas refinarias e terminais são definidas pelos vetores (o_i) e (ca_i), respetivamente. A variável de decisão y_{ie} define se num nó deve existir, ou não, um novo equipamento.

As decisões a tomar são a quantidade de produto a enviar de cada nó para cada nó, por cada modo de transporte, bem como a localização ideal para novas refinarias e/ou terminais. O objetivo continua a ser minimizar os custos de transporte. O modelo pode ainda ser facilmente adaptado para uma situação em que se pretenda analisar a localização ideal para novos arcos de ligação entre nós.

Para a formular o modelo foi considerada a seguinte notação adicional:

Conjuntos

- E tipos de equipamento, $E = \{1,2\}$

Parâmetros

- P_e número de equipamentos do tipo e (se $e=1$ trata-se de equipamentos do tipo refinaria, se $e=2$ trata-se de equipamentos do tipo terminal)
- o_i possível quantidade máxima que se poderá produzir no nó i , caso se construa uma refinaria (expressa em metros cúbicos)
- ca_i possível capacidade máxima de armazenamento no nó i , caso se construa um terminal (expressa em metros cúbicos)

Variáveis de decisão

- y_{ie} existência ou não de um equipamento do tipo e no nó i (se $y=1$ existe equipamento, se $y=0$ não existe equipamento)

De acordo com a notação apresentada, a formulação usada foi a seguinte:

$$\min F = \sum_{\{i,j\} \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} D_{ijm} \times x_{ijms} \times ct_m \quad (20)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{ijms} + p_i \leq o_i \times y_{i1} + op_i + oi_i + \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{jim2},$$

$$\forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (21)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm1} \leq o_i \times y_{i1} + op_i + \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{jim1}, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (22)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm2} + p_i \leq ca_i \times y_{i2} + cap_i + \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{jim2}, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (23)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm3} \leq oi_i, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (24)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{jim2} \geq p_i, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (25)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ijm2} + p_i \leq \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{jims}, \quad \forall i \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (26)$$

$$x_{ij11} = 0, \quad \forall \{i, j\} \in \{N | D_{ijm} > 0\} \quad (27)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ie} \leq P_e, \quad \forall e \in E \quad (28)$$

$$x_{ijms} \in \mathbf{Z}_0^+, \quad \forall \{i, j\} \in N; m \in M; s \in S \quad (29)$$

O objetivo (20) é de minimizar os custos totais de transporte. As restrições (21, 22, 23, 24, 25 e 26) em conjunto obrigam a que exista conservação de fluxo. A restrição (21) estabelece que o fluxo total que sai do nó i mais a procura no mesmo nó seja menor ou igual à oferta produzida ou disponível para importação no nó i mais o fluxo total que entra no mesmo nó. O fluxo de distribuição primária que sai do nó i tem que ser menor ou igual à oferta produzida no nó i mais o fluxo de distribuição primária que entra no mesmo nó (restrição 22). O fluxo de distribuição secundária que sai do nó i mais a procura no mesmo nó tem que ser menor ou igual à capacidade de armazenamento no nó i mais o fluxo de distribuição secundária que entra no mesmo nó (restrição 23). O fluxo de importação que sai do nó i tem que ser menor ou igual à oferta disponível para importação no mesmo nó, como estabelecido na restrição (24). A restrição (25) obriga a que a procura seja satisfeita por fluxo de distribuição secundária. O fluxo de distribuição secundária que sai do nó i mais a procura no mesmo nó tem que ser menor ou igual ao fluxo total que entra no nó i (restrição 26). A restrição (27) garante que a distribuição primária seja feita por oleoduto ou hidrovía. A restrição (28) estabelece o número máximo de equipamentos de cada tipo. Por fim, a restrição (29) garante que os fluxos são valores inteiros e positivos.

4.3.2 Modelo estocástico

Este modelo é baseado no modelo determinístico de longo prazo apresentado anteriormente, onde se consideram adicionalmente múltiplos cenários. O conjunto “cenários” representa os vários cenários estabelecidos. Ao introduzir este novo conjunto, o vetor da procura (p_i) passa a ser uma matriz com um número de colunas igual ao número de cenários (p_{ic}).

As decisões a tomar são as mesmas que no modelo determinístico de longo prazo. Numa primeira fase são fixadas as localizações dos equipamentos e numa segunda fase é decidida a melhor forma de distribuição para cada cenário. A solução apenas tem que respeitar a procura de alguns cenários, de acordo com o nível de confiança fixado pelo decisor. O programa deve decidir sobre quais os cenários a considerar. O objetivo continua a ser minimizar os custos de transporte.

De maneira a formular o modelo foi considerada a seguinte notação adicional:

Conjuntos

- \mathbf{C} cenários, $\mathbf{C} = \{1, \dots, C\}$

Parâmetros

- $prob_c$ probabilidade de acontecer o cenário c (de acordo com uma distribuição normal)
- p_{ic} procura de QAV no nó i no cenário c (expressa em metros cúbicos)
- nc nível de confiança (se $nc=0$ nenhum cenário é tido em consideração, se $nc=1$ todos os cenários são tidos em consideração)

Variáveis de decisão

- x_{ijmsc} fluxo a enviar do nó i para o nó j pelo modo de transporte m através do serviço s no cenário c .
- z_c consideração de cenários (se $t=1$ o cenário c é considerado, se $t=0$ o cenário c não é considerado)

De acordo com a notação apresentada, a formulação usada foi a seguinte:

$$\min F = \sum_{\{i,j\} \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{c \in \mathbf{C}} prob_c \times D_{ijm} \times x_{ijmsc} \times ct_m \quad (30)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{s \in \mathbf{S}} x_{ijmsc} + p_{ic} \times z_c \leq o_i \times y_{i1} + op_i + oi_i + \sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{s \in \mathbf{S}} x_{jimsc}, \quad \forall i \in \{\mathbf{N} | D_{ijm} > 0\}; c \in \mathbf{C} \quad (31)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} x_{ijm1c} \leq o_i \times y_{i1} + op_i + \sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} x_{jim1c}, \quad \forall i \in \{\mathbf{N} | D_{ijm} > 0\}; c \in \mathbf{C} \quad (32)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} x_{ijm2c} + p_{ic} \times z_c \leq ca_i \times y_{i2} + cap_i + \sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} x_{jim2c}, \quad \forall i \in \{\mathbf{N} | D_{ijm} > 0\}; c \in \mathbf{C} \quad (33)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} x_{ijm3c} \leq oi_i, \quad \forall i \in \{\mathbf{N} | D_{ijm} > 0\}; c \in \mathbf{C} \quad (34)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} x_{jim2c} \geq p_{ic} \times z_c, \quad \forall i \in \{\mathbf{N} | D_{ijm} > 0\}; c \in \mathbf{C} \quad (35)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} x_{ijm2c} + p_{ic} \times z_c \leq \sum_{j \in \mathbf{N}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{s \in \mathbf{S}} x_{jimsc}, \quad \forall i \in \{\mathbf{N} | D_{ijm} > 0\}; c \in \mathbf{C} \quad (36)$$

$$x_{ij11c} = 0, \quad \forall \{i,j\} \in \{\mathbf{N} | D_{ijm} > 0\}; c \in \mathbf{C} \quad (37)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} y_{ie} \leq P_e, \quad \forall e \in \mathbf{E} \quad (38)$$

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} z_c = nc \times N \quad (39)$$

$$x_{ijmsc} \in \mathbf{Z}_0^+, \quad \forall \{i, j\} \in \mathbf{N}; m \in \mathbf{M}; s \in \mathbf{S}; c \in \mathbf{C} \quad (40)$$

O objetivo (30) é de minimizar os custos totais de transporte. As restrições (31, 32, 33, 34, 35 e 36) em conjunto obrigam a que exista conservação de fluxo. A restrição (31) estabelece que o fluxo total que sai do nó i mais a procura no mesmo nó num dado cenário, seja menor ou igual à oferta produzida ou disponível para importação no nó i mais o fluxo total que entra no mesmo nó. O fluxo de distribuição primária que sai do nó i tem que ser menor ou igual à oferta produzida no nó i mais o fluxo de distribuição primária que entra no mesmo nó (restrição 32). O fluxo de distribuição secundária que sai do nó i mais a procura no mesmo nó num dado cenário, tem que ser menor ou igual à capacidade de armazenamento no nó i mais o fluxo de distribuição secundária que entra no mesmo nó (restrição 33). O fluxo de importação que sai do nó i tem que ser menor ou igual à oferta disponível para importação no mesmo nó, como estabelecido na restrição (34). A restrição (35) obriga a que a procura seja satisfeita por fluxo de distribuição secundária. O fluxo de distribuição secundária que sai do nó i mais a procura no mesmo nó num dado cenário, tem que ser menor ou igual ao fluxo total que entra no nó i , restrição (36). A restrição (37) garante que a distribuição primária seja feita por oleoduto ou hidrovía. A restrição (38) estabelece o número máximo de equipamentos de cada tipo. A restrição (39) fixa o número máximo de cenários a considerar de acordo com um dado nível de confiança. Por fim, a restrição (40) garante que os fluxos são valores inteiros e positivos.

5 ESTUDO DE CASO: Distribuição de combustíveis da aviação no Brasil

Este capítulo consiste na aplicação dos modelos desenvolvidos a um problema baseado na cadeia de distribuição de combustíveis da aviação no Brasil, com o objetivo de identificar e resolver estrangulamentos ao nível da infraestrutura. São apresentados os parâmetros admitidos no modelo e é feita uma análise dos resultados.

5.1 Caracterização do setor da aviação

Situação atual

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2006), o setor da aviação engloba vias aéreas, terminais de passageiros e cargas, e o sistema de controlo aéreo. Ele cumpre um papel importante no desenvolvimento regional, estimulando as relações económicas e o intercâmbio de pessoas e mercadorias. Atualmente, a regulação da aviação civil, das infraestruturas aeroportuária e aeronáutica, e também a regulação técnica são da competência da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2013). Já a operação aeroportuária está concentrada na Infraero, que administra 67 aeroportos, correspondendo a 97% dos passageiros transportados anualmente no mercado brasileiro (McKinsey&Company, 2010).

No Brasil, são realizadas mais de 100 milhões de viagens por ano, número que cresceu à expressiva taxa de 12,6% ao ano entre 2003 e 2012, refletindo o crescimento económico do país de 3,85% ao ano e o aumento da população de 1% ao ano, no mesmo período (ANAC, 2013). O gráfico 1 apresenta a evolução do número de passageiros, população e PIB *per capita* no Brasil, entre 2003 e 2012. Verifica-se que a população brasileira usa cada vez mais o transporte aéreo. O número de passageiros frente ao crescimento da população aumentou de 0,2 viagens, por habitante, em 2003, para 0,5 viagens, por habitante, em 2012 (ANAC, 2013). Apesar deste crescimento, o Brasil está longe dos valores verificados em países mais desenvolvidos, como os Estados Unidos e a Austrália, que apresentam taxas superiores a 5 viagens, por habitante, ao ano (ABEAR, 2013).

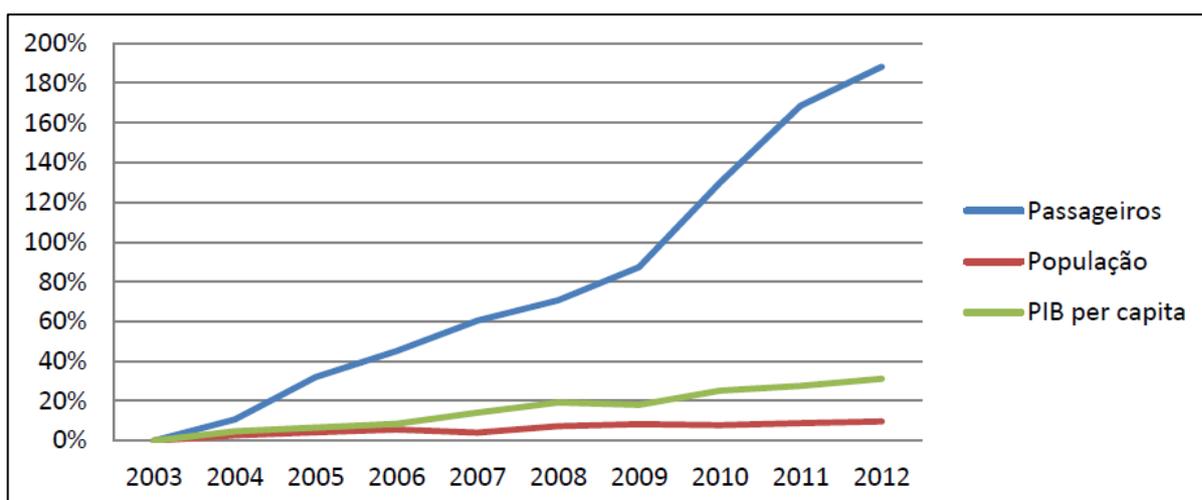


Gráfico 1: Evolução do número de passageiros, população e PIB *per capita* no Brasil, entre 2003 e 2012.

Face a este desenvolvimento, o Brasil depara-se com a necessidade de expandir a capacidade do sistema. Diversos aeroportos já se encontram no limite da sua capacidade e, se o ritmo de crescimento se mantiver, será necessário investir na construção de novos aeroportos ou aumentar a capacidade dos existentes (McKinsey&Company, 2010).

Em simultâneo com a necessidade de expansão da infraestrutura surgem outras oportunidades de atuação no setor, nomeadamente a diminuição do consumo de combustível. O custo com combustível de aviação chega a representar 40% do total das despesas das companhias aéreas. Desta forma, o aperfeiçoamento no controle de tráfego aéreo, poderia diminuir o tempo de viagem, permitindo rotas com traçado mais direto, progressão de subida e descida mais eficiente e menores circuitos de espera, na aproximação para pouso. Além disso, existe uma enorme diferença nas taxas de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) sobre os combustíveis, de estado para estado, o que conduz as empresas aéreas à prática de *tankering*, isto é, ao carregamento de combustível além do tecnicamente necessário a partir dos locais de menor taxa. Menor tempo de voo e menor peso transportado implicaria menor consumo de combustível e menores custos operacionais (McKinsey&Company, 2010).

No estudo de caso serão considerados 32 aeroportos (Quadro 2) que, segundo McKinsey&Company (2010), representam cerca de 90% do tráfego aéreo total do país. Este conjunto é composto pelos 20 principais aeroportos do Brasil, os 10 maiores aeroportos localizados em estados que não possuem nenhum dos aeroportos principais e dois aeroportos considerados estratégicos (Porto Seguro e Pampulha). Todos eles são administrados pela Infraero, com exceção do aeroporto de Porto Seguro, que é administrado pela Sinart.

Nome	Município	Estado	Código IATA
Guarulhos - Governador André Franco Montoro	Guarulhos	SP	GRU
Congonhas	São Paulo	SP	CGH
Galeão - Antônio Carlos Jobim	Rio de Janeiro	RJ	GIG
Pres. Juscelino Kubitschek	Brasília	DF	BSB
Deputado Luís Eduardo Magalhães	Salvador	BA	SSA
Tancredo Neves	Belo Horizonte	MG	CNF
Salgado Filho	Porto Alegre	RS	POA
Guararapes - Gilberto Freyre	Recife	PE	REC
Afonso Pena	São José dos Pinhais	PR	CWB
Santos Dumont	Rio de Janeiro	RJ	SDU
Pinto Martins	Fortaleza	CE	FOR
Val de Cans	Belém	PA	BEL
Hercílio Luz	Florianópolis	SC	FLN
Eduardo Gomes	Manaus	AM	MAO
Eurico de Aguiar Salles	Vitória	ES	VIX
Augusto Severo	Parnamirim	RN	NAT
Santa Genoveva	Goiânia	GO	GYN
Marechal Rondon	Várzea Grande	MT	CGB
Viracopos	Campinas	SP	VCP
Zumbi dos Palmares	Maceió	AL	MCZ
Marechal Cunha Machado	São Luís	MA	SLZ
Campo Grande	Campo Grande	MS	CGR
Santa Maria	Aracaju	SE	AJU
Pampulha - Carlos Drummond de Andrade	Belo Horizonte	MG	PLU
Macapá	Macapá	AP	MCP
Senador Petrônio Portella	Teresina	PI	THE
Pres. Castro Pinto	Santa Rita	PB	JPA
Governador Jorge Teixeira de Oliveira	Porto Velho	RO	PVH
Presidente Médici	Rio Branco	AC	RBR
Brigadeiro Lysias Rodrigues	Palmas	TO	PMW
Boa Vista	Boa Vista	RR	BVB
Porto Seguro	Porto Seguro	BA	BPS

Quadro 2: Lista dos 32 aeroportos considerados no estudo.

Da análise da figura 3 verifica-se uma grande concentração de tráfego de passageiros na região Sudeste do País. De acordo com a Infraero (2015), o aeroporto de Guarulhos, em São Paulo, é o aeroporto brasileiro com mais tráfego (chegadas e partidas) e apresentou um volume de 32,8 milhões de passageiros no ano de 2012, seguido pelo aeroporto de Galeão, no Rio de Janeiro, com um volume anual de 17,5 milhões de passageiros, no mesmo período.

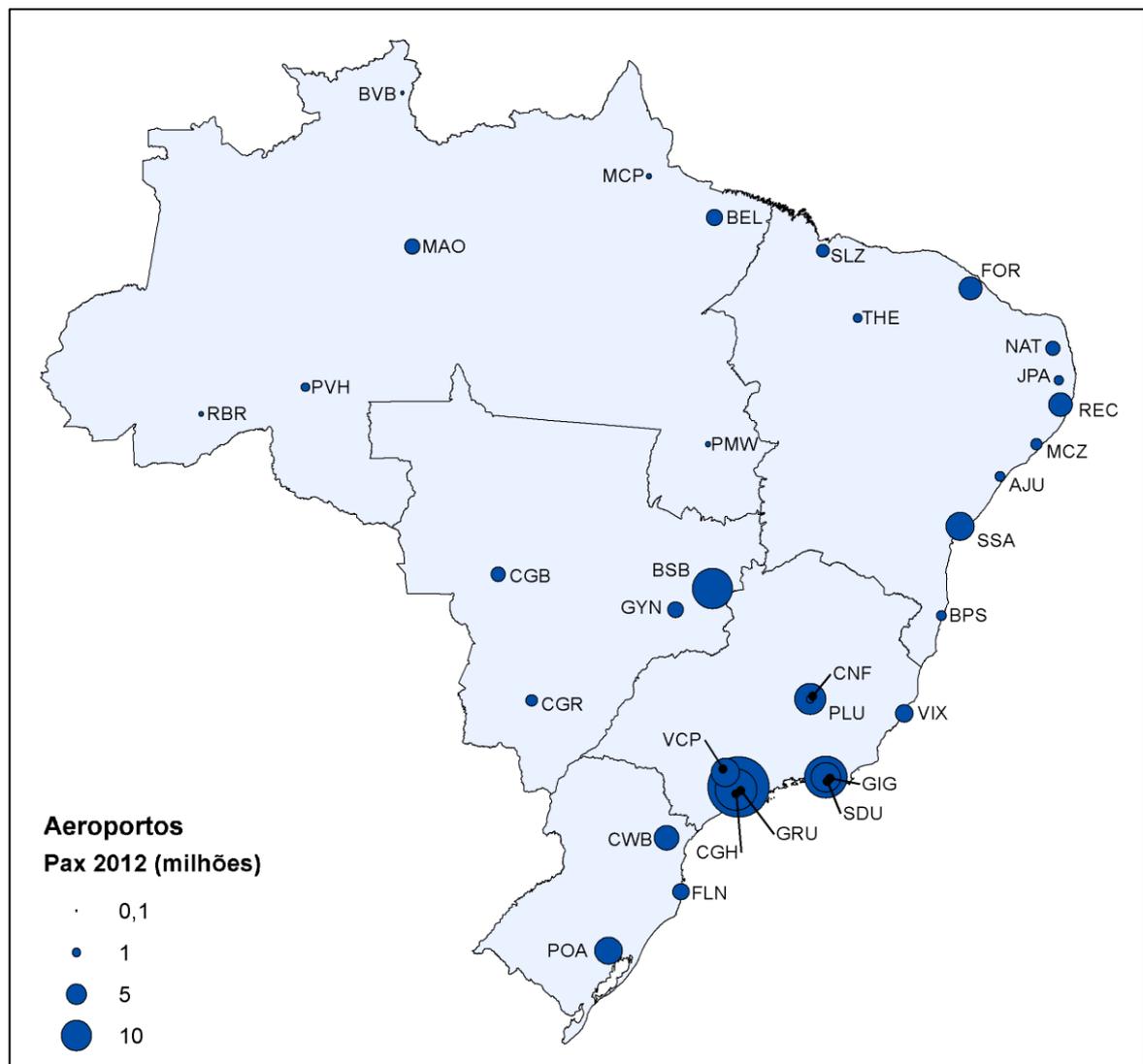


Figura 3: Tráfego de passageiros nos 32 aeroportos em estudo, no ano 2012.

Perspetivas de evolução

A procura pelo modo de transporte aéreo está diretamente relacionada com a população e com o estado da economia. Estes parâmetros influenciam o número de passageiros e podem variar ao longo do tempo. Nesse sentido, elaborou-se um modelo estatístico de previsão do número de passageiros, aplicando uma regressão múltipla com recurso ao método dos mínimos quadrados, de forma a encontrar a função que minimiza a soma dos erros quadrados, ou seja, a diferença entre os valores observados e os respetivos valores estimados (Draper e Smith, 2014). Procurou-se explicar a movimentação de passageiros em cada aeroporto com base na população e no PIB *per capita* das respetivas áreas de captação (região, geralmente

metropolitana, que é atendida por um ou mais aeroportos). Verificou-se que a função teórica que relaciona a população, o PIB *per capita* e o tráfego de passageiros é a seguinte:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2^2 + \varepsilon \quad (41)$$

onde,

Y – Variável dependente, tráfego de passageiros (chegadas mais partidas);

X₁ – Variável independente, população da área de captação;

X₂ – Variável independente, PIB *per capita* na área de captação;

β₀ – Coeficiente relativo à intercepção com a origem (foi admitido β₀ = 0);

β₁ – Coeficiente de regressão relativo à variável X₁;

β₂ – Coeficiente de regressão relativo à variável X₂;

ε – Erros ou resíduos da regressão.

Pode constatar-se que a variação no número de passageiros revela uma tendência que se caracteriza pela existência de uma parcela aleatória (ε), ou seja pode ser estimada mas com alguma incerteza.

Os coeficientes β₁ e β₂ da função teórica foram estimados com base nos dados observados anualmente, para cada aeroporto e respectiva área de captação, das variáveis Y, X₁ e X₂, entre 2003 e 2012, obtendo uma equação de estimativa para cada aeroporto na forma:

$$y_i = b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i}^2 \quad (42)$$

onde,

y_i – Valor estimado do tráfego de passageiros (chegadas mais partidas);

x_{1i} – Valor observado da população da área de captação;

x_{2i} – Valor observado do PIB *per capita* na área de captação;

b₁ – Coeficiente de regressão relativo à variável X₁;

b₂ – Coeficiente de regressão relativo à variável X₂.

A interpretação literal da equação (42) é que quando x₁ ou x₂ se igualam a zero o número de passageiros também é nulo. Quando a população aumenta b₁ unidades o número de passageiros aumenta 1 unidade (mantendo-se o PIB *per capita* constante). E que quando o PIB *per capita* aumenta b₂ unidades o número de passageiros aumenta 1 unidade (novamente, mantendo-se a população constante). Assim, os coeficientes determinados simplesmente indicam como alterações unitárias em cada variável independente podem influenciar o valor da variável dependente.

Uma vez determinados os coeficientes da equação (42), esta pode ser usada para prever o tráfego de passageiros, em cada aeroporto, nos anos 2015 e 2025. Nesse sentido, foram

elaboradas projeções da população e do PIB *per capita*, em cada área de captação, extrapolando linearmente as suas tendências ao longo do tempo, com base nos valores observados entre 2003 e 2012. Por fim, a previsão é feita através da substituição simples dos valores projetados na equação (42).

Como o volume de passageiros varia de mês para mês, os valores estimados devem ser multiplicados por um fator de ponta. Através da análise dos dados relativos ao ano 2013 (Infraero, 2015), obteve-se um fator de ponta mensal igual a 1,1 (Quadro 3).

Ano 2013	Pax (milhões)
Jan	11,964
Fev	9,696
Mar	10,711
Abr	10,748
Mai	11,062
Jun	10,747
Jul	12,234
Ago	11,234
Set	11,257
Out	11,950
Nov	11,705
Dez	12,439
Média	11,3121
Máximo	12,439
$fp = (\text{Máximo}/\text{Média})$	1,1

Quadro 3: Fator de ponta mensal do movimento de passageiros no Brasil, em 2013.

A título de exemplo apresenta-se a estimativa do volume de passageiros no aeroporto de Guarulhos (GRU), para 2015 e para 2025.

Recolheram-se os dados, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, relativos à população (Quadro 4) e PIB *per capita* (Quadro 5) na Região Metropolitana de São Paulo, entre 2003 e 2012, consultando a contagem da população em 2007 (IBGE, 2015a), os censos de 2010 (IBGE, 2015b), as estimativas da população para os restantes anos (IBGE, 2015c) e o valor do PIB da região, no mesmo período (IBGE, 2015a; IBGE, 2015b; IBGE, 2015c).

População (milhares)										
Município	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Arujá	66	70	73	75	73	79	81	-	76	77
Barueri	232	248	257	266	253	265	270	-	243	246
Biritiba-Mirim	27	28	29	30	27	29	30	-	29	29
Caieiras	81	88	91	95	81	87	88	-	88	89
Cajamar	56	59	61	63	58	63	64	-	65	66
Carapicuíba	363	376	383	390	380	389	393	-	372	373
Cotia	162	170	175	180	173	179	182	-	205	209
Diadema	373	384	390	395	387	394	398	-	389	391
Embu das Artes	224	234	240	246	237	245	249	-	243	245
Embu-Guaçu	63	68	70	72	59	62	62	-	63	64
Ferraz de Vasconcelos	157	166	171	177	169	176	179	-	170	172
Francisco Morato	149	159	165	171	147	155	157	-	156	158
Franco da Rocha	115	120	122	125	121	129	131	-	133	135
Guararema	23	24	24	25	25	27	27	-	26	26
Guarulhos	1.160	1.219	1.251	1.283	1.236	1.279	1.299	-	1.233	1.245
Itapecerica da Serra	143	152	157	162	149	159	162	-	154	156
Itapevi	179	190	197	203	194	202	206	-	204	207
Itaquaquecetuba	306	328	341	353	335	351	359	-	326	329
Jandira	101	107	110	113	104	110	112	-	110	111
Juquitiba	28	30	31	31	28	29	29	-	29	29
Mairiporã	66	70	73	75	72	77	79	-	83	84
Mauá	384	398	406	414	403	413	417	-	421	425
Mogi das Cruzes	348	360	366	372	363	371	375	-	392	396
Osasco	679	696	705	715	701	713	719	-	668	669
Pirapora do Bom Jesus	14	15	15	16	14	15	16	-	16	16
Poá	102	106	108	110	105	111	112	-	107	108
Ribeirão Pires	110	114	117	119	107	111	112	-	114	114
Rio Grande da Serra	39	41	42	42	39	41	42	-	45	45
Salesópolis	15	16	16	17	15	16	16	-	16	16
Santa Isabel	46	47	47	48	45	47	47	-	51	51
Santana de Parnaíba	86	94	98	102	100	111	114	-	111	114
Santo André	3	3	3	3	668	3	3	-	3	3
São Bernardo do Campo	745	773	789	804	781	802	811	-	770	775
São Caetano do Sul	137	135	134	133	145	151	152	-	150	151
São Lourenço da Serra	14	15	15	16	16	18	18	-	14	14
São Paulo	10.677	10.839	10.928	11.017	10.887	10.990	11.038	-	11.316	11.377
Suzano	250	265	272	280	269	279	284	-	265	268
Taboão da Serra	209	217	221	225	219	225	227	-	248	252
Vargem Grande Paulista	38	41	43	45	40	44	45	-	44	45
RM São Paulo	17.972	18.464	18.737	19.007	19.224	18.947	19.106	19.684	19.147	19.279

Quadro 4: População na Região Metropolitana de São Paulo, entre 2003 e 2012.

	PIB (milhões de SR)	Pop (milhares)	PIB per capita (SR)
2003	322.731	17.972	17.958
2004	357.015	18.464	19.336
2005	411.164	18.737	21.944
2006	450.703	19.007	23.713
2007	512.582	19.224	26.664
2008	572.274	18.947	30.204
2009	613.027	19.106	32.085
2010	701.797	19.684	35.653
2011	765.372	19.147	39.974
2012	786.500	19.279	40.796

Quadro 5: PIB *per capita* na Região Metropolitana de São Paulo, entre 2003 e 2012.

De seguida, recolheram-se dados disponibilizados pela Infraero, relativos ao número de passageiros (chegadas mais partidas) e, relacionando-os com os dados da população e do PIB *per capita* através de uma regressão múltipla, determinaram-se os coeficientes b_1 e b_2 da equação (42). Para executar a regressão múltipla recorreu-se à funcionalidade de análise de dados do programa Microsoft Excel. No quadro 6 apresentam-se os dados usados no modelo.

	Pop	PIB per capita(SR)	Pax
2003	17.971.893	17.958	11.581.034
2004	18.464.153	19.336	12.940.193
2005	18.736.573	21.944	15.834.797
2006	19.006.936	23.713	15.759.181
2007	19.223.897	26.664	18.795.596
2008	18.947.082	30.204	20.400.304
2009	19.106.440	32.085	21.727.649
2010	19.683.975	35.653	26.849.185
2011	19.146.713	39.974	30.003.428
2012	19.278.639	40.796	32.777.330

Quadro 6: Valores usados no modelo estatístico de previsão do número de passageiros no aeroporto de Guarulhos.

Obtiveram-se $b_1 = 0,417631$ e $b_2 = 0,014289$, com $P - value = 6,01 \times 10^{-7}$ e $P - value = 5,64 \times 10^{-9}$, respetivamente. O facto de os valores de $P - value$ serem inferiores a 0,05 significa que os valores obtidos são significativos e podemos aceitar os valores de b_1 e b_2 como válidos.

Além disso, obtiveram-se $R^2 = 0,999$ e $R_{aj}^2 = 0,874$. O elevado valor de R^2 significa que o modelo descreve muito bem a variação do número de passageiros com base na variação da população e do PIB *per capita* com 99,9% de certeza. O elevado valor de R_{aj}^2 confirma a conclusão anterior, porque o valor de R^2 pode ser forçado a ser elevado ao introduzir mais variáveis independentes, mesmo que não se verifique uma boa relação entre as variáveis. Nesses casos o valor de R_{aj}^2 é baixo.

Na sequência, extrapolaram-se os valores da população e do PIB *per capita* da Região Metropolitana de São Paulo para 2015 e 2025, efetuando uma regressão linear simples ao longo do tempo para cada uma das variáveis, com base nos valores apresentados anteriormente relativos ao período entre 2003 e 2012.

Por fim, os valores obtidos foram substituídos na equação (42), juntamente com os valores dos coeficientes b_1 e b_2 , de maneira a efectuar a previsão do número de passageiros em 2015 e 2025. No quadro 7, para além dos valores da População e do PIB *per capita* extrapolados, apresenta-se também o número de passageiros por dia, no aeroporto de Guarulhos, já multiplicado pelo factor de ponta ($fp = 1,1$).

	Pop	PIB per capita (\$R)	Pax/ano	Pax/dia
2015	19.924.691	49.161	42.853.602	129.148
2025	21.215.439	76.265	91.967.746	277.163

Quadro 7: Valores obtidos para a população, o PIB *per capita* e número de passageiros, em 2015 e 2025.

O mesmo procedimento foi adotado para os restantes aeroportos em estudo. Os valores dos coeficientes, os valores estatísticos das regressões e os valores médios esperados para o tráfego diário de passageiros em cada aeroporto, nos anos 2015 e 2025, são apresentados no quadro 8.

O modelo estocástico de otimização apresentado neste trabalho abrange ainda a incerteza associada aos erros da regressão (ε), considerando um conjunto de cenários na análise a longo prazo. Pressupondo-se que estes erros são variáveis aleatórias independentes, com média igual a 0, desvio padrão igual a 1 e que seguem uma distribuição normal ($\varepsilon \sim N[0,1]$), e calculando o erro padrão da procura em cada aeroporto, podem estimar-se os erros esperados. Calcularam-se os erros esperados para 10 cenários, gerando 10 números aleatórios para cada aeroporto, de acordo com $\varepsilon \sim N[0,1]$, e multiplicando estes números pelo erro padrão do

respetivo aeroporto. Somando o erro esperado ao valor médio esperado para o tráfego diário de passageiros em cada aeroporto, em 2025, criaram-se 10 cenários.

A título de exemplo, apresenta-se o processo de criação de um cenário. Recorrendo à funcionalidade de análise de dados do programa Microsoft Excel, geraram-se 10 números aleatórios para cada aeroporto, tal como descrito anteriormente. Pegando no primeiro número gerado para cada aeroporto e multiplicando este número pelo erro padrão do respetivo aeroporto, obtém-se o erro esperado para cada aeroporto no primeiro cenário. O erro padrão de cada aeroporto é calculado automaticamente pelo programa Microsoft Excel ao fazer a regressão múltipla. De seguida, soma-se o erro esperado, para cada aeroporto, ao respetivo número médio esperado de passageiros, e obtêm-se os valores para o primeiro cenário (Quadro 9). O mesmo procedimento foi adotado para gerar os restantes cenários

No longo prazo (2025), estima-se que o tráfego de passageiros cresça cerca de 189%, relativamente a 2012, atingindo um volume de aproximadamente 530 milhões de passageiros por ano (chegadas e partidas). Verificando-se que o crescimento é aproximadamente uniforme em todo o país, com dois focos de maior crescimento, Santa Rita e Rio de Janeiro com crescimentos acima dos 400%.

Aeroporto	Área de captação	b_1	p-value (b_1)	b_2	p-value (b_2)	R^2	R^2_{aj}	Pax 2015 (milhares)	Pax 2025 (milhares)
GRU	RM São Paulo	0,418	0,000	0,014	0,000	0,999	0,874	129,1	277,2
CGH	Paulo	0,497	0,000	0,004	0,002	1,000	0,666	62,0	109,2
GIG	RM Rio de Janeiro	0,288	0,002	0,018	0,000	0,994	0,868	65,5	137,4
SDU	Janeiro	-0,399	0,040	0,023	0,010	0,998	0,497	53,7	141,4
CNF	RM Belo Horizonte	0,190	0,038	0,011	0,000	0,997	0,796	41,4	100,2
PLU	Horizonte	0,063	0,009	0,001	0,007	0,999	0,665	3,2	6,5
BSB	RIDE Distrito Federal e Entorno	2,033	0,000	0,003	0,000	0,996	0,871	60,3	115,3
SSA	RM Salvador	0,667	0,001	0,014	0,000	0,995	0,870	33,7	64,7
POA	RM Porto Alegre	0,362	0,000	0,007	0,000	0,999	0,874	32,8	70,1
REC	RM Recife	0,862	0,000	0,008	0,000	0,994	0,869	25,1	50,7
CWB	RM Curitiba	0,590	0,000	0,005	0,000	0,998	0,873	28,1	60,9
FOR	RM Fortaleza	0,517	0,000	0,016	0,000	0,996	0,870	23,9	52,2
BEL	RM Belém	0,388	0,000	0,015	0,000	0,998	0,873	12,9	27,1
FLN	RM Florianópolis	1,015	0,000	0,004	0,000	0,999	0,874	13,1	28,2
MAO	RM Manaus	0,380	0,000	0,003	0,000	0,998	0,872	12,4	24,9
VIX	RM Grande Vitória	0,473	0,000	0,002	0,000	0,995	0,870	14,2	31,9
NAT	RM Natal	0,560	0,000	0,010	0,000	0,998	0,873	11,0	23,8
GYN	RM Goiânia	0,312	0,000	0,006	0,000	0,997	0,872	11,9	27,0
CGB	RM de Vale do Rio Cuiabá	0,677	0,019	0,003	0,000	0,975	0,847	9,6	20,7
VCP	RM Campinas	-1,154	0,007	0,007	0,000	0,948	0,817	37,2	99,1
MCZ	RM Maceió	0,387	0,000	0,006	0,000	0,997	0,872	6,8	14,8
SLZ	RM Grande São Luís	0,192	0,010	0,005	0,000	0,992	0,866	8,0	19,6
CGR	Microrregião Campo Grande	0,430	0,000	0,003	0,000	0,998	0,873	6,6	15,7
AJU	RM Aracaju	0,236	0,017	0,004	0,000	0,995	0,828	4,7	10,3
MCP	RM Macapá	0,860	0,000	0,001	0,023	0,995	0,869	2,0	3,2
THE	RIDE Grande Teresina	0,093	0,024	0,007	0,000	0,993	0,867	4,6	11,5
JPA	RM João Pessoa	0,077	0,048	0,008	0,000	0,996	0,853	9,3	22,3
PVH	Microrregião Porto Velho	0,251	0,001	0,002	0,000	0,996	0,871	4,4	11,3
RBR	Microrregião Rio Branco	0,345	0,001	0,001	0,000	0,990	0,864	1,7	3,4
PMW	Microrregiões Miracena do Tocantins e Porto Nacional	0,209	0,048	0,002	0,000	0,975	0,847	2,2	5,1
BVB	Microrregião Boa Vista	0,224	0,034	0,001	0,000	0,983	0,856	1,4	3,0
BPS	Microrregião Porto Seguro	0,693	0,000	0,006	0,000	0,996	0,853	4,8	9,5

Quadro 8: Valores dos coeficientes, valores estatísticos das regressões e valores médios esperados para o tráfego diário de passageiros em cada aeroporto, nos anos 2015 e 2025.

Aeroporto	Número aleatório	Erro padrão (milhares de Pax)	Erro esperado (milhares de Pax)	Pax 2025 (milhares)	Pax Cenário 1 (milhares)
GRU	0,784	2,166	1,697	277,2	278,9
CGH	1,548	0,771	1,193	109,2	110,4
GIG	0,406	2,716	1,102	137,4	138,5
SDU	-1,375	0,939	-1,292	141,4	140,1
CNF	-1,738	1,110	-1,929	100,2	98,3
PLU	1,013	0,093	0,094	6,5	6,6
BSB	0,287	2,223	0,639	115,3	115,9
SSA	-2,077	1,352	-2,808	64,7	61,9
POA	0,351	0,485	0,170	70,1	70,3
REC	2,072	1,108	2,295	50,7	52,9
CWB	0,304	0,594	0,181	60,9	61,1
FOR	0,487	0,789	0,384	52,2	52,6
BEL	-0,601	0,291	-0,175	27,1	27,0
FLN	-1,010	0,201	-0,203	28,2	28,0
MAO	0,408	0,330	0,135	24,9	25,0
VIX	-0,691	0,468	-0,323	31,9	31,5
NAT	-1,038	0,253	-0,262	23,8	23,5
GYN	-0,727	0,293	-0,213	27,0	26,7
CGB	-0,158	0,799	-0,126	20,7	20,6
VCP	-1,081	2,965	-3,204	99,1	95,9
MCZ	-1,413	0,173	-0,245	14,8	14,6
SLZ	-0,854	0,322	-0,275	19,6	19,3
CGR	0,057	0,126	0,007	15,7	15,7
AJU	0,758	0,156	0,118	10,3	10,4
MCP	0,404	0,106	0,043	3,2	3,2
THE	0,472	0,166	0,078	11,5	11,6
JPA	0,593	0,144	0,085	22,3	22,4
PVH	0,706	0,114	0,080	11,3	11,4
RBR	0,224	0,091	0,020	3,4	3,4
PMW	-1,468	0,159	-0,233	5,1	4,8
BVB	0,617	0,087	0,053	3,0	3,0
BPS	-0,087	0,061	-0,005	9,5	9,5

Quadro 9: Valor médio esperado para o tráfego diário de passageiros em cada aeroporto, no primeiro cenário.

Consumo de QAV

No Brasil são comercializados dois tipos de combustíveis de aviação, o querosene de aviação (QAV ou Jet A-1), e a gasolina de aviação (GAV) que abastece aviões de menores dimensões. De acordo com o Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes (Sindicom, 2014), a GAV representa apenas 1% do mercado dos combustíveis de aviação comercializados no Brasil, sendo o restante mercado composto pelo QAV. Como os volumes correspondentes à GAV são muito baixos, quando comparados com os volumes de QAV, neste trabalho apenas será considerada a cadeia de distribuição de QAV.

Segundo a ANP (2014), o preço médio ponderado de produtores e importadores de QAV foi de R\$ 1,849 por litro, em 2013, e o preço médio ao consumidor foi R\$ 2,498 no mesmo ano.

De maneira a estimar o consumo de QAV em cada aeroporto em 2015 e 2025, foi elaborada a projeção do consumo de QAV por passageiro no Brasil, extrapolando a sua tendência ao longo do tempo, através de uma função potência, com base no número de passageiros (Infraero, 2015) e QAV consumido (ANP, 2015a), entre 2003 e 2012. Obtendo os resultados de 36,4 litros/Pax para 2015 e de 32,1 litros/Pax para 2025.

No Gráfico 2 apresenta-se a evolução do consumo de QAV por passageiro até 2025. Verificando-se uma descida de consumo por passageiro ao longo do tempo, com tendência para estabilizar na casa dos 30 litros/Pax. Isto explica-se devido ao aumento do aproveitamento das aeronaves (*load factor*), acompanhado de uma maior eficiência das mesmas no que toca ao consumo de combustível.

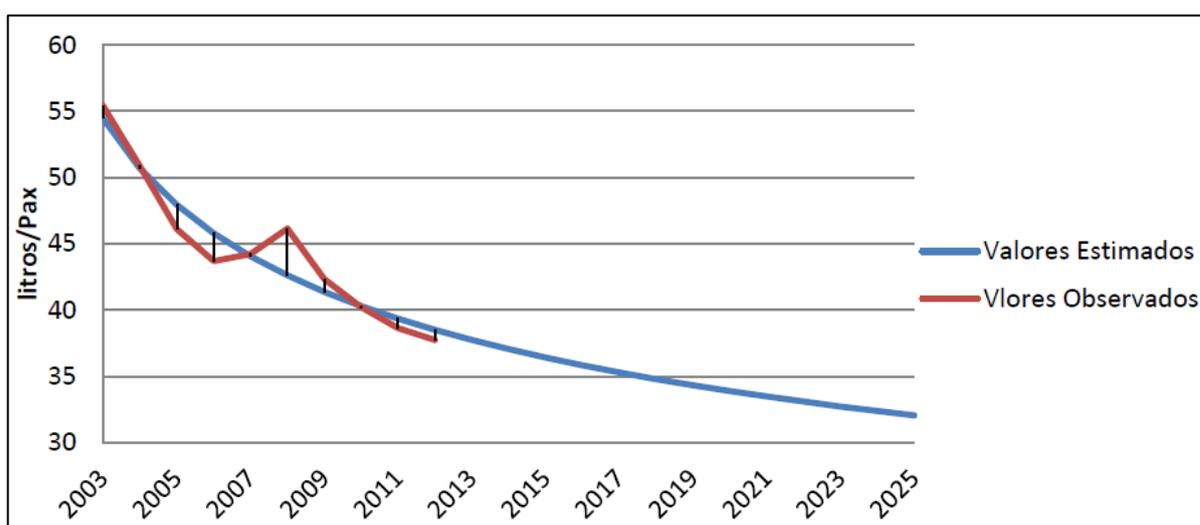


Gráfico 2: Evolução do consumo de QAV por passageiro, no Brasil.

Com esses valores calcularam-se os consumos médios diários esperados em cada aeroporto, para 2015 e para 2025 (Quadro 10). O mesmo procedimento foi adotado para calcular os consumos esperados em cada cenário.

Aeroporto	QAV 2015 (m ³ /dia)	QAV 2025 (m ³ /dia)
GRU	4.701,0	8.896,9
CGH	2.257,4	3.504,9
GIG	2.383,4	4.409,5
SDU	1.956,2	4.537,3
CNF	1.506,7	3.217,0
PLU	115,6	208,4
BSB	2.194,7	3.700,4
SSA	1.228,2	2.077,4
POA	1.192,8	2.250,5
REC	913,2	1.625,9
CWB	1.022,1	1.955,3
FOR	870,4	1.674,6
BEL	470,1	871,2
FLN	477,5	905,4
MAO	450,9	799,6
VIX	517,3	1.022,9
NAT	400,3	762,4
GYN	434,7	865,5
CGB	350,7	664,1
VCP	1.352,6	3.180,4
MCZ	245,9	475,6
SLZ	291,5	629,0
CGR	241,4	504,9
AJU	171,1	331,0
MCP	74,5	102,4
THE	167,3	368,9
JPA	338,1	716,6
PVH	160,4	363,2
RBR	60,3	107,8
PMW	79,0	162,2
BVB	49,3	95,4
BPS	173,3	306,2
Total	26.847,8	51.292,9

Quadro 10: Valores médios esperados para o consumo diário de QAV em cada aeroporto, nos anos 2015 e 2025.

5.2 Rede de distribuição

Refinarias

Em 2014, o parque de refinação brasileiro contou com 16 refinarias, sendo quatro de propriedade particular e as restantes pertencentes à Petrobras. Apenas 9 das 12 refinarias de Petrobras produzem QAV. A produção brasileira de QAV representa cerca de 5% da produção de derivados energéticos de petróleo. A produção deste combustível, em 2014, representou um aumento de 3 milhões de barris face a 2013, ano em que se verificou uma pequena recessão de 0,9% nas vendas (ANP, 2014).

Na falta de informação sobre a capacidade nominal de produção de QAV em cada refinaria, e de maneira a obter um modelo realista, recolheram-se os dados relativos ao historial de produção de QAV em cada refinaria na última década, consultando os anuários estatísticos da Agência Nacional do Petróleo dos respetivos anos, e admitindo como capacidade de produção anual em cada refinaria os valores máximos observados para cada refinaria (Quadro 11), distribuída uniformemente ao longo do ano.

	Produção QAV (mil m ³)										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Máx
RPCC	32	75	76	78	87	120	128	120	123	113	128
RLAM	284	249	270	279	290	249	207	201	286	284	290
Reduc	980	741	773	885	966	1.050	1.195	1.177	1.318	1.324	1.324
Refap	127	117	142	131	161	158	241	212	227	240	241
Regap	307	343	376	417	386	478	416	535	656	774	774
Reman	69	76	135	147	136	156	168	173	156	174	174
Repar	141	182	163	178	217	252	261	303	285	325	325
Replan	547	430	320	227	291	349	736	713	654	810	810
Revap	1.668	1.611	1.848	1.532	1.846	1.853	2.044	1.989	1.849	2.035	2.044
Total	4.154	3.825	4.103	3.873	4.381	4.665	5.395	5.423	5.554	6.079	6.110

Quadro 11: QAV produzido anualmente em cada refinaria, entre 2005 e 2014. (Fonte: ANP, 2015b)

A capacidade de produção de QAV (Figura 4), encontra-se concentrada na região Sudeste do país, em especial nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, que, em conjunto, possuem um total de 3 refinarias produtoras de QAV, representando 69% da capacidade total. Em contraste, a região Centro-Oeste é totalmente dependente da oferta das restantes regiões, não possuindo nenhuma refinaria.

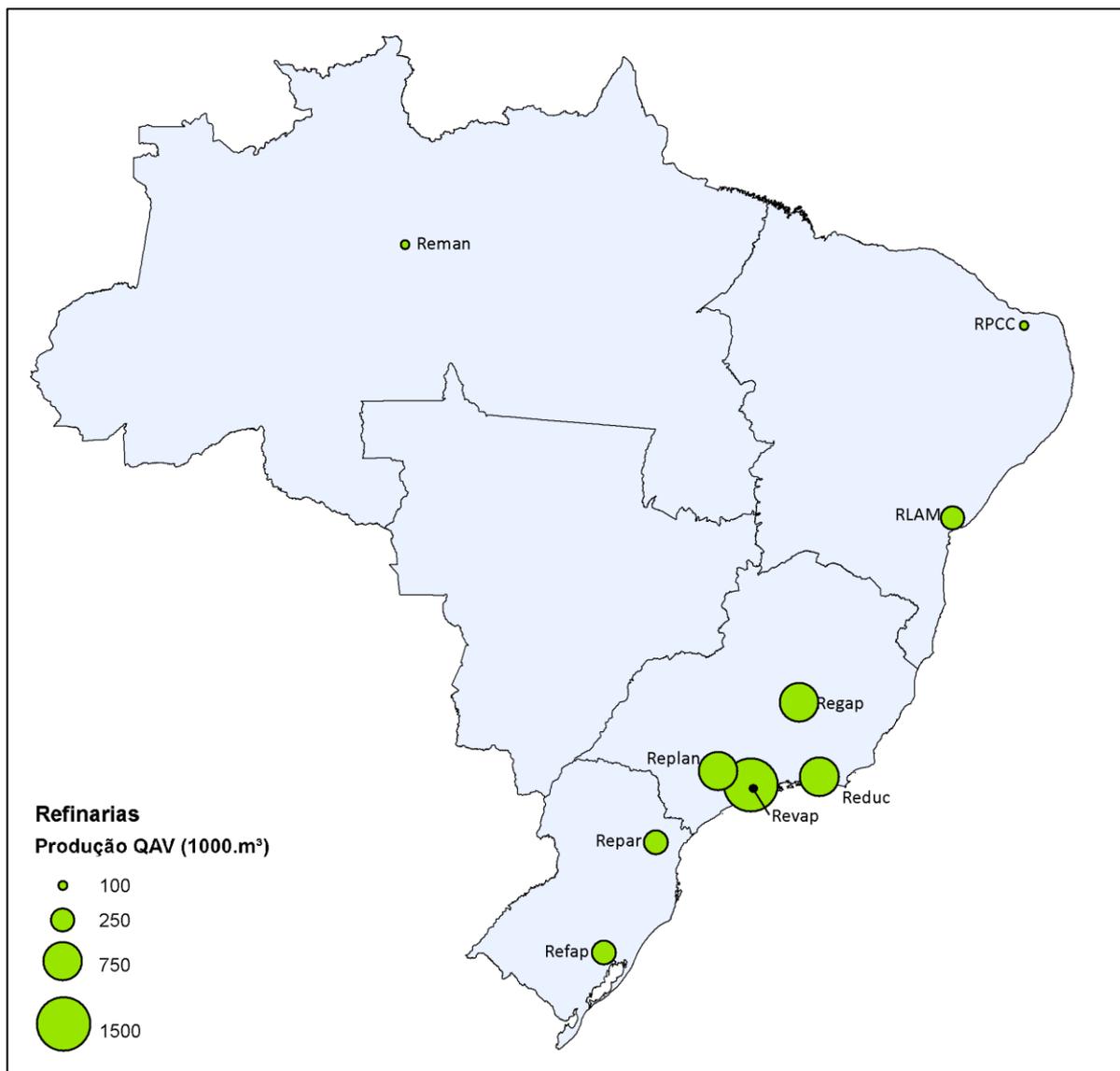


Figura 4: Distribuição geográfica da produção de QAV admitida.

Terminais

Segundo o Sindicom (2014), o QAV é distribuído por três empresas de distribuição (BR Aviation, Shell Aviation e Air BP), e tem que cumprir especificações rigorosas no seu armazenamento.

Quando o QAV chega aos terminais, este deve ficar em repouso durante 24 horas, de maneira a segregar, por decantação, os contaminantes. Após o tempo de repouso, é feita a recertificação do produto, sendo as análises realizadas pelos laboratórios da produtora e da distribuidora. O processo de recertificação tem duração de aproximadamente 18 horas (Brichi,

2014). Desta forma, no estudo de caso, considerou-se um *stock* mínimo para 3 dias nos terminais.

De maneira a tornar viável o transporte de petróleo, derivados e etanol a Petrobras dispõe de 52 terminais autorizados, que possuem o conjunto de instalações necessárias para o recebimento, armazenamento e expedição destes produtos, podendo ser classificados em terminais marítimos, fluviais ou terrestres. De acordo com a ANP (2014), 39 desses terminais permitem o armazenamento de derivados de petróleo, incluindo QAV.

A capacidade de armazenamento de QAV nos terminais está limitada pela procura por outros produtos comercializados pela Petrobras. Para conhecer a capacidade de armazenamento disponível para cada produto, seria necessário considerar o problema global da distribuição dos diferentes produtos produzidos e comercializados por esta empresa. Tendo em conta que o QAV representa 5% da produção de derivados, considerou-se que a capacidade de armazenamento de QAV, em cada um dos 39 terminais com condições para o seu armazenamento, é igual a 5% da capacidade total de armazenamento do terminal (Quadro 12).

Estes terminais (Figura 5) são de extrema importância, na distribuição de QAV, para as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste que possuem uma produção muito baixa ou inexistente. No caso de importação de QAV, os terminais marítimos representam o ponto de entrada no Brasil.

Terminal	Município	Estado	Derivados (m ³)	QAV (m ³)
Terminal Angra dos Reis	Angra dos Reis	RJ	132.489	6.624
Terminal Aquaviário Barra do Riacho	Barra do Riacho	ES	60.988	3.049
Terminal Aracaju	Aracaju	SE	10.000	500
Terminal Barueri	Barueri	SP	200.134	10.007
Terminal Belém	Belém	PA	37.899	1.895
Terminal Biguaçu	Biguaçu	SC	38.361	1.918
Terminal Brasília	Brasília	DF	72.351	3.618
Terminal Cabedelo	Cabedelo	PB	10.022	501
Terminal Campos Elíseos	Duque de Caxias	RJ	4.393	220
Terminal Candeias	Candeias	BA	36.417	1.821
Terminal Coari	Coari	AM	275	14
Terminal Cubatão	Cubatão	SP	112.625	5.631
Terminal Guamaré	Guamaré	RN	92.454	4.623
Terminal Guarimir	Guarimir	SC	19.146	957
Terminal Guararema	Guararema	SP	600.254	30.013
Terminal Guarulhos	Guarulhos	SP	165.146	8.257
Terminal Ilha d'Água	Rio de Janeiro	RJ	165.066	8.253
Terminal Itabuna	Itabuna	BA	24.050	1.203
Terminal Itajaí	Itajaí	SC	50.553	2.528
Terminal Japeri	Japeri	RJ	38.588	1.929
Terminal Jequié	Jequié	BA	22.413	1.121
Terminal Maceió	Maceió	AL	37.140	1.857
Terminal Madre de Deus	Madre de Deus	BA	604.079	30.204
Terminal Natal	Natal	RN	26.642	1.332
Terminal Niterói	Canoas	RS	21.842	1.092
Terminal Osório	Osório	RS	192.159	9.608
Terminal Paranaguá	Paranaguá	PR	194.602	9.730
Terminal Ribeirão Preto	Ribeirão Preto	SP	52.228	2.611
Terminal Rio Grande	Rio Grande	RS	86.021	4.301
Terminal Santos	Santos	SP	263.134	13.157
Terminal São Caetano do Sul	São Caetano do Sul	SP	230.842	11.542
Terminal São Luís	São Luís	MA	71.290	3.565
Terminal São Sebastião	São Sebastião	SP	541.009	27.050
Terminal Senador Canedo	Senador Canedo	GO	122.366	6.118
Terminal Suape	Ipojuca	PE	104.864	5.243
Terminal Uberaba	Uberaba	MG	42.925	2.146
Terminal Uberlândia	Uberlândia	MG	47.331	2.367
Terminal Vitória	Vitória	ES	11.000	550
Terminal Volta Redonda	Volta Redonda	RJ	28.137	1.407

Quadro 12: Capacidades de armazenamento em cada terminal. (Fonte: ANP, 2014)

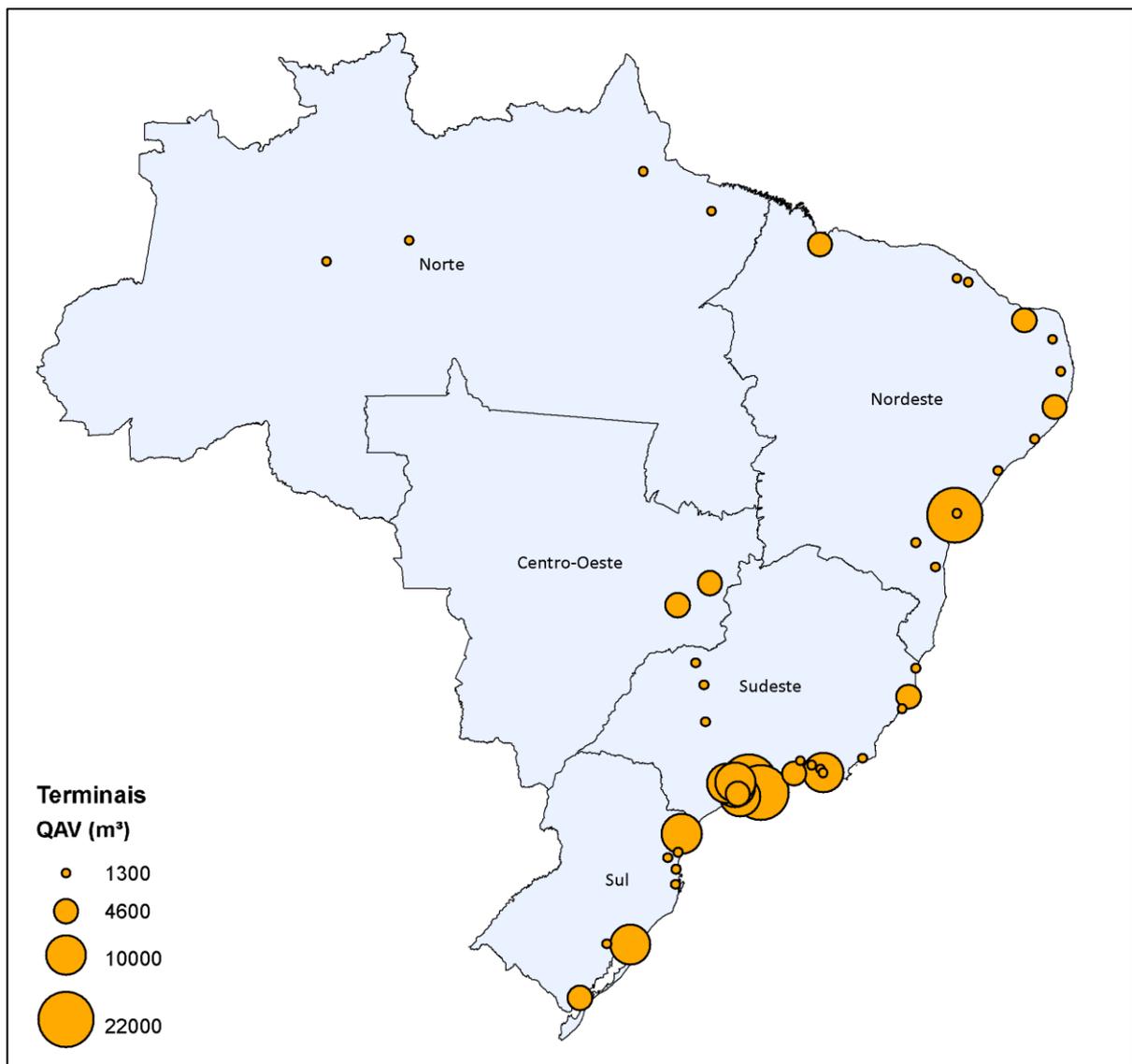


Figura 5: Distribuição geográfica da capacidade de armazenamento de QAV, no Brasil.

Transportes

O transporte tem um grande peso no custo logístico das empresas, logo, este deve ser eficiente de maneira a atingir os objetivos das mesmas. No Brasil, o transporte de QAV é feito através dos modos dutoviário, rodoviário, marítimo e fluvial, não se recorrendo ao transporte ferroviário. O transporte aéreo não se adapta ao transporte de QAV, por se tratar de uma carga de risco. Cada um destes modos apresenta custos e características diferentes, que os tornam mais ou menos indicados para certos tipos de operações. A alternativa de distribuição mais adequada é aquela que oferece um menor custo total de transporte.

i. Dutoviário

Apesar de os oleodutos serem uma das formas mais baratas para transportar grandes volumes de derivados líquidos de petróleo, estes não apresentam qualquer flexibilidade no trajeto e têm custos de construção muito elevados.

A Petrobras conta com uma rede de oleodutos que ligam refinarias a terminais primários, existindo dois casos particulares (aerportos do Galeão e de Guarulhos) em que a esta rede permite a ligação direta entre refinarias e terminais secundários.

Neste trabalho foram considerados 40 arcos dutoviários e os dados foram recolhidos com base na informação disponibilizada pela Petrobras (2015), na sua página oficial da internet. Não foram consideradas as capacidades de escoamento dos respetivos oleodutos.

ii. Rodoviário

O transporte rodoviário é caracterizado por ser o mais utilizado de entre os restantes modos, no Brasil. Adequa-se a curtas e médias distâncias, surgindo custos acrescidos para longas distâncias (>700km), devido à necessidade de descanso do condutor. Este modo de transporte é o mais flexível, existindo uma grande rede que permite o acesso a qualquer zona do país (MT, 2014).

Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2015), existem cerca de 1,720 milhões de quilómetros de estradas no Brasil, estando apenas 12,9% pavimentadas.

O transporte de QAV, pelo modo rodoviário, é feito recorrendo a uma vasta frota de camiões-tanque. Em geral, cada camião, tem a capacidade de transportar 15 m³ e a sua maioria possui tanques compartimentados, permitindo o transporte de diferentes produtos para o mesmo terminal ou para diferentes terminais (Brichi, 2014).

As rodovias federais brasileiras identificam-se pela sigla “BR”. No estudo de caso consideraram-se as rodovias radiais (BR-0), longitudinais (BR-1), transversais (BR-2) e ainda alguns troços das rodovias diagonais (BR-3) e de ligação (BR-4), num total de 297 arcos rodoviários. O comprimento, bem como os pontos inicial e final de cada arco foram obtidos recorrendo à base de dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2015). Além disso, não se consideraram custos acrescidos para longas distâncias, nem limitações no número de camiões-tanque disponíveis.

iii. Hidroviário

Este modo caracteriza-se pelo transporte de grandes quantidades de mercadoria a grandes distâncias, com um baixo custo. Trata-se de uma opção lenta e pouco flexível, estando limitada às hidrovias existentes (MT, 2014).

O transporte hidroviário é realizado através de hidrovias, que podem ser fluviais ou marítimas. Por sua vez, o transporte marítimo pode classificar-se de longo curso, para rotas internacionais, ou cabotagem para percursos ao longo da costa (CNT, 2006). De acordo com Lacerda (2004), está convencionado que os custos do transporte marítimo de longo curso estão ao encargo dos compradores.

A frota da Transpetro (subsidiária da Petrobras), para transporte de derivados de petróleo, é composta por 17 navios petroleiros com capacidades entre as 30 e as 50 mil toneladas (Transpetro, 2015).

No estudo de caso foram considerados 72 arcos hidroviários, cujo comprimento, bem como os pontos inicial e final foram obtidos recorrendo à base de dados do DNIT (2015). Além disso, não se consideraram limitações na capacidade e no número de navios disponíveis.

iv. Ferroviário

Tal como o transporte hidroviário, o transporte ferroviário também é caracterizado por ser adequado para o transporte de grandes quantidades de mercadoria a grandes distâncias, com um baixo custo. Este modo de transporte é pouco flexível, devido à pequena extensão da rede e por apenas fazer paragens de terminal ferroviário em terminal ferroviário (MT, 2014).

De acordo com ANTT (2015), a extensão da rede ferroviária brasileira é de aproximadamente 28 mil quilómetros. Estando grande parte da faixa de rodagem demasiado envelhecida.

O transporte de QAV, pelo modo ferroviário, requer vagões com tanque de armazenamento e mecanismos de carga e descarga nas estações de transbordo.

No estudo de caso analisou-se a viabilidade da implementação deste modo, no transporte de QAV, considerando 126 arcos ferroviários, cujo comprimento e pontos inicial e final foram obtidos recorrendo à base de dados do DNIT (2015).

v. Custos

O custo unitário de transporte é um valor complexo de determinar, pois depende de variadíssimos fatores. No quadro 13, apresentam-se os custos unitários de transporte de cada modo, determinados em vários estudos sobre o caso do Brasil. No presente trabalho adotaram-se os valores apresentados pela Macrologística Consultoria (2007). Para o transporte por oleoduto foi admitido um custo residual.

Fontes	Custo de transporte (US\$)		
	Rodoviário	Ferroviário	Hidroviário
J. C. T. Riva - Consultoria – 2004	32	20	12
SIFRECA - ESALQ – 2005	30	22	13
Caramuru - Revista da Indústria - 2007	50	33	20
Macrologística Consultoria - 2007	50	20	10
M. P. Lima - Consultoria – 2005	73	12	24

Quadro 13: Custos de transporte de cargas no Brasil. (Fontes: Mackenzie, 2010; Lima, 2006)

O transbordo de mercadorias consiste na transferência direta de mercadorias de um veículo para outro. Segundo o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES, 2011), os custos de transbordo entre caminhões e navios, e entre comboios e navios, geralmente variam entre os US\$ 4,00 por tonelada e os US\$ 5,00 por tonelada. Admitindo que os restantes tipos de transbordo apresentam custos semelhantes, no estudo de caso adotou-se um custo médio de transbordo de US\$ 4,50 por tonelada. Para implementar o custo de transbordo nos modelos, foram considerados arcos e nós fictícios de maneira a representar este custo.

5.3 Análise de curto prazo das soluções de distribuição

De maneira a identificar quais equipamentos estão a trabalhar no limite da sua capacidade (estrangulamentos), quantificar o volume de QAV que é necessário importar, e ainda, estabelecer a forma mais económica de distribuição do produto, aplicou-se o modelo determinístico de curto prazo, considerando a procura estimada para 2015. Na análise admitiu-se que é usada a infraestrutura existente atualmente.

A solução obtida apresenta um custo total de transporte de US\$ 211.345 por dia. Como seria de esperar, os resultados mostram que todas as refinarias estão a trabalhar no máximo da capacidade admitida, sendo necessário importar 38% do total consumido (10.107 m³/dia). Já nos terminais, verifica-se uma folga total de 65% na capacidade de armazenamento. Os equipamentos que se encontram a trabalhar no máximo da capacidade representam

estrangulamentos, isto é, se a sua capacidade fosse maior os custos de transporte seriam menores. O quadro 14 apresenta a utilização prevista dos vários terminais.

Terminal	Qtd. armazenada (m³)	Utilização
Angra dos Reis	2.026	92%
Aracaju	166	100%
Barra do Riacho	334	33%
Barueri	0	0%
Belém	631	100%
Biguaçu	478	75%
Brasília	79	7%
Cabedelo	167	100%
Candeias	0	0%
Canoas	364	100%
Coari	4	86%
Cubatão	0	0%
Duque de Caxias	73	100%
Guamaré	771	50%
Guaramirim	0	0%
Guararema	4.518	45%
Guarulhos	0	0%
Ipojuca	1.084	62%
Itabuna	173	43%
Itajaí	0	0%
Japeri	643	100%
Jequié	0	0%
Maceió	251	41%
Madre de Deus	1.228	12%
Natal	400	90%
Osório	829	26%
Paranaguá	1.022	32%
Ribeirão Preto	468	54%
Rio de Janeiro	2.751	100%
Rio Grande	0	0%
Santos	3.793	86%
São Caetano do Sul	0	0%
São Luís	1.188	100%
São Sebastião	0	0%
Senador Canedo	2.039	100%
Uberaba	715	100%
Uberlândia	0	0%
Vitória	183	100%
Volta Redonda	469	100%

Quadro 14: Utilização dos terminais, em 2015.

A título de exemplo, na figura 6 apresenta-se o fluxo ótimo de QAV para o abastecimento dos aeroportos de Guarulhos (GRU) e de São Paulo (CGH), desde a origem até ao destino.



Figura 6: Fluxo ótimo de abastecimento dos aeroportos de São Paulo e Guarulhos, em 2015.

Verifica-se que o aeroporto de São Paulo deve ser fornecido, exclusivamente, por QAV importado e que o aeroporto de Guarulhos deve ser fornecido pela combinação de QAV importado e QAV produzido na refinaria de São José dos Campos (Revap). O combustível importado entra no país pelo terminal marítimo de Santos. Já o combustível produzido na refinaria Revap, segue para o terminal de Guararema antes de ser enviado para o aeroporto de Guarulhos.

5.4 Análise de longo prazo das soluções de distribuição

Aplicaram-se os modelos determinístico e estocástico de longo prazo, com a procura estimada para 2025, de maneira a identificar as localizações e dimensões ótimas para novas refinarias e/ou terminais, e ainda, estabelecer a forma mais económica de distribuição do produto, de acordo com a infraestrutura em estudo. Nesta análise, para além do uso dos modos de transporte rodoviário, hidroviário e dutoviário, testou-se o impacto da implementação do uso do transporte ferroviário.

5.4.1 Resultados da aplicação do modelo determinístico

Aplicando o modelo determinístico de longo prazo, com a infraestrutura existente atualmente, estima-se um custo total de transporte de US\$ 458.138 por dia, com todas as refinarias a trabalhar no máximo da capacidade. Será necessário importar cerca de 67% do total consumido (34.552 m³/dia). Nos terminais, estima-se uma folga total de 33% na capacidade de armazenamento. O quadro 15 apresenta a utilização prevista dos vários terminais.

Seguidamente, permitiram-se alterações na infraestrutura e estudaram-se várias soluções (Quadro 16). Como seria de esperar, os resultados mostram que o custo de transporte nas soluções sem novas refinarias, é mais baixo que nas outras soluções. Isto acontece porque o QAV importado entra na rede em localizações mais próximas dos destinos. Apesar de nestes casos o custo de transporte ser mais baixo, isso não significa que optar pela importação seja uma melhor solução. A decisão depende da relação entre os custos de produção e os custos de importação do combustível.

Além disso, ao aumentar a quantidade de novas refinarias ou terminais o custo transporte tende a baixar. Verifica-se um abrandamento no valor economizado, para quantidades maiores de equipamentos. Principalmente no caso dos terminais, onde os benefícios chegam a ser nulos. A decisão sobre a melhor alternativa depende do custo de construção dos vários equipamentos.

Relativamente à implementação do uso do transporte ferroviário, verifica-se uma economia na ordem dos US\$ 30.000 por dia, que representa cerca de 6% do custo total de transporte. A decisão de implementar o uso do transporte ferroviário, depende do investimento que será necessário fazer.

Como exemplo, no quadro 17 apresentam-se as localizações e dimensões ótimas (dimensão atual mais o aumento de capacidade) para os equipamentos previstos na solução em que se permite a abertura de duas refinarias e um terminal. Como em Guamaré já existe uma refinaria e um terminal, poderá ser mais vantajoso aumentar a capacidade desses equipamentos, ao invés de construir novos.

Terminal	Qtd. armazenada (m ³)	Utilização
Angra dos Reis	2.208	100%
Aracaju	166	100%
Barra do Riacho	840	83%
Barueri	0	0%
Belém	631	100%
Biguaçu	380	59%
Brasília	0	0%
Cabedelo	167	100%
Candeias	0	0%
Canoas	364	100%
Coari	4	86%
Cubatão	0	0%
Duque de Caxias	73	100%
Guamaré	1.541	100%
Guaramirim	319	100%
Guararema	8.839	88%
Guarulhos	0	0%
Ipojuca	1.747	100%
Itabuna	306	76%
Itajaí	842	100%
Japeri	643	100%
Jequié	0	0%
Maceió	619	100%
Madre de Deus	4.494	45%
Natal	444	100%
Osório	1.887	59%
Paranaguá	3.243	100%
Ribeirão Preto	0	0%
Rio de Janeiro	2.751	100%
Rio Grande	0	0%
Santos	4.385	100%
São Caetano do Sul	0	0%
São Luís	1.188	100%
São Sebastião	9.016	100%
Senador Canedo	2.039	100%
Uberaba	715	100%
Uberlândia	789	100%
Vitória	183	100%
Volta Redonda	469	100%

Quadro 15: Utilização dos terminais em 2025, sem alteração na infraestrutura.

		0 Terminais	1 Terminal	2 Terminais	3 Terminais
Sem transporte ferroviário	0 Refinarias	458.138	398.471	375.499	363.629
	1 Refinaria	688.563	676.230	676.061	676.061
	2 Refinarias	566.575	524.037	515.554	515.386
	3 Refinarias	536.572	495.172	486.688	486.520
Com transporte ferroviário	0 Refinarias	426.439	366.772	349.494	336.253
	1 Refinaria	658.030	645.696	645.528	645.528
	2 Refinarias	536.041	489.912	481.428	481.260
	3 Refinarias	506.039	463.397	454.913	454.745

Quadro 16: Custo total de transporte para as várias soluções estudadas, em US\$.

Equipamento	Localização	Capacidade ótima (m ³ /dia)
Refinaria 1	Ribeirão Preto	24867
Refinaria 2	Guamaré	10509
Terminal	Guamaré	10509

Quadro 17: Solução com acréscimo de duas refinarias e um terminal, em 2025.

5.4.2 Resultados da aplicação do modelo estocástico

Nesta análise, tiveram-se em conta dez cenários em simultâneo, cada um com a mesma probabilidade de ocorrência. E, de acordo com o nível de confiança, geraram-se soluções para a implantação de duas novas refinarias e um terminal. No quadro 18, apresentam-se os resultados obtidos através do modelo estocástico e comparam-se esses valores com a solução obtida através do modelo determinístico.

Verifica-se que o custo de transporte tende a subir com o aumento do nível de confiança. Além disso, os resultados obtidos sugerem diferentes localizações possíveis, mas praticamente todas consistem na implantação de uma refinaria de grandes dimensões na região Sudeste e uma refinaria de menores dimensões, em conjunto com um terminal, na região Nordeste.

Apesar de a diferença nos custos de transporte para os diferentes níveis de confiança ser relativamente pequena, isso não significa que os lucros não sejam elevados. Ao comparar as soluções com níveis de confiança de 10% e 100%, existe uma diferença de cerca de US\$ 1,5 milhões ao ano. Esta variação no custo certamente terá peso na decisão do gestor, que pode optar por uma opção mais segura com um custo esperado mais elevado.

Como exemplo, apresentam-se as localizações dos equipamentos propostos (Figura 7) e os custos de transporte para cada cenário (Quadro 19), na solução com nível de confiança igual a 50%. Os cenários que apresentam um custo nulo são aqueles que foram descartados pelo programa.

		Custo total (US\$)	Refinaria 1 (cap. m³/dia)	Refinaria 2 (cap. m³/dia)	Terminal (cap. m³/dia)
Modelo Determinístico	Média	524.037	Ribeirão Preto (24867)	Guamaré (10509)	Guamaré (10509)
	10%	519.762	Suzano (26875)	Guamaré (10364)	Guamaré (10364)
	20%	520.098	Brasília (26641)	Guamaré (10372)	Guamaré (10372)
	30%	520.696	Cabiúnas (26891)	Guamaré (10393)	Guamaré (10393)
	40%	521.055	Suzano (27198)	Guamaré (10418)	Guamaré (10418)
Modelo Estocástico (Nível de confiança)	50%	521.137	Suzano (26841)	Guamaré (10433)	Guamaré (10433)
	60%	521.850	Angra dos Reis (26986)	Guamaré (10459)	Guamaré (10459)
	70%	522.497	Suzano (27011)	Guamaré (10470)	Guamaré (10470)
	80%	523.060	Guararema (25996)	Guamaré (10488)	Guamaré (10488)
	90%	523.546	Cabiúnas (26978)	Guamaré (10502)	Guamaré (10502)
	100%	523.745	Cabiúnas (27000)	Guamaré (10507)	Guamaré (10507)

Quadro 18: Comparação dos resultados obtidos pelos modelos a longo prazo.



Figura 7: Localização dos equipamentos propostos (50% confiança).

Cenário	Procura (m³/dia)	Custo (US\$)
1	51.201	521.666
2	0	0
3	0	0
4	51.036	519.762
5	0	0
6	0	0
7	50.998	521.894
8	0	0
9	51.279	521.931
10	51.208	520.433

Quadro 19: Custos de transporte para cada cenário, em 2025 (50% confiança).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cadeia de distribuição de combustíveis da aviação é de fundamental importância para as atividades da indústria petrolífera e do setor da aviação. Esta cadeia está inserida num ambiente repleto de flutuações e incertezas, sendo o dimensionamento da infraestrutura e a forma de distribuição, algumas das principais decisões estratégicas a serem tomadas. Neste sentido, esta dissertação apresentou modelos matemáticos de otimização para analisar a cadeia de distribuição de querosene de aviação no Brasil, considerando múltiplos modos de transporte, serviços, equipamentos (modelos determinísticos a curto e longo prazo) e cenários (modelo estocástico a longo prazo). As decisões a serem tomadas foram de dois tipos. O primeiro definiu a localização e capacidade ótima de novas refinarias ou terminais e o segundo definiu a melhor forma de distribuição com base na infraestrutura. Ao contrário da maioria dos modelos existentes, os modelos desenvolvidos no presente trabalho consideram um conjunto de parâmetros reduzido. O que, por um lado, torna os modelos menos realistas, mas por outro, permite analisar problemas de maiores dimensões. Além disso, as soluções geradas pelo modelo estocástico permitiram uma análise com mais sensibilidade do que as soluções geradas pelo modelo determinístico, mas exigindo um maior esforço computacional.

De acordo com os resultados obtidos, a Petrobras e as Distribuidoras deverão dar prioridade aos investimentos que apresentem uma melhor relação entre o valor a investir em infraestruturas e o retorno em economia nos custos de transporte.

Como o objeto de análise do presente trabalho foi o querosene de aviação, não se considerou a distribuição dos restantes derivados do petróleo, ou seja, as localizações propostas são as ótimas para a distribuição de QAV mas poderão ser diferentes quando se considerar o problema global da distribuição de derivados do petróleo. Nesse sentido, uma das principais oportunidades de pesquisa futura refere-se ao problema global da distribuição de derivados de petróleo no Brasil. Além disso, muitos dos aeroportos brasileiros já se encontram no limite da sua capacidade, e, no futuro, será necessário investir na construção de novos aeroportos ou aumentar a capacidade dos existentes. Nesse sentido, outra oportunidade de pesquisa futura passa por desenvolver um modelo de localização de aeroportos que maximize o impacto ao nível do desenvolvimento regional no Brasil.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEAR (2013). “Aviação Brasileira: Agenda 2020”. Associação Brasileira das Empresas Aéreas, Brasil.
- An, H., Wilhelm, W. E., & Searcy, S. W. (2011). “Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review.” *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3763-3774.
- ANAC (2013). “Anuário do Transporte Aéreo: Dados Estatísticos e Económicos de 2012”. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília.
- ANP (2014). “Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2014”. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro.
- ANP (2015a). “Tabela: Vendas de QAV, pelas distribuidoras, segundo grandes regiões e unidades da Federação - 2003-2012”. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro (página internet oficial, <http://www.anp.gov.br/?id=661>). Consultado em 15 de Maio de 2015.
- ANP (2015b). “Tabela: Produção de derivados de petróleo energéticos e não-energéticos”, 2005-2014. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. (página internet oficial, <http://www.anp.gov.br/?id=661>). Consultado em 1 de Junho de 2015.
- ANTT (2015). (<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4750.html>). Agência Nacional de Transportes Terrestres (página internet oficial). Consultado em 2 de Março de 2015.
- Antunes, A., Berman, O., Bigotte, J., & Krass, D., (2009). “A location model for urban hierarchy with population dynamics”. *Environment and planning. A*, 41(4), 996.
- Ballou, R. H. (1993). “Logística Empresarial: Transportes, Administração de Materiais, Distribuição Física”. Atlas, Rio de Janeiro.

- Ballou, R. H. (2006). “Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial”. Bookman, São Paulo.
- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2011). “Linear programming and network flows”. John Wiley & Sons.
- BNDES (2011). (http://www.bndes.gov.br/arqs/corredor_bioceanico/Produto%2010.pdf). Banco Nacional de Desenvolvimento (página oficial internet). Consultado em 3 Junho de 2015.
- Brichi, C. S. (2014). “Análise da Distribuição Logística do Querosene de Aviação no Estado de São Paulo”. Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Logística, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- CNT (2006). “Atlas do Transporte”. Confederação Nacional do Transporte, Brasília.
- Daskin, M. S. (1995). “Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications”. Wiley Interscience, New York.
- DNIT (2015). (<http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais>). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (página oficial internet). Consultado em 4 de Março de 2015.
- Draper, N. R., & Smith, H. (2014). “Applied regression analysis”. John Wiley & Sons.
- Drummond, M. A. (2008). “Uma Contribuição ao Estudo dos Custos de Transporte Doméstico de Carga no Brasil”. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Engenharia de Transportes, Rio de Janeiro.
- Escudero, L. F., Quintana, F. J., & Salmerón, J. (1999). “CORO, a modeling and an algorithmic framework for oil supply, transformation and distribution optimization under uncertainty”. *European Journal of Operational Research*, 114(3), 638-656.
- Feng, B., Fan, Z. P., & Li, Y. (2011). “A decision method for supplier selection in multi-service outsourcing”. *International journal of production economics*, 132(2).
- Fernandes, L. J., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). “Strategic network design of downstream petroleum supply chains: single versus multi-entity participation”. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(8), 1557-1587.

- Fernandes, L. J., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). “Collaborative Design and Tactical Planning of Downstream Petroleum Supply Chains”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(44), 17155-17181.
- Guyonnet, P., Grant, F. H., & Bagajewicz, M. J. (2008). “Integrated model for refinery planning, oil procuring, and product distribution”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(1), 463-482.
- Galp (2015). (<http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Refinacao-Distribuicao/ARL/Refinacao/Paginas/Didatico-Refinacao.aspx>). Galp Energia (página internet oficial).
Consultado em 20 de Fevereiro de 2015.
- Gomes, J., & Alves, F. (2011). “The Universe of the Oil and Gas Industry: From Exploration to Refining”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Hu, T. C. (1963). “Multi-commodity network flows”. *Operations research*, 11(3), 344-360.
- ICAO (2012). “Manual on Civil Aviation Jet Fuel Supply”. D 9977, International Civil Aviation Organization, Quebec.
- Infraero (2015). “Tabela: Movimento de aeronaves da rede Infraero”, 2002-2013. Diretoria de Planejamento e Gestão, Infraero, Brasília.
(<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatistica-dos-aeroportos.html>).
Consultado em 5 de Maio de 2015.
- IBGE (2015a). “Contagem da População 2007”. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil. (http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm).
Consultado em 30 de Abril de 2015.
- IBGE (2015b). “Censo Demográfico 2010”. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil. (http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm).
Consultado em 30 de Abril de 2015.
- IBGE (2015c). “Estimativa da população”, (2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009, 2011, 2012). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil.
(http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm).
Consultado em 4 de Maio de 2015.

- Lacerda, S. M. (2004). “Transporte marítimo de longo curso no Brasil e no mundo”. Revista BNDES, Rio de Janeiro, (21), 209-232.
- Lima, M. P. (2006). “Custos Logísticos na Economia Brasileira”. Revista Tecnológica, São Paulo, 122(9), 66-44.
- Mackenzie (2010). “Transporte Hidroviário”. Departamento Hidroviário, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.
- McKinsey&Company (2010). “Estudo do Setor de Transporte Aéreo do Brasil: Relatório Consolidado”. Rio de Janeiro, 2010.
- MirHassani, S. A. (2008). “An operational planning model for petroleum products logistics under uncertainty”. Applied Mathematics and Computation, 196(2), 744-751.
- MT (2015). (<http://www.transportes.gov.br/>). Ministério dos Transportes (página oficial internet).
Consultado em 2 de Março de 2015.
- Neiro, S. M., & Pinto, J. M. (2004). “A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains”. Computers & Chemical Engineering, 28(6), 871-896.
- Petrobras (2002). “Processos de Refino: Adaptado do material original de Elie Abadie”. Centro Universitário Positivo, Curitiba.
- Petrobras (2015). (www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/). Petrobras (página internet oficial).
Consultado em 15 de Fevereiro de 2015.
- Quintiq (2015). (<http://www.quintiq.com/industries/oil-and-gas-planning.html>). Quintiq (página internet oficial).
Consultado em 27 de Fevereiro de 2015.
- Shah, N. K., Li, Z., & Ierapetritou, M. G. (2010). “Petroleum refining operations: key issues, advances, and opportunities”. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(3), 1161-1170.

- Sindicom (2014). “Combustíveis, Lubrificantes & Lojas de Conveniência 2014”. Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes, Brasil.
- Snyder, L. V. (2006). “Facility location under uncertainty: a review”. *IIE Transactions*, 38(7), 547-564.
- Soares, A. C., Leal, J. E., & Azevedo, I. (2003). “Diagnóstico da rede de distribuição de derivados de petróleo no Brasil e sua representação em um SIG”. XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Ouro Preto.
- Transpetro (2015). (http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/transporte-maritimo.html). Transpetro (página oficial internet)
Consultado em 15 de Junho de 2015.
- Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). “A robust optimization model for stochastic logistic problems”. *International Journal of Production Economics*, 64(1), 385-397.
- Zierer, T. K., Mitchell, W. A., & White, T. R. (1976). “Practical applications of linear programming to Shell’s distribution problems”. *Interfaces*, 6(4), 13-26.